

การสร้างแม่พิมพ์แบบร้อนโดยเทคโนโลยีการพ่นผงอนุภาคที่ละเอียดสูง
เพื่อประยุกต์ใช้งานทางแล็บส์ออนชิป

PRECISION HOT EMBOSSEING MOLD FABRICATED BY HIGH-RESOLUTION
POWDER BLASTING FOR LAB-ON-CHIPS APPLICATIONS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ศ.ศ. 2556

KMUTL-2013-EN-D-918-022

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสร้างแม่พิมพ์หุ่นแบบร้อนโดยเทคโนโลยีการพ่นผงอนุภาคที่ละเอียดสูง
เพื่อประยุกต์ใช้งานทางแลปส์ออนชิป

PRECISION HOT EMBOSING MOLD FABRICATED BY HIGH-RESOLUTION
POWDER BLASTING FOR LAB-ON-CHIPS APPLICATIONS



ถนอม โลมาศ
TANOM LOMAS

ร.ก. ๓๑

b. 1๙๘๖๕๘๙
i.

เลขหมู่..... 55292
เลขทะเบียน.....
รับ. เดือน. ปี. 29 ต.ค. 2556

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2556

KMITL-2013-EN-D-018-022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PRECISION HOT EMBOSSING MOLD FABRICATED BY HIGH-RESOLUTION
POWDER BLASTING FOR LAB-ON-CHIPS APPLICATIONS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2013

KMITL-2013-EN-D-018-022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2013

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การสร้างแม่พิมพ์หุ่นแบบร้อนโดยเทคโนโลยีจากการพ่นผงอนุภาคที่ละเอียดสูง
เพื่อประยุกต์ใช้งานทางแลปส์ออนชิป

Thesis Title Precision Hot Embossing Mold Fabricated by High-Resolution Powder
Blasting for Lab-on-Chips Applications

นักศึกษา นายถนอม โลมาศ

รหัสประจำตัว 50060003

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ฟูศักดิ์ ชิวสุวิทย์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม) ดร.อดิสร เตือนตรานนท์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2013-EN-D-018-022

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิทยา	ทิพย์สุวรรณพร	
รศ.ดร.ทวีพล	ชื่อสัตย์	
รศ.ดร.สุรพันธ์	ยิ้มมัน	
ผศ.ดร.พงษ์ชัย	นิลาศ	
รศ.ดร.ฟูศักดิ์	ชิวสุวิทย์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 19 มีนาคม พ.ศ. 2556 เวลา 09.30-11.30 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 5

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(ศาสตราจารย์ ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา วันที่ 19 มีนาคม พ.ศ. 2556 โยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสร้างแม่พิมพ์นูนแบบร้อนโดยเทคโนโลยีจากการพ่นผงอนุภาคที่ละเอียดสูงเพื่อประยุกต์ใช้งานทางแลปส์ออนชิป
นักศึกษา	นาย ถนอม โลมาศ
รหัสนักศึกษา	50060003
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2556
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. พุศศักดิ์ ชิวสุวิทย์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร. อติสร เตือนตรานนท์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการออกแบบสร้างเพื่อประยุกต์ใช้แม่พิมพ์นูนแบบร้อนโดยวิธีการพ่นผงอนุภาคซึ่งใช้เทคโนโลยีการสร้างหน้ากากจากสารไวแสงชื่อเอชยู-8 ร่วมกับสารโพลีเมอร์ชื่อพอลิไดเมทิลไซลอคเซน งานดังกล่าวนี้เพื่อประยุกต์ทำต้นแบบแม่พิมพ์นูนแบบร้อนขนาดเล็กสำหรับสร้างลวดลายระดับไมครอนเพื่อใช้ในงานประเภทแลปส์ออนชิปที่จำเป็นต้องใช้ช่องของไหลขนาดเล็กเพื่อใช้วัดวิเคราะห์ทางเคมีและการแพทย์ การสร้างช่องของไหลดังกล่าวจะใช้กระบวนการอัดพิมพ์ด้วยความร้อนหรือเรียกว่า “ฮอทเอมบอส” โดยมีตัวแม่พิมพ์นูนเป็นโลหะ กระบวนการสร้างเริ่มจากสร้างสารไวแสงประเภท SU-8 ลงบนแผ่นสแตนเลสตีตามารูปแบบของหน้ากากบังแสงที่ออกแบบและนำไปฉายแสงในระบบของลิโทกราฟีทำให้เกิดรีวรอยในสารโฟโตรีซิส นั้น จากนั้นอบให้แห้งและนำพอลิไดเมทิลไซลอคเซนหรือพีดีเอ็มเอสลงบนแผ่นบริเวณร่องที่เกิดเป็นรีวรอยในสารโฟโตรีซิส รอให้แห้งสนิทและนำไปเข้ากระบวนการพ่นอนุภาค ผงอนุภาคที่ใช้ชื่อซิลิกอนคาร์ไบด์มีขนาดเล็กและแข็งมากมีขนาดเล็กส่วนมากระดับเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 50 ไมโครเมตร ใช้แรงดันลมที่ประมาณ 4 บาร์ถึง 6 บาร์ การพ่นดังกล่าวนี้สารไวแสงจะหายไปเร็วกว่าสารโพลีเมอร์มากทำให้บริเวณหน้ากากโพลีเมอร์จะเกิดรูปบนแผ่นสแตนเลสในระดับที่เล็กมากและลึกตามต้องการและสามารถสร้างให้เล็กได้ตามขนาดของโฟโตรีซิส จากการทดสอบพบว่าการออกแบบช่องของไหลที่มีหน้ากาสารโพลีเมอร์ขนาดกว้าง 50 ไมโครเมตร จะให้ความลึกได้ถึงประมาณ 150 ไมโครเมตร โดยได้เรโซที่ตีมากถึงประมาณ 3 ซึ่งการพ่นที่ผลดีที่สุดจะอยู่ที่ความดัน 6.2 บาร์ ผลดีของงานชิ้นนี้คือจะช่วยลดค่าขั้นตอนการผลิตที่ซับซ้อนและเป็นทางเลือกใหม่ที่ราคาถูกลง ทำให้แม่พิมพ์เล็กลงได้ตามขนาดของหน้ากาสารไวแสงและขนาดของผงอนุภาค วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังรวบรวมวิธีการสร้างช่องของไหลขนาดเล็กแบบวิธีอื่นโดยเฉพาะวิธีการสร้างแบบการพ่นอนุภาคเพื่อประโยชน์ในการประยุกต์ใช้ในแลปส์ออนชิปต่อไป

Thesis Title	Precision Hot Embossing Mold Fabricated by High-Resolution Powder Blasting for Lab-on-chips Applications
Student	Mr. Tanom Lomas
Student ID.	50060003
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2013
Thesis Advisor	Assoc. Professor Dr. Fusak Cheevasuvit
Thesis Co-Advisor	Dr. Adisorn Tuantranont

ABSTRACT

This thesis discusses the design, fabrication and application of a three-dimensional micromold by using micropowder and micropattern masking technology. High-resolution powder blasting with polydimethylsiloxane (PDMS) and SU-8 masking is developed for the fabrication of a precision microfluidic mold for hot embossing fabrication. PDMS is a suitable masking material for powder blasting due to its high erosion resistance. First, a 100 mm SU-8 negative pattern was developed on a stainless steel substrate by standard photolithography. A PDMS solution was then applied to the substrate mainly filling recessed regions. Excess of PDMS was then physically removed by a blade. The PDMS/SU-8 structure was then cured. Next, silicon carbide (SiC) powder with an average diameter of 50 mm was blasted on a PDMS/SU-8 coated stainless sheet at a constant pressure between 4 and 6 bar and a PDMS mask was removed by ultrasonic cleaning in isopropanol. The three-dimensional structure was examined by an optical microscope, optical white light interferometer and scanning electron microscope. The PDMS pattern is found to be 50 mm wide, and the maximum etched depth at this thickness is around 150 mm at a blasting pressure of 6.2 bar; thus, an aspect ratio of 3 is easily obtained. In principle, the low-cost micromachining hot embossing mold developed can be improved to yield submicrometer- and nanometer-scale resolution. In this thesis we have fabricated microfluid channel by newly developed method in order to compare to previously reported methods by other research groups. And, moreover, to review how to create microfluidic channels for lab-on-chip applications.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์จาก ดร.อนุรัตน์ วิศิษฐ์สรรรถที่แนะนำเกี่ยวกับเทคนิคเฉพาะทางและยังให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการอย่างละเอียดเพื่อให้การเขียนเนื้อหาของวิทยานิพนธ์สมบูรณ์และเข้าใจง่าย

ขอขอบคุณ ดร.อดิสร เตือนตรานนท์ ที่แนะนำเทคโนโลยีทางของ MEMS แก่ข้าพเจ้าคนแรก พร้อมทั้งยังให้โอกาสได้ร่วมศึกษาวิจัยในกลุ่มงานวิจัยทางนาโนอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องกลจุลภาค ตั้งแต่เริ่มต้นจนจบและให้การสนับสนุนทุกด้านจนสำเร็จการศึกษา

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ฟูศักดิ์ ชิวสุวิทย์ เป็นอย่างสูงที่ให้คำปรึกษาให้กำลังใจให้การสนับสนุนและเร่งรัดจนสำเร็จการศึกษา

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.จิติ หนูแก้ว และ ดร.ศุภนิจ พรธีระภัทร วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยี สจล. ที่เสนอแนะ ให้การสนับสนุนด้านต่างๆโดยเฉพาะการวิจัยเพื่อสังคมและการบำเพ็ญประโยชน์

ขอขอบคุณ สมาชิกห้องปฏิบัติการวิจัยนาโนอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องกลจุลภาคทุกท่าน โดยเฉพาะ คุณธิติมา มธูรส คุณอัครพงษ์ ทรัพย์พัฒน์ คุณณัฐพล วัฒนวิสุทธิ คุณชาคริต ศรีประจวบวงค์ คุณสุริยะ โมงปราณีต และ Mr. Johannes Philipp Mensing ที่สนับสนุนขณะทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณ คุณอดิศักดิ์ แซ่สาริกิตและคุณพยุงค์ศักดิ์ ใจคำ ที่ให้การสนับสนุนช่วยเหลือและคอยติดตามความก้าวหน้าในการเขียนวิทยานิพนธ์

และสุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา-มารดา ที่ให้กำเนิด เลี้ยงดูและอบรมข้าพเจ้าจนมีวันนี้ รวมทั้งผู้มีพระคุณอันประกอบด้วยครูบาอาจารย์ในอดีตที่เคยให้การสนับสนุนแก่ข้าพเจ้าทั้งทางตรงและทางอ้อมซึ่งท่านเหล่านั้นผลักดันให้ข้าพเจ้าได้รับโอกาสทางการศึกษาตั้งแต่เริ่มต้นที่ชนบทจนถึงปัจจุบันที่สำเร็จการศึกษา

ธนอม โลมาศ

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ปัญหาและเหตุที่ต้องวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนการศึกษาและวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.7 สรุปเนื้อหางานวิจัย.....	4
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ลักษณะของแม่พิมพ์นูนที่มีอยู่ทั่วไป.....	6
2.1.1 แม่พิมพ์นูนจากวัสดุซิลิกอน.....	6
2.1.2 แม่พิมพ์นูนจากวัสดุניเกิล.....	7
2.1.3 แม่พิมพ์นูนจากวัสดุอื่นๆ.....	8
2.2 ลักษณะของแม่พิมพ์นูนที่สร้างขึ้นใหม่.....	9
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	
3.1 แลปส์ออนชิป.....	11
3.1.1 ที่มาของแลปส์ออนชิป.....	11
3.1.2 องค์ประกอบของแลปส์ออนชิป.....	12
3.1.3 ประโยชน์ของแลปส์ออนชิป.....	14
3.2 ระบบของไหลจุลภาคสำหรับงานแลปส์ออนชิป.....	14
3.2.1 ระบบของไหลจุลภาคคืออะไร.....	15
3.2.2 เทคนิคการแพร่เคทางานระบบของไหลจุลภาค.....	15
3.2.2.1 การใช้วัสดุซิลิกอนและแก้ว.....	16
3.2.2.2 การแพร่เคทางานจากเทคโนโลยีโพลีเมอร์.....	16
3.3 ไมโครแมชชีนนิ่ง (Micromachining).....	18
3.3.1 เบาที่ไมโครแมชชีน (Bulk Micromachining).....	19
3.3.2 เซอร์เฟซไมโครแมชชีน (Surface Micromachining).....	19
3.3.3 ลิการ์ไมโครแมชชีนนิ่ง (LIGA Micromachining).....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

3.4	ปฏิกิริยาของผงอนุภาค	20
3.4.1	การกัดเซาะวัสดุที่เปราะ	20
3.4.2	การใช้มุมกระทบเพื่อการกัดเซาะ	21
3.4.3	การกัดเซาะวัสดุเหนียว	22
3.4.4	การกัดเซาะวัสดุยึดหยุ่น	24
3.4.5	คุณสมบัติของอนุภาค	24
3.5	เงื่อนไขที่มีผลต่อการกัดกร่อนของอนุภาค	25
3.5.1	การฟุ้งของลม	25
3.5.2	ไหลของอนุภาคที่เป็นลักษณะก๊าซ	26
3.5.3	คุณสมบัติฟลักซ์ของอนุภาค	27
3.5.4	การใส่อนุภาคในระบบพ่นและหัวฉีดนอตเซลล์	27
3.6	การพิจารณาคูณสมบัติวัสดุที่มีการย่อระดับจุลภาค	28
3.6.1	การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากขนาดเล็กมาก	28
3.6.2	การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากย่อส่วนในระบบของเหลว	28
3.6.3	การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการย่อขนาดระบบทางเคมีและชีววิทยา	29
3.6.4	การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากเป็นฟิล์มบาง	30
3.6.5	คุณสมบัติวัสดุเปลี่ยนเนื่องจากระบบเครื่องกลขนาดเล็กลง	30
3.6.6	การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการย่อขนาดระบบทางความร้อน	31
3.6.7	การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการย่อขนาดระบบทางไฟฟ้าและแม่เหล็ก	31
3.6.8	การย่อขนาดของระบบทางแสง	33
บทที่ 4 การออกแบบและผลิตแม่พิมพ์นูนเบื้องต้น		
4.1	แม่พิมพ์นูนที่กัดด้วยเครื่องซีเอ็นซี	34
4.1.1	การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์นูนจากเครื่องซีเอ็นซี	34
4.1.2	การแพabriเคทแม่พิมพ์บนวัสดุพลาสติก	35
4.1.3	ผลการทดลองแม่พิมพ์นูนที่กัดด้วยเครื่องซีเอ็นซี	37
4.2	แม่พิมพ์นูนที่สร้างจากเอชยู-8	40
4.2.1	การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์นูนจากเอชยู-8	41
4.2.2	การแพabriเคทแม่พิมพ์เอชยู-8 บนวัสดุพลาสติก	42
4.2.3	ผลการทดลองแม่พิมพ์เอชยู-8	43
บทที่ 5 การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์นูนแบบพ่นอนุภาค		
5.1	การออกแบบแม่พิมพ์นูนแบบพ่นอนุภาค	47
5.1.1	แนวคิดและหลักการเบื้องต้นของการออกแบบ	47
5.1.2	การออกแบบแม่พิมพ์นูนจากสแตนเลส	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

5.2 การเตรียมอุปกรณ์และการสร้างแม่พิมพ์.....	49
5.2.1 กระบวนการสร้างเอชยู-8 และหน้ากากพีดีเอ็มเอช.....	49
5.2.2 การจัดเตรียมระบบการพ่นอนุภาค.....	52
บทที่ 6 ผลการทดลองและการวิเคราะห์แม่พิมพ์นูนแบบพ่นอนุภาค	
6.1 ผลการสร้างแม่พิมพ์นูนแบบพ่นอนุภาค.....	54
6.1.1 ลักษณะหน้ากากจากสารพีดีเอ็มเอช.....	54
6.1.2 ลักษณะทั่วไปของชิ้นงานแม่พิมพ์นูน.....	54
6.2 การวิเคราะห์ผล.....	55
6.2.1 การวิเคราะห์หน้ากากพีดีเอ็มเอชหลังการพ่นอนุภาค.....	55
6.2.2 การวิเคราะห์แม่พิมพ์นูนด้วยเครื่องมือที่มีความละเอียดสูง.....	56
6.2.2 อัตราการสึกหรอของแม่พิมพ์และหน้ากากที่เป็นสารเอชยู-8.....	58
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
7.1 สรุปผลการทดลอง.....	61
7.2 ปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางในการแก้ปัญหา.....	61
7.2.1 ปัญหาจากกระบวนการทางโฟโตลิโทกราฟี.....	61
7.2.2 ปัญหาจากขนาดของแม่พิมพ์.....	62
7.2.3 ปัญหาความเสียหายขณะทำการทดสอบ.....	62
7.3 แนวทางในการพัฒนาและข้อเสนอแนะ.....	63
เอกสารอ้างอิง.....	64
ภาคผนวก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	71
ประวัติผู้ทำการวิจัย.....	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้าที่
3.1 โพลีเมอร์แต่ละประเภทที่ประยุกต์ใช้ในงานของระบบของไหลจุลภาค.....	17
3.2 คุณสมบัติของโพลีเมอร์เมื่อเทียบกับแก้วและซิลิกอน.....	18



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 ภาพจำลองของต้นแบบแลปส์ออนชิปที่มีอุปกรณ์ร่วมหลายชนิด	13
3.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกัดกร่อนและมุมที่ตกกระทบของวัสดุที่เหนียวและวัสดุที่เปราะ	22
3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกัดเซาะของผงอนุภาคและมุมตกกระทบที่ต่างกันเมื่อเปลี่ยนขนาดผงอนุภาค	22
3.4 อัตราการกัดเซาะที่เกิดจากผลของมุมกระทบสำหรับวัสดุเหนียว	23
3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของผงอนุภาคและผลการกัดเซาะโลหะที่ความเร็วแตกต่างกัน	23
3.6 กราฟความสัมพันธ์ความเร็วอนุภาคเทียบกับระยะหัวฉีด มวลคือ 1.4 กรัมต่อนาที ความดันในแกนซ้ายเป็น 2.3×10^5 ปาสคาลและในแกนขวา 1.0×10^5 ปาสคาล	26
3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลของฟลักซ์กับความเร็วของผงอนุภาคซึ่งจะเห็นว่าความเร็วของผงอนุภาคลดลงเมื่อฟลักซ์เพิ่มขึ้น	27
3.8 แสดงกราฟของพาสเซนเคิร์ฟ	33
3.9 กราฟเปรียบเทียบความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่ระยะช่องว่างของโรเตอร์และสเตเตอร์ที่ต่างกัน	33
4.1 ลักษณะแม่พิมพ์พูนที่เกิดจากเครื่องจักรซีเอ็นซีที่มีความละเอียดสูง	35
4.2 ร่องของไหลจุลภาคที่ทดสอบอัดพิมพ์ลงบนพลาสติกจากแม่พิมพ์พูนที่เกิดจากเครื่องจักรซีเอ็นซีที่มีความละเอียดสูง	35
4.3 ภาพกระบวนการที่อัดพิมพ์เพื่อลอกกลายจากแม่พิมพ์พูนที่เป็นโลหะอลูมิเนียม	36
4.4 ภาพด้านบนของแม่พิมพ์พูนแบบอลูมิเนียมที่กว้าง 100 ไมโครเมตร	37
4.5 ภาพช่องของไหลบนพลาสติกที่อัดพิมพ์จากแม่พิมพ์พูนแบบอลูมิเนียมที่กว้าง 100 ไมโครเมตร	37
4.6 ภาพด้านบนของแม่พิมพ์พูนแบบอลูมิเนียมที่กว้าง 400 ไมโครเมตร	38
4.7 ภาพช่องของไหลบนพลาสติกที่อัดพิมพ์จากแม่พิมพ์พูนแบบอลูมิเนียมที่กว้าง 400 ไมโครเมตร	38
4.8 ภาพที่บอกรายละเอียดความสูงของแม่พิมพ์พูนที่เกิดจากเครื่องจักรซีเอ็นซีโดยที่วัดจากเครื่อง Dektak Surface Profiler	38
4.9 ภาพที่วัดความลึกร่องของไหลจุลภาคที่ได้ทดสอบอัดพิมพ์ลงบนพลาสติกแล้ววัดจากเครื่อง Dektak Surface Profiler	39
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การหดตัวของพลาสติกและเวลาในการอัดพิมพ์บนพลาสติกของแม่พิมพ์อลูมิเนียม	40
4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความลึกคลาดเคลื่อนและเวลาในการอัดพิมพ์บนพลาสติกของแม่พิมพ์อลูมิเนียม	40
4.12 ภาพแม่พิมพ์พูนแบบร้อนที่สร้างจากเอชยู-8 และภาพขยายของช่องของไหลขนาดเล็กรูปตัว T บริเวณแม่พิมพ์	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 ภาพแม่พิมพ์นูนแบบร้อนที่สร้างจากเอชยู-8 และภาพขยายของช่องของไหล ขนาดเล็กรูปตัว U บริเวณแม่พิมพ์.....	42
4.14 กระบวนการอัดพิมพ์ที่ลอกกลายจากแม่พิมพ์นูนที่สร้างจากเอชยู-8.....	43
4.15 สภาพพลวดลายของช่องของไหลจุลภาคที่ที่ถูกอัดรีดลงบนพลาสติกชนิด PMMA.....	44
4.16 ภาพชั้นของแม่พิมพ์เอชยู-8 ด้านบนที่อ่านด้วยเครื่อง Interferometer Surface Profiler...45	45
4.17 ภาพผิวของช่องของไหลบนพลาสติกและกราฟของ Surface Roughness ที่อ่าน ได้จากเครื่อง Interferometer Surface Profiler.....	45
4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกที่ได้อัดพิมพ์ลงบนพลาสติกของแม่พิมพ์ เอชยู-8 และเวลาในการอัดพิมพ์เป็นวินาที.....	46
5.1 ภาพจำลองหลักการในกระบวนการพ่นผงอนุภาค.....	48
5.2 ภาพจำลองแผนผังของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นบริเวณอนุภาคโดยรอบ.....	48
5.3 ภาพของพีดีเอ็มเอชจากกล้องไมโครสโคปขณะหลงในช่องของเอชยูเอช-8.....	51
5.4 ภาพชิ้นงานตำแหน่งเดิมของพีดีเอ็มเอชจากกล้องไมโครสโคปหลังจากผ่าน กระบวนการพ่นอนุภาคซึ่งหน้ากักพีดีเอ็มเอชยังคงอยู่.....	51
5.5 ภาพของโฟโตลิโทกราฟีที่ใช้สร้างหน้ากักเอชยู-8.....	52
5.6 กระบวนการสร้างแม่พิมพ์จากเทคโนโลยีการสร้างหน้ากักเอชยู-8 และพีดีเอ็ม เอช (a) นำเอชยู-8 ไปฉายแสง (b) ได้โครงสร้างเอชยู-8 (c) สร้างหน้ากักร่วมกับ สารพีดีเอ็มเอช (d) เข้ากระบวนการพ่นอนุภาคและสุดท้าย (e) ได้โครงสร้างของ แม่พิมพ์จากสแตนเลสแบบใหม่ระดับขนาดไมโครเมตร.....	53
6.1 ภาพแสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนหรือ SEM สำหรับตรวจวิเคราะห์.....	55
6.2 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนหรือภาพจาก SEM ที่ได้จากแม่พิมพ์นูนที่ หนา 50 ไมโครเมตรและลึก 50 ไมโครเมตรภายใต้หน้ากักพีดีเอ็มเอช.....	52
6.3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของแม่พิมพ์แบบพ่นอนุภาคบางรูปแบบ ที่มีมีผงอนุภาคขนาดใหญ่เกาะอยู่ที่ช่องขนาดเล็ก.....	57
6.4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของแม่พิมพ์แบบพ่นอนุภาคที่เป็นรูปทรง กลมของงานสำหรับประยุกต์ใช้สำหรับแลปส์ออนชิป.....	57
6.5 ภาพแสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีความละเอียดสูงที่แสดงบริเวณช่องที่กีด ด้วยการพ่นอนุภาคมีขนาดเล็กและลึกมากกว่า.....	58
6.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันลมและเวลาที่ทำการกีดหน้ากักเอชยู-8 หนา 100 ไมโครเมตรเมื่อพ่นด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์.....	59
6.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและระยะสึกกร่อนของแม่พิมพ์นูนที่ทำจากวัสดุสแตน เลสเมื่อพ่นด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ที่แรงดันคงที่ 6.2 บาร์.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 6.8 ภาพสามมิติที่แสดงลักษณะของแม่พิมพ์นูนแบบฟันด้วยอนุภาคที่มีความสูงประมาณ 100 ไมโครเมตรและความกว้างประมาณ 50 ไมโครเมตรที่วัดโดยใช้เครื่องวัดอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์แบบใช้ย่านแสงขาว (white-light interferometer ยี่ห้อ: PolyTech).....60



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ห้องปฏิบัติการบนชิป (Lab-on-a-chip) เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่เสมือนย่อห้องปฏิบัติการมาไว้บนชิปขนาดเล็กระดับที่สามารถย่อมาวางบนฝ่ามือได้ ทำให้การตรวจวัดรวดเร็ว ช่วยประหยัดสารเคมีทางการแพทย์และสามารถผลิตในกระบวนการคล้ายกับการผลิตไอซีจึงทำให้ผลิตได้ปริมาณมากและราคาถูก ในห้องปฏิบัติการบนชิปหรือแล็บส์ออนชิปนอกจากจะประกอบด้วยวงจรรีเล็กทรอนิกส์ เช่น เซอร์และอื่นๆ แล้วสิ่งที่ถือว่าสำคัญที่สุดคือระบบของไหลจุลภาค (Microfluidics) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีในการย่อส่วนและจัดการกับของเหลวที่มีปริมาตรในระดับไมโครลิตร ในระบบของไหลจุลภาคหนึ่งๆ อาจจะประกอบด้วยท่อ หัวฉีด ปัมป์ ช่อง ตัวผสม ส่วนกรอง วาล์ว เซนเซอร์ ปัมป์ขนาดเล็กที่เรียกว่า ไมโครปั๊ม (Micropump) และไมโครมิกเซอร์ (Micromixer) ที่ช่วยผสมสารเคมีเข้าด้วยกันเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเป็นต้น การสร้างชิปของระบบของไหลจุลภาคหนึ่งๆ ต้องอาศัยความรู้อย่างลึกซึ้งเช่นเรื่องผลของการย่อส่วน วิทยาศาสตร์เกี่ยวกับพื้นผิว คุณสมบัติของวัสดุและอื่นๆ เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้ตามต้องการและถูกต้องตามจุดประสงค์ ส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดในระบบของไหลจุลภาคได้แก่ เครื่องข่ายของท่อขนาดเล็ก (Microchannel) ซึ่งทำหน้าที่เชื่อมโยงส่วนต่างๆ ในระบบที่มีขนาดตั้งแต่ไมโครเมตรจนกระทั่งขนาดนาโนเมตร ท่อขนาดเล็กในระบบของไหลจุลภาคนั้นส่วนมากจะมีการผลิตด้วยมือเปลาซึ่งนิยมทำจากแก้วและสารโพลีเมอร์ ในการสร้างระบบของไหลที่ทำจากแก้วนั้นจะสร้างโดยการกัดให้เป็นร่องด้วยสารเคมีซึ่งไม่สะดวกในการทำให้เป็นแม่พิมพ์และก็สามารถพัฒนาเพื่อนำมาสร้างร่วมกับสารโพลีเมอร์เช่นนำมาประกบติดเป็นฐานรองให้แก้วโพลีเมอร์เป็นต้น ท่อขนาดเล็กชนิดโพลีเมอร์นั้นอาจได้จากการเทและลอกจากแม่พิมพ์หากเป็นแม่พิมพ์ขนาดเล็กมากระดับไมโครเมตรจะไม่สามารถใช้แม่พิมพ์จากการกัดซีเอ็นซีหรือไม่สามารถสร้างแบบปกติทั่วไป แต่จำเป็นต้องสร้างแม่พิมพ์จากกระบวนการทางไมโครแมชชีนและกระบวนการลิโทกราฟีที่สร้างจากสารโฟโตรีซิสชนิดต่างๆ เช่นสารโฟโตรีซิสชนิดเอชยู-8 เป็นต้น ท่อขนาดเล็กที่ทำจากโพลีเมอร์นั้นปัจจุบันนิยมสร้างจากโพลีเมอร์ชนิดโพลีไดเมทิลไซโลเซน (PDMS) สามารถสร้างและลอกจากจากแม่พิมพ์แข็งเช่น แก้วและโลหะเป็นต้นแล้วนำชิ้นงานโพลีเมอร์ที่ได้ไปประกบฐานรองที่เป็นแก้วหรือโพลีเมอร์อีกครั้งเพื่อเป็นระบบของไหลจุลภาคแต่การประกบติดแบบดังกล่าวจำเป็นต้องเตรียมให้ผิวหน้าสัมผัสของแก้วหรือโพลีเมอร์นั้นเรียบและเป็นลักษณะไฮโดรโฟบิกเพื่อการยึดติดกันกับฐานรองอย่างถาวรและไม่มีการรั่วซึมของสารละลายในระบบของไหลจุลภาคนั้นซึ่งเป็นเรื่องยุ่งยากที่จะสร้างสภาวะของสภาพผิวดังกล่าวนั้นในกระบวนการผลิตทั่วไป

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้พยายามสร้างทางเลือกใหม่ ด้วยการสร้างท่อขนาดเล็กในระบบของไหลจุลภาคที่ทำจากวัสดุตัวใหม่นั้นคือวัสดุพลาสติกชนิดโพลีเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) แทนการใช้โพลีเมอร์ทั่วไปเพราะจะสามารถเกิดโอกาสการสร้างแม่พิมพ์ขึ้นเพื่อขึ้นรูปท่อของไหลขนาดเล็กบนพลาสติกได้ด้วยกระบวนการผลิตที่รวดเร็วกว่า การสร้างแม่พิมพ์แบบร้อนสำหรับสร้างลวดลายของช่องระบบของไหลจุลภาคนั้นได้ศึกษาและสร้างแม่พิมพ์ขึ้นที่ทำจากเอชยู-8 บนแผ่นโลหะสแตนเลสและสร้างระบบอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนเพื่ออัดพิมพ์ลงบนพลาสติกโพลีเมทิลเมทาคริเลตได้สำเร็จแล้วแต่มีข้อจำกัดเรื่องแม่พิมพ์ขึ้นที่ทำจากสารโฟโตรีซิสชนิดเอชยู-8 บนแผ่นสแตนเลส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นขณะทำการอัดพิมพ์วัสดุที่เป็นสารโพโตรีซิสแล้วเมื่อใช้ประยะหนึ่งจะเกิดการหลุดลอกเนื่องจากความร้อนและแรงอัด ดังนั้นเนื้อหาลึกในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเป็นที่มาของการศึกษาวิจัยการสร้างแม่พิมพ์นูนแบบร้อนโดยเทคโนโลยีการพ่นผงอนุภาค (Powder blasting) ที่ละเอียดสูงเพื่อประยุกต์ใช้งานทางแลปส์ออนชิปที่สามารถสร้างสารไวแสงประเภทเอชยู-8 ลงบนแผ่นสแตนเลสสตีลและนำไปฉายแสงในระบบของลิโทกราฟีและไปกัดออกด้วยสารสารเคมีทำให้เกิดริ้วรอยในสารโพโตรีซิสนั้น จากนั้นอบให้แห้งและนำสารพอลิไดเมทิลไซลอกเซนหรือพีดีเอ็มเอสเคลงบนแผ่นบริเวณร่องที่เกิดเป็นริ้วรอยในสารโพโตรีซิส อบให้แห้งสนิทและนำไปเข้ากระบวนการพ่นอนุภาค การพ่นดังกล่าวทำให้บริเวณหน้ากากโฟลิเมอร์จะเกิดรูบนแผ่นสแตนเลสในระดับที่เล็กมากและลึก ซึ่งจะเกิดผลดีต่อการนำไปใช้เป็นแม่พิมพ์นูนแบบร้อนที่ทนความร้อนทนต่อแรงดันและทนต่อการหลุดลอกเนื่องจากแม่พิมพ์เป็นเนื้อวัสดุเดียวกันกับฐานรองที่เป็นสแตนเลสและเกิดประโยชน์อย่างมากต่อการสร้างแลปส์ออนชิปที่เป็นพลาสติกที่ใช้ในกระบวนการอัดพิมพ์ในจำนวนมากต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาหลักการและทฤษฎีเกี่ยวกับการสร้างแลปส์ออนชิป (Lab-on-chip) ระบบของไหลจุลภาค (Microfluidics) ท่อขนาดเล็ก (Microchannel) วิวัฒนาการของเทคโนโลยี ประวัติและประโยชน์เป็นต้น
2. เพื่อศึกษาการสร้างแม่พิมพ์นูนแบบร้อนแบบต่างๆเพื่อนำมาสร้างเป็นช่องขนาดเล็กของไหลจุลภาคที่สร้างจากวัสดุพลาสติก
3. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างเครื่องอัดพิมพ์แบบร้อนอย่างประหยัดสำหรับการอัดพิมพ์วัสดุพลาสติกพีเอ็มเอ็มเอ
4. เพื่อทราบกระบวนการและวิธีการของเทคโนโลยีการพ่นอนุภาคที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับแลปส์ออนชิปซึ่งเป็นเรื่องที่จะเกิดประโยชน์อย่างมากต่อมนุษย์
5. ให้วิทยานิพนธ์เป็นสื่อเพิ่มพูนความรู้และเผยแพร่เทคโนโลยีทางด้านแลปส์ออนชิปเทคโนโลยีระบบของไหลจุลภาคและเทคโนโลยีการพ่นอนุภาค

1.3 ขอบเขตการศึกษาและวิจัย

งานวิจัยนี้เน้นศึกษาทฤษฎีทั่วไปเรื่องแลปส์ออนชิป ระบบของไหลจุลภาคและเทคโนโลยีการพ่นอนุภาคเพื่อให้เกิดเทคโนโลยีใหม่ในการสร้างแม่พิมพ์นูนสำหรับอัดพิมพ์ช่องของไหลจุลภาคสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานแลปส์ออนชิปในอนาคต มีขอบเขตเริ่มต้นเน้นการศึกษาแม่พิมพ์ที่เป็นโลหะแม่พิมพ์ที่เป็นโพโตรีซิสประเภทเอชยู-8 โดยแม่ทั้งหมดนั้นเป็นแม่พิมพ์ลายนูนแบบร้อนบนฐานรองหรือซัพสเตรทที่เป็นโลหะ หลังจากนั้นศึกษาเครื่องอัดพิมพ์ลายนูนแบบร้อนเพื่อเตรียมเป็นกระบวนการสร้างช่องของไหลขนาดเล็กแบบประหยัดและส่วนท้ายที่สำคัญที่สุดนั้นจะเน้นการสร้างแม่พิมพ์นูนแบบร้อนที่เป็นโลหะสแตนเลสที่เป็นเนื้อเดียวกันกับฐานรองที่ทำจากเทคโนโลยีการพ่นอนุภาคและเทคโนโลยีการสร้างหน้ากากจากกระบวนการทางลิโทกราฟีและขั้นตอนสุดท้ายของงานวิจัยคือทดสอบและกำหนดคุณสมบัติการพ่นอนุภาคที่เหมาะสมเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการบวนการผลิตระบบช่องของไหลจุลภาค จากนั้นวัดผลแม่พิมพ์นูนที่ได้ด้วยเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์เพื่อบันทึกการดำเนินการแต่ละกระบวนการสรุปผลและเขียนวิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ปัญหาและเหตุที่ต้องศึกษาวิจัย

ระบบช่องของไหลจุลภาคนั้นเป็นอุปกรณ์สำคัญอย่างหนึ่งในแลปส์ออนชิปที่เริ่มมีการวิจัยและเริ่มการสร้างเร็วๆ นี้โดยเน้นการวัดวิเคราะห์แขนงต่างๆ เช่น การวัดทางเคมีประยุกต์ การวัดทางการแพทย์และวัดทางพันธุวิศวกรรม เป็นต้น โดยงานวิจัยดังกล่าวเน้นการสร้างช่องของไหลเฉพาะงานวิจัยในกลุ่มนั้นโดยไม่ค่อยพบนักวิจัยผู้เน้นการผลิตในระบบของกระบวนการผลิตตั้งนั้นจึงมีผลให้อุปกรณ์ระบบช่องของไหลมีราคาแพงและเป็นอุปสรรคต่อการพัฒนางานวิจัยด้านแลปส์ออนชิปในอนาคต ถึงแม้จะมีผู้พยายามประดิษฐ์แลปส์ออนชิปด้วยวิธีต่างๆ แต่เกือบทั้งหมดก็ยังเป็นเฉพาะในห้องปฏิบัติการเป็นเท่านั้น ในการพัฒนาแลปส์ออนชิปไปสู่เชิงพาณิชย์นั้นเมื่อไม่นานมานี้ก็เพิ่งจะมีบริษัทเอกชนแห่งหนึ่งชื่อ ไมโครนิตไมโครฟลูอิดิก (Micronit Microfluidics Ltd.) ในประเทศเนเธอร์แลนด์ได้เน้นการสร้างช่องของไหลขนาดเล็กและแลปส์ออนชิปเพื่อขายให้ตลาดที่ทำวิจัยด้านวิทยาศาสตร์เพื่อชีวิตและการวัดวิเคราะห์ทางเคมีแต่ก็เน้นวัสดุที่เป็นแก้วเป็นส่วนใหญ่ ต้นเหตุของปัญหาดังกล่าวจึงได้พยายามศึกษาเทคโนโลยีใหม่นั้นคือแม่พิมพ์นูนเพื่อสร้างช่องของไหลบนวัสดุพลาสติกชนิดพีเอ็มเอ็มเอ การศึกษาในครั้งนี้นอกจากจะสร้างแม่พิมพ์นูนที่ทำจากโลหะแล้วยังทำการศึกษาแม่พิมพ์นูนที่ทำจากสารโพลีไตรไซซีนชนิดเอชยู-8 ซึ่งผลการสร้างแม่พิมพ์นูนแบบโลหะนั้นมีข้อจำกัดที่สร้างให้ขนาดเล็กมากไม่ได้เพราะข้อจำกัดของซีเอ็นซี และหากมาพิจารณาการสร้างแม่พิมพ์นูนแบบสารโพลีไตรไซซีนชนิดเอช-8 แล้วถึงแม้สามารถสร้างขนาดเล็กมากได้เพราะทำในกระบวนการลิโธกราฟีแต่มีข้อจำกัดที่ไม่แข็งแรงไม่ทนความร้อน ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ศึกษาการสร้างแม่พิมพ์นูนแบบร้อนโดยเทคโนโลยีการพ่นผงอนุภาคที่ละเอียดสูงเพื่อประยุกต์ใช้งานในทางแลปส์ออนชิปที่มีข้อดีกว่าวิธีที่กล่าวข้างต้นนั้นคือสายแม่พิมพ์นูนนั้นเป็นเนื้อโลหะเดียวกันกับฐานรองทำให้ทนความร้อนและทนการกัดกร่อนและสามารถสร้างแม่พิมพ์นูนให้มีขนาดเล็กมากได้เพราะว่าสร้างจากกระบวนการทางลิโธกราฟี ผลสำเร็จของการศึกษาดังกล่าวสามารถนำไปพัฒนาเพื่อผลิตช่องขนาดเล็กของระบบของไหลจุลภาคได้ปริมาณมากและมีราคาถูกลงทำให้เกิดผลดีต่อการพัฒนาเทคโนโลยีด้านนี้อย่างมาก

1.5 ขั้นตอนการศึกษาและวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีทั่วไปของแลปส์ออนชิปและระบบของไหลจุลภาค เช่น ประวัติ ประโยชน์ที่ได้และการนำแลปส์ออนชิปไปประยุกต์ใช้งานเป็นต้น
2. ศึกษาทฤษฎีทั่วไปของการสร้างแม่พิมพ์นูนแบบร้อนแบบต่างๆ ทั้งที่แบบธรรมดาและมีความละเอียดสูงศึกษาทฤษฎีทั่วไปของการพ่นอนุภาคโดยการสับคั้นวิธีการแบบต่างๆ ที่เคยวิจัยมาแล้วทั้งวิธีการและกระบวนการสร้าง
3. ศึกษาการสร้างแม่พิมพ์นูนจากโลหะและสร้างแม่พิมพ์นูนจากเอชยู-8 โดยการศึกษาดังกล่าวนอกเหนือจากอ้างอิงจากผู้ที่เคยทำวิจัยทั่วโลกแล้วยังต้องทำการทดลองสร้างเองเพื่อการอัดรีดช่องของไหลจุลภาคลงบนวัสดุพลาสติก เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการทดลองอัดรีดวัสดุพลาสติกข้างต้น
4. ศึกษาการสร้างเครื่องอัดพิมพ์แบบร้อนอย่างง่ายที่บีบอัดจากระบบนิวเมติกส์และศึกษาอุณหภูมิและแรงดันที่เหมาะสมในการบีบอัดพลาสติกชนิดพีเอ็มเอ็มเอ
5. ศึกษาและสร้างแม่พิมพ์นูนแบบร้อนด้วยพ่นอนุภาคโดยสร้างโพลีไตรไซซีนชนิดเอชยู-8 ลงบนฐานรองที่เป็นโลหะสแตนเลสตีลโดยหมุนเหวี่ยง (Spin) ให้เรียบและอบให้แห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะเดียวกันก็สร้างหน้ากากบังแสงและนำมาวางเพื่อบ่งสารเอชยู-8 ที่เตรียมไว้แล้ว นำไปฉายแสงในเครื่องลิโทกราฟี และนำมาล้างด้วยน้ำยาล้างสารไวแสงหรือน้ำยาน้ำยาดีเวลลอปเปอร์

6. เตรียมสารโพลีเมอร์ชื่อพอลิไดเมทิลไซลอคเซนโดยเตรียมในระบบสุญญากาศเพื่อไล่ฟองอากาศก่อนที่สารดังกล่าวนี้จะแห้งให้นำมาเทลงที่รอยช่องว่างระหว่างโฟโตรีซิสเอชยู-8 เพื่อเป็นหน้ากากให้แก่แม่พิมพ์นูนและอบให้แห้ง
7. นำไปเข้าขบวนการพ่นอนุภาคที่มีความละเอียดสูงให้บริเวณสารโฟโตรีซิสชื่อเอชยู-8 ถูกทำลายลงไปพร้อมกับฐานรองพร้อมทั้งตรวจวัดขนาดความลึกที่ต้องการจากนั้นนำชิ้นงานที่ได้มาวิเคราะห์ผลโดยส่องจากเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์เพื่อดูความลึกความและดูความหยาบของผิว (Surface Roughness) เป็นต้น เพื่อจะได้ต้นแบบของแม่พิมพ์นูนแบบร้อนสำหรับนำไปใช้ในกระบวนการผลิตช่องของไหลจุลภาคต่อไป
8. วิเคราะห์และสรุปผลและจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. การศึกษาเทคโนโลยีการสร้างระบบของไหลจุลภาคทำให้เราทราบกระบวนการและวิธีการสร้างช่องของของไหลจุลภาคแบบต่างๆ ที่นักวิจัยทั่วโลกได้เคยสร้างขึ้นซึ่งส่งผลทำให้เราสามารถปรับปรุงงานวิจัยและเกิดเทคโนโลยีใหม่คือการสร้างแม่พิมพ์นูนที่ให้รายละเอียดสูงแข็งแรงและทนต่อความร้อนจากระบบเครื่องอัดพิมพ์และสามารถพัฒนาเป็นการผลิตแม่พิมพ์ที่ราคาถูกและพัฒนาเป็นเชิงพาณิชย์ได้
2. วิทยานิพนธ์เรื่องนี้เป็นการสร้างแม่พิมพ์นูนแบบร้อนโดยเทคโนโลยีการพ่นผงอนุภาคที่ละเอียดสูงเป็นครั้งแรกและเป็นการเขียนวิทยานิพนธ์ภาษาไทยเรื่องดังกล่าว เป็นเรื่องแรก ดังนั้นจึงเป็นประโยชน์ต่อผู้ประสงค์เรียนรู้ นักวิจัยและผู้สนใจเทคโนโลยีด้านนี้ในประเทศไทย
3. วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ส่งเสริมให้เรียนรู้เทคโนโลยีทางด้านแลปส์ออนชิปและเทคโนโลยีการระบบของไหลจุลภาคที่สามารถนำมาประยุกต์ตรวจวัดทางเคมี นำมาประยุกต์ใช้ในงานเทคโนโลยีทางพันธุวิศวกรรมและนำมาประยุกต์ตรวจวิเคราะห์โรคซึ่งเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีด้านการแพทย์และเทคโนโลยีด้านอื่นๆที่เกี่ยวข้องซึ่งจะเกิดประโยชน์ต่อมนุษย์อย่างประมาณค่ามิได้

1.7 สรุปเนื้อหางานวิจัย

บทที่ 2: เป็นการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแม่พิมพ์นูนแบบต่างๆ ที่มีผู้สร้างไว้ทั่วไปโดยจะกล่าวถึงแม่พิมพ์นูนที่เกี่ยวข้องและสร้างในกระบวนการทางไมโครแพบริเคชันหรือเกี่ยวข้องกับการสร้างในกระบวนการทางไมโครแมซิน ศึกษาวิธีการสร้างแม่พิมพ์แต่ละลักษณะซึ่งจะหาข้อเสียหรือข้อจำกัดของแม่พิมพ์นูนเหล่านั้นจนได้ที่มาของการสร้างแม่พิมพ์นูนแบบใหม่ที่พ่นด้วยอนุภาคที่ละเอียดสูงในหัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 3: เป็นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยซึ่งจะรวบรวมงานวิจัยต่างๆทั่วโลกด้านแลปส์ออนชิปและระบบของไหลจุลภาคที่เคยมีกลุ่มนักวิจัยสร้างขึ้นและเกี่ยวข้องกับเรื่องดังกล่าว โดยจะกล่าวพอสังเขป จากนั้นจะรวบรวมหลักการโดยสรุปของกระบวนการทางไมโครแมซินเพื่อเสริมความรู้ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกี่ยวข้องในการสร้างระบบของไหลจุลภาคในอนาคต เช่น กระบวนการเกี่ยวกับเบ้าและเซอร์เฟสไมโครแมชชีนเป็นต้น จากนั้นจะกล่าวถึงทฤษฎีของปฏิกิริยาจากผองอนุภาคและเงื่อนไขที่เป็นผลให้เกิดการกักเซาะของผองอนุภาคโดยจะศึกษาพร้อมทั้งเลือกมาจากการวิจัยทั่วไปและสรุปมาเพื่ออ้างอิงเป็นองค์ความรู้ และในตอนท้ายจะกล่าวโดยสรุปเรื่องคุณสมบัติวัสดุที่มีการย่อยระดับจุลภาคเพื่อประโยชน์การศึกษาและหากมีการออกแบบในอนาคตให้ถูกต้องเพราะแต่คุณสมบัติของวัสดุอาจเปลี่ยนไปจากทฤษฎีเดิมเมื่อชิ้นงานมีขนาดเล็กมากๆ

บทที่ 4: กล่าวถึงการออกแบบแม่พิมพ์หุ่นแบบกัดจากซีเอ็นซี การออกแบบแม่พิมพ์หุ่นแบบโฟโตรีซิส กระบวนการสร้าง ผลการทดลอง และอธิบายผลการทดลองและเหตุผลทางเทคนิคแต่ละกระบวนการและวิธีเพื่อพัฒนาหาทางแก้ไข

บทที่ 5: กล่าวถึงการออกแบบแม่พิมพ์หุ่นแบบร้อนจากการพ่นอนุภาคที่ทำจากโลหะประเภทสแตนเลส กล่าวถึงวิธีการจัดเตรียมอุปกรณ์และกระบวนการสร้าง

บทที่ 6: กล่าวถึงกระบวนการสร้าง (Fabrication) การนำไปวิเคราะห์และหาค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการสร้างแม่พิมพ์และอธิบายผลการทดลอง

บทที่ 7: สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ กล่าวถึงงานวิจัยทั้งหมดโดยสรุปและเสริมข้อเสนอแนะเพิ่มเติม



บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะของแม่พิมพ์นูนที่มีอยู่ทั่วไป

ระบบที่มีการพิมพ์ด้วยลายนูนแบบร้อนนั้นเป็นที่นิยมนำไปอัดพิมพ์และนำไปขึ้นรูปขึ้นงานมากที่สุด เนื่องจากมีความเรียบง่าย ต้นทุนต่ำและสามารถนำไปผลิตเป็นจำนวนมากๆได้ แม่พิมพ์นูนแบบร้อนนั้นมีเทคนิคพิเศษคือการนำไปอัดพิมพ์ชิ้นงานที่มีขนาดเล็กมากระดับไมโครได้ โดยใช้ความร้อนในระบบการอัดพิมพ์เพื่อให้ชิ้นงานทำได้อย่างรวดเร็วและผลิตได้ปริมาณมากทำให้มีราคาถูกลงเมื่อเรื่อนี้มีการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์นูนแบบร้อนที่นำไปประยุกต์ใช้งานในเทคโนโลยีต่างๆมากมาย การพิมพ์ด้วยลายนูนดังกล่าวไม่ใช่เพียงแต่นำไปขึ้นรูปหรืออัดพิมพ์เพื่อสร้างงานที่มีขนาดเล็กได้เท่านั้น แต่ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการอัดพิมพ์เพื่อสร้างระบบไมโครรีเอคเตอร์ นำไปอัดพิมพ์หรือสร้างอุปกรณ์เพื่อการเกิดปฏิกิริยาในช่องเล็กๆระดับไมโครเมตร เป็นระบบของไหลจุลภาค นำไปสร้างงานทางระบบแคปิลลารีอิเล็กทรอนิกส์ (CE) ไปพัฒนาเป็นระบบของไหลจุลภาคในกระบวนการทางโพลิเมอร์เรสเซนซ์เจ็ลอิเล็กชัน (PCR) ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งสำหรับงานด้านการที่เพิ่มจำนวนดีเอ็นเอ และระบบการวิเคราะห์อุปกรณ์รวมระดับไมโครเมตร (μ TAS) เป็นต้น [1-5] การสร้างระบบเพื่อพิมพ์ลายนูนแบบใช้ความร้อนนั้น ต้นทุนหลักคือแม่พิมพ์นูนนั่นเอง จึงได้เน้นการวิจัยเพื่อสร้างแม่พิมพ์นูนแบบร้อนในกระบวนการต่างๆ ในการสร้างแม่พิมพ์นูนที่มีความละเอียดสูงสำหรับงานการอัดพิมพ์แบบใช้ความร้อนนั้นพบว่าแม่พิมพ์ที่ละเอียดและใช้ในกระบวนการทางไมโครแพริเคชันนั้นได้มีการวิจัยและสร้างมาไม่มากนัก จากการศึกษาและค้นคว้าเพื่อจะสร้างแม่พิมพ์แบบใหม่นั้นโดยดูผลงานนักวิจัยจากทั่วโลก พบว่านิยมทำแม่พิมพ์นูนระดับไมครอนหรือระดับไมโครเมตรนั้นได้ทำมาจากวัสดุประเภทซิลิกอน [6-7] และวัสดุประเภทพิกเซล [8-9] เป็นส่วนมาก และนอกจากนั้นก็ยังมีแม่พิมพ์ประเภทอื่นๆ

2.1.1 แม่พิมพ์นูนจากวัสดุซิลิกอน

การสร้างแม่พิมพ์ในกระบวนการไมโครแพริเคชันและกระบวนการสร้างแม่พิมพ์ระดับไมโครเมตรนั้น งานที่เป็นแม่พิมพ์นูนจากซิลิกอนเป็นแม่พิมพ์นูนแรกๆที่นักวิจัยทั่วโลกได้ศึกษาและนำไปประยุกต์ใช้เช่นในปี ค.ศ 2001.X.J. Shen และคณะจากมหาวิทยาลัยเบิร์กลีย์ประเทศสหรัฐอเมริกาได้สร้างแม่พิมพ์ที่ทำจากซิลิกอน [10] เพื่อสร้างเลนส์ขนาดระดับไมโครเมตร มีกระบวนการคือสร้างและกัดซิลิกอนให้เป็นร่องทรงกลมและเลือกให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่างๆ ตามที่ออกแบบไว้ เมื่อนำแม่พิมพ์ซิลิกอนที่เตรียมไว้ไปเข้ากระบวนการอัดพิมพ์ลงบนวัสดุโพลิคาร์บอนเนตที่มีความร้อนจะได้ลักษณะของโพลิคาร์บอนเนตที่มีลักษณะกลมและใสซึ่งผลงานที่ได้ดังกล่าวเตรียมไว้เพื่อนำไปใช้ในงานโฟโตนิกส์ที่เกี่ยวข้องทางด้านแสงโดยเฉพาะใช้งานเป็นไมโครเลนส์ หลังจากนั้นในปี 2004 Jin Tae Kim และคณะจากสถาบันวิจัยอิลีทรอนิกส์และโทรคมนาคมแห่งเมืองแดจุน ประเทศเกาหลีใต้ ได้ใช้ประโยชน์จากซิลิกอนโดยการสร้างเป็นแม่พิมพ์นูนจากซิลิกอน [11] ให้เป็นช่องของไหลจุลภาคแล้วนำไปเป็นแม่พิมพ์นูนแบบร้อนโดยนำไปอัดพิมพ์ไปยังพลาสติกโดยตรง เพื่ออัดรีดลงบนพลาสติกชนิดพีเอ็มเอ็มเอเพื่อนำไปใช้ในการวิจัยทางด้านแสง การใช้แม่พิมพ์ซิลิกอนทำต้นแบบทางพลาสติกดังกล่าวเนื่องจากงานวิจัยในสถาบันวิจัยแห่งนี้บ้างโครงการจะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการใช้เส้นใยนำแสงหลายเส้น เช่น เส้นใยนำแสงเพื่อใช้กับอุปกรณ์สวิตช์แสงที่มีจำนวนมาก ดังนั้น การสร้างอุปกรณ์ที่จัดวางวงจรทางแสงที่เรียกว่าอุปกรณ์ “Planar Light wave Circuit” หรือ PLC นั้นหากไม่มีระบบจัดวางเรียงเส้นใยนำแสงในระบบและไม่เป็นระเบียบก็มีความยุ่งยาก การใช้เทคนิคแม่พิมพ์นูนในงานวิจัยของ Jin Tae Kim และคณะดังกล่าวนี้จึงเป็นการอุปกรณ์ช่วยจัดวางช่องแสงให้มีประสิทธิภาพดังมีการตีพิมพ์ในวารสารทางโฟโตนิกส์ตั้งเอกสารอ้างอิงข้างต้น หลังจากนั้นในปี ค.ศ. 2004 J. Mazuno และคณะจากมหาวิทยาลัยในเมืองโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น ได้สร้างแม่พิมพ์นูนจากซิลิกอน [12] โดยการกัดแม่พิมพ์ด้วยกระบวนการ RIE โดยสร้างหน้ากากและเปิดช่องส่วนที่เป็นโครงสร้างที่ต้องการ จากนั้นนำไปกัดให้เป็นร่องและจากนั้นนำมาอัดพิมพ์ลงบนพลาสติกชนิดพีเอ็มเอเอ็มเอ เพื่อให้เกิดร่องเป็นช่องของไหลแล้วนำไปประกบติดกับพลาสติกเปล่าอีกครั้งและกลายเป็นชิปสำหรับประยุกต์ใช้งานทางระบบของไหลจุลภาค การดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ทำในเครื่องอัดพิมพ์ขนาดใหญ่และทันสมัยซึ่งงานการผลิตจากงานวิจัยที่กัดด้วยกระบวนการ RIE นี้เมื่อนำไปอัดพิมพ์จะได้ปริมาณมากดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงดูเหมือนจะเป็นงานวิจัยกลุ่มแรกๆที่สร้างแม่พิมพ์นูนแบบร้อนที่มีลักษณะประยุกต์ใช้งานเชิงอุตสาหกรรม

2.1.2 แม่พิมพ์นูนจากวัสดุซิลิกอน

การพัฒนาแม่พิมพ์แบบซิลิกอนถึงแม้จะสามารถใช้งานเป็นแม่พิมพ์นูนได้แต่ก็มีข้อจำกัดเรื่องเปราะและแตกง่ายและมักสร้างได้เฉพาะในระบบที่มีการกัดแม่พิมพ์ด้วยวิธีการกัดแห้งและกัดเปียกเป็นส่วนใหญ่ซึ่งเป็นข้อจำกัดหรือข้อเสียของแม่พิมพ์ดังกล่าวจากนั้นนักวิจัยจึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการสร้างไมโครโมลด์หรือแม่พิมพ์นูนระดับไมครอนแบบใหม่ขึ้น โดยพัฒนาเทคนิคการทำแม่พิมพ์ให้หลากหลายขึ้น การพัฒนามาเป็นแม่พิมพ์นูนที่สร้างมาจากซิลิกอนแทนซิลิกอนโดยแม่พิมพ์นี้ส่วนใหญ่ทำมาจากกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โฟโตนิกส์ โดยพบว่าในต้นปี ค.ศ. 2006 Liqun Du และคณะจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีแห่งเมืองดาเหลียน ประเทศจีน ได้ทำการสร้างแม่พิมพ์นูนที่เป็นโลหะซิลิกอน [13] โดยนอกจากลดความเสียหายของแม่พิมพ์นูนจะเป็นโลหะแล้วยังทำบนซับสเตรทที่เป็นโลหะอีกด้วยโดยเป็นวัสดุซับสเตรทหรือฐานรองเป็นสแตนเลส วิธีการสร้างคือจะนำเอซยู-8 สร้างลงบนแผ่นโลหะจากนั้นแล้วนำไปสร้างหน้ากากและฉายแสงให้เกิดโครงสร้างที่ได้ออกแบบไว้ จากนั้นนำโครงสร้างที่เกิดจากเอซยู-8 นั้นไปเข้ากระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โฟโตนิกส์ซึ่งจะได้โครงสร้างของโลหะซิลิกอนติดบนซับสเตรทสแตนเลสเมื่อกำจัดโฟโตรีซิสที่เป็นเอซยู-8 ออกก็จะได้แม่พิมพ์นูนร้อนที่เป็นแม่พิมพ์ขนาดเล็กและพร้อมที่จะนำไปใช้งาน ในระยะเวลาใกล้เคียงกันนั้น ในต้นปี ค.ศ. 2006 เช่นกันได้มีการวิจัยชื่อ Rean-Der Chien ที่สถาบันเทคโนโลยีนันทยา ในประเทศไต้หวัน ได้สร้างแม่พิมพ์ลายนูนร้อนที่เป็นซิลิกอนผสมโครเมียม [14] โดยมีเทคนิคการสร้างคือใช้ซับสเตรทเป็นแผ่นซิลิกอนและสร้างโฟโตรีซิสที่เป็นแบบเอซยู-8 ขึ้นมาบนแผ่นซิลิกอน จากนั้นก็นำไปทำลวดลายของโครงสร้างแม่พิมพ์ในกระบวนการการลิโทกราฟี เมื่อฉายแสงเสร็จและอบตามขั้นตอนจากนั้นล้างด้วยน้ำยาดีเวลอปเปอร์ให้เหลือโครงสร้างของเอซยู-8 ที่มีช่องว่างบนแผ่นซิลิกอนพร้อมที่จะนำไปทำในกระบวนการเคมี จากนั้นนำชิ้นงานไปเข้ากระบวนการทางอิเล็กทรอนิกส์โฟโตนิกส์หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่ากระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งการสร้างแม่พิมพ์ในกระบวนการที่ใช้ยาเคมีลักษณะนี้จะเกิดแม่พิมพ์ที่เป็นโลหะชนิดซิลิกอนผสมกับโครเมียมและลอกออกมาใช้เป็นแม่พิมพ์นูนโลหะที่พร้อมจะเป็นแม่พิมพ์เพื่อทำการอัดพิมพ์บนพีเอ็มเอเอ็มเอให้เป็นระบบช่องของไหลจุลภาคสำหรับงานแล็บส์ออนชิป งานนี้นักวิจัยนำไปใช้งานในด้านการทดสอบดีเอ็นเอหรืองานทาง “ดีออกซีไรโบนิวคลีอิก แอซิด” (Deoxyribonucleic acid) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Acid) และทดสอบงานด้านอาร์เอ็นเอหรืองานด้าน “ไรโบนิวคลีอิก แอซิด” (Ribonucleic Acid) ซึ่งคล้ายกับดีเอ็นเอแต่ซับซ้อนกว่าเพราะใช้สารดังกล่าวเป็นสารพันธุกรรมแทนดีเอ็นเอของกลุ่มเชื้อไวรัสที่มีความซับซ้อน หลังจากนั้นในกลางปี ค.ศ. 2006 X.C. Shan และคณะ จากสถาบันเทคโนโลยีด้านโรงงาน หรือ “SIMTech” แห่งประเทศสิงคโปร์ ได้ทำการทดลองทำแม่พิมพ์นูนที่ทำมาจากนิเกิล [15] สำหรับมาประยุกต์ใช้เป็นกระจกเล็กๆในการสวิตซ์แสงโดยทำเป็นช่องแสงขนานกันในแนวแกน x และแนวแกน y และออกแบบให้กระจกเล็กๆทำงานร่วมกับคานขนาดเล็กที่สามารถป้อนกระแสให้ขยับขึ้นลงเพื่อสวิตซ์แสงไปยังเอาต์พุตได้ บริเวณด้านอินพุตและเอาต์พุตจะติดตั้งโฟเบอร์ออฟติกส์และติดตั้งเลนส์กลม เพื่อการส่งสัญญาณแสงและปรับระยะการส่งได้ตามต้องการ การใช้แม่พิมพ์นูนเพื่อสร้างงานลักษณะนี้ใช้วิธีสร้างแม่พิมพ์นูนต้นแบบที่เป็นซิลิกอนโดยตรงโดยการกัดให้เป็นรูปตามที่ต้องการและนำไปเข้าในกระบวนการอิเล็กโทรเพลทติ้งซึ่งนิเกิลจะเกาะเป็นรูปร่างต้นแบบแต่มีลวดลายด้านตรงกันข้ามกัน ซึ่งหากดึงแม่พิมพ์ออกแล้วจะได้แม่พิมพ์นูนเป็นนิเกิลที่พร้อมจะนำไปอัดรีดลงบนพลาสติก ในการวิจัยนี้ใช้พลาสติกชื่อโพลีคาร์บอนเนตซึ่งเป็นผลดีคือได้ชิ้นงานที่ลดต้นทุนในการสร้างอุปกรณ์ หลังจากนั้นในต้นปี ค.ศ. 2007 Sung-Hoon Hong และคณะจากมหาวิทยาลัยเกาหลี ประเทศเกาหลี ได้สร้างแม่พิมพ์นูนที่ทำมาจากวัสดุนิเกิล [16] โดยทำในกระบวนการอิเล็กโทรฟอร์ミングโดยเริ่มต้นทำจากแบบจากวัสดุซิลิกอนแล้วนำไปกัดให้ได้รูปร่างลักษณะเป็นช่องของไหลจุลภาคตามที่ต้องการ จากนั้นนำแม่พิมพ์ที่เป็นซิลิกอนนี้ไปอัดพิมพ์ลงบนแผ่นพีวีซี (Polyvinyl chloride) ที่เตรียมไว้ซึ่งจะได้ลวดลายตามซิลิกอนจากแผ่นตั้งต้น จากนั้นนำแผ่นพีวีซีที่ได้ดังกล่าวมาเคลือบน้ำยาให้มีลักษณะพร้อมนำไปเข้าในกระบวนการอิเล็กโทรเพลทติ้ง ซึ่งหลังจากเข้ากระบวนการดังกล่าวนิเกิลจะเกาะกันเป็นชั้นแม่พิมพ์ที่หนาพอสมควรเมื่อลอกนิเกิลดังกล่าวออกแล้วจะได้แม่พิมพ์นิเกิลที่พร้อมจะใช้งาน การนำเสนองานการสร้างแม่พิมพ์นูนดังกล่าวมีข้อดีคือถ้าใช้วิธีการดังกล่าวนี้นักวิจัยสามารถสร้างให้แม่พิมพ์มีขนาดเล็กระดับ 50 นาโนเมตรได้

2.1.2 แม่พิมพ์นูนจากวัสดุอื่นๆ

การสร้างแม่พิมพ์นูนแบบอื่นๆที่ใช้เทคโนโลยีให้แม่พิมพ์มีขนาดเล็กระดับไมโครนอกเหนือจากแม่พิมพ์แบบออลูมิเนียมที่กัดขนาดใหญ่แล้วยังมีแม่พิมพ์ที่สร้างจากโฟโตรีซิสโดยที่ทำงานจากเนื้อโฟโตรีซิสที่ได้จากการฉายแสงซึ่งหลังจากศึกษาแม่พิมพ์ที่ได้จากการพัฒนาแม่พิมพ์นูนแบบอื่นๆที่น่าสนใจคือแม่พิมพ์จากพลาสติกแข็งบางชนิดกล่าวคือ ในต้นปี ค.ศ. 2005 Terry Koerner และคณะจากมหาวิทยาลัยควีนส์ จากประเทศแคนาดา ได้สร้างแม่พิมพ์นูนแบบใหม่ที่ใช้พลาสติกแข็งเป็นแม่พิมพ์ เขาได้ใช้พลาสติกที่เรียกตามท้องตลาดว่า “อีพอร์กซี” เป็นแม่พิมพ์ [17] โดยมีกรรมวิธีและกระบวนการในการสร้างแม่พิมพ์คือเริ่มต้นสร้างจากสารโฟโตรีซิสชื่อ เอชยู-8 เพื่อจะนำไปเป็นแม่แบบให้พีดีเอ็มเอช จากนั้นนำพีดีเอ็มเอชที่สะอาดและไม่มีฟองอากาศที่ได้เตรียมไว้เรียบร้อยแล้วนั้นเทลงบนแม่พิมพ์แล้วรอให้แห้งจากนั้นลอกออก จากนั้นเตรียมอีพอร์กซีใหม่แล้วนำอีพอร์กซีเทลงในพีดีเอ็มเอชที่มีรีจรอยอีกทีหนึ่ง เมื่อทำให้อีพอร์กซีแห้งแล้วจึงลอกเอาพีดีเอ็มเอชออกและนำอีพอร์กซีดังกล่าวไปทำเป็นแม่พิมพ์นูนต่อไป การสร้างแม่พิมพ์แบบนี้นอกจากจะราคาประหยัดแล้วยังสามารถทำได้รวดเร็วมากโดยกระบวนการในสร้างแม่พิมพ์แบบนี้ใช้เวลาแค่ 2 ถึง 4 วันเท่านั้น การสร้างแม่พิมพ์ดังกล่าวนี้ นักวิจัยได้ทดสอบอัดพิมพ์ลงบนวัสดุพลาสติกที่เรียกว่าวัสดุพีเอ็มเอ็มเอ การอัดพิมพ์ดังกล่าวนี้ใช้ก็จะมีข้อจำกัดและหลักการที่สำคัญคือจะต้องให้พีเอ็มเอ็มเอร้อนและอ่อนตัวเต็มที ก่อนจึงจะสามารถนำแม่พิมพ์อีพอร์กซีนี้ไปอัดพิมพ์ได้เพื่อให้พลาสติกเป็นรูปร่างตามต้องการ ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยนี้ได้ทดสอบการอัดพิมพ์พลาสติกให้เป็นช่องของไหลจุลภาคขนาดเล็กเพื่อเป็นการนำไปใช้ในงานระบบแลกเปลี่ยนไอออนที่กำลังเป็นที่สนใจของนักวิจัยทั่วไปในขณะนี้

2.2 ลักษณะของแม่พิมพ์หมุนที่สร้างขึ้นใหม่

การสร้างโครงสร้างที่เล็กมากระดับไมโครเมตรและมีความละเอียดสูงบนวัสดุต่าง ๆ นั้น โดยเฉพาะในวัสดุที่เป็นซิลิกอนและแก้วนิยมทำในกระบวนการทางเคมีเช่น กระบวนการกัดวัสดุแบบแห้งและกระบวนการกัดวัสดุแบบเปียกเป็นต้น วิธีการดังกล่าวนี้จะได้โครงสร้างขนาดไมโครเมตรที่ละเอียดแต่เวลาที่ใช้สำหรับการกัดหรือเจ็ชนั้นช้ามาก อาจใช้เวลานานหลายวันและอัตราที่ได้อาจแค่ระยะประมาณ 1-10 ไมโครเมตรต่อนาทีเท่านั้นเอง จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ชนิดอื่นสนับสนุนเช่น กระบวนการทางไมโครแพริเคชันซึ่งสำคัญอย่างมากเพื่อให้งานสำเร็จอย่างสมบูรณ์ การวิจัยในลักษณะนี้จำเป็นต้องมีระบบความปลอดภัยทางเคมี บางครั้งถ้าเป็นงานที่มีความละเอียดสูงและป้องกันฝุ่นเกาะติดในขณะสร้างแม่พิมพ์เพื่อฉายแสงนั้นจำเป็นต้องมีห้องที่สะอาดหรือห้องคลีนรูม เพื่อให้ชิ้นงานสะอาดและตรงตามแบบมาตรฐาน การสร้างแม่พิมพ์จากนิเกิลหรือโลหะนั้นส่วนใหญ่สร้างจากกระบวนการอิเล็กโทรฟอร์มมิงหรืออิเล็กโทรเพลทติงซึ่งกระบวนการสร้างแม่พิมพ์หมุนที่กล่าวมานั้นขนาดของความสูงของแม่พิมพ์อาจทำได้ไม่สูงมากนักเนื่องจากเป็นข้อจำกัดของอุปกรณ์โฟโตรีซิสและการฉายแสง นั่นคือถ้าโฟโตรีซิสทำได้หนาเท่าใดขนาดความลึกของแม่พิมพ์ที่ได้ก็จะมีขนาดใกล้เคียงกับโฟโตรีซิสนั้นเนื่องจากกระบวนการเคมีนั้นสร้างหรือก่อตัวระหว่างโฟโตรีซิสนั้น นอกจากนี้กระบวนการทางเคมีเพื่อสร้างแม่พิมพ์นั้นก็มีข้อจำกัดเรื่องความเร็วและความแม่นยำเช่นกัน ดังนั้นจึงได้หาวิธีการและศึกษาเพื่อสร้างแม่พิมพ์แบบใหม่ด้วยวิธีการที่มีการพ่นด้วยผงอนุภาค (Powder Blasting) ที่มีความละเอียดสูงเพื่อรองรับการใช้แม่พิมพ์หมุนแบบร้อนที่เป็นโลหะ การใช้วิธีการพ่นอนุภาคนั้นไม่เพียงแต่ใช้ในการสร้างแม่พิมพ์ที่เป็นโลหะเท่านั้นแต่ยังสามารถใช้กับวัสดุทุกประเภทที่สามารถแตกหรือกระเทาะจากพลังงานจลน์ที่มาจากการพุ่งชนของผงอนุภาคได้ โดยมีผู้เชี่ยวชาญและผู้ศึกษาและนำเทคนิคการพ่นอนุภาคไปประยุกต์ในงานต่างแล้วซึ่งก็ได้ผลดีดังที่อ้างอิงไว้แล้ว [18-20]

เทคโนโลยีการพ่นอนุภาคด้วยผงอนุภาคที่มีความละเอียดสูงนั้นเป็นเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจมาก เนื่องจากสะดวกประหยัดใช้งานง่ายและค่าใช้จ่ายไม่แพง สามารถนำไปพ่นเพื่อกัดเซาะเอาสิ่งที่ไม่ต้องการออกหรือทำความสะอาดชิ้นงานก็ได้ การพ่นอนุภาคนั้นมีวิธีการให้เกิดริ้วรอยหลายวิธีเช่น วิธีการพ่นด้วยเม็ดแก้วขนาดเล็ก (Glass Bead) พ่นด้วยผงอนุภาคช็อบราวน์อลูมิเนียมออกไซด์ (Brown Aluminum Oxide) และพ่นด้วยผงอนุภาคยี่ห้อไวท์อลูมิเนียมออกไซด์ (White Aluminum Oxide) เป็นต้น ริ้วรอยบนโครงสร้างขนาดเล็กนั้นเกิดขึ้นมาจากหน้ากาก การเลือกใช้ผงอนุภาคที่มีความละเอียดสูงนั้นจำเป็นต้องใช้หน้ากากที่เป็นโฟโตรีซิสโดยเฉพาะชิ้นงานที่เล็กกว่า 100 ไมโครเมตร โฟโตรีซิสที่พบในห้องตลาดที่เราคุ้นเคยนั้นเป็นแบบแผ่นและรีดทับบนซับสเตรทเพื่อฉายแสงได้ทันที ข้อจำกัดของหน้ากากที่เป็นโฟโตรีซิสเป็นแผ่นลักษณะเช่นนั้นวัสดุมีคุณสมบัติคล้ายแผ่นพลาสติกจึงไม่ทนต่อการกัดกร่อนในระบบการพ่นผงอนุภาคเนื่องจากเมื่อมีการพ่นไม่นานนักโฟโตรีซิสเหล่านั้นก็จะสึกหรอนหายไปทำให้ได้ริ้วรอยของชิ้นงานที่ได้มีค่าความสูงไม่มากนัก สำหรับโฟโตรีซิสชื่อ เอชยู-8 มีคุณสมบัติเด่นคือสามารถสร้างให้สูงหรือมีความหนาได้โดยการสปินหรือหมุนเหวี่ยงเคลือบบนซับสเตรทและหากทำให้โฟโตรีซิสมีความสูงมากก็สามารถฉายแสงให้หนาขึ้นหรือถ้ามีความสูงในระดับ 1 มิลลิเมตรขึ้นไปก็สามารถฉายแสงขึ้นโครงตรอนได้และเนื่องจากคุณสมบัติของเอชยู-8 ที่สามารถสร้างหน้ากากให้หนาได้ดีแล้วหากมีความต้องการให้มีขนาดเล็กก็ยังสามารถสร้างให้โครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีขนาดเล็กระดับนาโนได้เช่นกันซึ่งหากพิจารณาร่วมกับคุณสมบัติของโพลีไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane) หรือพีดีเอ็มเอช (PDMS) ที่สามารถเคลงในรีวอร์อยในระดับนาโนได้แล้ว อีกทั้งคุณสมบัติของพีดีเอ็มเอชที่ทนต่อการกัดเซาะของผงอนุภาคระดับนาโนได้เป็นอย่างดีจึงได้นำเทคนิคการเทพีดีเอ็มเอชลงในหน้ากากเอชยู-8 เพื่อเป็นหน้ากากบังอนุภาคที่มีความละเอียดสูงเพื่อมาใช้ประโยชน์ร่วมกัน การสร้างแม่พิมพ์พูนด้วยเทคโนโลยีการพ่นอนุภาคที่มีความละเอียดสูงในปัจจุบัน มีเฉพาะการสร้างที่ทำมาจากวัสดุแก้ว ในบทความนี้จึงนำเสนอวิธีการใหม่ของการสร้างแม่พิมพ์พูนจากวัสดุโลหะที่เป็นสแตนเลสสตีลเพื่อประยุกต์ใช้ในทางอุตสาหกรรมและเพื่องานวิจัยที่ต้องการแม่พิมพ์โลหะที่แข็งแรงและมีความละเอียดสูงซึ่งจะช่วยลดปัญหาการเปราะบางของแม่พิมพ์จากวัสดุแก้วช่วยแก้ปัญหาข้อจำกัดเรื่องความคลาดเคลื่อนและข้อจำกัดเรื่องความสูงจากแม่พิมพ์ที่สร้างจากโฟโตรีซิสต์ด้วยวิธีการอื่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

3.1 แลปส์ออนชิป

แลปส์ออนชิป เป็นอุปกรณ์สำหรับการวัดวิเคราะห์ทางชีวเคมีขนาดเล็กที่ได้ออกมาลักษณะการทำงานของกระบวนการในห้องแลปส์มาไว้ในชิปเล็กๆชิปเดียวโดยชิปนั้นมีขนาดเล็กตั้งแต่ระดับมิลลิเมตรจนถึงระดับเซนติเมตรและสามารถจัดการหรือควบคุมของเหลวปริมาณเล็กน้อยจนถึงปริมาณน้อยมากระดับพิโคลิตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ อุปกรณ์แลปส์ออนชิปนั้นได้มีการนำไปใช้ร่วมกับอุปกรณ์ที่เป็นระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS) เพื่อประยุกต์ใช้งานซึ่งอาจจะเรียกงานดังกล่าวว่าเป็นระบบการวิเคราะห์รวมระดับไมโคร (μ TAS) แลปส์ออนชิปนี้มีความเกี่ยวข้องและสัมพันธ์กันกับระบบของไหลจุลภาค (Microfluidic) เนื่องจากเป็นงานที่อธิบายลักษณะทางกายภาพที่คล้ายกันโดยเฉพาะการศึกษาของเหลวปริมาณน้อยๆ อย่างไรก็ตามสิ่งที่จะเป็นแลปส์ออนชิปจริงนั้นควรจะเป็นการนำกระบวนการในห้องแลปส์ทั้งที่เป็นกระบวนการเดียวหรือหลายกระบวนการเพื่อย่อขนาดนำไปไว้ในรูปแบบที่เป็นชิปขนาดเล็ก เทคโนโลยี“ไมโครฟลัส”หรือระบบการวิเคราะห์รวมระดับไมโครนั้นเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่ใช้มาเกี่ยวข้องกับแลปส์ออนชิปซึ่งหากจะเทียบ“ไมโครฟลัส”กับ“แลปส์ออนชิป”ก็อาจจะกล่าวได้ว่าไมโครฟลัสนั้นมีจุดประสงค์ที่เน้นการวิเคราะห์กระบวนการทางเคมีเป็นส่วนมากซึ่งต่างจากแลปส์ออนชิปที่เป็นเทคโนโลยีที่ใช้งานกว้างกว่า

3.1.1 ที่มาของแลปส์ออนชิป

การประดิษฐ์งานที่เป็นเทคโนโลยีระดับไมโครเมตรในช่วงประมาณปี ค.ศ.1954 นั้นหลังจากที่ได้พัฒนาและสร้างวงจรรวมจากสารกึ่งตัวนำที่เป็นลักษณะชิปขนาดเล็กหรือที่นิยมเรียกว่าไมโครอิเล็กทรอนิกส์ชิปแล้วนั้น ต่อมาได้มีการสร้างเซ็นเซอร์วัดความดันที่ใช้เทคโนโลยีโฟโตลิโทกราฟีในปี ค.ศ.1966 แต่เนื่องจากเทคโนโลยีดังกล่าวมีข้อจำกัดในการใช้ร่วมกับอุปกรณ์ที่เป็นซีมอส (CMOS) จึงได้มีผู้ศึกษาการสร้างอุปกรณ์ขนาดเล็กระดับไมโครเมตรที่มีโครงสร้างทางกลอยู่ในแผ่นซิลิกอนจึงเป็นการเริ่มต้นการสร้างเทคโนโลยีไมโครซิสเต็ม (MST) และเทคโนโลยีระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS) ในเวลาต่อมา การสร้างเทคโนโลยีดังกล่าวในกระบวนการทางไมโครแพบริเคชันที่มีวัสดุอื่นร่วมกับสารกึ่งตัวนำนั้นทำให้มีอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติทางกลนั้นใช้งานร่วมกับวงจรรวมได้อย่างดีซึ่งทำให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีดังกล่าวตามมามากมายและสามารถพัฒนาให้สามารถใช้ร่วมกับแลปส์ออนชิปได้ต่อไป งานทางแลปส์ออนชิปมีการพัฒนาและเติบโตอย่างจริงจังในช่วงปลายปี ค.ศ.1980 ถึงต้นปี 1990 โดยกลุ่มนักวิจัยในยุโรปเป็นส่วนใหญ่เพราะมีการพัฒนาไมโครปั๊ม พัฒนาเซ็นเซอร์วัดการไหล พัฒนาระบบการจัดการและวิเคราะห์ของเหลว [21] โดยสร้างอุปกรณ์เพื่อการวิเคราะห์ระดับไมโครเมตรทั้งหมดแทนการทำแบบเดิมที่ทำในห้องปฏิบัติการ เทคโนโลยีทางแลปส์ออนชิปมีการพัฒนาเป็นเชิงพาณิชย์เมื่อช่วงกลางปี ค.ศ.1990 เมื่อมีงานในกลุ่มประเภทเทคโนโลยีการวิเคราะห์รวมระดับไมโครซึ่งได้มีการสร้างเครื่องมือสำหรับการใช้ประโยชน์ทางจีโนม เช่น คอปิลลารีอิเล็กทรอนิกส์ โพรเซส และระบบไมโครดีเอ็นเอ จึงทำให้มีผู้สนใจและได้รับสนับสนุนมากจากหน่วยงานทางทหารของสหรัฐโดยเฉพาะสำนักงานโครงการวิจัยขั้นสูงของกระทรวงกลาโหมสหรัฐฯ (DARPA) นั้นได้ให้ความสนใจระบบตรวจวัดทางชีวเคมีแบบพกพาสำหรับเจ้าหน้าที่ในภารกิจสงคราม โครงการดังกล่าว

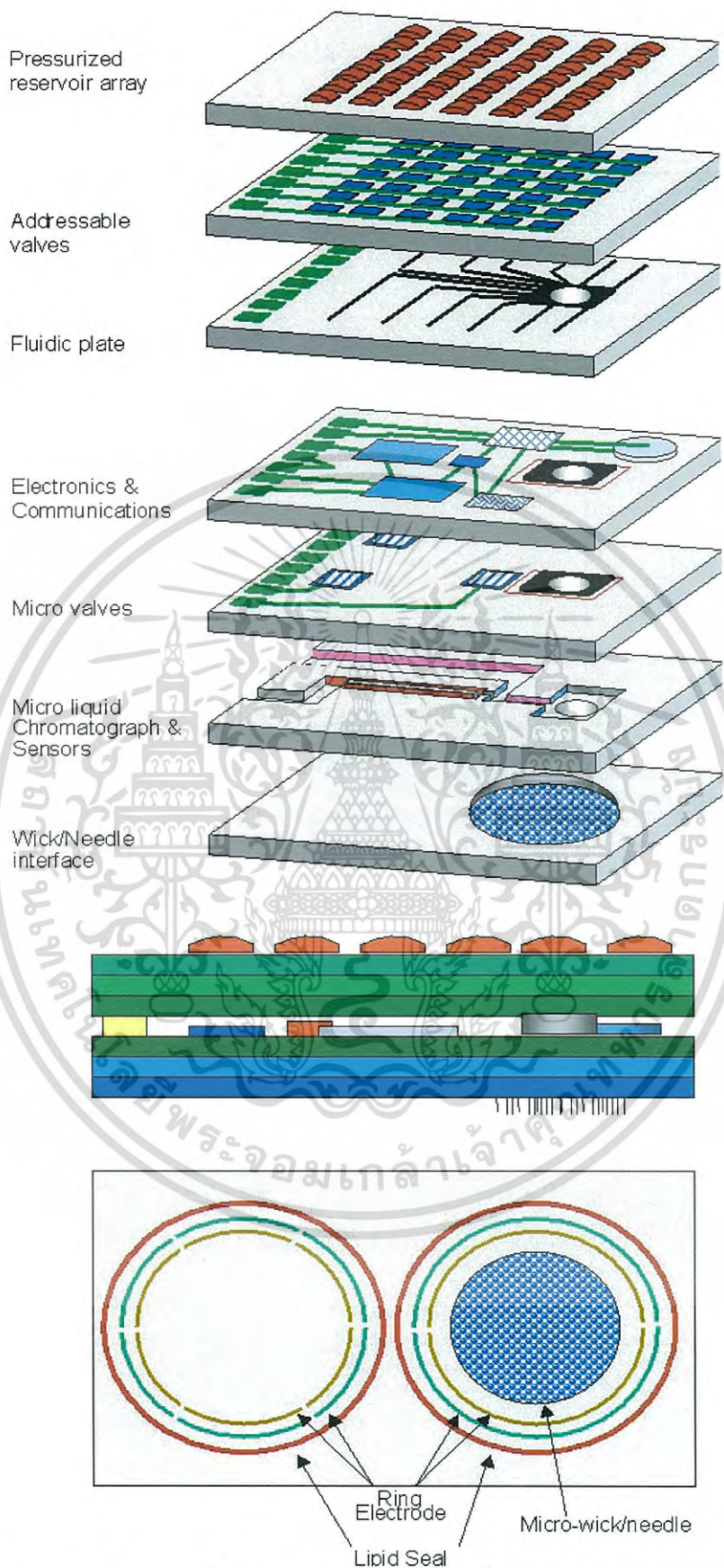
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่เพียงแต่ให้ทุนสนับสนุนการสร้างแลปส์ออนชิปเชิงย่อกะบวนการตรวจวัดไว้ในชิปเพียงอย่างเดียวเท่านั้นแต่ยังรวมถึงการสนับสนุนให้ศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างแลปส์ออนชิปลักษณะอื่นๆอีกด้วย ซึ่งการสนับสนุนโครงการดังกล่าวนี้ชื่อของ “แลปส์ออนชิป” จึงเป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลายในเวลาต่อมา

3.1.2 องค์ประกอบของแลปส์ออนชิป

การประดิษฐ์แลปส์ออนชิปนั้นจะเป็นการรวมอุปกรณ์ต่างๆ เข้าด้วยกันเพื่อทำหน้าที่เสมือนห้องแลปส์หนึ่งซึ่งระบบหรือกระบวนการเพื่อให้สามารถทำงานได้นั้นอาจจะรวมเอาหน้าที่การทำงานของอุปกรณ์ที่ไม่เหมือนกัน ให้มารวมกันในชิปเดียวเพื่อให้ได้ผลในตอนที่ทำงานนั้นตามจุดประสงค์ที่เราต้องการ การทำงานเชิงการวัดวิเคราะห์ของแลปส์ออนชิปก็มีทั้งการทำงานที่อาจวิเคราะห์แบบธรรมดาและระบบการทำงานที่ซับซ้อน โดยในแต่ละชุดอุปกรณ์นั้นก็อาจมีการออกแบบระบบที่ต่างกัน วัสดุหรือกรรมวิธีที่แตกต่างกันและอาจสร้างในกระบวนการที่ไม่เหมือนกันเพื่อที่จะนำมาประกอบเป็นระบบแลปส์ออนชิป แลปส์ออนชิปบางตัวอาจประกอบด้วยไมโครวาล์ว [22-24] ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ช่องที่กัดให้เป็นรูปแบบต่างๆ ช่องกักเก็บของไหล [25] และช่องของไหลจุลภาค [26] ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวอาจสร้างหรือแพ็คเกจมาจากวัสดุซิลิกอน วัสดุแก้ว วัสดุโลหะและอาจเป็นวัสดุโพลีเมอร์ก็ได้ หากเราพิจารณาแลปส์ออนชิปกับอุปกรณ์ที่เป็นระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคและอุปกรณ์ระบบของไหลจุลภาคแล้วอาจมีความใกล้เคียงกันในด้านการใช้งาน จากผลงานการวิจัยทั่วไปในเรื่องดังกล่าวจึงอาจกล่าวได้ว่าระบบของไหลจุลภาคนั้นเป็นอุปกรณ์หนึ่งที่น่าไปใช้ในระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคหรืออาจใช้เป็นองค์ประกอบหลักในแลปส์ออนชิป และในขณะเดียวกันระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคก็อาจเป็นอุปกรณ์หลักที่ประกอบในระบบของแลปส์ออนชิป ดังนั้นหากกล่าวถึงแลปส์ออนชิปที่รวมและย่อเอากระบวนการในห้องปฏิบัติการมารวมไว้ในชิปจึงเป็นเรื่องที่กว้างและมีหลากหลายศาสตร์มาเกี่ยวข้อง เพื่อให้เห็นภาพถึงแลปส์ออนชิปที่รวมเอาอุปกรณ์หลายๆอย่างมารวมกันจึงขอนำเอางานวิจัยของเช็คคา บานสารีและคณะ [27] จากมหาวิทยาลัยเซาท์ฟลอริดาที่ร่วมวิจัยกับมหาวิทยาลัยซินซินเนติ รัฐโอไฮโอประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งกลุ่มนักวิจัยดังกล่าวได้ทำการวิจัยเรื่องหัววัดสำหรับตรวจข้อมูลเชิงชีวภาพผ่านผิวหนังของมนุษย์โดยใช้เซ็นเซอร์ที่เป็นระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคในบทความดังกล่าวได้จำลองและแสดงการรวมอุปกรณ์ต่างๆเพื่อประกอบรวมกันเป็นแลปส์ออนชิปที่ประกอบไปด้วยอะเรย์สำหรับกักเก็บของไหล ระบบไมโครวาล์ว แผ่นชุดที่เป็นช่องของไหล ชุดอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ ระบบเซ็นเซอร์และไมโครลิควิดโครมาโทกราฟีเพื่อแยกสารโดยการให้สารนั้นผ่านเข้าไปในวัสดุที่มีรูพรุนเพื่อแยกสารออกจากกัน นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์อื่นๆ เพื่อประกอบเป็นแลปส์ออนชิปดังในรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ภาพจำลองของต้นแบบระบบแลปส์ออนชิปที่มีอุปกรณ์ร่วมหลายชนิด [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 ประโยชน์ของแลปส์ออนชิป

แลปส์ออนชิปเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่ใช้งานได้จริง มีองค์กรต่างๆให้ความสนใจและนักวิจัยก็ตื่นตัวต่อการศึกษาวิจัยโดยมีการศึกษาวิจัยหลากหลายเช่น การวิเคราะห์ทางเคมี การวัดวิเคราะห์สิ่งแวดล้อม การวิเคราะห์โรคในทางการแพทย์ และศึกษาวิเคราะห์ทางเซลล์ นอกจากนี้ยังใช้งานทางการแพทย์เคมี การนำไปประยุกต์เพื่อพัฒนาด้านอื่นๆ เช่น งานวิจัยในระบบแลปส์ออนชิปเพื่อลดขนาดของเหลว งานวิจัยทางนาโนเทคโนโลยี งานวิจัยช่องของไหลจุลภาคทั้งระดับไมโครและระดับนาโน การวิจัยความซับซ้อนของดีเอ็นเอ การวิจัยทางการแพทย์เซลล์เดียวและการวิจัยนาโนเซนเซอร์ เป็นต้น การเริ่มต้นสร้างแลปส์ออนชิปนั้นกระบวนการที่สำคัญที่สุดที่จำเป็นต้องใช้คือโฟโตลิโทกราฟีซึ่งอาจใช้งานร่วมกับวัสดุซิลิกอนซึ่งขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ในการสร้างอุปกรณ์นั้น การสร้างแลปส์ออนชิปนั้นอาจมีการสร้างและใช้งานแตกต่างกันเช่นใช้งานทางแสง ใช้งานทางชีวภาพหรืออาจใช้สำหรับงานทางเคมี ดังนั้นกระบวนการผลิตหรือต้นทุนในการผลิตอุปกรณ์ดังกล่าวจึงต่างกันไปตามลักษณะการสร้าง อย่างไรก็ตามได้มีการพัฒนาเทคนิคการสร้างแบบใหม่เพื่อพัฒนาแลปส์ออนชิปเช่น พัฒนาการกักตัวสกุแก้ว วัสดุเซรามิกส์ และวัสดุที่เป็นโลหะ การเคลือบ การเชื่อมต่วัสดุโพลิเมอร์ประเภทพีดีเอ็มเอส การสร้างเป็นฟิล์มหนา การสร้างเชิงสเตอริโอลิโทกราฟี รวมไปถึงพัฒนาวิธีการทำซ้ำแบบรวดเร็วด้วยวิธีการชุบด้วยไฟฟ้า การฉีดยาขึ้นรูป การทำให้แม่พิมพ์หมุน เป็นต้น ทำให้เทคโนโลยีดังกล่าวมีการพัฒนาดีขึ้นตามลำดับ การใช้งานแลปส์ออนชิปนั้นเมื่อนำไปใช้งานจะมีคุณลักษณะพิเศษที่ให้ข้อดีคือการตรวจวัดและเวลาตอบสนองเร็วขึ้นเนื่องจากกระยะการแพร่สั้น การส่งผ่านความร้อนก็ทำได้เร็วขึ้นกว่าระบบขนาดใหญ่ มีอัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรนั้นสูงและมีความจุของปริมาณความร้อนน้อยทำให้การทดลองได้ผลดี หากเทียบกับการควบคุมกระบวนการแบบทั่วไปแล้วแลปส์ออนชิปจะควบคุมกระบวนการดีกว่าเพราะการตอบสนองของระบบนั้นเร็วขึ้น เช่น การควบคุมความร้อนทางปฏิกิริยาเคมีแบบคายความร้อนก็จะได้ผลดีกว่า ขนาดของแลปส์ออนชิปนั้นมีขนาดเล็กมีปริมาตรน้อยจึงทำให้สามารถทำหน้าที่หลายอย่างในชุดอุปกรณ์เดียว ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้อย่างมากมายในคราวเดียวกัน ประกอบกับต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าเพราะผลิตในกระบวนการที่ผลิตได้ครั้งละมากๆจึงทำให้ราคาไม่แพง ทำให้ได้ชิปที่ใช้แล้วสามารถทิ้งได้ นอกจากนี้เทคโนโลยีแลปส์ออนชิปนั้นหากเป็นงานลักษณะที่เป็นสารกัมมันตรังสี สารเคมีและสารชีวภาพที่อันตรายกระบวนการในตัวมันนั้นมีความปลอดภัยมากกว่ากระบวนการทั่วไปในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากในระบบแลปส์ออนชิปมีการรวมกระบวนการเกือบทุกอย่างไว้ในตัวเดียวกัน มีปริมาตรของเหลวน้อยกว่า การกักเก็บพลังงานในอุปกรณ์ก็น้อยกว่า ข้อเสียหรือข้อที่ควรพิจารณาหากมีการใช้งานแล้วแต่ยังเป็นเทคโนโลยีแบบใหม่จึงยังไม่ได้พัฒนาให้สมบูรณ์มากนัก ประกอบกับเทคโนโลยีดังกล่าวเป็นเทคโนโลยีที่มีการใช้ผลทางกายภาพและทางเคมีเช่น แรงทางคอปิลลารี ความหยาบของพื้นผิว ปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น ถึงแม้บางครั้งจะให้ผลการทดลองที่ดีและโดดเด่นกว่าการทดลองในห้องปฏิบัติการแต่เมื่อขนาดเล็กลงแล้วคุณสมบัติบางอย่างอาจเปลี่ยนไป บางกรณีกระบวนการของแลปส์ออนชิปอาจซับซ้อนขึ้นมากกว่าอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการทั่วไปก็ได้ นอกจากนี้การลดขนาดให้เล็กลงมากแล้วนั้นบางกรณีอาจไม่เป็นผลดีจึงต้องพิจารณาด้วยว่าจะมีผลด้านสัญญาณรบกวนด้วยหรือไม่

3.2 ระบบของไหลจุลภาคสำหรับงานแลปส์ออนชิป

ระบบของไหลจุลภาคเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่ใช้เป็นส่วนประกอบของแลปส์ออนชิป งานทางด้านระบบของไหลจุลภาคในช่วงที่ผ่านมาจะมีการตีพิมพ์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องซึ่งตามฐานข้อมูลเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISI Web of Science นั้นพบว่าการศึกษาที่กระจายไปกว่า 40 วารสารนานาชาติและเรื่องดังกล่าวยังนำอ้างอิงในวารสารที่มีชื่อเสียงต่างๆ เช่น Lab-on-chip, Journal of Micromechanics and Microengineering, Microfluidics and Nanofluidics, และ Sensors and Actuators เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการผลิตและจำหน่ายระบบวิเคราะห์ขนาดเล็กที่เกี่ยวข้องนี้ที่นับตั้งแต่ในปี ค.ศ. 2006 [28] มากกว่า 130 บริษัทและสิทธิบัตรทางด้านระบบของไหลจุลภาคที่ออกในประเทศสหรัฐอเมริกา ก็เพิ่มขึ้นอย่างมากแต่ก็เป็นที่น่าทึ่งกันว่าในทางปฏิบัติที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องนำไปทดลองอย่างละเอียดถี่ถ้วนก่อนการนำไปใช้ในงานจริงโดยเฉพาะการใช้งานเชิงสาธารณสุข

3.2.1 ระบบของไหลจุลภาคคืออะไร

ระบบของไหลจุลภาคเป็นเครื่องมือที่สามารถใช้ควบคุมและจัดการปริมาณของของเหลวได้ในหน่วยระดับไมโครลิตร ครั้งแรกๆ ที่ทำการทดลองกับของเหลวในปริมาณระดับนาโนลิตรนั้นเมื่อปี ค.ศ. 1950 และเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทที่เป็นแบบช่องของไหลจุลภาคได้สร้างขึ้นขั้นแรกบนพื้นผิวซิลิกอน และในปี 1979 [29] เมื่อนักวิจัยชื่อ Terry และคณะได้นำเสนอคอลัมน์ที่เป็นลักษณะโครโมโตกราฟี (Chromatographic) ร่วมกับเครื่องตรวจจับก๊าซแบบนำความร้อนและในตอนที่หายของทศวรรษที่ ค.ศ. 1980 งานวิจัยทางไมโครปั๊มและไมโครวาล์วได้ถูกนำเสนอเป็นครั้งแรก [30-31] ซึ่งต่อมาในปี ค.ศ. 1990 นักวิจัยชื่อ Manz ได้สร้างคอลัมน์ของ HPLC ที่มีลักษณะเป็นวัสดุแก้วไปรีดแบบซิลิกอน (Si-Pyrex) นอกจากนี้นักวิจัยคนเดียวกันนี้ได้สร้างเครื่องมือที่เป็นตัวชี้วัดค่าความนำ [32] ซึ่งเขาได้นำเสนอแนวคิดของระบบการวิเคราะห์รวมระดับไมโคร (μ TAS) ในปี 1992 ตั้งแต่นั้นมาก็มีการวิจัยและสร้างเกี่ยวกับตัวแยกหรือแซปเปอร์เรเตอร์ มิกเซอร์ ไมโครฟิลเตอร์ ไมโครวาล์ว และอื่นๆ [33-36] ซึ่งผลงานวิจัยจึงมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทำให้เกิดการตื่นตัวและมีการสนใจทางด้านระบบของไหลจุลภาคกันเป็นจำนวนมากโดยการวิจัยที่พบนั้นเน้นที่อุปกรณ์ราคาถูกและสามารถพกพาได้ง่ายโดยสามารถใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณของสารเคมีที่น้อยมากๆ ได้ หลักการใช้ปริมาณสารเคมีน้อยเป็นสิ่งสำคัญมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งสารที่หายากราคาแพงหรืออาจอันตรายดังนั้นในการวัดระดับไมโครลิตร บางช่วงเวลาซึ่งเป็นผลกระทบทางกายภาพบางอย่างเด่นชัด นอกจากนี้มีนักวิจัยจำนวนมากให้ความสนใจกับเรื่องที่คุณสมบัติรวมทั้งสามารถใช้ร่วมกับงานไมโครแฟบริเคชันได้ด้วย หากสามารถทำได้ดีก็จะ เป็นวิธีพัฒนาด้านชีววิทยาและเทคโนโลยีชีวภาพได้อย่างรวดเร็วและนำเสนอเป็นอย่างยิ่งในระยะยาว โดยเฉพาะงานสำหรับการตรวจสอบระบบระดับไมโครเมตรของกระบวนการทางเคมีเชิงกายภาพและงานทางชีวภาพ เป็นต้น

3.2.2 เทคนิคการแฟบริเคชันระบบของไหลจุลภาค

อุปกรณ์ระบบของไหลจุลภาคที่นำมาสร้างในกระบวนการทางไมโครแฟบริเคชันนั้นโดยทั่วไป อาจทำบนซิลิกอน ทำบนแก้วและบางกรณีอาจทำบนโพลิเมอร์ที่นำไปแปะหรือวางบนแผ่นกลาสไลต์ การทำปั๊มขนาดไมโครเมตรครั้งแรกนั้นทำบนซิลิกอนและปิดผนึกด้วยกระจก [31] ซึ่งแนวโน้มล่าสุด ในการสร้างอุปกรณ์ดังกล่าวจะมุ่งเน้นไปทางการทำในโฟโตลิโทกราฟีเพื่อให้อุปกรณ์มีขนาดเล็กลง [37] หรือ การทำในกระบวนการที่ใช้เอชยู-8 ที่พิมพ์หนา [38] ทำให้การฉายแสงนั้นให้ร่องลึกตื้นกว่า จึงทำให้ ปัจจุบันยังคงทำในกระบวนการไมโครแฟบริเคชันเป็นส่วนใหญ่ การสร้างหรือการแฟบริเคชันระบบของไหลจุลภาคที่ได้ผลดีและเป็นที่ยอมรับนั้นมักทำมาจากวัสดุสองกลุ่มใหญ่ๆ คือกลุ่มที่วัสดุเป็นแก้วกับซิลิกอน และวัสดุโพลิเมอร์ซึ่งรายละเอียดคร่าวๆ มีดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.1 การใช้วัสดุซิลิกอนและแก้ว

การวิจัยเทคโนโลยีระบบของไหลจุลภาคนั้นได้มีการพัฒนาขึ้นโดยการแพบริเคทเพื่อพัฒนาเชิงอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับไมโครโปรเซสเซอร์โดยเฉพาะตั้งแต่ในปี ค.ศ. 1970 ถึง ค.ศ. 1980 ซึ่งได้มีการนำมาประยุกต์ใช้กับเทคนิคและวิธีการใหม่ที่เรียกว่าเทคนิคทางเซิร์ฟเฟสไมโครแมชินและเทคนิคทางเบาที่ไมโครแมชิน งานที่ใช้เทคนิคทางเซิร์ฟเฟสไมโครแมชินนั้นจะใช้ซิลิกอนเป็นหลัก เนื่องจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าและจำเป็นต้องใช้วัสดุตั้งต้นที่มีลักษณะบางเช่น ซิลิกอนไดออกไซด์, ซิลิกอนไนไตรด์, โพลีซิลิกอน เป็นต้น โดยการเพิ่มและการกัดชั้นที่ไม่ต้องการทิ้งเพื่อสร้างงานที่มีโครงสร้างเชิงผิว การสร้างลักษณะนี้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับงานไมโครอิเล็กทรอนิกส์ เทคนิคประการที่สองคือเบาที่ไมโครแมชิน ได้ถูกนำมาใช้เพื่อให้มีโครงสร้างหรือให้มีลวดลายในซิลิกอน การสร้างอาจสร้างเป็นชั้นสำหรับป้องกันหรือสร้างชั้นลวดลายก็ได้ ก็แล้วแต่กรณีไป อาจใช้น้ำยาไวแสงเพื่อนำมาปั่นบนชิ้นงานแล้วนำไปฉายรังสีอุลตราไวโอเล็ตโดยใช้น้ำกากบ่งแสงก่อนที่จะนำไปทำโครงสร้างที่หนาขึ้นกว่าวิธีแรก ซึ่งเทคนิคเซิร์ฟเฟสและเบาที่ไมโครแมชินนั้นจะกล่าวเพิ่มเติมในหัวข้อถัดไป การกัดวัสดุที่เป็นซิลิกอนและแก้วนั้นสามารถทำได้ทั้งแบบเปียกและแบบแห้ง วัสดุแก้วนั้นสามารถกัดแบบไอโซโทรปิกโดยใช้กรดไฮโดรฟลูออริก โปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) หรือสารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) เพื่อกัดวัสดุซิลิกอนซึ่งลักษณะการกัดโครงสร้างนั้นมักเป็นแบบแอนไอโซโทรปิก โดยใช้อัตราการกัดที่แตกต่างกัน ในส่วนการกัดแบบแห้งนั้นพื้นผิวจะถูกกระทำด้วยแก๊สหรืออาจใช้วิธีทางเคมีแบบแห้งเช่นการกัดแบบปฏิกิริยาไอออน หรือแบบ DRIE ซึ่งปัจจุบันก็ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับงานของโครงสร้างที่สูงขึ้น [39] องค์ประกอบของระบบของไหลจุลภาคนั้นจะทำต้นแบบบนกระจกมากกว่าซิลิกอนเพราะกระจกหรือกลาสโกลด์มีข้อดีหลายประการในแง่ของความโปร่งใสและวัสดุตั้งต้นก็เป็นฉนวนกันความร้อนได้อีกด้วย แต่ถ้ามีสนามไฟฟ้าสูงควรจะใช้เทคนิคที่เรียกว่าการกัดเปียกแทน สำหรับเทคนิคอื่นๆ อันได้แก่การพ่นอนุภาค การใช้พลาสมากัดหรือเอ็ดซ์ออกก็เป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถทำได้แต่จะได้พื้นผิวที่มีลักษณะขรุขระมาก [40-43] การใช้แก้วไวแสงบางชนิดที่ทำและผลิตขึ้นโดยบริษัท Schott ก็สามารถนำมากัดหรือเอ็ดซ์ได้แต่ราคาอาจแพงเกินไป อีกเทคนิคหนึ่งคือการกัดลงบนกระจกโดยตรงโดยการกัดที่ใช้กระบวนการรีแอคชัน ไอออน เอ็ดซิง (RIE) แต่ร่องรอยที่ได้ไม่ลึกมากและใช้เวลานานซึ่งเทคนิคดังกล่าวเหมาะสำหรับสร้างช่องของไหลที่มีลักษณะโปร่งแสงและมีขนาดเล็กมาก

3.2.2.2 การแพบริเคทจากเทคโนโลยีโพลีเมอร์

สารโพลีเมอร์นั้นปัจจุบันได้ถูกนำมาใช้สำหรับการผลิตเพื่อเป็นส่วนหนึ่งในระบบของไหลจุลภาคเป็นจำนวนมากเพราะมีราคาถูกกว่าและผลิตง่ายกว่าวัสดุที่เป็นแก้วและวัสดุซิลิกอน นอกจากนี้โพลีเมอร์เป็นวัสดุที่มีอยู่เป็นจำนวนมาก มีลักษณะแตกต่างกันและเป็นเรื่องง่ายที่จะนำไปร่วมกันกับชิ้นงานที่สร้างจากกระบวนการทางไมโครแพริเคชันเพื่อใช้งานเป็นระบบของไหลจุลภาค ข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับวัสดุโพลีเมอร์สามารถพบได้ในหนังสือที่แต่งเมื่อ ค.ศ. 2004 โดยไอเอ็ม วอร์ด และ เจ สเวนนี่หรือแต่งโดยเจอาร์ ยัง และ พีเอ โลเวล [44-45] การใช้งานโพลีเมอร์กับงานแต่ละประเภทนั้นได้เคยมีนักวิจัยได้รวบรวมโพลีเมอร์แต่ละประเภทเพื่อทราบคุณลักษณะการนำไปประยุกต์ใช้งานดังสรุปไว้ในตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 โพลีเมอร์แต่ละประเภทที่ประยุกต์ใช้ในงานของระบบของไหลจุลภาค [46]

	Name	Structure	Characteristics
COC	Cycloolefin copolymer Topas, Zeonor	Amorphous	Transparent
PMMA	Polymethylmethacrylate Plexiglas	Amorphous	Transparent
PC	Polycarbonate	Amorphous	transparent
PS	Polystyrene	Amorphous	biocompatible
POM	Polyoxymethylene	Semi-crystalline	
Teflon-PFA	Perfluoralkoxy copolymer	Semi-crystalline	No-reactive
PVC	Ployvinylchloride	Amorphous	
PP	Polypropylene	Semi-crystalline	
PET	Polyethylene terephthalate	Semi-crystalline	
PEEK	Polyetheretherketone	Semi-crystalline	Melting temperature 360°
PA	Polyamide	Semi-crystalline	
PVDF	Polyvinylidene fluoride	Semi-crystalline	No-reactive, piezoelectric
PI	Polyimide, Kapton	Amorphous	
LCP Vectra A950	Liquid crystal polymer	Semi-crystalline	
SU-8		Amorphous	Photosensitive
PDMS	Polydimethylsiloxane	Amorphous	
PCL	Polycaprolactone		Biodegradable

เทคโนโลยีการสร้างหรือการแพบริเคตสำหรับงานโพลีเมอร์จะรวมทั้งเทคนิคการลอกลาย ยูวี เลเซอร์อะเบเรชัน กระบวนการทางลิโทกราฟี [46-50] และกระบวนการทางลิกา (LIGA) นั้นได้ถูกพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1986 ที่ใช้ X-ray บนชั้นหนาของพีเอ็มเอ็มเอ [50] ในปี ค.ศ. 1990 ได้มีการนำน้ำยาไวแสงเอชยู-8 มาใช้เป็นครั้งแรกโดยกลุ่มบริษัทไอบีเอ็ม ซึ่งสารนี้สามารถใช้สร้างลวดลายในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีเพื่อทำโครงสร้างที่มีอัตราส่วนสูงมากกว่าน้ำยาไวแสงหรือฟิล์มไวแสงชนิดอื่นๆ โดยการใช้สารเอชยู-8 ในตอนแรกนั้นจะฉายแสงโดยใช้แสงเอ็กรีย์ [51] ซึ่งสารเอชยู-8 ในขณะนี้จะเป็นสารพื้นฐานหลักสำหรับการผลิตโครงสร้างระบบของไหลจุลภาคเพราะเป็นที่นิยมมีความโปร่งใส มีความคงตัวทางเคมีสูงและสามารถเคลือบได้ที่มีความหนาที่แตกต่างกันจากระดับตั้งแต่ 1 ไมโครเมตรไปจนถึง 1 มิลลิเมตร นอกจากนี้ยังสามารถทำงานที่อุณหภูมิเกือบ 100 องศาเซลเซียสได้อีกด้วย [52] การนำโพลีเมอร์มาใช้งานนั้นพบว่าบางครั้งจะพบว่าได้มีการนำไปงานลักษณะเดียวกันกับแก้วและซิลิกอนทั้งแยกกันโดยสิ้นเชิงและใช้ร่วมกันซึ่งจากการใช้วัสดุโพลีเมอร์ที่หลากหลาย ประกอบกับคุณสมบัติของโพลีเมอร์ก็มีหลายประเภทและคุณสมบัติบางชนิดก็ต่างกันจึงได้มีนักวิจัยได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างคุณสมบัติที่ต่างกันของโพลีเมอร์และวัสดุพวกซิลิกอนและแก้ว [53] ดังในตารางที่ 3.2 วัสดุพีดีเอ็มเอก็เป็นวัสดุหรือสารหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบของไหลจุลภาคในปัจจุบันเพราะมีข้อดีและคุณสมบัติเด่นซึ่งแม้ว่าจะมีปัญหาหลายประการเช่นการขาด การบวมและไม่ทนต่อสารละลายพวกโซลเวนต์แต่ก็นิยมนำมาใช้งานในระบบของไหลจุลภาคถึงแม้ว่าเมื่อเร็ว ๆ นี้จะมีผู้ที่คิดค้นและนำสารชื่อเปอร์ฟลูออโรโพลีเอสเตอร์ (PFPE) มาใช้งานที่ทน

ต่อสารเคมี [54-55] โดยสารดังกล่าวมีคุณสมบัติเด่นด้านทนการกัดกร่อนต่อสารเคมีมากแต่สารพีดีเอ็มเอชก็ยังนิยมใช้งานอยู่เพราะเนื่องจากมีลักษณะใสและสามารถตรวจสอบงานด้วยตาเปล่าได้

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของโพลีเมอร์เมื่อเทียบกับแก้วและซิลิกอน [53]

	Silicon	Glass	Thermoplastics PMMA, PC, PEEK, COC, PCL, PET, PI	Thermosets SU-8	Elastomers PDMS
Micro fabrication Processes	Easy-medium	Easy-medium	easy	Medium	Easy
	Wet and dry etching	Wet etching	Injection molding, hot embossing, thermoforming, laser ablation	Casting, lithography, etching	Casting
Mechanical stability	High	High	Low-medium	High	Very low
Temperature stability	High	High	Low-medium	Medium	Low
Acid stability	High	High	High	High	High
Solvent stability	high	Medium-high	Low-medium	Medium-high	Low
Optical transparency	No	High	Mostly high	Partly	high
Price	Medium	Medium-high	Low-medium	Medium	Low

3.3 ไมโครแมชชีนนิ่ง (Micromachining)

การพ่นอนุภาคเพื่อสร้างระบบของไหลจุลภาคบางกรณีจำเป็นต้องสร้างในกระบวนการอื่นๆ ควบคู่ไปด้วยเพื่อให้ได้อุปกรณ์แลปส์ออนชิปอย่างสมบูรณ์เช่นการนำไปสร้างร่วมกับกระบวนการผลิตไอซีและกระบวนการผลิตเมมส์ (MEMS) เป็นต้น กระบวนการแต่ละประเภทนั้นอาจใช้เครื่องมือที่แยกเฉพาะหรืออาจใช้ร่วมกับเครื่องมืออื่นๆ ร่วมกัน เช่น เครื่องสร้างให้มีลวดลายด้วยแสง (Photolithography) เครื่องยิงประจุหรือเครื่องยิงไอออนเข้าไปในซีพสเตอร์หรือฐานรอง (Ion Implantation) เครื่องทำให้เกิดสารโดยใช้เคมีความดันต่ำ (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) เครื่องระเหยสารให้เกิดการเคลือบบนวัสดุ (Evaporation) เครื่องเตรียมพลาสมาให้สารหลุดออกมาจากวัสดุเตรียมเพื่อไปเคลือบวัสดุเป้าหมาย (Sputtering) เครื่องใช้ไอออนของแก๊สเพื่อกัดสารเป้าหมาย (Plasma Etching) เครื่องใช้ไอออนบีมยิงไปยังสารตัวอย่างเพื่อให้ผิววัสดุหลุดออก (Ion milling) เครื่องเอกซเรย์ลิโทกราฟี (X-Ray Lithography) เครื่องปั่นเหวี่ยงสารละลาย (Spin Coating) เครื่องใช้พลาสมากัดในแนวลึก (Deep Reactive-Ion Etching) เป็นต้น นอกจากนี้ยังต้องใช้กระบวนการทางเคมีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อให้เกิดงานแลปส์ออนชิปตามที่ต้องการ การดำเนินการสร้างด้วยกระบวนการทางไมโครแมชชีนนิ่ง (Micromachining) นั้นหากปฏิบัติงานจริงอาจต้องมีการปรับปรุงตัดแปลงทางเทคนิคอีกมาก ซึ่งไม่ได้กล่าวในที่นี้ (รายละเอียดเพิ่มเติมดูได้จากหนังสือของ Madou [56]) การสร้างโครงสร้างเป็นสามมิติที่มีลักษณะซับซ้อนก็อาจต้องประยุกต์ใช้วิธีการทางไมโครแมชชีนนิ่งที่ซับซ้อนซึ่งสามารถแบ่งเป็น เบ้าไมโครแมคชีนนิ่ง (Bulk เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Micromachining) เซอร์เฟสไมโครแมชชีนนิ่ง (Surface Micromachining) และกระบวนการทางลิการ์ (LIGA Process) หรือ ลิการ์ไมโครแมชชีนนิ่ง

3.3.1 เบาท์ไมโครแมชชีน (Bulk Micromachining)

การสร้างด้วยวิธีเบาท์ไมโครแมชชีนนิ่งมีหลักการที่สำคัญคือการเอาวัสดุออกจากซัพสเตรทซึ่งส่วนใหญ่เป็นแผ่นซิลิกอนเพื่อให้เกิดรูปร่าง 3 มิติทรงเรขาคณิตขนาดเล็ก การสร้างด้วยวิธีการเบาท์ไมโครแมชชีนนิ่ง นั้นจะใช้ซัพสเตรทเป็นวัสดุรองรับและยังสามารถทำหน้าที่เป็น เป็นขั้วไฟฟ้าหรือ อิเล็กโทรดได้อีกด้วย เนื่องจากซัพสเตรทหรือฐานรองที่ทำจากแผ่นซิลิกอนนั้นเป็นลักษณะซิงเกิลคริสตัล (Single Crystal) ดังนั้นเราสามารถกัด (Etching) ได้มากมายหลายแบบ ทั้งรูปร่างธรรมดา และเป็น 3 มิติที่มีความซับซ้อนตัวอย่าง เช่น กัดให้เป็นร่องเป็นรูปตัววี (V-Grooves), เป็นแบบช่องธรรมดา (Channels), เป็นบ่อรูปพีรามิด, เป็นแผ่นเมมเบรน (Membranes) และให้เป็นรูปหัวฉีด (Nozzles) [57] เป็นต้น ลักษณะเด่นของเบาท์ไมโครแมชชีนนิ่งคือเป็นวิธีการสร้างที่ชัดเจนเพราะวิธีการทำของมันเป็นที่รู้จักผ่านการพัฒนามานาน เป็นเทคนิคที่กระบวนการสร้างนั้นราคาถูก แต่กระบวนการที่สร้างบางครั้งก็ทำให้สูญเสียวัสดุมาก เหมาะสมสำหรับวิธีการสร้างโครงสร้างแบบง่ายเช่น เซอร์เวดความดันและแอกชูเอเตอร์ (Actuator) บางประเภท เป็นเทคนิคที่ได้ลักษณะของ อัตราส่วน (Aspect Ratio) ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากความลึกหรือความสูงของโครงสร้างที่ว่าจะถูกจำกัดด้วยความหนาของซิลิกอนเวเฟอร์

3.3.2 เซอร์เฟสไมโครแมชชีนนิ่ง (Surface Micromachining)

เซอร์เฟสไมโครแมชชีนนิ่งเป็นเทคนิคที่ถือได้ว่าตรงข้ามกับเบาท์ไมโครแมชชีนนิ่งซึ่งเทคนิค จะมีการสร้างโครงสร้างระดับไมโคร (Microstructure) ที่ได้มีการเติมชั้นของวัสดุหลายๆ โดยชั้นที่เหนือ วัสดุซัพสเตรทอาจทำได้ด้วยการลงดิ่งสารลงบนวัสดุ (Deposit), การลอกลาย (Patterning) และการ เอ็ทซ์ (Etching) ก็ได้ ในการเติมสารลงบนชั้นซัพสเตรทนั้นโดยทั่วไปจะใช้เทคนิคที่เรียกว่าทำให้เกิด สารโดยใช้เคมีความร้อนต่ำหรือเรียกย่อว่า “LPCVD” วัสดุที่ใช้มากในกระบวนการของเซอร์เฟสไมโครแมชชีนคือวัสดุชื่อโพลิซิลิกอนซึ่งวัสดุดังกล่าวมีโครงสร้างเป็น Polycrystal ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้เป็น เมมเบรนสำหรับใช้งานที่สามารถตอบสนองคล้ายเซนเซอร์ได้ โดยเฉพาะในงานทางระบบเครื่องกล ไฟฟ้าจุลภาคโดยทั่วไปความหนาของชั้นที่อยู่บนซัพสเตรทจะประมาณ 2-5 μm ซึ่งถ้าแบบพิเศษอาจ หนาถึง 5-20 μm ลักษณะเด่นหากเปรียบเทียบกับไมโครแมชชีนนิ่งแบบอื่นคือวิธีนี้ต้องมีการสร้างชั้น วัสดุหลายชั้นลงบนซัพสเตรท เป็นวิธีการสร้างที่ซับซ้อน จะต้องมีชั้นที่สร้างรองรับไว้เพื่อเป็นชั้น สำหรับทำลายทิ้ง (Sacrificial layer) กระบวนการนั้นละเอียดและราคาแพง การสร้างอาจมีปัญหา เทคนิคหรือทางกลที่ยุ่งยากต่อการผลิตเช่นความเครียดของวัสดุเป็นต้น ข้อดีของเซอร์เฟสไมโครแมชชีนนิ่ง คือการสร้างโครงสร้างดังกล่าวจะไม่ถูกจำกัดด้วยความหนาของซัพสเตรท สามารถเลือกใช้ วัสดุได้มากกว่าวิธีของเบาท์ไมโครแมชชีนนิ่ง และเหมาะกับโครงสร้างที่ซับซ้อน เช่นวาล์วระดับไมโคร และ ไมโครแอกชูเอเตอร์ประเภทต่างๆ

3.3.3 ลิการ์ไมโครแมชชีนนิ่ง (LIGA Micromachining)

กระบวนการลิการ์หรือลิการ์ไมโครแมชชีนนิ่งเป็นเทคนิคที่ใหม่ซึ่งแตกต่างจากกระบวนการ เบาท์ไมโครแมชชีนนิ่งและกระบวนการเซอร์เฟสไมโครแมชชีนนิ่งอย่างมาก ลิการ์ไมโครแมชชีนนิ่งเป็น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการที่แก้ปัญหทั้งสองกระบวนการข้างต้นกล่าวคือแก้ปัญหาของกระบวนการเซอร์เฟสไมโครแมชชีนนิ่งที่มีอัตราส่วนเชิงเรขาคณิตหรือลักษณะเรโซที่ต่ำ ค่าดังกล่าวเป็นพารามิเตอร์อย่างหนึ่งของการสร้างโครงสร้างระดับไมโคร โดยเป็นนิยามอันหนึ่งของความลึกหารด้วยความกว้างบนพื้นผิวซึ่งการทำเซอร์เฟสไมโครแมชชีนนิ่งที่เคลือบฟิล์มบางๆลงพื้นผิวที่มีความหนาค่อนข้างน้อยทำให้ลักษณะเรโซทางเรขาคณิตที่ได้ไม่ดี เนื่องจากข้อจำกัดด้านความลึกของเซอร์เฟสไมโครแมชชีนนิ่งเอง ส่วนเบาที่ไมโครแมชชีนนิ่งก็มีข้อจำกัดทางความลึกเช่นกันโดยความหนาของซิลิกอนซัพสเตรทมีข้อจำกัดแค่ประมาณ 400-500 μm เท่านั้น การแก้ปัญหาประการที่สองคือกระบวนการทั้งสองแบบข้างต้นนั้นต้องใช้ซิลิกอนเป็นซัพสเตรทเท่านั้นทำให้เราไม่สามารถใช้โพลีเมอร์ พลาสติกและโลหะเพื่อมาสร้างอุปกรณ์ได้ซึ่งถือว่าเป็นข้อเสียอันเนื่องมาจากข้อจำกัดที่เป็นซิลิกอน วิธีการไมโครแมชชีนนิ่งซึ่งเป็นวิธีการที่ดีและเกิดประโยชน์มากเพราะสามารถสร้างโครงสร้างระดับไมโครได้โดยไม่ใช้ซัพสเตรทที่เป็นซิลิกอนเลย ข้อดีที่สำคัญที่สุดคือ สามารถสร้างอุปกรณ์ระดับไมโครได้หนา เรียบและพื้นผิวของชั้นต่างๆ ขนานกันเป็นอย่างดี ตัวอย่างเช่น สามารถทำระบบเกียร์ขนาดเล็ก มอเตอร์และทำกังหันขนาดเล็กที่ทำด้วยโลหะและพลาสติกได้ เนื่องจากข้อดีเหล่านี้ของกระบวนการลิทาร์ทำให้ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นเช่นกระบวนการสร้างเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคจะนิยมใช้กระบวนการลิทาร์นี้ ลักษณะเด่นของกระบวนการลิทาร์คือเป็นกระบวนการที่ราคาแพงกว่าหรือแพงที่สุด ชิ้นงานที่ได้อาจต้องใช้อุปกรณ์สนับสนุนที่เป็นเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนสำหรับเป็นตัวเอ็กรายลิโทกราฟี (X-ray Lithography) การใช้กระบวนการนี้อาจต้องมีการสร้างเทคโนโลยีสำหรับไมโครอินเจคชันโมลและอาจต้องออกแบบหรือสร้างเครื่องมือเฉพาะสำหรับชิ้นงานที่จะทำออกมาในเชิงอุตสาหกรรม ข้อดีของกระบวนการลิทาร์ไมโครแมชชีนนิ่งคือ สามารถสร้างให้ได้เรโซเชิงเรขาคณิตที่สูงมากๆ สามารถทำโครงสร้างที่มีความสลับซับซ้อนได้ เป็นวิธีเดียวที่สามารถสร้างโครงสร้างระดับไมโครที่เป็นโลหะได้ และหากได้พัฒนาอินเจคชันโมลเป็นผลสำเร็จแล้วกระบวนการลิทาร์เป็นวิธีที่ดีที่สุดสำหรับการผลิตเชิงอุตสาหกรรม

3.4 ปฏิกริยาของผงอนุภาค

3.4.1 การกัดเซาะวัสดุที่เปราะ

ปฏิกริยาที่เกิดจากการชนของผงอนุภาคนั้นมีหลักการและทฤษฎีที่เคยมีผู้ศึกษาวิจัยมานานแล้วโดยเฉพาะปฏิกริยาที่มีการกัดเซาะหรือกัดกร่อนของวัสดุ จึงขอยกเอางานวิจัยผู้อื่นในต่างประเทศมาศึกษาและอ้างอิงในงานวิจัยนี้เฉพาะที่เกี่ยวข้องเท่านั้นซึ่งหากจะกล่าวถึงวัสดุที่เปราะแล้วการกัดกร่อนของอนุภาคบริเวณผิววัสดุก็จำลองโดยพิจารณาอนุภาคที่ตกกระทบต่อผิวเรียบซึ่งเมื่อวัสดุที่มีความเปราะถูกชนด้วยวัสดุหรือผงวัสดุที่มีความแข็งและแหลมแล้วผิวสัมผัสจะเสียรูปเนื่องมาจากแรงอัดและความเค้นเฉือนซึ่งความเค้นที่เกิดจากการชนดังกล่าวจะส่งผลทำให้เกิดการแตกของพื้นผิวที่ถูกชนและทำให้วัสดุบริเวณดังกล่าวหลุดลอกออกไป การพิจารณาพฤติกรรมการชนมักจะเปรียบเทียบกับการชนพื้นฐานที่เกิดจากวัสดุแหลมคมแต่ผลที่เกิดการชนด้วยวัสดุที่แหลมคมนั้นจากการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมาก็ยังไม่สามารถหาคำตอบได้แน่นอนนักซึ่งต่างจากวัสดุที่กลมมน หลายปีที่ผ่านมาได้มีการตีพิมพ์เผยแพร่โมเดลต่างๆในการอธิบายอัตราการกัดกร่อนที่มีต่อคุณสมบัติของวัสดุพอสมควร [58] การพิจารณาแบบเดิมนั้นจะอธิบายโดยการใช้น้ำหนักที่ถูกทำให้หลุดไปหารด้วยน้ำหนักของผงอนุภาคที่ใช้ แต่ในปัจจุบันปริมาณเป้าหมายที่ถูกทำให้หลุดไปด้วยวัสดุที่ชนเพียง 1 พาร์ติเคิลนั้น นักวิจัยชื่อ มาร์ชเชลและคณะได้ค้นพบความสัมพันธ์ระหว่างความดันในการชนกับความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยาวของรอยแยกในวัสดุที่เปราะ [59] และนักวิจัยชื่อสลิเกอร์วีร์ ได้ใช้ทฤษฎีไอเดนเทชัน [60] ในการสร้างโมเดลการวิเคราะห์ดังแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.1

$$E_p = 0.0745 \frac{\rho_f E^{5.4} U_{kin}}{H^{17.12}} \left(\frac{U_{kin}^{1.6}}{K_{Ic}} - 5.34 \frac{E^{1.4}}{H^{13.12}} \right) \quad (3.1)$$

โดยที่ E_p คือการกักตรอนของวัสดุที่เปราะของอนุภาค,

ρ_f คือค่าความหนาแน่นของผิวชิ้นงานที่ชน

E คือ ยิงโมดูลัส ของชิ้นงานที่ชน,

U_{kin} คือพลังงานจลของอนุภาค,

H คือความแข็งของชิ้นงานที่ชน,

K_{Ic} คือความเหนียวของชิ้นงานที่ชน

โมเดลการชนข้างต้นสามารถอธิบายผลการชนของอนุภาคคอลลูมินาบนวัสดุแก้วซึ่งสมการข้างต้นแสดงให้เห็นค่าการกักตรอนนั้นจะขึ้นอยู่กับพลังงานจลน์จากอนุภาคเป็นส่วนใหญ่และมีการทดลองการกักตรอนโดยละเอียดของนักวิจัยชื่อ Feng และ Ball [61] ที่อธิบายความสัมพันธ์หลายๆ ส่วนทั้งวัสดุที่เป็นผงอนุภาคและวัสดุที่เลือกเป็นเป้า ในกรณีที่เป็นเซรามิกแล้วโดยทั่วไปนั้นกลไกการแตกที่เกิดจากการกักตรอนจะขึ้นกับความเปราะเนื้อเดียวกันหรือความเปราะฮอโมจีนีอัสของวัสดุ ในกรณีเซรามิกมีความเปราะผลึก ขนาดของโพร์ (Pore) และขนาดของเกรน (Grain) จะมีผลต่ออัตราการกักตรอนด้วย [62-63] ถ้าขนาดของเกรนเล็กมากเมื่อเทียบกับขนาดของผงอนุภาคที่ใช้ฟันแล้วกลไกของการกักตรอนจะมีลักษณะการกักที่จะกักกลุ่มของเกรนออกไปด้วยโดยพลังงานจลน์ของอนุภาคทั้งหมดจะถูกใช้ในการทำให้เกิดรอยแยกบริเวณรอยต่อระหว่างเกรนด้วย [64]

3.4.2 การใช้มุมกระทบเพื่อการกักเศษ

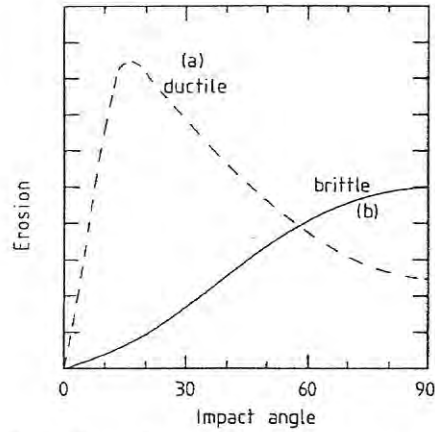
จากการศึกษาที่ผ่านมาจะได้ว่ามุมการชนลดอัตราการกักจะมีลักษณะเฉพาะของวัสดุเป้าหมายที่เปลี่ยนไป ลักษณะเฉพาะที่อธิบายส่วนมากจะพบอยู่ 2 ประการคือความเปราะและความเหนียวของวัสดุ กล่าวคือการกักเศษของวัสดุที่เปราะจะขึ้นกับการสร้างรอยแตกบนพื้นผิว ขณะที่การกักตรอนวัสดุที่เหนียวจะขึ้นกับการตัดหรือฉีก ผลที่ได้จากการชนที่มุมต่างๆกันจะมีผลต่อการกักตรอนด้วยซึ่งการกักตรอนที่มากที่สุดสำหรับวัสดุที่เปราะเช่นแก้ว ซิลิกอนและเซรามิก จะอยู่ที่มุม 90 องศา ในขณะที่วัสดุเหนียวจะมีการกักตรอนสูงสุดที่มุม 20-30 องศา อัตราการกักตรอนของมุมที่เปราะสามารถประมาณได้ดังสมการที่ (3.2)

$$E \propto \sin(\alpha)^k \quad (3.2)$$

เมื่อ α คือมุมในการชน

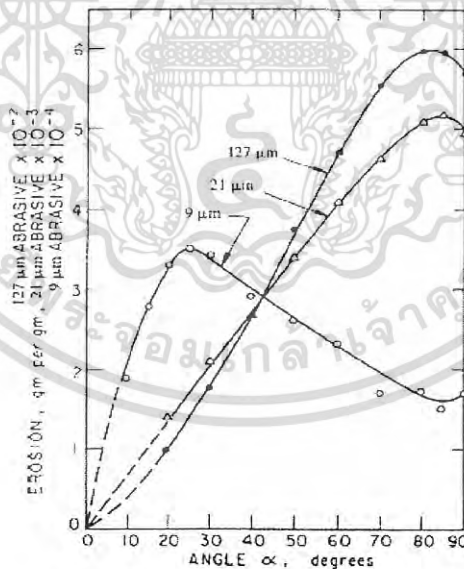
และ k มีค่าระหว่าง 2 และ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกัดกร่อนและมุมตกกระทบของวัสดุที่เหนียว และวัสดุที่เปราะ [65-66]

อย่างไรก็ตามที่มุมน้อยกว่า 30 องศา ความเร็วแนวสัมผัสมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการสร้างรอยแยกในแนวของความเร็วและอัตราการกัดกร่อนจะมีค่ามากกว่าที่ได้อธิบายในสมการ (3.2) [67] ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1966 เป็นที่รู้กันว่าอนุภาคขนาดเล็กมากนั้นมุมการชนต่ออัตราการกัดกร่อนของกระจกจะเปลี่ยนแปลงจากวัสดุที่นิ่มไปเป็นวัสดุที่แข็ง [66, 68] ตามรูปที่ 3.3 นั้นอนุภาคเหล่านั้นไม่มีพลังงานพอที่จะทำให้เกิดรอยแตก ดังนั้นก็ทำได้เพียงให้วัสดุเสียรูปซึ่งมีการวิจัยหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคและความเร็วที่เกิดขึ้น [68] ซึ่งต่อมาได้มีผู้ศึกษาการหาพลังงานจลน์ของผงอนุภาคเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณเกณฑ์หรือระดับที่เหมาะสม



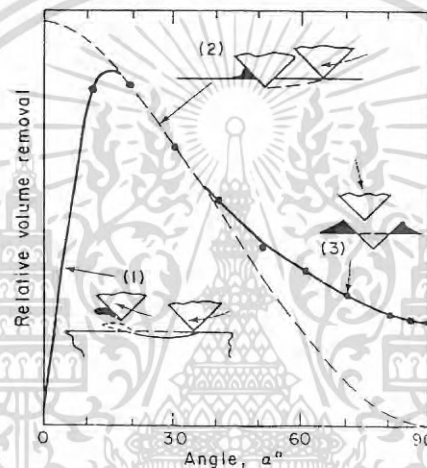
รูปที่ 3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกัดเซาะของผงอนุภาคกับมุมตกกระทบที่ต่างกันเมื่อเปลี่ยนขนาดผงอนุภาค [65]

3.4.3 การกัดเซาะวัสดุเหนียว (Ductile Erosion)

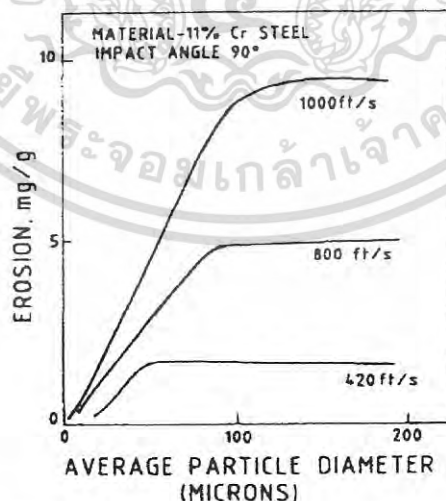
การกัดเซาะวัสดุเหนียวในเชิงกล (เช่นการกัดโลหะ) อาจจำเป็นต้องถูกควบคุมด้วยตารางทางพลาสติกดีฟอร์มเมชัน (Plastic Deformation) ซึ่งหมายถึงทฤษฎีการเปลี่ยนรูปของพลาสติก อัตรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกัดแบบขึ้นกับมุมในการกัดแสดงดังรูปที่ 3.4 เมื่อยิงอนุภาคในการกัดที่มุมน้อยๆ อนุภาคจะครูดไปทั่วทั้งพื้นผิว และเมื่อมุมมากขึ้นอนุภาคจะมาอยู่บนพื้นผิวขณะทำการกัด วัสดุที่ถูกกัดก่อนนั้นจะหลุดได้ด้วยอนุภาคที่ยิงมาทีหลัง อย่างไรก็ตามการกัดที่มุม 90 องศาจะไม่สามารถอธิบายแบบนี้ได้ แต่ในความเป็นจริงเราไม่สามารถทำให้อนุภาคตกบนพื้นผิวที่ 90 องศาได้ทั้งหมด เนื่องจากความขรุขระของพื้นผิว มุมการชนที่ทำให้ได้อัตราการกัดจะสูงที่สุดนั้นจะขึ้นกับความแข็งของโลหะหรือความแข็งของโลหะผสม [68] นอกจากนี้อัตราการกัดจะไม่ขึ้นกับขนาดของอนุภาคเมื่ออนุภาคมีขนาดน้อยกว่าค่าเริ่มต้นค่าหนึ่งในการวิจัย ขนาดของอนุภาคที่มีผลต่อการกัดกร่อนนั้น [69-70] จะพบว่าเมื่อขนาดของอนุภาคมีขนาดเล็กกว่า 100 ไมโครเมตร แล้วอัตราการกัดกร่อนจะเท่ากันโดยผลจากขนาดของอนุภาคที่เล็กมากดังกล่าวจะมีผลต่อการกัดกร่อนเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วของการชนของอนุภาค ดังนั้นหากใช้ผงอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากโดยน้อยกว่า 100 ไมโครเมตรแล้วเมื่อต้องการให้กัดกร่อนดีขึ้น ควรเพิ่มความเร็วมหรือความดันในระบบอัดลมให้แรงขึ้น



รูปที่ 3.4 อัตราการกัดเซาะที่เกิดจากผลของมุมกระทบสำหรับวัสดุเหนียว [66]



รูปที่ 3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของผงอนุภาคและผลการกัดเซาะโลหะที่ความเร็วแตกต่างกัน [71]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การชนลักษณะนี้จะได้อัตราการกัดที่ขึ้นกับความเร็วของอนุภาคสำหรับโลหะซึ่งจะหาค่าได้จากสมการ

$$E \propto v^k \quad (3.3)$$

โดยที่ k มีค่าระหว่าง 2-3 [66, 71] ซึ่งจะมีค่าขึ้นกับมุมของการชนของอนุภาค ที่มุมการชนที่ต่ำๆ จะเกิดการกระเพื่อมบนผิวและจะส่งผลให้เกิดความเร็วตามแนวผิวสัมผัส [72] เมื่อโลหะถูกกัดจะเห็นว่าน้ำหนักของผิวจะเพิ่มขึ้นในเบื้องต้นจนกระทั่งถึงภาวะการกัดที่คงที่ในช่วงเวลาต่อมา ซึ่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นในตอนแรกนั้นจะมาจากอนุภาคที่วิ่งไปฝังตัวอยู่บนผิวที่เราทำการพ่นอนุภาค

3.4.4 การกัดเซาะวัสดุยืดหยุ่น (Elastomer Erosion)

การกัดกร่อนวัสดุที่ยืดหยุ่นเช่นวัสดุพวยยาง จะเป็นการทำให้เกิดรอยชนบนผิวแล้วขยายการกัดกร่อนไปเรื่อยๆ การกัดกร่อนเกิดจากความเครียดจากแรงดึงซึ่งความเครียดจากแรงดึงก็มาจากความต้านทานการเสียดสีมากกว่าการเสียดรูปของวัสดุทั้งก่อน ซึ่งไม่คล้ายกับการกัดกร่อนวัสดุอื่น ความเครียดจากแรงดึงและเสียดสีนั้นจะมีมากที่ไม่ใช่มุมฉากดังนั้นวัสดุยืดหยุ่นจึงให้อัตราการกัดกร่อนลดลงมากที่มุมชน 90 องศา อัตราการกัดกร่อนที่ขึ้นกับมุมของการชนนี้จะมีค่าคล้ายกับการกัดกร่อนบนวัสดุเหนียว (Ductile) แต่จะต่างกันที่การเกิดลักษณะการกัดกร่อน ชั้นแรกนั้นมวลของวัสดุที่ต้องการกัดจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีอนุภาคไปฝังตัวอยู่บนผิว หลังจากนั้นเมื่อกระบวนการทำดังกล่าวนี้อยู่ในภาวะสมดุลจะทำให้เกิดการกัดกร่อนที่คงที่ ซึ่งการกัดกร่อนแบบนี้จะขึ้นกับมุมในการชนมากกว่าการกัดกร่อนของวัสดุที่เปราะหรือวัสดุที่นุ่ม [73]

3.4.5 คุณสมบัติของอนุภาค

การเสื่อมคุณภาพของวัสดุของอนุภาคนั้นเมื่ออนุภาคชนบนเป้าหมายจะทำให้อนุภาคเกิดการแตกหักโดยเฉพาะกรณีที่อนุภาคมีความแข็งน้อยกว่าหรือแข็งแรงเท่ากับความแข็งของวัสดุเป้าหมายนั้นให้อัตราการกัดกร่อนจะน้อยมาก [74-75] การเสื่อมคุณภาพของอนุภาคจะทำให้อนุภาคมีความกลมและมนมากขึ้นและจะทำให้ให้อัตราการกัดกร่อนลดลง จำนวนอนุภาคที่หักตอนแรกจะขึ้นกับความเร็วที่ชน [76] ขณะทดลองให้อนุภาคอะลูมินาที่ชนบนกระจกนักวิจัยก็พบว่าเป้าที่ถูกอนุภาคชนที่เกิดจากข้อบกพร่องก่อนหน้านั้น เมื่อเทียบกับการกัดเซาะนานขึ้นอนุภาคจะเปลี่ยนสภาพจากใหญ่เป็นขนาดเล็กอนุภาคจะมีความแข็งแรงมากขึ้น ดังนั้นข้อบกพร่องทั้งสองเรื่องนี้กล่าวคือการหักของอนุภาคและอนุภาคเล็กแล้วนั้นมีลักษณะแข็งขึ้นซึ่งข้อเสียดังกล่าวก็อาจชดเชยกันได้ทำให้ข้อบกพร่องนั้นหมดไป ขนาดของวัสดุจะเกิดผลที่สำคัญที่สุดก็คือขนาดของผงอนุภาคมีต่อคุณสมบัติการกัดกร่อน เพราะมาจากพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามอาจมีผลกระทบอื่น ๆ เช่นความแตกต่างในเรื่องของความร้อน หรือความแตกต่างในอัตราการกรองอนุภาคขนาดกว้างจะช่วยเพิ่มขนาดการกัดเซาะ [77-78] กล่าวได้ว่าอนุภาคที่เนิ่นและพิจารณาคืออนุภาคที่มีความคม การแตกจะเกิดเมื่อมีร่องรอยเกิดขึ้นมาก่อนบนผิวจึงจะเริ่มแตกหลังจากอนุภาคหลังวิ่งชนบนผิวนั้น นั่นก็คือผงอนุภาคที่คมมันสามารถสร้างร่องรอยขึ้นมาได้เอง แต่ในกรณีของอนุภาคทรงกลมจะมีลักษณะกลไกการแตกที่แตกต่างกันไป ซึ่งจะมีผลต่อการกัดกร่อน [79] ผลของอนุภาคที่ชนหรือกระทบขึ้นกับความเร็วและมุมการกระจายความเครียดของผิววัสดุต่างๆโดยสามารถคำนวณโดยใช้ทฤษฎีของเฮิร์ตซ์ [80]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 เงื่อนไขที่มีผลต่อการกัดกร่อนของอนุภาค

3.5.1 การพุ่งของลม

การกัดกร่อนของชิ้นงานนอกจากจะเกิดจากผลที่ได้โดยตรงจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างผงอนุภาคกับวัสดุเป้าหมายแล้วจะมีเงื่อนไขอื่นที่ควรพิจารณาโดยเฉพาะลมที่ใช้ การพุ่งของลมนั้นมีผลกระทบโดยตรงกับชิ้นงานที่เป็นเป้าหมาย กล่าวคืออนุภาคแบบผงจะถูกเร่งโดยการใส่เข้าไปในท่อลมที่มีความเร็วสูง ท่อทางเดินลมที่สร้างขึ้นจะใช้หลักการความแตกต่างของความดันบริเวณนอตเชิลซึ่งความแตกต่างความดันมักจะมีขนาดมากกว่า 1.9 บาร์ ในกรณีนี้หัวฉีดรูปทรงกระบอกจะถูกอัดด้วยลมซึ่งจะทำให้อากาศที่ประตูทางออกหัวฉีดมีความเร็วลมเท่ากับความเร็วของเสียง โดยความเร็วเสียงที่เกิดจากการอัดลมที่หัวฉีดทรงกระบอกคำนวณได้จาก

$$c \propto \sqrt{k \frac{p_e}{\rho}}, \quad (3.4)$$

โดยที่ c คือความเร็วของเสียง

k อัตราความร้อนจำเพาะ ($k = 1.4$ เมื่อก๊าซในทางอุดมคติ)

p_e ความดันอากาศที่ทางออกหัวฉีด

ρ ความหนาแน่นของอากาศ

เมื่อหัวฉีดถูกอัดด้วยความดัน ที่ทางออกหัวฉีดนั้นความดันจะเท่ากับความดันบรรยากาศ ดังนั้นความเร็วเสียงจะเท่ากับ 330 เมตรต่อวินาที ในลักษณะเดียวกันเมื่อความดันแตกต่างเพิ่มขึ้นเป็นค่า 1.9 บาร์ ความดันที่ทางออกหัวฉีดก็จะเพิ่มมากขึ้นและกลายเป็นค่ามากกว่าความดันบรรยากาศ ความดันที่หัวฉีดด้านออกนั้นจะคำนวณด้วยสมการ

$$\frac{p_e}{p_r} \approx 0.5283 \quad (3.5)$$

เมื่อ p_e ความดันอากาศที่ทางออกหัวฉีด

p_r คือความดันรอบๆทางออก

การเพิ่มความดันนี้ยังเปลี่ยนความหนาแน่นของอากาศในจุดนั้นๆ สำหรับการไหลที่อัดเป็นแบบไอเซนโทรปิก (Isentropic)

$$\frac{p_e}{p^k} = C_1 \quad (3.6)$$

เมื่อ C_1 คงที่ซึ่งมีค่าประมาณ 69.8×10^3 เมื่อเราใช้สมการ (3.4) ร่วมกับสมการ (3.6) จะได้ความเร็วเสียงในกระบอกหัวฉีดซึ่งจะคำนวณได้ดังนี้

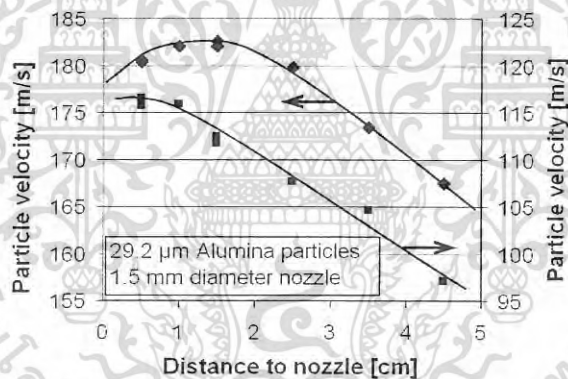
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$c = \sqrt{kC_1^{1/k} p_c^{(1-1/k)}} \quad (3.7)$$

เมื่อใช้สมการ (3.5) และสมการ (3.7) ก็สามารถคำนวณได้ว่าที่แรงดันรอบๆ เท่ากับ 5×10^5 ปาสคาลและจะได้รับความเร็วลมที่ทางออกหัวฉีดประมาณ 378 เมตรต่อวินาที ในความเป็นจริงแล้วกรณีลำอากาศผสมกับอนุภาคที่เป็นผงจะคำนวณได้ยาก ซึ่งงานวิจัยที่แก้ปัญหานี้จึงได้แนะนำให้ใช้แรงดันทางออกให้สูงขึ้น [81]

3.5.2 การไหลของอนุภาคที่เป็นลักษณะก๊าซ

เมื่ออนุภาคถูกแรงที่บริเวณทางออกของหัวพ่นในขณะที่เริ่มต้นนั้น อนุภาคเหล่านี้ก็ยังมีความเร็วที่ต่ำเมื่อเทียบกับความเร็วลมที่เกิดขึ้นแม้ขณะถูกแรงอยู่ที่ภายนอกหัวพ่นก็ตาม จากการศึกษาที่ผ่านมาความเร็วสูงสุดของอนุภาคที่บริเวณหัวพ่นอาจมากเป็น 10 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อหัวพ่นซึ่งจะเห็นได้จากอัตราการกัดเซาะที่เพิ่มขึ้นในตอนแรกและจะลดลงเมื่อเป้าหมายห่างมากขึ้น [81] ผลกระทบนี้จะมากเมื่อความแตกต่างระหว่างความเร็วอนุภาคและหัวเจ็ทมีมากขึ้นโดยเฉพาะกรณีที่อนุภาคมีขนาดใหญ่หรือมวลมากขึ้นเป็นต้น ความเร็วลมสูงพร้อมทั้งพลังค์ของอนุภาคสูงนั้นก็ส่งผลให้ความเร็วเฉลี่ยลดต่ำลงได้เช่นกัน



รูปที่ 3.6 กราฟความสัมพันธ์ความเร็วอนุภาคเทียบกับระยะหัวฉีด มวลคือ 1.4 กรัมต่อนาที ความดันในแกนซ้ายเป็น 2.3×10^5 ปาสคาลและในแกนขวา 1.0×10^5 ปาสคาล

เมื่อลำอากาศยิงลงบนเป้าหมายความเร็วอากาศจะเป็นศูนย์ที่บริเวณใกล้กับพื้นผิว ผงอนุภาคขนาดใหญ่ที่หนักมีแนวโน้มว่าจะพุ่งในเส้นทางเดิมดังนั้นผลทางพลศาสตร์จะมาก แต่อนุภาคขนาดเล็กหรือน้อยกว่า 10 ไมโครเมตร [82] เมื่อมีการพุ่งกระทบเป้าจะเกิดลำอากาศไหลผ่านรอบเป้าด้วยซึ่งจะกระทำกับอนุภาคเหล่านี้และทำให้เกิดการเปลี่ยนมุมและตำแหน่งการกระทบตามมา ความเร็วอนุภาคจากอากาศสามารถคำนวณได้จากความเร็วลม [83] การทดลองแสดงให้เห็นว่าความเร็วของผงอนุภาคเป็นสัดส่วนดังแสดงตามความสัมพันธ์เป็นดังนี้

$$v \propto d^{-0.285} p^{0.5} \quad (3.8)$$

เมื่อ d คือเส้นผ่าศูนย์กลางอนุภาค

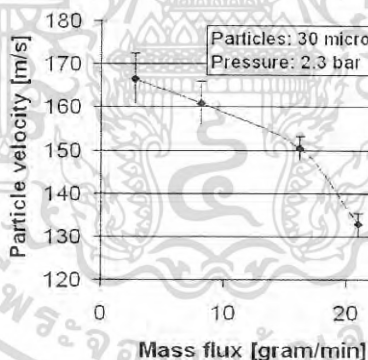
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวทช. รับผิดชอบการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

p ความดันอากาศที่ใส่เข้าไป

ความดันนั้นสูงถึง 0.7×10^5 ปาสคาลและขนาดอนุภาคระหว่าง 70-1000 ไมโครเมตรและหัวฉีดมีรูปแบบเป็นทรงกระบอก สำหรับอัตราส่วนโดยประมาณระหว่างหัวฉีด 30-130 ซึ่งความยาวหัวฉีด เทบจะไม่มีผลต่อความเร็วอนุภาค [84]

3.5.3 คุณสมบัติฟลักซ์ของอนุภาค (Particle Flux Properties)

ความหนาแน่นฟลักซ์ของอนุภาคที่มากขึ้นจะทำให้อัตราการกัดกร่อนสูงขึ้น อย่างไรก็ตามที่ความหนาแน่นของอนุภาคสูงๆก็จะมีผลให้การกัดเซาะเฉลี่ยของอนุภาคเดียวนั้นลดลงได้เช่นกัน เนื่องจากความหนาแน่นของอนุภาคมากขึ้นในท่ออากาศจะส่งผลให้ผงอนุภาคที่เคลื่อนที่ซ้านั้นและมีแนวโน้มที่จะชนกับอนุภาคที่เข้ามาอย่างรวดเร็ว การชนระหว่างอนุภาคกับอนุภาคนั้นก็จะมีผลต่อพื้นผิวเป้าหมาย เช่น หากเราจะลดพลังงานการชนกันและเปลี่ยนมุมการชนต่อผิวเป้าหมายก็จะลดการชนของอนุภาคกับอนุภาคได้ดังนั้นจึงเป็นการลดอัตราการกัดเซาะเฉลี่ยด้วย ปรากฏการณ์นี้สามารถแก้การชนระหว่างอนุภาคกับอนุภาคได้ด้วยการทำให้อนุภาคมีความเร็วที่มากขึ้นเนื่องจากอนุภาคจะหลุดไปจากโซนการชนอย่างรวดเร็ว และเนื่องจากความเร็วของอากาศที่สูง [85] ผลของฟลักซ์อนุภาคสูงก็คือการลดลงของความเร็วอนุภาคที่ความดันคงที่ซึ่งเป็นเพราะแรงผลักดันในท่อลมจะต้องมีการกระจายไปทั่วอนุภาคทั้งหมดซึ่งยังเป็นผลให้อัตราการกัดเซาะลดลง [81] ความเร็วอนุภาคจะลดลงเมื่อเพิ่มฟลักซ์การทดลองเดียวกันกับวิธีการวัดในรูปที่ 3.7 ดังนั้นแม้ว่าไหลของอนุภาคที่สูงขึ้นแม้จะลดเวลาของทั้งกระบวนการแต่ก็จะต้องพิจารณาว่าปริมาณอนุภาคที่ใช้ในการชนบนเป้าหมายจะต้องดีขึ้น



รูปที่ 3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลของฟลักซ์กับความเร็วของผงอนุภาคซึ่งจะเห็นว่าความเร็วของผงอนุภาคลดลงเมื่อฟลักซ์เพิ่มขึ้น

3.5.4 การใส่อนุภาคในระบบพ่นและหัวฉีดนอตเชิล

ระบบการใส่อนุภาคเข้าไปในท่อลมนั้นหากการใส่อนุภาคที่ไม่ต่อเนื่องจะทำให้การกัดเซาะไม่สม่ำเสมอ ส่วนมากผงอนุภาคมักจะใส่เข้าไปด้วยไวยเบรตติ้งฟีดเดอร์ (Vibrating Feeder) ซึ่งเป็นวิธีที่ค่อนข้างแม่นยำนอกจากนี้หากไอน้ำในระบบจะทำให้อนุภาคจับตัวกัน ดังนั้นจึงต้องกำจัดความชื้นโดยการให้ความร้อนกับระบบ 120 องศาเซลเซียสจึงจะเพิ่มความแม่นยำของการใส่อนุภาคมากขึ้น [81] การใส่ผงอนุภาคในท่อหรือลำอากาศมี 2 แบบ คือการใส่อากาศแบบดูดและการใส่อนุภาคในระบบปิด แบบแรกคือการใส่อากาศแบบดูด วิธีการคือลำอากาศจะถูกแรงในท่อแคบ ๆ ซึ่งจะสร้างจะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างให้เกิดแรงดันและดันอนุภาคใส่เข้ามาโดยใช้ท่อภายนอกและดูดเข้าไปในหัวฉีด ระบบออกแบบมาให้เติมอนุภาคและเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาคได้ง่ายในช่วงการกัดชิ้นงาน อัตราการกัดจะขึ้นกับการออกแบบตัวนอตเชิลด้วยเช่นกัน การใส่อนุภาคแบบที่สองคือการใส่อนุภาคในระบบปิด [81] อนุภาคจะถูกส่งเข้าไปในระบบแรงดันแบบปิดไปสู่ทางออกโดยการสั่นหรือกระกระโดดให้เคลื่อนที่ การเติมผงในกรณีนี้ต้องมีการลดความดันและการเปลี่ยนผงต้องอยู่ในระบบที่สะอาด อย่างไรก็ตามด้วยการเติมแบบระบบปิดลักษณะนี้จะทำให้ได้อนุภาคที่มีความเร็วที่สูง

ในระบบของหัวฉีดแบบทรงกระบอกจะมีผลอย่างมากต่ออัตราเร่งของอนุภาค ขนาดของหัวฉีดอาจจะมีได้หลากหลายแต่หากเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเล็กเมื่อเทียบกับท่อที่นำมาต่อหัวฉีดและอาจจะถูกกัดกร่อนจากพ่นอนุภาค ถึงแม้ว่าหัวฉีดเป็นเซรามิกที่แข็งแต่ก็จะมีกรกัดเซาะและอาจทำให้รูปร่างหัวฉีดเปลี่ยนแปลงหรือบานออก ซึ่งทำให้ความเร็วของอนุภาคลดลงและอัตราการกัดกร่อนก็อาจน้อยลง ความขรุขระของหัวฉีดก็เป็นปัญหาหนึ่งของการพ่นอนุภาค แม้หัวฉีดจะเป็นแนวตรงแต่การชนของอนุภาคจะทำให้ตรงปลายของหัวฉีดบานออก ทำให้ลำอากาศที่ออกไปไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะทำให้ส่งผลกระทบต่อลำอนุภาคที่ออกไปด้วย นอกจากนี้การชนของอนุภาคภายในของผนังหัวฉีดทำให้อนุภาคหลุดไปจากแกนกลางของลำของการชนซึ่งทำให้อนุภาคไปตกผิดตำแหน่งที่ต้องการ (Halo effect) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่ผนังของหัวฉีดมีความขรุขระมากการสะท้อนของอนุภาคในผนังหัวฉีดจะมีค่ามาก ซึ่งจะทำให้ความเร็วของอนุภาคเฉลี่ยลดลง [86] ความแบนของหัวฉีดก็เป็นปัญหาหนึ่งของการพ่นอนุภาค การกัดของอนุภาคที่ยิงมาจากหัวฉีดทรงกระบอกเป็นเหมือนกั๊ดเป้าหมายด้วยสปีดปลายแหลม การสแกนไปบนเป้าจะทำให้เกิดแนวเส้นที่วางต่อกันไปเรื่อยๆ ซึ่งทำให้เกิดการกัดผิวอย่างสม่ำเสมอ เพื่อเพิ่มความสม่ำเสมอนี้หัวฉีดแบบแบนได้ถูกนำมาใช้ ซึ่งหัวฉีดแบบนี้จะช่วยเพิ่มการกระจายอนุภาคไปทั่วบริเวณกว้าง เมื่อใช้หัวแบบนี้สแกนไปทั่วพื้นผิวจะทำให้เกิดการซ้อนทับกันของผิวที่ถูกกัดออก และเนื่องจากแกนของการชนนั้นจะเล็ก ดังนั้นความหนาของอนุภาคจะไม่มีผลมากนัก ทำให้สามารถเพิ่มมวลของปลั๊กซีได้โดยไม่ทำให้อัตราการกัดกร่อนลดลง

3.6 การพิจารณาคูณสมบัติวัสดุที่มีการย่อระดับจุลภาค

เทคโนโลยีที่มีการย่อขนาดชิ้นงานหรือย่อวัสดุให้มีขนาดเล็กลงมากมายนั้นอาจจะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างจากเทคโนโลยีปกติทั่วไปและอาจใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง แต่บางครั้งการย่อขนาดก็จะมีผลทำให้คุณสมบัติของชิ้นงานนั้นไม่เหมือนเดิมดังนั้นการสร้างระบบของไหลจุลภาคหรืออุปกรณ์ขนาดเล็กจึงควรศึกษาผลที่ได้ในเรื่องดังกล่าวนี้ควบคู่ไปด้วยซึ่งไม่ควรคำนวณด้วยทฤษฎีเพียงอย่างเดียว การศึกษาประโยชน์ที่ได้จากคุณสมบัติต่างๆ ที่สร้างให้มีขนาดเล็กจึงควรพิจารณาศึกษาเรื่องดังต่อไปนี้

3.6.1 การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากขนาดเล็กมาก

การสร้างอุปกรณ์ทางเทคโนโลยีไมโครแพคเกจจิ้งและเทคโนโลยีไมโครแมชีนสามารถทำให้เล็กลงมากกว่า 1000 เท่าของตัวต้นแบบตัวอย่างเช่น มอเตอร์ขนาดใหญ่ สามารถย่อให้เล็ก ระดับ 1000 เท่าได้ คุณสมบัติที่ดีกว่าเมื่อย่อให้มีขนาดเล็กลงนั้นเป็นประโยชน์ในการประยุกต์ใช้ซึ่งหากเปรียบเทียบกับตัวต้นแบบที่มีขนาดใหญ่กับชิ้นงานขนาดเล็กที่ถูกย่อแล้ว คุณสมบัติที่ได้จะต้องแตกต่างกันเสมอ ตัวที่ย่อขนาดแล้วคุณสมบัติบางอย่างอาจดีกว่าหรือแย่กว่าก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2 การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากย่อยส่วนในระบบของเหลว

หากจะนำกระบวนการทางไดนามิกส์ในระบบของเหลวขนาดใหญ่มาใช้ในระบบของเหลวขนาดเล็กนั้นต้องศึกษาและระมัดระวังมากเพราะเรายังไม่สามารถอธิบายระบบของเหลวขนาดเล็กได้ทั้งหมด การวัดคุณสมบัติของของเหลวมีหลายประการแต่ที่สำคัญและจะกล่าวต่อไปในระบบย่อยส่วนของของเหลวนี้ คือเรโนลด์นัมเบอร์ซึ่งใช้วัดการไหลที่ปั่นป่วน (Turbulence Flow) เช่น $Re > 2000$ จะเป็นสถานะการไหลราบเรียบ (Lamina Flow) แต่ถ้า $Re > 4000$ จะเป็นการไหลที่ปั่นป่วน (Turbulence Flow), ขนาดของระบบของเหลวขนาดเล็กดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดขนาดของเรโนลด์นัมเบอร์ ตามสมการ (3.9) [87]

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (3.9)$$

เมื่อ	ρ	คือ ความหนาแน่นของของเหลว
	v	คือ อัตราเร็ว
	D	คือ ความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลาง
	μ	คือ ความหนืด

การไหลแบบปั่นป่วนจะเกิดในระบบขนาดใหญ่ การไหลแบบราบเรียบจะเกิดในระบบขนาดเล็ก เมื่อลดขนาดของระบบของเหลวแล้วขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและเรโนลด์นัมเบอร์จะลดลงด้วยอัตราส่วนเท่ากัน เช่นเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง 10 เท่า ค่าเรโนลด์นัมเบอร์ก็ลดลง 10 เท่าเช่นกัน ดังนั้นในตอนแรกค่าอาจมากถึง 4000 เมื่อลดขนาดลงเหลือ 400 ก็จะเป็นการไหลแบบราบเรียบทันที แต่ก็เป็นกรยากที่จะทำให้ระบบเล็กๆเกิดการไหลแบบราบเรียบ เหตุผลดังกล่าวจึงทำให้มีการนำระบบขนาดเล็กมาใช้ประโยชน์ในการผสมของเหลวและถึงแม้จะเป็นจริงดังสมการแต่จริงๆแล้วสมการดังกล่าวก็ยังไม่พอที่จะอธิบายระบบของไหลจุลภาคให้ถูกต้องทั้งร้อยเปอร์เซ็นต์ [88] ซึ่งปัจจุบันกำลังศึกษาวิจัยและพยายามสร้างแบบจำลองของสมการต่างๆ เพื่ออธิบายระบบของไหลขนาดเล็กดังกล่าวอยู่ดังเอกสารอ้างอิง [89, 90]

3.6.3 การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการย่อขนาดระบบทางเคมีและชีววิทยา

การย่อขนาดในทางเคมีต้องพิจารณาการใช้งานควบคู่ไปด้วยเนื่องจากมีข้อจำกัดของขนาดตัวอย่างที่นำมาตรวจวัดและข้อจำกัดจากวิธีตรวจวัด ดังนั้นการเลือกที่จะลดขนาดของระบบเพียงอย่างเดียวอาจเกิดปัญหาได้ เช่น ถาลดขนาดในระบบทางเคมีแล้วอาจจะเป็นประโยชน์ที่ช่วยลดปริมาณเคมี แต่หากเราลดปริมาณเคมีหรือความเข้มข้นของปริมาณเคมีแล้วมีผลให้โมเลกุลทางเคมีก็จะลดลงด้วย ซึ่งทำให้ผลการตรวจวัดที่ได้ไม่มีประสิทธิภาพ ผลที่ตามมาคือต้องใช้ตัวเครื่องมือตรวจที่มีความไวสูงขึ้นกว่าเดิม และถึงแม้จะลดขนาดเล็กเท่าใดก็ตาม อย่างน้อยที่สุดต้องมีหนึ่งโมเลกุล ไม่สามารถให้น้อยลงกว่านี้ได้อีกแล้ว (ขนาดเซลล์ทั่วไปประมาณ 5-20 μm) ในการลดขนาดทางชีววิทยาเกี่ยวข้องกับหลายสาขาวิชา โดยเฉพาะงานที่เกี่ยวกับทางโมเลกุลนั้นสามารถทำให้ขนาดเล็กลงได้อย่างมากเช่น งานวิเคราะห์ทางดีเอ็นเอ เป็นต้น จากปัญหาในการตรวจวัดของระบบจุลภาคดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจุบันสามารถแก้ปัญหานี้ได้แล้วโดยใช้กลไกการขยาย (Gain Mechanism) โดยระบบทำให้โมเลกุลเกิดขึ้นใหม่จากโมเลกุลแรกที่อยู่ในระบบและสภาวะที่เหมาะสม [91]

3.6.4 การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากเป็นฟิล์มบาง

คุณสมบัติของวัสดุที่เป็นฟิล์มบางจะแตกต่างจากวัสดุที่เป็นก้อนใหญ่ซึ่งความต่างกันอาจมาจากกระบวนการผลิต และมาจากเรื่องความเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุเป็นต้น ตามปกติเราจะคิดว่าวัสดุต่างๆที่เห็นนั้นเป็นเนื้อเดียวกัน แต่หากพิจารณาวัสดุระดับเป็นฟิล์มบางแล้วอาจไม่เป็นเช่นนั้น เพราะจะต้องสังเกตผลกระทบในระดับเกรน (Grain) ของวัสดุด้วย เช่นการสร้างวัสดุฐานรองให้กับวัสดุโพลีซิลิกอนซึ่งการที่เกรนไม่เหมือนกันก็อาจส่งผลให้คุณสมบัติของวัสดุที่ได้แตกต่างกันแม้จะผลิตในกระบวนการเดียวกันก็ตาม ปัญหาจากคุณสมบัติที่ได้ไม่เหมือนกันนี้เป็นปัญหาทางเทคนิคอย่างหนึ่งของการผลิตเช่นการผลิตอุปกรณ์ทางไมโครแพบริเคชันและการผลิตอุปกรณ์ระบบเครื่องกลไฟฟ้า จุลภาคเป็นต้น ปัญหาดังกล่าวถึงแม้ทำให้เกิดของเสียค่อนข้างน้อยเพราะจุดบกพร่องในเนื้อวัสดุเป็นจุดเล็กๆในฟิล์มบางของระนาบหนึ่งๆเมื่อแยกชิ้นเป็นจำนวนมากแล้วอาจพบแค่บางตัว คิดอัตราการสูญเสียถือว่ายังมีน้อยหากเทียบกับงานขนาดใหญ่ ดังนั้นในการศึกษาวัสดุเชิงผิวมากกว่าเชิงปริมาตร เช่น วัสดุที่ผลิตเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคนั้นจำเป็นต้องพิจารณาคุณสมบัติที่เป็นฟิล์มบางด้วย การวัดหรือทดสอบคุณสมบัติเชิงวัสดุที่เป็นฟิล์มบางหากเป็นระบบของกระบวนการทางไมโครแพบริเคชันจะมีประโยชน์มากเนื่องยึดหยุ่นในการวัดสามารถวัดและทดลองเป็นไปพร้อมๆกัน (In-situ) [92-94] การวัดคุณสมบัติของวัสดุพร้อมกับการผลิตโดยเฉพาะงานทางฟิล์มบาง สามารถแก้ปัญหาข้อบกพร่องล่วงหน้าได้ [95-97]

3.6.5 คุณสมบัติวัสดุเปลี่ยนเนื่องจากระบบเครื่องกลขนาดเล็กลง

ระบบเครื่องกลที่มีขนาดเล็กลงจะมีประโยชน์คือทำให้เสียหายยากเพราะเป็นที่ทราบกันแล้วว่าหากวัตถุขนาดเล็กเมื่อตกจากที่สูงจะไม่เกิดการเสียหายหรืออาจสามารถยกน้ำหนักมากกว่าน้ำหนักของตัวเองได้หลายเท่าตัว อีกประการหนึ่งเนื่องจากมวลแปรผันตรงกับปริมาตรของวัตถุ การลดขนาดลักษณะเชิงเส้นของวัตถุหากมองเป็นแนวเส้นกว้าง ยาวและสูง เมื่อเล็กลงด้วยแฟคเตอร์ [98] แต่ละด้านแล้ว หากลดเป็นเชิงปริมาตรก็จะลดลงเป็น Factor s^3 หรือลดลงทั้ง 3 ด้าน อย่างไรก็ตามชิ้นส่วนทางกลที่บิดงอได้เช่น Cantilever Beam เมื่อทำให้มีขนาดเล็ก ด้วย Factor s ดังนั้นความแข็งแรงทางกลหรือ Mechanical Stiffness (k) คือ

$$k = \frac{wt^3E}{4L^3} \quad (3.10)$$

เมื่อ	w	คือความกว้างของคาน (Beam)
	t	คือความหนา
	L	คือ ความยาว
	E	คือ Elastic Modulus

จากสมการ (3.1) ตัวแปรแต่ละตัวจะลดค่าลง $1/s$ ทุกตัว (เช่นขนาดมีค่าเป็น X ลดลง 10 เท่า หรือ 0.1X) จากสมการนี้ค่า k ลดลงตาม Factor s^3 จะเห็นว่าความแข็งแรงของวัตถุจะลดลงซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว่าแรงเฉื่อย (แรงเฉื่อยลดลงเป็น s^3 แต่ความเร่งลดลง s) ผลจากคุณสมบัติที่มีขนาดเล็กความแข็งแรงทางกลจะลดลงเข้าเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคเพราะถึงแม้จะมีความเร่งมากแต่มีผลกระทบน้อย เช่นมีตัวอย่างที่ได้ทดสอบความเร่งกับอุปกรณ์ Accelerometer ซึ่งเป็นอุปกรณ์เครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค โดยได้ทดสอบยิงจากรถถังไปพร้อมกับลูกปืนแต่ปรากฏว่าเซ็นเซอร์ไม่ชำรุดทั้งที่ยิงด้วยความเร่ง $100,000 \text{ g}$ ($1 \text{ g} = 9.8 \text{ m/s}^2$) แต่ Package ของ MEMS นั้นชำรุดไปแล้ว

3.6.6 การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการย่อขนาดระบบทางความร้อน

การย่อขนาดของระบบความร้อนเราสามารถวิเคราะห์ล่วงหน้าหาความสัมพันธ์พื้นฐานที่เกี่ยวข้องได้ วัตถุขนาดเล็กจะสามารถส่งผ่านความร้อนได้ง่ายเพราะความร้อนไปได้ทุกทิศทางดีกว่า แต่ระบบขนาดเล็กสามารถสร้างให้เป็นโครงสร้างให้ป้องกันความร้อนได้ดีเช่นกัน เนื่องจากเราสามารถที่จะสร้างโครงสร้างที่ซับซ้อนให้สามารถระบายความร้อนและให้ความร้อนคงอยู่ได้ ในการวิเคราะห์ระบบทางความร้อนนั้นหากต้องวิเคราะห์ให้ลึกซึ่งเกี่ยวกับองค์ประกอบการส่งผ่านความร้อนในงานเล็กๆแล้ว ต้องนำเรื่องควันตัมแมคคานิกส์ของโฟนอนหรือการสั่นของแลตทิก (Lattice Vibration) ผลจากเรื่องดังกล่าวในอนาคตเมื่อขนาดของชิ้นงานเล็กลงมาก ๆ ใกล้เคียงกับโฟนอนจะทำให้เราสร้างอุปกรณ์ระดับซิปไมครอนที่เล็กกว่าระดับไมครอนได้ ทำให้สามารถควบคุมความร้อนดีกว่าเดิม

3.6.7 การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการย่อขนาดระบบทางไฟฟ้าและแม่เหล็ก

การเกิดอุตสาหกรรมไอซีเป็นที่ทราบกันแล้วว่าสามารถลดขนาดระบบทางไฟฟ้าได้อย่างมาก เช่น วงจรตัวต้านทาน, ตัวเก็บประจุ, ไดโอด และ ทรานซิสเตอร์ ซึ่งคุณสมบัติของอุปกรณ์ดังกล่าวส่วนใหญ่ทำงานได้แต่โอเล็กโทรสแตติกแอกชูเอเตอร์ (Electro Static Actuators) ซึ่งเป็นระบบทางแม่เหล็กไฟฟ้ายังต้องมีการวิเคราะห์และศึกษาเพิ่มเติม คุณสมบัติของแอกชูเอเตอร์ (Actuators) สามารถบ่งบอกได้ด้วยความหนาแน่นของพลังงานที่เกิดจากสนามไฟฟ้า U ซึ่งถูกสะสมในช่องว่างระหว่างโรเตอร์ (Rotor) และสเตเตอร์ (Stator) ของมอเตอร์ จากทฤษฎีของสนามไฟฟ้าความหนาแน่นของพลังงานสนามไฟฟ้า เป็นไปตามสมการ

$$U_{\text{electromst atics}} = \frac{1}{2} \epsilon E^2 \quad (3.11)$$

โดย	ϵ	คือ ค่า Permittivity
	E	คือ สนามไฟฟ้า
	U	คือค่าความหนาแน่นของพลังงานสนามไฟฟ้าสูงสุดก่อนที่ช่องว่าง (Gab) จะเกิดเบรคดาวน์ (Breakdown)

โดยทั่วไปหากมองเชิงมหภาคแล้วพบว่าบริเวณช่องว่างสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดเบรคดาวน์ (Breakdown) เมื่อสนามไฟฟ้าค่าหนึ่งคงที่ ประมาณ 3 MVm^{-1} ซึ่งเราจะได้ความหนาแน่นของ

พลังงานสนามไฟฟ้าที่ประมาณ 40 Jm^{-3} ตัวอย่างเช่นเมื่อมีช่องว่าง (Gab) ที่ $1 \text{ }\mu\text{m}$ มีแรงดัน 3 Volt เมื่อแทนค่าในสมการพื้นฐานทั่วไปจะได้

$$\begin{aligned} \text{Electric field (E)} &= \frac{V}{D} \\ &= \frac{3 \text{ Volt}}{1 \text{ }\mu\text{m}} \\ &= 3 \times 10^6 \text{Vm}^{-1} \end{aligned}$$

สำหรับแอกซูเอเตอร์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กคือ

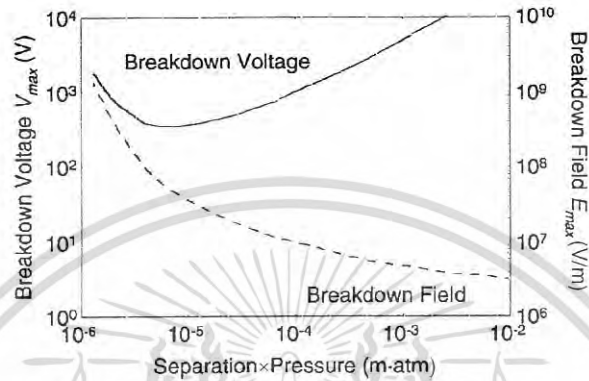
$$U_{\text{magnetostatic}} = \frac{1}{2} \left(\frac{B^2}{\mu} \right) \quad (3.12)$$

เมื่อ μ คือ Permittivity
 B คือ Magnetic Flux Density

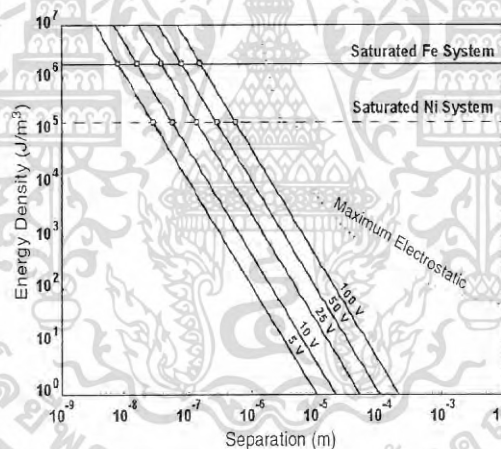
พลังงานสนามแม่เหล็กสูงสุดที่ทำได้ จะถูกกำหนดด้วยสนามแม่เหล็กอิ่มตัว (B_{sat}) ตามปกติจะอยู่ที่ขนาดประมาณ $1T$ หรือ $1 \text{ V}\cdot\text{sm}^2$ และจะได้ค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กคือ $400,000 \text{ Jm}^{-3}$ ดังนั้นจะเห็นว่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กมีมากกว่าพลังงานไฟฟ้าถึงหนึ่งหมื่นเท่า ดังนั้นแอกซูเอเตอร์ที่เป็นแบบสนามแม่เหล็กจึงนิยมใช้แพร่หลายในมอเตอร์ขนาดใหญ่ทั่วไป อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่กล่าวในที่นี้เมื่อทำให้เล็กลงในระดับหนึ่ง คุณสมบัติก็ยังคงเหมือนเดิมแต่เมื่อเล็กลงมากๆปรากฏว่าระบบที่ใช้สนามไฟฟ้าจะมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นคือสามารถเก็บพลังงานของสนามไฟฟ้าได้มากขึ้นเนื่องจากสนามไฟฟ้าเบรคดาวน์ (Breakdown Electric Field) ของช่องว่างนั้นมีค่าสูงขึ้นมาก เพราะว่าช่องว่างน้อยมากๆนั้นจะมีก๊าซในช่องว่างน้อยลงจึงเกิดการไอโอไนเซชันทางโมเลกุลของก๊าซที่อยู่ระหว่างช่องว่างยากขึ้น ดังนั้นสนามเบรคดาวน์ (Breakdown Field) ก็จะสูงขึ้นตาม ได้มีการสร้างความสัมพันธ์ของแรงดันเบรคดาวน์กับช่องว่างดังกล่าวขึ้นเรียกว่าพาสเชนเคิร์ฟ (Paschen Curve) ดังรูปที่ 3.7 [99-100] จากความรู้ดังกล่าวนี้จะส่งผลต่ออุปกรณ์ที่มีช่องว่างเล็กๆจะทำให้ค่าเบรคดาวน์สูงสุด (Maximum Breakdown) นั้นมีค่าสูงขึ้นทำให้ความหนาแน่นของพลังงานสนามสูงสุด (Maximum Field Energy Density) สูงขึ้น เมื่อพลังงานสนามสูงสุดมีค่าสูงขึ้นก็จะนำไปใช้ประโยชน์กับสร้างอุปกรณ์ต่างๆในกระบวนการไมโครแมชีนนิ่งและงานขนาดเล็กได้ดีในอนาคต จากรูปที่ 3.8 เป็นกราฟได้ทำการคำนวณมาแล้ว โดยจะมีช่องว่างอันหนึ่งซึ่งจะทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าสถิตย์สะสมสูงสุด ช่องว่างระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์โดยคำนวณทางโมเดลคือค่าสูงสุดที่จะเป็นไปได้คือ $2 \text{ }\mu\text{m}$ อย่างไรก็ตามถ้ามีการประยุกต์ก็จะไปถึงจุดเบรคดาวน์ (ตามปกติจะไม่ใช้จุดเบรคดาวน์) ตามปกติจะให้จ่ายแรงดันให้อุปกรณ์น้อยๆ ถ้าหากช่องระยะประมาณ $2 \text{ }\mu\text{m}$ จะได้ Electric field = 10 MV เมื่อนำไปคำนวณพลังงานก็ยังคงได้พลังงานน้อย (เช่น 3 Volt ได้ Energy density 40 Jm^{-3}) ดังนั้นต้องลด Gab ลงให้ได้ $0.05 \text{ }\mu\text{m}$ สำหรับใช้ Voltage 10 Volt เพื่อให้ได้ค่าตามต้องการ สรุปได้ว่าการศึกษในช่วงแรกเมื่อพิจารณาเชิงกว้างเราใช้ในรูปแบบแม่เหล็กดีกว่าสนามไฟฟ้า เพราะพลังงานสะสมรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามแม่เหล็กมากกว่าสนามไฟฟ้าถึง 10,000 เท่า แต่พอมาศึกษาเพื่อเห็นภาพเชิงระดับไมโคร สนามไฟฟ้ากลับมีบทบาทมาแทน เนื่องจากค่าเบรคดาวน์จะมีสนามไฟฟ้าสูงขึ้นทำให้พลังงานสะสม ในรูปสนามไฟฟ้าก็สูงขึ้นด้วย จากรูปที่ 3.7-3.8 ปัญหาการใช้แอกชูเอเตอร์แบบสนามแม่เหล็ก (Magnetic Actuators) จะมีปัญหาคือสูญเสียพลังงานอันเนื่องมาจากความต้านทานและเกิดความยุ่งยากในการทำขดลวดให้เล็กเพื่อนำมารวมในพื้นที่เล็ก ๆ ซึ่งการทำให้แอกชูเอเตอร์แบบ สนามแม่เหล็กเล็กลงก็เป็นปัญหาที่นักวิจัยต้องศึกษาวิจัยต่อไป



รูปที่ 3.7 แสดงกราฟของพาสเซนเคิร์บ [99-100]



รูปที่ 3.8 กราฟเปรียบเทียบความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่ระยะช่องว่างของโรเตอร์และสเตเตอร์ที่ต่างกัน [99-100]

3.6.8 การย่อขนาดของระบบทางแสง

ในปัจจุบันเทคนิคทางไมโครแพบริเคชันได้มีการพัฒนาจนสามารถใช้ผลิตงานระบบทางแสงที่มีขนาดเล็กได้แล้วเช่นหลอดแอลอีดี เลเซอร์ การประยุกต์เชิงเวฟไกด์ (Integrated Waveguide) กระจกขนาดไมโครและเกรตติงสำหรับงานแทรกสอดของแสง เป็นต้น ขนาดของอุปกรณ์ทางออปติกส์ปกติจะไม่ทำให้เล็กลงกว่าความยาวคลื่นของแสงขาว (650-475 นาโนเมตร) การย่อขนาดของระบบทางแสงเท่าที่ปรากฏในปัจจุบัน สามารถทำนายหรืออธิบายได้อย่างดีจากสมการทั่วไป ซึ่งถือเป็นเรื่องโชคดีทางด้านออปติกส์ที่มีทฤษฎีต่างๆอธิบายไว้แล้ว ตัวอย่างเช่น สมการของเฟรสเนล (Fresnel equations) เป็นต้น [101]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การออกแบบและผลิตแม่พิมพ์นูนเบื้องต้น

4.1 แม่พิมพ์นูนที่กัดด้วยเครื่องซีเอ็นซี

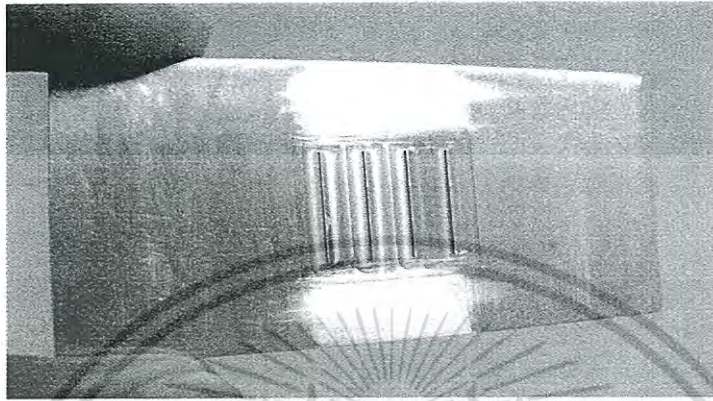
การศึกษาวิจัยการสร้างแม่พิมพ์นูนแบบร้อนโดยเทคโนโลยีการพ่นผงอนุภาคเป็นการสร้างแม่พิมพ์ขึ้นมาใหม่ซึ่งผลการวิจัยในเรื่องดังกล่าวยังไม่พบสร้างมากนักโดยเฉพาะการนำมาประยุกต์เพื่อรีดหรือบีบอัดบนพลาสติกเพื่อเป็นช่องของไหลจุลภาคและสำหรับการประยุกต์ใช้งานเป็นแลปส์ออนชิปนั้นยังไม่พบผู้ศึกษาวิจัย ดังนั้นในการศึกษาเริ่มต้นจึงได้เริ่มต้นทดลองศึกษาผลการอัดแม่พิมพ์โลหะแบบร้อนบนวัสดุที่เป็นพลาสติกซึ่งเป็นเรื่องแรกๆ โดยศึกษาจากแม่พิมพ์ชนิดอื่นที่เตรียมได้ง่ายกว่าก่อนเช่น แม่พิมพ์อลูมิเนียมเป็นต้น เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ก่อนที่จะนำไปทดสอบกับแม่พิมพ์แบบใหม่ที่ได้สร้างขึ้น การศึกษาดังกล่าวได้เลือกใช้พลาสติกชื่อพอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethyl methacrylate) หรือเรียกย่อว่าพีเอ็มเอ็มเอ (PMMA) เป็นพลาสติกที่มีลักษณะใสโปร่งแสงคล้ายกระจกและทนต่อแรงขีดข่วนซึ่งอาจสามารถใช้ทดแทนกลาสส์ได้

4.1.1 การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์นูนจากเครื่องซีเอ็นซี

การออกแบบแม่พิมพ์นูนเบื้องต้นเพื่ออัดพิมพ์ลงบนพลาสติกพีเอ็มเอ็มเอนั้นได้ออกแบบแม่พิมพ์นูนขนาดเล็กจากวัสดุอลูมิเนียมมีขนาดกว้างและยาวโดยประมาณนั้นเท่ากับกลาสส์คือขนาดกว้างประมาณ 3 เซนติเมตรและยาวประมาณ 7 เซนติเมตร กัดและสร้างลวดลายบนแม่พิมพ์โดยการกัดจากระบบเครื่องกัดซีเอ็นซีขนาดใหญ่ที่มีความละเอียดสูงโดยส่งไปกัดที่ประเทศเยอรมันมีความคลาดเคลื่อนแค่ประมาณ 1 ไมโครเมตรเท่านั้น โดยสร้างให้เป็นรอยนูนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็กซึ่งสูงประมาณ 120 ไมโครเมตรเท่ากันและเป็นเส้นที่ยาวเท่ากันแต่กัดให้มีขนาดความกว้างของเส้นนูนต่างกัน ความกว้างของเส้นแม่พิมพ์มีขนาดตั้งแต่ขนาด 100 ไมโครเมตร 200 ไมโครเมตร 300 ไมโครเมตร และ 400 ไมโครเมตรตามลำดับ การสร้างแม่พิมพ์อลูมิเนียมนี้เพื่อนำมาสร้างช่องของไหลขนาดเล็กบนพลาสติกและนำไปประกอบกับเครื่องอัดพิมพ์ขนาดเล็กที่ออกแบบไว้ก่อนหน้านี้โดยนำแม่พิมพ์ที่ได้นี้ไปวางในช่องวางชิ้นงานที่ระบบรักษาอุณหภูมิให้คงที่เพื่อการทดสอบหาค่าความร้อนที่เหมาะสมสำหรับป้อนให้แม่พิมพ์อลูมิเนียมและให้แก่แท่นวางเพื่อศึกษาและรักษาอุณหภูมิให้เหมาะสมในการอัดพิมพ์และขึ้นรูปในพลาสติก การออกแบบเครื่องอัดพิมพ์ดังกล่าวนี้จะต้องจ่ายกระแสให้แก่ฮีตเตอร์ที่ฝังไว้บริเวณที่วางชิ้นงานด้านล่างและชุดอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่บีบอัดที่อยู่ด้านบนเพื่อให้อุณหภูมิคงที่ตลอดเวลาหลังจากติดตั้งแม่พิมพ์อลูมิเนียมดังกล่าว เพื่อดูระยะเวลาที่แม่พิมพ์อัดลงบนพลาสติก นอกจากนี้เพื่อดูแรงบีบอัดที่เหมาะสมให้แก่พลาสติกด้วย การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมดังกล่าวจะช่วยให้เราสามารถนำไปทดสอบกับแม่พิมพ์ที่เป็นโลหะที่มีลักษณะเดียวกันและระบบเครื่องเดียวกันได้ แม่พิมพ์ที่เป็นอลูมิเนียมนี้เป็นเนื้อโลหะเดียวกันตลอดทั้งแม่พิมพ์และซัพสเตรทเพราะขึ้นรูปจากการกัดลงในเนื้อซัพสเตรท ดังนั้นแรงกระแทกและความร้อนจึงไม่เป็นผลเสียต่อแม่พิมพ์และจะเป็นผลดีต่อการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ดังกล่าวไปใช้กับแม่พิมพ์อื่นๆ ทั้งที่เป็นโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คล้ายกันและแม่พิมพ์ชนิดอื่นที่บอบบางเช่น ใ้ใช้กับแม่พิมพ์ที่มีลวดลายเป็นสารโพโตริซิสเพื่อดูแรง และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทดลองในครั้งต่อไป การทดสอบด้วยแม่พิมพ์อลูมิเนียมนี้ยังจะช่วยให้ลด การเสียหายของแม่พิมพ์เนื่องจากการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่ผิดพลาดเป็นต้น



รูปที่ 4.1 ลักษณะแม่พิมพ์หุ่นที่กัดจากเครื่องจักรซีเอ็นซีที่มีความละเอียดสูง



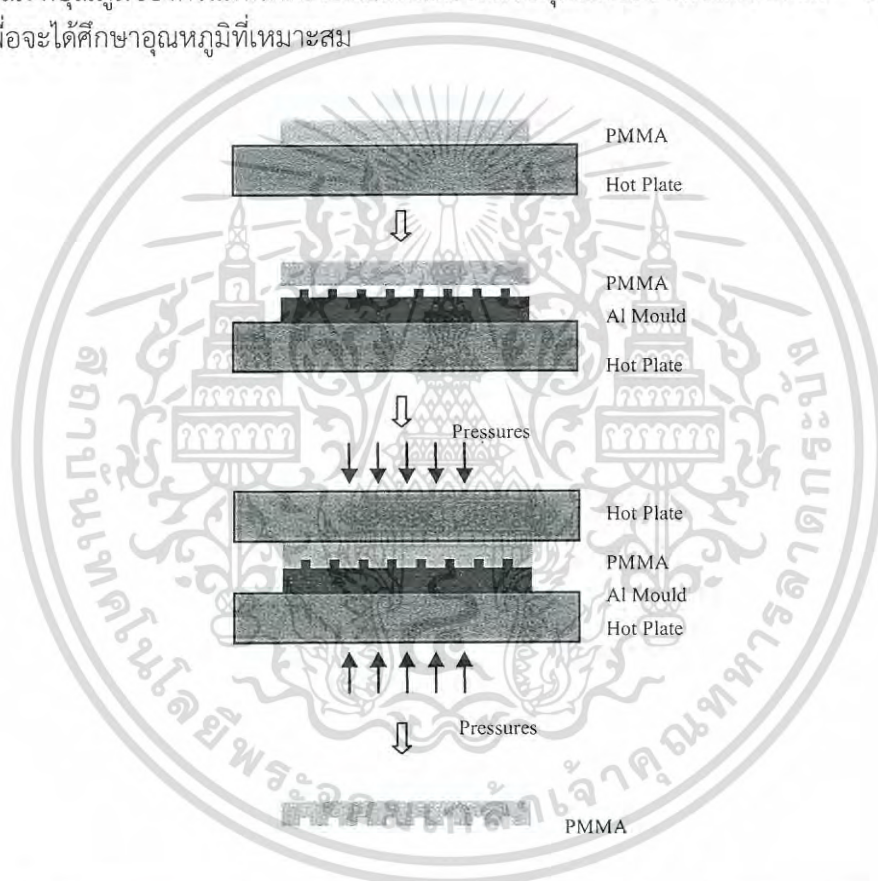
รูปที่ 4.2 ร่องของไหลจุลภาคที่ทดสอบอัดพิมพ์ลงบนพลาสติกจากแม่พิมพ์หุ่นที่กัดจากเครื่องจักรซีเอ็นซีที่มีความละเอียดสูง

4.1.2 การแพปริเคทแม่พิมพ์บนวัสดุพลาสติก

การสร้างช่องของไหลจุลภาคด้วยแม่พิมพ์อลูมิเนียม เมื่อนำไปอัดพิมพ์ลงบนวัสดุพลาสติก ชนิดพีเอ็มเอ็มเอนั้นจะต้องนำพลาสติกดังกล่าวตัดเป็นชิ้นให้มีขนาดพอเหมาะและใกล้เคียงกับแม่พิมพ์ซึ่งควรเล็กกว่าแม่พิมพ์พลาสติกทำให้แม่พิมพ์สามารถอัดพิมพ์ได้เต็มระนาบของพลาสติกและเหมาะที่จะนำไปประกบติดกับพลาสติกเปล่าอีกครั้งเพื่อเป็นแลปส์ออนชิปที่พร้อมนำไปประกอบใช้งาน การเตรียมนั้นโดยนำพลาสติกไปวางบนแผ่นเครื่องทำความร้อนหรือเครื่องฮอตเพลทที่อุณหภูมิ มีความละเอียดสูงหรือเครื่องที่สามารถตั้งค่าอุณหภูมิอย่างอัตโนมัติ โดยตั้งอุณหภูมิครั้งแรกที่ 200 องศาเซลเซียสเพื่อให้พลาสติกเกิดการอ่อนตัวแต่ห้ามไม่ให้อุณหภูมิเกิน 290 เนื่องจากจะทำให้พลาสติกละลายและไหม้ ซึ่งอุณหภูมิที่ทำให้พลาสติกนุ่มพร้อมที่จะเปลี่ยนรูปร่างตามแม่พิมพ์คืออยู่ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณ 200 องศาเซลเซียสและพลาสติกมีการอ่อนตัวอยู่ได้แค่ 90 องศาเซลเซียสเท่านั้น หลังจากที่เราเตรียมครั้งแรกให้พลาสติกได้ 200 องศาเซลเซียสแล้วจากนั้นนำพลาสติกที่อ่อนตัวไปวางบนเครื่องอัดพิมพ์พร้อมกับมีพิมพ์อลูมิเนียม ในระบบเครื่องอัดพิมพ์นั้นก็ได้ออกแบบบริเวณที่จะรีดอัดให้มีอุณหภูมิที่พอเหมาะคือประมาณ 200 องศาเซลเซียสเพื่อให้พลาสติกยังคงมีสภาพอ่อนตัว การรักษาสภาพให้คงการอ่อนตัวดังกล่าวอ้างอิงจากหลักการที่เรียกว่า “การเปลี่ยนแปลงลักษณะที่เหมือนแก้ว” (Glass Transition) กล่าวคือพลาสติกเปลี่ยนจากแข็งเป็นลักษณะอ่อนตัว เกิดขึ้นที่อุณหภูมิที่เรียกว่า อุณหภูมิ “กลาสส์ทรานซิชัน” นั่นเอง การวางแผ่นพลาสติกลงบนบริเวณอัดพิมพ์นั้นได้ศึกษาเวลาที่ใช้ในการบีบอัดพลาสติกด้วยโดยได้ศึกษาเวลาที่ใช้อัดพิมพ์ตั้งแต่ 2 วินาที ถึง 6 วินาที ในขณะที่อุณหภูมิของตัวแม่พิมพ์ที่จะใช้อัดพิมพ์จะควบคุมให้เปลี่ยนแปลงจาก 60 – 80 องศาเซลเซียสเพื่อจะได้ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสม



รูปที่ 4.3 ภาพกระบวนการที่อัดพิมพ์เพื่อลอกกลายจากแม่พิมพ์นูนที่เป็นโลหะอลูมิเนียม

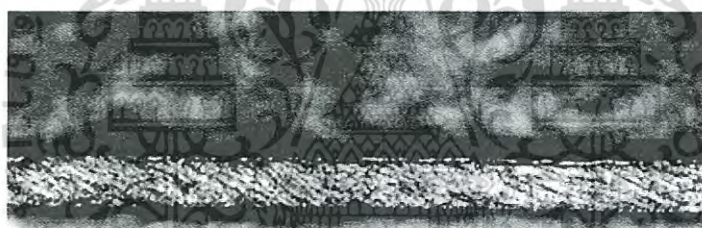
การทดลองในครั้งนี้เพื่อให้เกิดแรงอัดที่คงที่จึงได้ปรับแรงดันให้คงที่ตลอดเวลาโดยได้แรงดันจากถังก๊าซไนโตรเจนและปรับแรงดันให้เหมาะสมด้วยตัวเรกูเลเตอร์โดยป้อนให้แก่กระบอกสูบ 2 ชุดเพื่อใช้อัดพิมพ์และหาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสม การสร้างงานชิปพลาสติกจากการอัดพิมพ์ซึ่งเรียกทั่วไปว่า “แพปริเคท” นั้นจะศึกษาคุณสมบัติที่ได้บริเวณร่องของพลาสติกพีเอ็มเอ็มเอทีที่เกิดจากอัดพิมพ์ด้วยแม่พิมพ์นูนแบบอลูมิเนียม การวัดร่องที่จะนำไปใช้เป็นระบบของไหลจุลภาคนั้นได้ใช้เครื่องวัดรายละเอียดผิว (Surface Profiler) ในที่นี้เราจะใช้ยี่ห้อ Dektak และชื่อรุ่นคือ Dektak

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Profiler ผลการวัดค่าที่ได้จากการอัดพิมพ์ลงบนพลาสติกนี้มีจุดประสงค์หลักคือเพื่อเปรียบเทียบกับแม่พิมพ์นูนต้นแบบซึ่งเป็นวัสดุชนิดอลูมิเนียมและนำค่าที่ได้มาศึกษาและเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนกับแม่พิมพ์ชนิดอื่นและวิธีการอื่น

4.1.3 ผลการทดลองแม่พิมพ์นูนที่กัดด้วยเครื่องซีเอ็นซี

เมื่อทำการอัดพิมพ์แม่พิมพ์นูนที่เป็นอลูมิเนียมลงบนพลาสติกด้วยการปรับแรงอัดจากกระบอกสูบให้คงที่ประมาณ 3 บาร์ ปรับอุณหภูมิบริเวณแม่พิมพ์ระหว่าง 60-80 องศาเซลเซียสและอัดลงบนพลาสติกด้วยเวลาระหว่าง 2-6 วินาที ผลการทดลองพบว่าแม่พิมพ์นูนที่ได้จากการกัดซีเอ็นซีจะอัดเข้ากับวัสดุได้เป็นอย่างดี โดยรีร้อยของแม่พิมพ์ที่ถ่ายลงไปสู่พลาสติกนั้นมีความคมชัดทุกชั้น นับตั้งแต่ทดลองที่อุณหภูมิน้อยจนถึงอุณหภูมิมากกว่าและเวลาทดลองบีบอัดน้อยจนถึงเวลาบีบอัดมากซึ่งหลังจากที่นำไปส่องในกล้องไมโครสโคปที่กำลังขยายประมาณ 100 เท่าพบว่าบริเวณร่องที่สร้างเป็นของไหลจุลภาคจะเห็นรีร้อยของผิวแม่พิมพ์ถ่ายเทลงบนพลาสติกได้ชัดเจน ดังรูปที่ 4.4 จนถึง รูปที่ 4.7 จากภาพจะสังเกตเห็นความชัดเจนเฉพาะบริเวณที่โฟกัสเท่านั้นเนื่องจากเป็นข้อจำกัดของไมโครสโคปที่ส่องได้ชัดเพียงระดับที่โฟกัสได้ ดังนั้นจึงเห็นความชัดเจนบริเวณร่องลึกของแนวเส้นของช่องของไหลจุลภาคที่ได้อัดพิมพ์และบริเวณผิวหน้าด้านบนบนสุดของมีพิมพ์นูนเท่านั้น

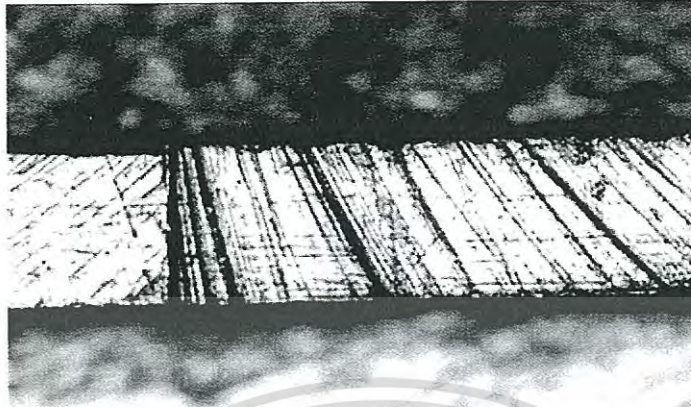


รูปที่ 4.4 ภาพด้านบนของแม่พิมพ์นูนแบบอลูมิเนียมที่กว้าง 100 ไมโครเมตร

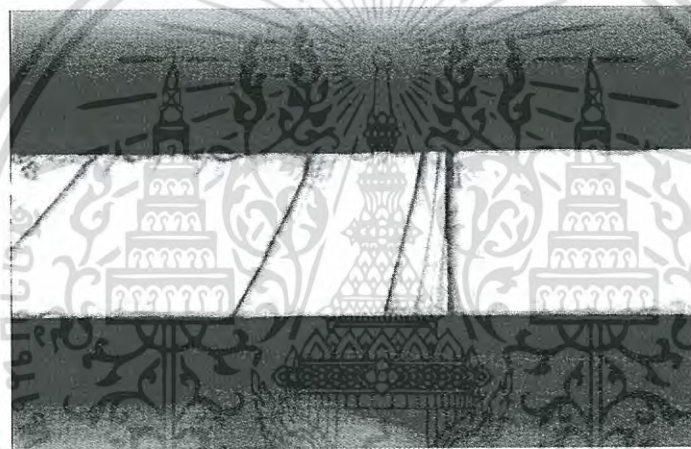


รูปที่ 4.5 ภาพช่องของไหลบนพลาสติกที่อัดพิมพ์จากแม่พิมพ์นูนแบบอลูมิเนียมที่กว้าง 100 ไมโครเมตร

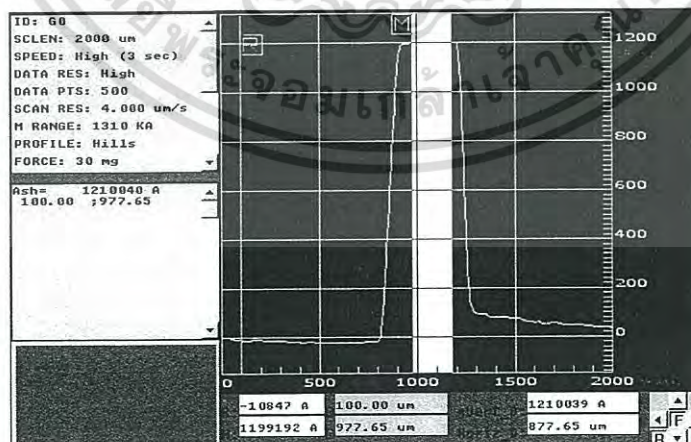
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ภาพด้านบนของแม่พิมพ์นูนแบบอลูมิเนียมที่กว้าง 400 ไมโครเมตร

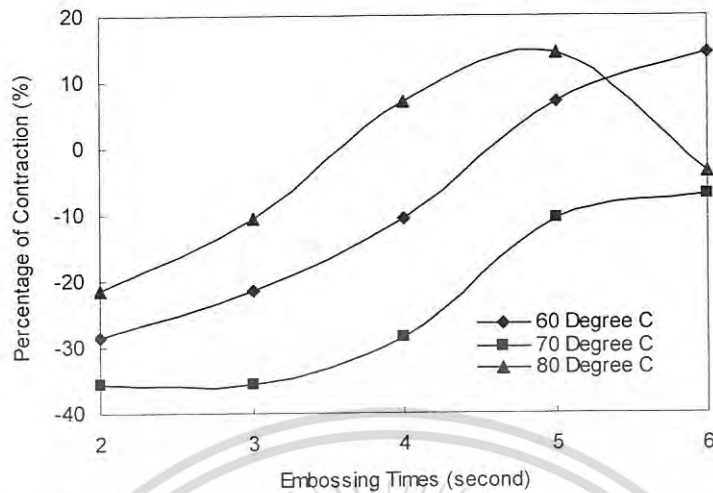


รูปที่ 4.7 ภาพช่องของไหลบนพลาสติกที่อัดพิมพ์จากแม่พิมพ์นูนแบบอลูมิเนียมที่กว้าง 400 ไมโครเมตร

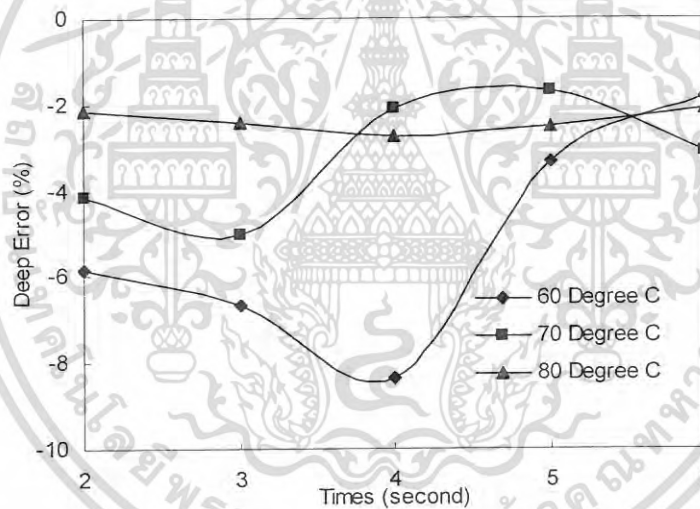


รูปที่ 4.8 ภาพที่บอกรายละเอียดความสูงของแม่พิมพ์นูนที่กัดจากเครื่องจักรซีเอ็นซีที่วัดจากเครื่อง Dektak Surface Profiler

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การหดตัวของพลาสติกและเวลาในการอัดพิมพ์บนพลาสติกของแม่พิมพ์อลูมิเนียม



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความลึกคลาดเคลื่อนและเวลาในการอัดพิมพ์บนพลาสติกของแม่พิมพ์อลูมิเนียม

4.2 แม่พิมพ์นูนที่สร้างจากเอชยู-8

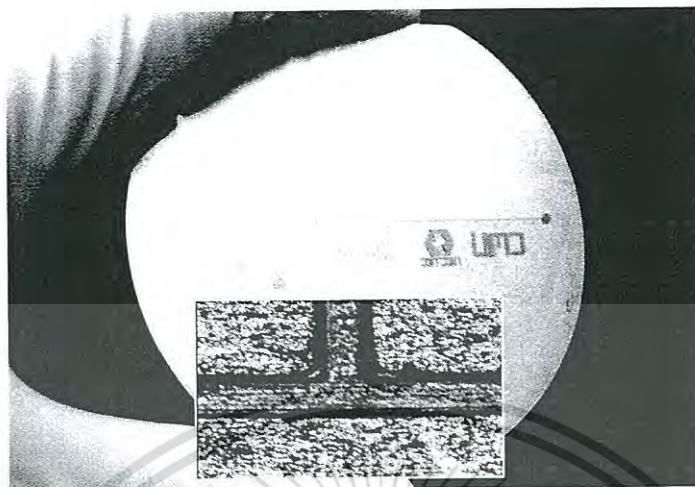
การสร้างด้วยแม่พิมพ์เอชยู-8 เป็นการสร้างในกระบวนการทางลิโทกราฟีที่ขึ้นรูปแม่พิมพ์ด้วยโฟโตรีซิส การทดลองสร้างแม่พิมพ์ลักษณะนี้มีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาทดลอง เนื่องจากการสร้างแม่พิมพ์นูนจากโลหะเพื่อเป็นลวดลายสำหรับงานทางระบบของไหลจุลภาคนั้น เรามีข้อจำกัดที่ไม่สามารถที่จะทำได้ขนาดเล็กมากเนื่องจากแม่พิมพ์แบบโลหะทั่วไปเช่น วัสดุอลูมิเนียมนั้นหากเราจะสร้างแม่พิมพ์ด้วยเครื่องซีเอ็นซีที่มีความละเอียดสูงเราสามารถทำให้ละเอียดมากที่สุดหรือไม่นั้นก็ขึ้นอยู่กับความละเอียดของเครื่องจักรซีเอ็นซีนั่นเอง ดังนั้นเมื่อต้องการสร้างแม่พิมพ์ที่มีขนาดเล็กกว่า

นี่จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะหาวิธีต่างเพื่อให้การสร้างช่องของไหลในแลปส์ออนชิปเล็กที่สุดเพื่อประโยชน์ในการทดลองและในการประหยัดสารละลายที่มีราคาแพงมาก จึงได้เริ่มศึกษาวิจัยแม่พิมพ์ อนุขึ้นมาใหม่ที่ทำจากโฟโตรีซิสและสร้างลงบนโลหะที่เป็นสแตนเลส การศึกษาวิจัยเพื่อสร้างแม่พิมพ์ อนุด้วยวิธีดังกล่าวสามารถทำให้เล็กลงได้เท่าที่ต้องการหรือเล็กที่สุดเท่าที่เทคโนโลยีการสร้าง หน้ากากบังแสงจะสามารถทำได้และทำในกระบวนการไมโครแพบริเคชันที่สะอาดกว่ากระบวนการ กัดโดยตรงจากเครื่องจักร

4.2.1 การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์อนุจากเอชยู-8

การออกแบบเบื้องต้นเพื่อทดลองศึกษาวิจัยนั้นได้ออกแบบให้เป็นรูระบบของไหลจุลภาคที่นำไปใช้ในงานทดสอบภาคสนามจริงสำหรับการนำไปผสมสารในกระบวนการทางเคมีและนำไปทดลองในห้องปฏิบัติการ เป็นลักษณะมีขั้วต่อสำหรับการบ่อนสารละลาย 5 ตำแหน่งและมีการขุดไปมา 5 ครั้งเพื่อให้สารผสมเข้าหากันก่อนตรวจวัด กระบวนการเตรียมอุปกรณ์ดังกล่าวต้องสร้าง หน้ากากบังแสงจากพลาสติกให้เป็นรูระบบของไหลจุลภาคที่เราต้องการและนำไปสร้างหน้ากานี้ ในห้องปฏิบัติการที่สามารถพิมพ์หมึกบังแสงบนแผ่นพลาสติกที่ละเอียดสูง โดยพิมพ์ให้เป็นสีดำทึบไม่ สามารถให้แสงผ่านได้ ต้องพิมพ์ให้ช่องแสงสามารถผ่านเฉพาะเส้นที่จะเป็นช่องทางเดินของของไหล เท่านั้น นั่นคือบริเวณที่ออกแบบให้สารเอชยู-8 คงอยู่ แม่พิมพ์ที่ทำจากเอชยู-8 นั้นเป็นสารโฟโตรีซิส ที่มีความไวต่อแสงอุลตราไวโอเลต ดังนั้นการเลือกใช้ต้องให้เหมาะสม นั่นคือก็ต้องเลือกรุ่นที่ขึ้นอยู่กับ ความหนาของสารโฟโตรีซิสที่เราเตรียมจะสร้างแพทเทิร์นด้วยด้วย เช่นหากต้องการสร้างที่ความหนา 100 ไมโครเมตรก็ต้องเลือกรุ่นจากผู้ผลิตที่ระบุสำหรับสปีนหรือหมุนเหวี่ยงให้หนา 100 ไมโครเมตร เหมือนกัน การสร้างแม่พิมพ์ที่ทำจากเอชยู-8 จะเริ่มจากนำไปสปีนบนแผ่นสแตนเลสทรงกลมเส้น ผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้วและแผ่นดังกล่าวมีความหนา 2.5 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปทำความสะอาดผิวใน เครื่องออกซิเจนพลาสมาเป็นเวลา 10 นาที การเลือกใช้เอชยู-8 จะเลือกใช้ชนิดที่ระบุว่าเป็น SU-8 No 2100 ซึ่งหมายถึงสร้างให้มีความหนา 100 ไมโครเมตร กระบวนการในการสปีนนั้นจะใช้สารโฟโตรี ซิสดังกล่าวลงบนแผ่นสแตนเลสและทำการสปีนเบื้องต้น 1000 รอบเป็นเวลา 5 วินาทีและหลังจาก นั้นก็จะทำต่อทันทีโดยตั้งเวลาให้สปีนอัตโนมัติที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อวินาทีเป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นนำเอชยู-8 ที่ผ่านการสปีนแล้วไปอบหรือเบค (Bake) เบื้องต้นที่ 60 องศาเซลเซียส 70 องศาเซลเซียส 80 องศาเซลเซียส อย่างละ 5 นาที ตามลำดับ และทำการอบอีกครั้งที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที การทำการเบคหลายขั้นตอนดังกล่าวเพื่อลดความเครียด (Stress) ของชั้นโฟโตรีซิสเอชยู-8 บนแผ่นสแตนเลส หลังจากที่ทำวงขึ้นงานไว้ในอุณหภูมิห้องให้เย็นแล้วนำเอช ยู-8 ไปฉายแสงอุลตราไวโอเลตที่ความยาวคลื่น 380 นาโนเมตรในเครื่องลิโทกราฟีโดยให้เวลาใน การฉาย 10 วินาที จากนั้นนำไปทำอบหรือเบคอีกครั้งที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที หลังจากครบกำหนดแล้ววางไว้ในอุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 12 ชั่วโมงเพื่อลดความเครียดจาก การฉายแสงยูวี หลังจากนั้นจึงเป็นขั้นตอนสุดท้ายคือนำไปแช่ในน้ำยาเคมีชื่อเอชยู-8 ดีเวลอปเปอร์ เป็นเวลา 20 นาที แล้วล้างออกด้วยน้ำบริสุทธิ์ซึ่งจะได้แม่พิมพ์ที่ทำจากเอชยู-8 ดังรูปที่ 4.12 และรูป ที่ 4.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ภาพแม่พิมพ์นูนแบบร้อนที่สร้างจากเอชยู-8 และภาพเส้นนูนขนาดเล็กรูปตัว T บริเวณแม่พิมพ์



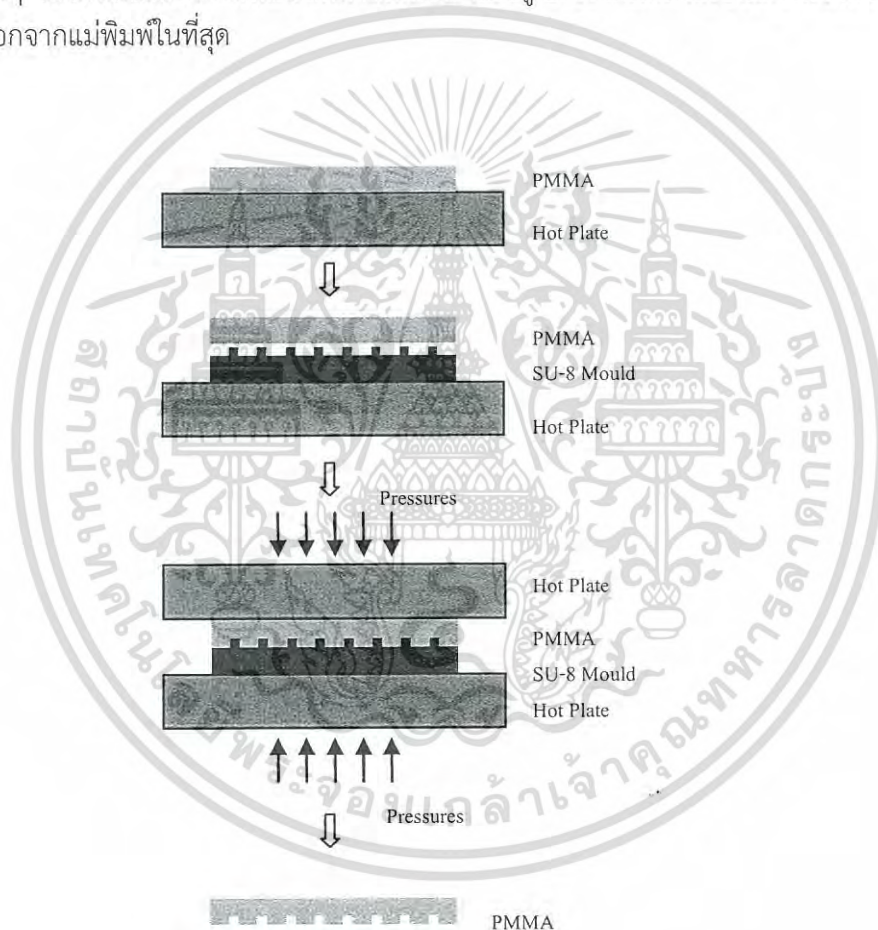
รูปที่ 4.13 ภาพแม่พิมพ์นูนแบบร้อนที่สร้างจากเอชยู-8 และภาพขยายเส้นนูนขนาดเล็กรูปตัว U บริเวณแม่พิมพ์

4.2.2 การแปบริเคทแม่พิมพ์เอชยู-8 บนวัสดุพลาสติก

การแปบริเคทหรือถ่ายร็วรอยจากแม่พิมพ์ที่เป็นเอชยู-8 ลงบนพลาสติกนั้นก็ทำในกระบวนการเดียวกันกับแม่พิมพ์นูนจากวัสดุอะลูมิเนียม โดยนำพลาสติกที่เตรียมเป็นแลปส์อ่อนชนิดนั้นไปวางบนฮอทเพลทและตั้งอุณหภูมิครั้งที่ 200 องศาเซลเซียสเพื่อให้พลาสติกเกิดการอ่อนตัวเป็นเวลา 5 นาที จากคุณสมบัติของพลาสติกที่เราใช้จะหลอมละลายที่ 290 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ทำให้พลาสติกนูนพร้อมที่จะเปลี่ยนรูปร่างตามแม่พิมพ์คืออยู่ที่ประมาณ 200 องศาเซลเซียส และพลาสติกมีการอ่อนตัวอยู่ได้แค่ 90 องศาเซลเซียสเท่านั้น ดังนั้นอุณหภูมิและเวลาที่ทดลองต้องแม่นยำเพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อน การนำพลาสติกพีเอ็มเอ็มเอวางบนเครื่องอัดพิมพ์แบบร้อนนั้นจะทำการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงเวลาในการอัดพิมพ์และเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยให้ความดันในการอัดพิมพ์คงที่เป็น 3 บาร์ เวลาในการอัดพิมพ์นั้นจะใช้ทดสอบตั้งแต่ 2-6 วินาทีโดยนับจากแม่พิมพ์สัมผัสผิวของพลาสติก และแม่พิมพ์เอชยู-8 ยกขึ้น การปรับอุณหภูมินั้นทำที่ 60 องศาเซลเซียสจนถึง 80 องศาเซลเซียส การทดลองครั้งนี้ต้องจับเวลากារวางพลาสติกบนฮอตเพลท การนำพลาสติกไปวางบนเครื่องอัดพิมพ์แบบร้อนนั้นต้องทำอย่างต่อเนื่องเพื่อไม่ให้อุณหภูมิห้องมีผลกระทบต่อแม่พิมพ์และขณะทำการทดลองต้องทำภายใต้อุณหภูมิห้องคงที่คือ 25 องศาเซลเซียส กระบวนการอัดพิมพ์แบบร้อนของเอชยู-8 ก็ทำในลักษณะเดียวกันกับแม่พิมพ์ที่เป็นอลูมิเนียมดังรูปที่ 5.14 การทดลองในกระบวนการนี้จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องควบคุมอุณหภูมิที่ตั้งไว้ให้ถูกต้องแม่นยำเช่นกัน เนื่องจากเอชยู-8 ที่เป็นแม่พิมพ์หากความร้อนสูงมากๆ จะไม่หลอมละลายเหมือนพลาสติกใสแต่เอชยู-8 จะไหม้กลายเป็นสีดำแข็งตัว เปราะและลอกออกจากแม่พิมพ์ในที่สุด



รูปที่ 4.14 กระบวนการอัดพิมพ์ที่ลอกออกจากแม่พิมพ์นูนที่สร้างจากเอชยู-8

4.2.3 ผลการทดลองแม่พิมพ์เอชยู-8

การทดลองอัดพิมพ์ลงบนแผ่นพลาสติกใสหนา 2 มิลลิเมตรนั้นใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองแม่พิมพ์อลูมิเนียม นั่นคือใช้ความดันที่ป้อนให้ระบบ 3 บาร์ ใช้อุณหภูมิที่ทำการบีบอัดที่ 80

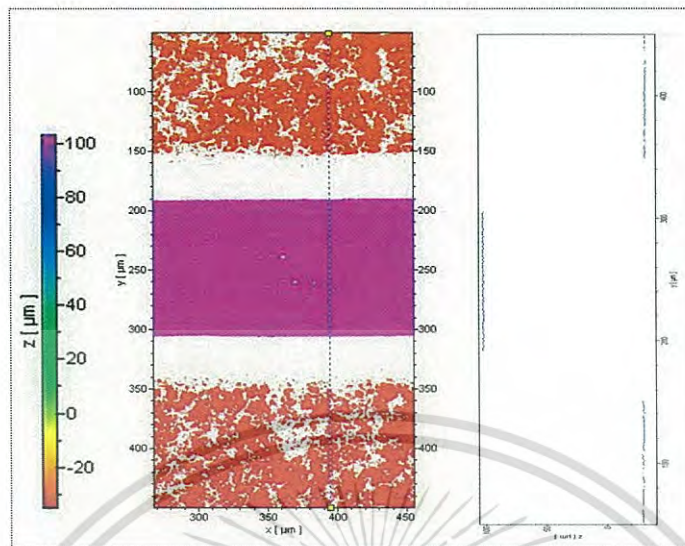
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องศาเซลเซียสและใช้เวลาในการบิบบนพลาสติกพีเอ็มเอ็มเอ 4 วินาที เมื่อนำแม่พิมพ์เอชยู-8 ติดตั้งในระบบของเครื่องอัดพิมพ์และปรับอุณหภูมิให้คงที่ ทำการอัดพิมพ์ลงบนแผ่นดังอย่างปรากฏว่า แม่พิมพ์แบบเอชยู-8 สามารถถ่ายรีวรอยบนพลาสติกได้อย่างดี มีลักษณะสะอาดใสดังรูปที่ 4.15 ซึ่งผลที่ได้ดังกล่าวนี้สามารถนำไปสร้างเป็นระบบของไหลจุลภาคได้โปร่งใสไม่ต่างจากวัสดุเป็นแก้ว อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปนักวิจัยที่เคยสร้างแลบส์ออนชิปนั้นแม้จะสร้างบนวัสดุโพลีเมอร์ชนิดใดก็ตามก็จำเป็นต้องประกบติดให้ปิดสนิทด้วยโพลีเมอร์ชนิดเดียวกันหรือหากเป็นโพลีเมอร์ที่อ่อนตัวอย่างพีดีเอ็มเออาจใช้แผ่นกลาสไลด์ประกบติดเป็นซัพสเตรทก็ได้ ในกรณีที่เป็นวัสดุพลาสติกก็เช่นเดียวกันจำเป็นต้องประกบติดกับวัสดุพลาสติกชนิดเดียวกันเพราะทำได้ง่ายกว่านั้นคือโดยใช้แค่กาวละลายพลาสติกติดเท่านั้น การประกบติดวิธีการเดิมโดยใช้กลาสไลด์นั้นจำเป็นต้องสร้างให้ผิวของโพลีเมอร์มีสภาพเป็นผิวชอบน้ำหรือไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) เพื่อจะได้ประกบติดแน่นกับแผ่นกลาสไลด์ ดังนั้นวิธีการทำระบบของไหลจุลภาคบนพลาสติกนี้จึงมีข้อดีกว่าเพราะสามารถประกบติดได้ทันทีกับพลาสติกแบบเดียวกันโดยอาจทาน้ำยาประสานพลาสติกซึ่งทำให้รวดเร็วขึ้น การทดสอบผิวพลาสติกหลังกระบวนการอัดพิมพ์มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งเนื่องจากช่องของไหลจุลภาคที่ได้นี้จะต้องนำประกอบติดกับแผ่นพลาสติกและเจาะรูเพื่อประยุกต์ใช้งานเป็นแลบส์ออนชิปแต่ละประเภท งานประเภทแลบส์ออนชิปส่วนใหญ่จำเป็นต้องมีลักษณะใสและราบเรียบดังนั้นจึงได้นำไปทดสอบในเครื่องทดสอบสภาพผิวแบบอินเตอร์เฟอโรเมตริก (ยี่ห้อ Polytec, จากเยอรมัน) ซึ่งแม่พิมพ์เอชยู-8 ที่มีความสูงประมาณ 100 ไมโครเมตรและอัดรีดลงในพลาสติกแล้วจะมีค่าความความหยาบของผิว (Surface Roughness) ที่อ่านเป็นค่าเฉลี่ยของ (Standard Deviation) เป็น 278.9 นาโนเมตร และมีความเรียบของผิว (Surface Flatness) เป็น 2.02 ดังรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17

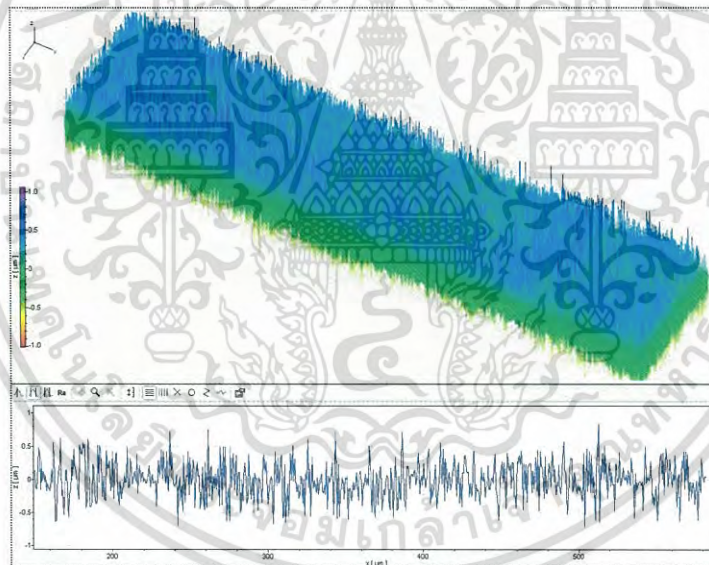


รูปที่ 4.15 สภาพลวดลายของช่องของไหลจุลภาคที่ถูกอัดรีดลงบนพลาสติกชนิด PMMA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ภาพชั้นของแม่พิมพ์เอชยู-8 ด้านบนที่อ่านด้วยเครื่อง Interferometer Surface Profiler

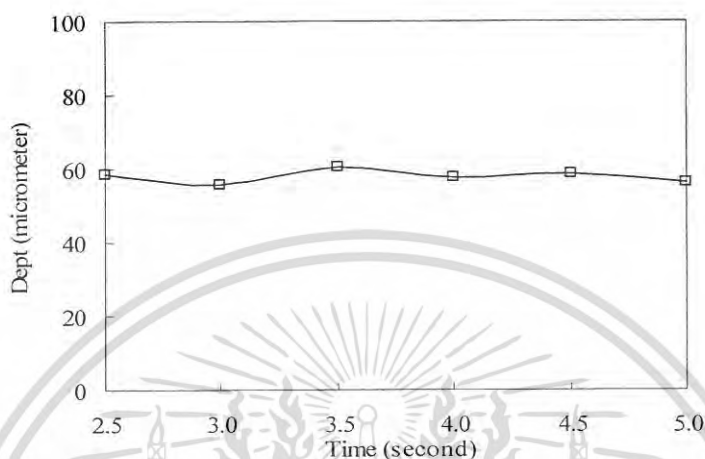


รูปที่ 4.17 ภาพผิวของช่องของไหลบนพลาสติกและกราฟของ Surface Roughness ที่อ่านได้จากเครื่อง Interferometer Surface Profiler

พลาสติกที่ได้จากการอัดพิมพ์จากแม่พิมพ์แบบ เอชยู-8 ที่มีความหนา 100 ไมโครเมตรที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสและเปลี่ยนเวลาในการประทับหรือบีบอัดที่ 2-5 วินาทีนั้นค่าความลึกที่ได้ทำการแพบริเคทเมื่อวัดจากเครื่องตรวจสภาพผิวยี่ห้อ Dektak แล้วจะมีความลึกโดยเฉลี่ยที่ 60 ไมโครเมตรดังรูปที่ 4.18 ดังนั้นการสร้างและทดสอบแม่พิมพ์ที่ทำจากอลูมิเนียมเปรียบเทียบกับแม่พิมพ์ที่ผลิตจาก เอชยู-8 จะเห็นว่าแม่พิมพ์เอชยู-8 เมื่อนำไปอัดพิมพ์แบบร้อนจะมีความคลาดเคลื่อนมากกว่า แต่อย่างไรก็ตามแม่พิมพ์เอชยู-8 จะมีข้อดีคือราคาถูกกว่าเพราะสร้างใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการทางไมโครแพบริเคชันทำให้สามารถสร้างแม่พิมพ์ได้เล็กกว่ามาก ในขณะที่แม่พิมพ์แบบอลูมิเนียมนั้นต้องใช้เครื่องไมโครอีดีเอ็ม (Micro Electro Discharge Machine) และเครื่องกัดซีเอ็นซีที่มีความละเอียดสูงซึ่งราคาแพง



รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกที่ได้อัดพิมพ์ลงบนพลาสติกของแม่พิมพ์เอชยู-8 และเวลาในการอัดพิมพ์เป็นวินาที

การแก้ปัญหาแม่พิมพ์อลูมิเนียมที่แพบริเคทบนพลาสติกที่มีต้นทุนการผลิตที่ราคาแพงและมีข้อจำกัดที่เครื่องกัดซีเอ็นซีไม่สามารถทำให้เล็กลงมากกว่านี้ เทียบกันกับการแก้ปัญหาแม่พิมพ์เอชยู-8 ที่ราคาถูก สามารถแพบริเคทให้มีความละเอียดสูงแต่มีปัญหาเรื่องการอัดพิมพ์ที่มีความคลาดเคลื่อนสูง จึงได้แก้ปัญหาทั้งแม่พิมพ์ทั้งสองแบบโดยการสร้างแม่พิมพ์โลหะที่สร้างในกระบวนการทางไมโครแพบริเคชันที่ใช้เทคนิคใหม่เพื่อให้ได้ความละเอียดสูงกว่าที่กัดด้วยซีเอ็นซีและได้ความละเอียดสูงเทียบเท่าแม่พิมพ์นูนที่ทำจากโฟโตรีซิสแต่มีความแข็งแรงและคลาดเคลื่อนน้อยดังจะกล่าวในบทต่อไป

บทที่ 5

การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์นูนแบบพ่นอนุภาค

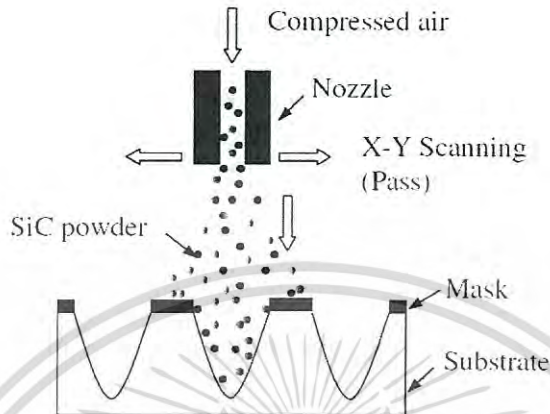
กระบวนการสร้างแม่พิมพ์นูนที่มีความละเอียดสูงและใช้ความร้อนในการบีบอัดนั้น ขนาดความสูงของแม่พิมพ์อาจทำได้ไม่สูงมากนักเนื่องจากเป็นข้อจำกัดของโพโตรซีสและถึงแม้จะสร้างแม่พิมพ์จากโพโตรซีสชนิดเอชยู-8 ก็ยังได้ความลึกที่คลาดเคลื่อนมากถึง 40 เปอร์เซ็นต์ดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 ซึ่งได้พยายามสร้างแม่พิมพ์นูนจากโลหะโดยตรงด้วยการกัดจากเครื่องซีเอ็นซีก็ยังไม่สามารถทำให้เล็กลงได้เกินกว่า 100 ไมโครเมตรเพราะขีดจำกัดของเครื่องจักร ก่อนหน้านี้ได้เคยมีผู้วิจัยการนำโพโตรซีสแบบแผ่นกาวมาสร้างสวดลายเป็นหน้ากากให้แม่พิมพ์โลหะแต่ก็ยังไม่เคยมีเป็นลักษณะที่บางเนื่องจากหน้ากากที่เป็นโพโตรซีสนั้นไม่คงทนต่อการพ่นอนุภาค ดังนั้นจึงได้ศึกษาและหาวิธีการสร้างแม่พิมพ์ด้วยวิธีการสร้างหน้ากากจากโพลีเมอร์พีดีเอ็มเอชที่ถ่ายสวดลายมาจากโพโตรซีสเอชยู-8 และการพ่นอนุภาคที่มีความละเอียดสูงเพื่อรองรับการใช้แม่พิมพ์ระดับไมโครเนื่องจากหลักการของการพ่นอนุภาคนั้นสามารถใช้ได้กับทุกโลหะหรือใช้ได้กับวัสดุทุกประเภทที่สามารถแตกกระเทาะจากพลังงานจลของผงอนุภาคที่เล็กๆ การสร้างแม่พิมพ์นูนแบบร้อนด้วยวิธีการทางการพ่นอนุภาคที่มีความละเอียดสูงนี้เคยมีเฉพาะกลุ่มวิจัยที่สร้างมาจากวัสดุที่ทำมาจากแก้วเท่านั้น ดังนั้นในบทความนี้จะนำเสนอวิธีการใหม่ของการสร้างแม่พิมพ์นูนขนาดไมครอนที่ทำจากโลหะซึ่งดีกว่า เลือกโลหะเป็นประเภทสแตนเลส เป็นการพัฒนาเทคโนโลยีการพิมพ์แบบนูนที่มีประโยชน์อย่างยิ่งต่องานอุตสาหกรรมและเน้นการประยุกต์ใช้กับงานแลปส์ออนชิปในอนาคต

5.1 การออกแบบแม่พิมพ์นูนแบบพ่นอนุภาค

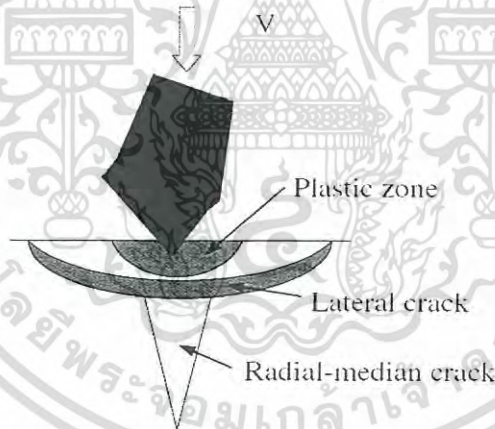
5.1.1 แนวคิดและหลักการเบื้องต้นของการออกแบบ

การออกแบบเพื่อสร้างแม่พิมพ์แบบพ่นอนุภาคได้แนวคิดจากการศึกษาการเกิดรอยร้าวที่ร้อนในวัสดุซึ่งในเรื่องดังกล่าวนี้หากเราพิจารณาในเนื้อวัสดุ กล่าวได้ว่าอนุภาคขนาดเล็กที่มีความเร็วสูงหากวิ่งมาตกระแทกกับผิวที่มีความเปราะบางกว่าจะทำให้บริเวณผิวหน้าของวัสดุที่ถูกตกระแทกเกิดความเครียด (Tensile Stress) ในบริเวณที่เราเรียกว่าพลาสติกโซน (Plastic Zone) ทำให้เกิดการแตกร้าวในระดับไมโครเมตร (Micro Crack) ขึ้น [102-103] การแตกร้าวนี้สามารถแบ่งได้สองบริเวณ บริเวณแรกเรียกว่าบริเวณแตกด้านข้าง (Lateral Crack) และบริเวณที่สองคือแตกกลางรัศมี (Radial Median Crack) การเกิดรอยแตกกลางรัศมีนี้จะส่งผลให้ความทนทานของวัสดุลดลงเนื่องและทำให้เกิดการแตกร้าวเข้าไปในเนื้อของวัสดุนั้น และบริเวณที่เกิดการหลุดออกไปจากผิวหน้าของวัสดุคือบริเวณแตกด้านข้าง (Lateral crack) ซึ่งเป็นจะเป็นบริเวณชิ้นงานถูกกัดเซาะ ดังรูปที่ 5.1 ดังนั้นการนำแนวคิดนี้มาสร้างแม่พิมพ์นูนนั้นก็สามารถทำได้ทั้งสองกรณีซึ่งอาจเป็นการกัดเซาะทั้งวัสดุที่เปราะเช่นแก้วและซิลิกอนเป็นต้น หรืออาจเป็นวัสดุที่เหนียวเช่นโลหะเป็นต้น โดยความสามารถในการสร้างร่องลึกเพื่อสร้างแม่พิมพ์นูนนั้นก็ขึ้นกับวัสดุที่เราเลือกเพื่อมาเป็นแม่พิมพ์นูน ในวิทยานิพนธ์นี้ได้มุ่งเน้นให้แม่พิมพ์นั้นเป็นวัสดุที่เป็นมีความคงทนไม่แตกหัก และเกิดการแตกร้าวที่ชัดเจนในแนวต

กระทบประมาณ 90 องศาตามทฤษฎีดังกล่าวและให้เหมาะกับหน้ากากที่จะสร้างเพื่อบังผงอนุภาคซึ่งอาจมีลวดลายที่เล็กมากและลึกทำให้ผงอนุภาคสามารถพุ่งชนและกัดเซาะในจุดที่แคบได้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 5.1 ภาพจำลองหลักการในกระบวนการพ่นผงอนุภาค



รูปที่ 5.2 ภาพจำลองแผนผังของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นบริเวณอนุภาคโดยรอบ

การพ่นอนุภาคนั้นเกี่ยวข้องกับโดยตรงกับระบบแรงดันลม กล่าวได้ว่าอนุภาคขนาดเล็กมาก จะถูกเร่งโดยลมที่มีความดันสูง อนุภาคมีความเร็วและความหนาแน่นที่สูง (ประมาณ 80-200 m/s) จะพุ่งผ่านหัวฉีดและตกกระทบบนผิวชิ้นงานที่ได้สร้างรูปแบบไว้ก่อนหน้านี้อแล้ว รูปแบบที่ได้สร้างไว้ดังกล่าวอาจเป็นการสร้างหน้ากากสำหรับบังผลอนุภาคที่อาจสร้างจากโพโรซิซีชนิดต่างๆเพื่อให้เกิดริ้วรอยตามที่ต้องการซึ่งอาจทำเป็นลักษณะรูปช่องว่างไว้ เป็นต้น ทำให้บริเวณที่ถูกอนุภาคพุ่งชนนั้นถูกกัดเซาะหลุดออกไปซึ่งค่าประสิทธิภาพของการกัดเซาะจะมีความสัมพันธ์กับค่าพลังงานจลน์ [103] และเป็นฟังก์ชันกับสมบัติของอนุภาคตั้งสมการ (5.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{eff} \therefore \frac{E^{\frac{5}{4}}}{H^{\frac{17}{12}} K_{lc}} U^{\frac{1}{6}_{kin}} \quad (5.1)$$

โดยที่ U_{kin} คือค่าพลังงานจลน์ของอนุภาค
 E คือค่ายังโมดูลัส (Young's modulus)
 H คือค่าความแข็งของวัสดุ
 K_{lc} คือค่าความทนทานของชิ้นงาน

5.2.2 การออกแบบแม่พิมพ์นูนจากสแตนเลส

การออกแบบแม่พิมพ์นั้นได้ออกแบบบนโปรแกรม L-Edit แล้วแปลงไฟล์ที่ออกแบบเสร็จสมบูรณ์นั้นให้อยู่ในรูปแบบไฟล์ที่เป็นชนิดพีดีเอฟ การออกแบบได้สร้างให้มีลวดลายเป็นรูปเครื่องหมายบวก เครื่องหมายลบ เป็นเส้นตรงขนาดต่างๆกันและเป็นตัวเลขตั้งแต่ 0 ถึง 9 เป็นต้นเพื่อนำไปพิมพ์ออฟเซ็ทเป็นหน้ากากบังแสงต่อไป ในการทำหน้ากากบังแสงจากวัสดุพลาสติกเพื่อใช้งานกับโฟโตรีซิสเอชยู-8 นี้เนื่องจากแม่พิมพ์ที่ทดลองออกแบบมีขนาดประมาณ 50-100 ไมโครเมตร ดังนั้นจึงสามารถใช้หน้ากากที่ขึ้นรูปจากพลาสติกใสธรรมดาได้ การออกแบบหน้ากากจากแผ่นพลาสติกนั้นหลังจากออกแบบให้มีลวดลายตามที่ต้องการแล้วจะนำไปไฟล์ส่งให้บริษัทที่ทำการพิมพ์ภาพนั้นทำการสร้างหน้ากากขึ้นมาให้มีขนาดตรงกับแบบที่เราต้องการด้วยเครื่องการพิมพ์ภาพที่มีความละเอียดสูง และจะได้หน้ากากที่เป็นฟิล์มสีดำมีช่องโปร่งแสงพร้อมที่จะนำมาฉายกับสารโฟโตรีซิสต่อไป ในการใช้หน้ากากจากวัสดุที่เป็นแผ่นพลาสติกใสนี้ได้เคยทำการทดลองแล้วสร้างลวดลายที่มีขนาดเล็กมากแล้วปรากฏว่าสามารถใช้ได้เฉพาะกรณีมีขนาดเล็กสุดที่ประมาณ 50 ไมโครเมตรเท่านั้นหากเล็กกว่านี้จะทำให้ระบบพิมพ์ออฟเซ็ทไม่ชัดและมีผลต่อลวดลายแม่พิมพ์ไม่ชัดตามไปด้วย ดังนั้นหากต้องการที่ต้องการแม่พิมพ์ที่มีความละเอียดสูงมากกว่านี้หลายเท่าก็จำเป็นต้องใช้หน้ากากกระจกพิเศษที่ผลิตรูปลวดลายจากกระบวนการลิโธกราฟีแทนเพราะจะให้ความละเอียดจากการฉายแสงได้ดีเท่าที่ต้องการ ในการสร้างแม่พิมพ์นูนนั้นถึงแม้จะสร้างจากหน้ากากที่เป็นการพิมพ์ออฟเซ็ทธรรมดาหรืออาจสร้างจากหน้ากากกระจกพิเศษที่ทำในกระบวนการที่มีความละเอียดของแม่พิมพ์สูงมากก็ตามก็ควรทำในห้องสะอาดหรือห้องคลีนรูมโดยเฉพาะการทำงานที่ใช้โฟโตรีซิสเอชยู-8 ในกระบวนการทางลิโธกราฟีจำเป็นอย่างยิ่งที่ควรสะอาดและสามารถป้องกันฝุ่นละอองที่ผลกระทบลวดลายของแม่พิมพ์ที่ละเอียดสูง

5.2 การเตรียมอุปกรณ์และการสร้างแม่พิมพ์

5.2.1 กระบวนการสร้างเอชยู-8 และหน้ากากพีดีเอ็มเอช

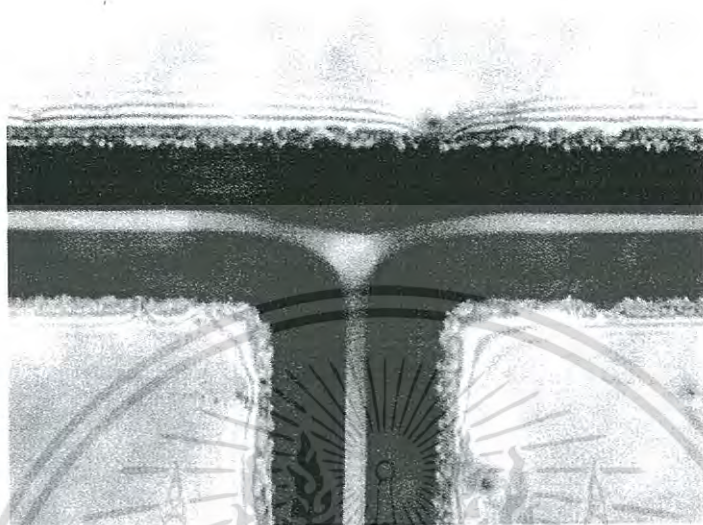
เอชยู-8 เป็นโฟโตรีซิสประเภทเนกาทีปชนิดหนึ่งซึ่งเป็นโพลิเมอร์ที่มีความหนืดมากคล้ายอีพอกซี สามารถนำไปสปินหรือนำสารนี้ไปหมุนเหวี่ยงให้มีความหนาได้ตั้งแต่ 1 ไมโครเมตรจนถึง 300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครเมตร สามารถนำไปสร้างชิ้นงานที่มีค่าเอ็กสเปกเรชันสูงกว่า 20 และเป็นสารโพโตรีซิสที่เหมาะสมกับการนำไปฉายแสงอุลตราไวโอเลทที่มีความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร ได้น้ำเอชยู-8 นี้มาทำสร้างรูปร่างแม่พิมพ์ในกระบวนการลิโทกราฟีร่วมกับพีดีเอ็มเอชซึ่งพีดีเอ็มเอชนี้มีชื่อเต็มว่า Polydimethylsiloxane (PDMS) เป็นกลุ่มสารโพลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่คล้ายกับซิลิโคน พีดีเอ็มเอชนี้ถูกใช้มากกับงานที่เป็นกระบวนการทางซิลิกอนที่ใช้ร่วมกับงานออกแกนิกโพลิเมอร์และงานที่เป็นของไหล พีดีเอ็มเอชนี้ไม่มีสี เป็นสารที่เฉื่อย ไม่มีพิษและไม่ติดไฟ บางครั้งก็เรียกสารนี้ว่าไดเมทริกอน (Dimethicone) ซึ่งเป็นสารประเภทหนึ่งในน้ำมันซิลิโคน การสร้างให้เกิดรูรอยบนวัสดุสแตนเลสนั้นสารเอชยูเอชและพีดีเอ็มเอชเป็นวัสดุหลักที่ทำให้เกิดแม่พิมพ์ขึ้น การสร้างแม่พิมพ์ขึ้นจะเริ่มจากเตรียมแผ่นสแตนเลสที่สะอาดและนำไปพ่นอนุภาคให้มีความหยาบเล็กน้อยจากนั้นนำมาทำความสะอาดในน้ำยาอะซิโตนและล้างออกอีกครั้งด้วยน้ำดีไอหรือบริสุทธิ์ และนำแผ่นสแตนเลสทรงกลมหนา 2.5 มิลลิเมตรที่ได้ทำความสะอาดในเครื่องออกซิเจนพลาสมาเป็นเวลา 10 นาทีโดยทำที่โหมด 35 วัตต์อาร์เอฟ ก่อนนำไปทำในกระบวนการโพโตลิโทกราฟีโดยเทเอชยู-8 ลงพอประมาณในซีพสเตท การใช้สารเอชยู-8 ใช้รุ่น 2100 ที่เหมาะกับความหนาที่ 100 ไมโครเมตร นำไปสปินเป็น 2 ชั้นตอน คล้ายกับการสปินที่ใช้แผ่นเวเฟอร์ในระบบโพโตลิโทกราฟีโดยทำการสปินเริ่มต้นที่ 1000 รอบเป็นเวลา 5 นาทีและหลังจากนั้นก็จะทำต่อทันทีโดยตั้งเวลาให้สปินอัตโนมัติที่ความเร็วรอบ 3000 ต่อวินาทีเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเอชยู-8 ที่ผ่านการสปินแล้วไปอบ เบื้องต้นที่ 60 องศาเซลเซียส 5 นาที 70 องศาเซลเซียส 5 นาที 80 องศาเซลเซียส อีก 5 นาที และทำการอบนานขึ้นอีกครั้งที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที การทำการเบคหลายชั้นตอนดังกล่าวเพื่อลดความเครียดของชั้นโพโตรีซิสเอชยู-8 บนแผ่นสแตนเลส หลังจากที่ทำวงขึ้นงานไว้ในอุณหภูมิห้องให้เย็นแล้วนำเอชยู-8 ไปฉายแสงอุลตราไวโอเลทที่มีความยาวคลื่น 380 นาโนเมตรในเครื่องลิโทกราฟีโดยใช้เวลาในการฉาย 10 วินาที จากนั้นนำไปทำอบหรือเบคอีกครั้งที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที หลังจากครบกำหนดแล้ววางไว้ในอุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 12 ชั่วโมงเพื่อลดความเครียดจากการฉายแสงยู หลังจากนั้นก็ไปแช่ในน้ำยาสำหรับล้างเอชยู-8 หรือเรียกว่า “น้ำยาเดลวิลอเปอร์” ประมาณ 20 นาที และพร้อมทั้งสังเกตการหลุดออกของเอชยู-8 เมื่อส่วนที่ไม่ต้องการหลุดออกหมดแล้วจึงล้างออกด้วยน้ำบริสุทธิ์ เมื่อได้แม่พิมพ์เอชยูเอชที่ยึดอยู่บนสแตนเลส จึงมาเตรียมเทสารโพลิเมอร์ชื่อพีดีเอ็มเอช (Polydimethylsiloxane (PDMS) เพื่อเทในช่องว่างระหว่างวัสดุที่เป็นเอชยู-8 ที่สร้างไว้ พีดีเอ็มเอชนั้นเป็นโพลิเมอร์ประเภทหนึ่งที่มีโมเลกุลเล็กมากและสามารถไหลแทรกลงไปได้ในระดับนาโนในที่นี้เลือกใช้พีดีเอ็มเอชจาก Dow Corning (ยี่ห้อ Sylgard 184 Silicone Elastomer kit) ก่อนนำไปใช้ต้องผสมกับกับสารตั้งต้นก่อนคือสาร Sylgard กับสารละลายที่ช่วยให้แข็งตัวในอัตรา 10 : 1 โดยปริมาตรจึงจะได้พีดีเอ็มเอชที่พร้อมนำไปใช้งาน หลังจากนั้นนำไปคนและผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันและนำไปเอาฟองอากาศออกที่ระดับความดันประมาณ 20-50 mTorr ในระบบการปั๊มให้เป็นสุญญากาศเป็นเวลา 10 นาทีซึ่งจะได้พีดีเอ็มเอชที่ไม่มีฟองผสมอยู่และใส่พร้อมนำไปใช้งาน ขณะที่เทพีดีเอ็มเอชลงในช่องของเอชยู-8 ควรสังเกตให้น้ำยาพีดีเอ็มเอชอยู่ต่ำกว่าโครงสร้างของเอชยู-8 เมื่อเทพีดีเอ็มเอชเรียบร้อยแล้วให้นำไปอบที่เบคหรือวางที่แผ่นความร้อน 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาทีทิ้งไว้จนกว่าจะแห้งซึ่งจะได้ไมโครแพทเทิร์นหรือชิ้นงานที่พร้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเข้าไปทำการพ่นอนุภาคดังรูปที่ Micropattern ที่พร้อมนำไปเข้ากระบวนการพ่นทรายดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.3 ภาพของพีดีเอ็มเอชจากกล้องไมโครสโคปขณะเทลงในช่องของเอชยูเอช-8



รูปที่ 5.4 ภาพชิ้นงานตำแหน่งเดิมของพีดีเอ็มเอชจากกล้องไมโครสโคปหลังจากผ่านกระบวนการพ่นอนุภาคซึ่งหน้ากักพีดีเอ็มเอชยังคงอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



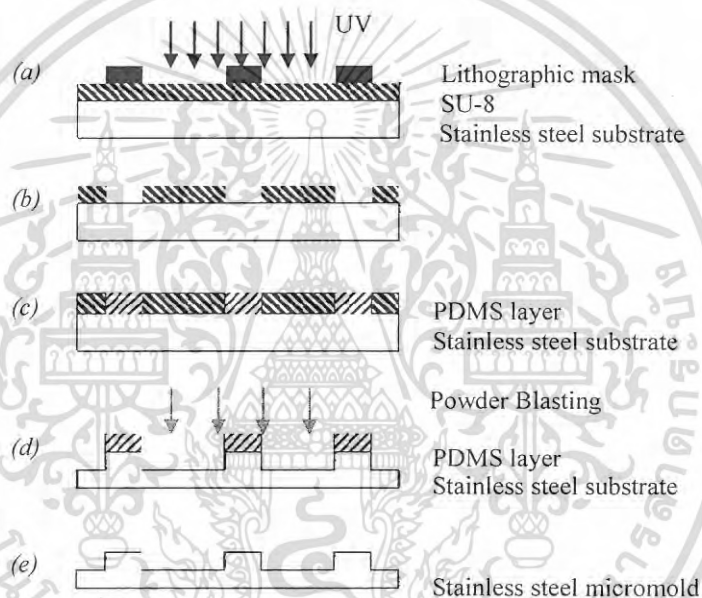
รูปที่ 5.5 ภาพของโพลีโทกรรฟิที่ใช้สร้างหน้ากากเอชยู-8

5.2.2 การจัดเตรียมระบบการพ่นอนุภาค

กระบวนการในการทดลองกักแม่พิมพ์สแตนเลสทั้งหมดจะประยุกต์ใช้เครื่องพ่นอนุภาคที่มีคุณภาพสูง (ยี่ห้อ Blastburn Machine, Model: Burn SME). ภายในแชมเบอร์สำหรับพ่นผงอนุภาคนั้นประกอบด้วยแท่นสเตทสำหรับปรับเลื่อนแนวแกน X-Y เพื่อให้งานวางได้คงที่ ภายในเครื่องมีแรงให้การไหลเวียนของลมด้วยแอร์คอมเพรสเซอร์ สร้างแรงพ่นด้วยหัวนอตเซล (Nozzle) ที่ทำจากทองเหลืองเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 มิลลิเมตร เมื่อหัวพ่นหยุดทำงานระบบดูดผงละอองที่ฟุ้งกระจายยังคงทำงานต่อเนื่องต่อไปเพื่อนำผงที่ฟุ้งกระจายในแชมเบอร์ไปกรองในระบบการกรองระดับไมครอนเพื่อให้เกิดความปลอดภัย หลังจากหมดผงอนุภาคที่ฟุ้งกระจายแล้วจึงสามารถเปิดประตูเครื่องเพื่อหยิบชิ้นงานออก หัวพ่นทรายถูกยึดให้ระยะห่างคงที่จากชิ้นงานเป็นระยะ 50 mm เพื่อให้ผงอนุภากดังกล่าวสามารถกระจายลงบนชิ้นงานได้ทั่วทั้งแผ่นชิ้นงาน ในการทดลองครั้งนี้ปรับแรงดันลมที่เครื่องพ่นทรายให้คงที่ตลอดการแฟริเคทซึ่งใช้ลมตั้งแต่ 2-6 บาร์ ระบบลมสำหรับพ่นนั้นได้เลือกใช้เครื่องอัดแรงลมที่มีปริมาตรสูง (ยี่ห้อ Ceccato-screw compressor series CSA, Model CSA7.5/10 จากอิตาลี) มีระบบดักจับความชื้นและไอรหรือน้ำมันได้ถึงคลาส 1 (Class 1) นั้นหมายถึงลมที่กระทบชิ้นงานนั้นจะสะอาด ปลอดภัยจากน้ำและละอองไอรหรือน้ำมัน ระบบจ่ายลมมีความดันสูงสุดได้ถึง 10 บาร์สามารถส่งกำลังลม (Air delivery) ปกติได้ถึง 630 ลิตรต่อนาที ปริมาตรลมที่สามารถจ่ายได้มากดังกล่าวจะประโยชน์ต่องานระบบการพ่นผงอนุภาคเนื่องจากจะทำให้การพ่นอย่างมีแรงดันและปริมาตรคงที่อย่างต่อเนื่องอย่างมากและช่วยให้แรงดันที่หัวนอตเซลทำงานคงที่ด้วย ผงอนุภาคที่มีความละเอียดสูงนั้นทำจากซิลิกอนคาร์ไบด์ มีน้ำหนักเบา ค่าความแข็งสูง มีความแข็งแรงสูงที่อุณหภูมิสูง การพ่นออกจากหัวนอตเซลลงกระทบชิ้นงานดี ภายในเครื่องนี้ได้เติมผงอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็กกว่า 50 ไมโครเมตร การเลือกอนุภาคให้มีขนาดเล็กที่สุดทำเบื้องต้นอย่างงานโดยการนำอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่มีจำหน่ายในท้องตลาดในที่นี้คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50 ไมโครเมตร นำไปร่อนในสภาพแบนและกรองแยกเอาเฉพาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรายที่เล็กกว่า 50 ไมโครเมตร เพื่อความปลอดภัยการดำเนินการดังกล่าวต้องป้องกันระบบทางเดินหายใจด้วยหน้ากากป้องกันฝุ่นหรือเคมี เมื่อเข้าสู่กระบวนการพ่น การทดลองครั้งนี้จะปลอดภัยมากขึ้นเนื่องจากระบบเครื่องพ่นทรายที่ใช้ภายในเป็นระบบที่สามารถดูดและพ่นทรายได้โดยละอองไอในแชมเบอร์นั้นมีระบบดูดกำจัดภายในด้วยไส้กรอง นอกจากนี้การเติมทรายสะดวกเนื่องเติมทรายลงในแชมเบอร์โดยตรง เลือกใช้หัวเจ็ทพ่นมีรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตรสามารถพ่นได้อย่างพอเหมาะกะกับโครงสร้างของชิ้นงานที่ความดัน 6 บาร์ สามารถประมาณการของการไหลเชิงมวลประมาณ 20 กรัมต่อวินาทีและความเร็วของผงอนุภาคที่ 120 เมตรต่อวินาที การวัดอัตราการไหลเชิงมวลนั้นได้จากการทดลองวัดโดยตรงจากการพ่นอนุภาคเข้าถุงที่ปิดใน 10 วินาที ขณะที่ความเร็วของผงอนุภาคนั้นคำนวณอัตราการไหลเชิงมวล ร่วมกับซิลิกอนคาร์ไบด์และหัวนอตเซลล์



รูปที่ 5.6 กระบวนการสร้างแม่พิมพ์จากเทคโนโลยีการสร้างหน้ากากเอชยู-8 และพีดีเอ็มเอช (a) นำเอชยู-8 ไปฉายแสง (b) ได้โครงสร้างเอชยู-8 (c) สร้างหน้ากากร่วมกับสารพีดีเอ็มเอช (d) เข้ากระบวนการพ่นอนุภาคและสุดท้าย (e) ได้โครงสร้างของแม่พิมพ์จากสแตนเลสแบบใหม่ระดับขนาดไมโครเมตร [103]

ผลการทดลองและการวิเคราะห์แม่พิมพ์นูนแบบพ่นอนุภาค

6.1 ผลการสร้างแม่พิมพ์นูนแบบพ่นอนุภาค

6.1.1 ลักษณะหน้ากจากสารพีดีเอ็มเอช

แม่พิมพ์นูนแบบร่อนที่ใช้เทคโนโลยีการพ่นอนุภาค จะเกิดเป็นรีวรอยได้ด้วยหน้ากที่เป็นพีดีเอ็มเอช เราได้ประโยชน์จากโฟตรีซิสที่เป็นเอชยู-8 ที่สามารถทำให้หน้าได้ดี ร่วมกับคุณสมบัติของพีดีเอ็มเอชที่ซึมลงในช่องว่างเล็กๆและการทนการกัดกร่อนได้ดีนั้นมาประยุกต์ให้เกิดประโยชน์ จากคุณสมบัติที่เอชยู-8 ทนการกัดกร่อนต่อการพ่นอนุภาคได้น้อยกว่าพีดีเอ็มเอชเมื่อนำตัวอย่างงานเข้าไปทำในกระบวนการพ่นอนุภาคชั้นของเอชยู-8 จะถูกกัดก่อนเร็วกว่ามากจึงทำให้บริเวณที่เป็นเอชยู-8 เกิดการสึกกร่อนไวกว่า ยิ่งหากใช้เวลาทำการพ่นอนุภาคนานมากขึ้นกว่าเดิมบริเวณที่เคยมีเฉพาะเอชยู-8 ก็จะเป็นร่องลึกมาก ขณะที่บริเวณพีดีเอ็มเอชซึ่งเป็นโพลีเมอร์สามารถทนการกัดกร่อนได้ดีมากจึงไม่เกิดรีวรอยบนวัสดุสแตนเลสตีล ดังนั้นหากเราไม่ต้องการให้เกิดรีวรอยบริเวณใดจึงควรออกแบบให้สารพีดีเอ็มเอชไหลไปเป็นหน้ากบริเวณนั้นโดยออกแบบสร้างเอชยู-8 ตั้งต้นไว้ล่วงหน้าซึ่งจะได้แม่พิมพ์นูนจากสแตนเลสตามต้องการ

6.1.2 ลักษณะทั่วไปของชิ้นงานแม่พิมพ์นูน

การสร้างเอชยู-8 การสร้างหน้ากที่เป็นพีดีเอ็มเอชและกระบวนการแพบรีเคชันแม่พิมพ์นูนขนาดไมโครในทุกขั้นตอนนั้นได้ทำภายใต้การส่องกล้องไมโครสโคปที่มีความละเอียดสูง (ยี่ห้อ: Olympus BX51 3D microscope) และ บันทึกภาพบนเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านกล้องวิดีโอที่มีความคมชัด (ยี่ห้อ: Sony Super Exwave) เนื่องจากเราจำเป็นต้องสังเกตว่าเอชยู-8 และโพลีเมอร์พีดีเอ็มเอชที่ใช้เป็นหน้ากนั้นจะไม่ขาดหรือมีรอยตำหนิหรือไม่ การมีตำหนิหรือขาดของหน้ากเพียงจุดหนึ่งจุดใดเพียงเล็กน้อยจะเป็นเหตุให้รูปร่างของชิ้นงานที่ได้ไม่เป็นรูปร่างหรือรีวรอยอย่างที่ต้องการ การเทพีดีเอ็มเอชลงร่องขนาดเล็กได้ใช้วิธีการเทในปริมาณพอดีและ ปาดโพลีเมอร์พีดีเอ็มเอชออกเกือบหมดขณะที่เป็นของเหลวจากนั้นเราจำเป็นต้องรอจนกว่าพีดีเอ็มเอชไหลซึมเข้าไปในร่องของแม่พิมพ์ที่ขึ้นรูปด้วยเอชยู-8 ให้หมดเสียก่อนและสังเกตอย่างละเอียดและต่อเนื่องด้วยกล้องที่มีกำลังขยายสูงนอกจากนี้เราได้วิเคราะห์ตัวอย่างของชิ้นงานที่ทำเสร็จแล้วด้วยเครื่องจุลทรรศน์สำหรับอิเล็กตรอนหรือซีเอ็ม (Scanning Electron Microscopy, SEM)



รูปที่ 6.1 ภาพแสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนหรือ SEM สำหรับตรวจวิเคราะห์

6.2 การวิเคราะห์ผล

6.2.1 การวิเคราะห์หน้ากากพีดีเอ็มเอชหลังการพ่นอนุภาค

การทดลองที่ใช้ขนาดผงอนุภาคที่น้อยกว่า 50 ไมโครเมตรบางครั้งก็จะเกิดปัญหาการกัดไม่ราบเรียบเนื่องจากร่องของเอชยู-8 มีขนาดเล็ก เหตุที่ทำให้ไม่ราบเรียบคือทำการพ่นอนุภาคบริเวณแม่พิมพ์เอชยู-8 ที่มีร่องลึกและร่องลึกดังกล่าวนี้จะอยู่ระหว่างหน้ากากพีดีเอ็มเอชด้วยซึ่งจะเกิดปัญหาที่เรียกว่าผลกระทบจากขนาดผงอนุภาค (Effect of Particle Size) ปัญหาเช่น บางตำแหน่งจะมีผลอนุภาคขนาดใหญ่มาอุดตัน ผงอนุภาคเล็กกว่า 50 ไมโครเมตรแต่ก็มีผงแปลกปลอมที่ใหญ่กว่าเข้าไปอุดตันและสร้างปัญหาได้จึงทำให้อาจเกิดปัญหาเรื่องขนาดบางตำแหน่งไม่ตรงตามพีดีเอ็มเอชที่ออกแบบ ดังนั้นในการทำแม่พิมพ์แบบพ่นอนุภาคที่ต้องการความละเอียดสูงลักษณะนี้ควรทำด้วยเอชยู-8 แบบเนกาตีฟ (Negative SU-8) การสร้างเอชยู-8 แบบเนกาตีฟหมายถึงส่วนที่ไม่ถูกฉายแสงจะถูกน้ำยาล้างออกดังนั้นควรพิจารณาแบบงานที่หลีกเลี่ยงร่องที่มีขนาดเล็ก การแก้ปัญหาอีกประการหนึ่งคือการเลือกใช้ผงอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ก็จะเป็นการลดปัญหาอุดตันได้ การพ่นอนุภาคเพื่อให้เกิดโครงสร้างขนาดไมโครที่มีหน้ากากพีดีเอ็มเอชประกอบอยู่ด้านข้างทั้งสองด้าน จะพบว่าหากช่องว่างมีขนาดใหญ่จะมีผลทำให้อัตราการกัดของเครื่องพ่นอนุภาคเร็วกว่าหรือลึกกว่าช่องที่มีขนาดเล็กและบริเวณด้านข้างของช่องของไหลขนาดขนาดไมโครดังกล่าวจะมีความเอียงเล็กน้อยประมาณ 10 องศา

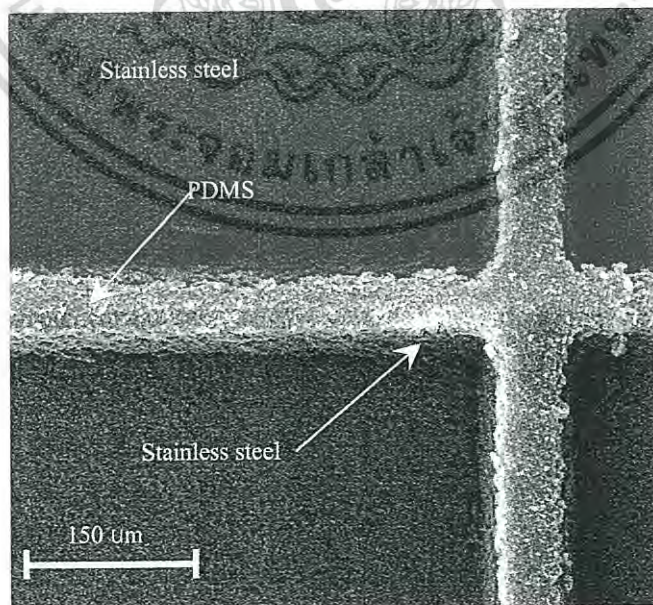
เทคนิคอีกประการหนึ่งที่มีผลต่อการสร้างแม่พิมพ์แบบพ่นด้วยอนุภาคคือ หากต้องการให้แม่พิมพ์มีความชันมากๆใกล้เคียงกับ 90 องศา ก็ควรการสร้างหน้ากากจากพีดีเอ็มเอชให้เอชยู-8 บริเวณโดยรอบมีขนาดกว้าง เนื่องจากการทดลองในกรณีมีพื้นที่ด้านข้างกว้างจะพบว่าการกัดกร่อนมีอัตราการกัดดีกว่าบริเวณที่แคบอัตราการกัดที่รวดเร็วจะทำให้บริเวณขึ้นแม่พิมพ์มีความชันมากกว่า เหตุดังกล่าวอาจเกิดจากการรบกวนหรือการอุดตันของผงอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์นั่นเอง ดังนั้นผลการออกแบบขนาดของแม่พิมพ์นั้นลักษณะนี้ขณะที่ออกแบบจึงควรพิจารณาผลของความชันควบคู่ไปด้วย อย่างไรก็ตามคุณสมบัติการเกิดความชันน้อยอาจจะไม่เป็นข้อเสียต่อการสร้างแม่พิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการสร้างแม่พิมพ์ที่มีความชันข้างนั้นในบางกรณีอาจเป็นผลดีต่อการออกแบบระบบของไหลจุลภาคในบางลักษณะก็ได้

6.2.2 การวิเคราะห์แม่พิมพ์นูนด้วยเครื่องมือที่มีความละเอียดสูง

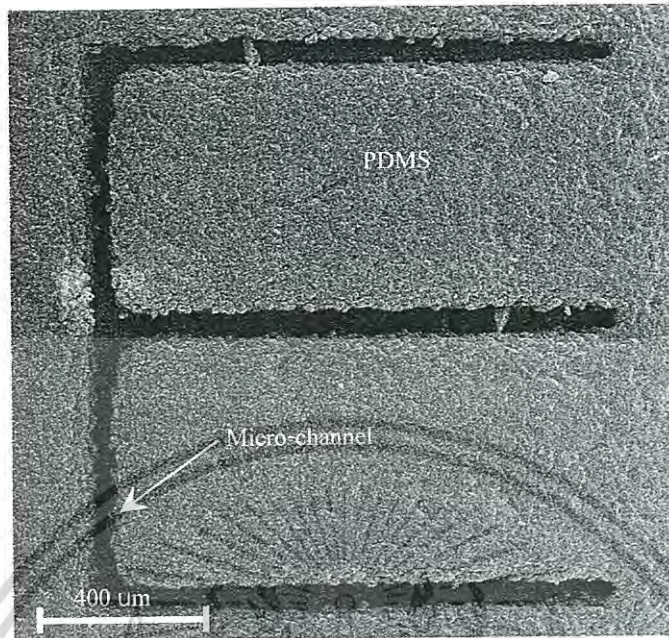
ลักษณะของภาพที่ได้จาก SEM หรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนนั้นจะได้แม่พิมพ์แบบนูนและหน้าากที่ เป็นพีดีเอ็มเอซังจะเห็นเป็นแม่พิมพ์นูนลายกากบาทมีลักษณะความสูงเป็น 50 ไมโครเมตรซึ่งหลังจากทำการพ่นอนุภาคแล้วจะได้ความลึกที่ 50 ไมโครเมตรและได้ความชันดีมากในขณะที่สารพีดีเอ็มเอซังยังคงสภาพเป็นหน้าได้เป็นอย่างดีไม่เสียหาย บริเวณผนังของแม่พิมพ์และบริเวณผิวของเนื้อสแตนเลสทั้งสองบริเวณก็ยังคงมีสภาพเรียบร้อยและสวยงามดังรูปที่ 6.2 และถัดมาคือรูปที่ 6.3 เป็นลักษณะของแม่พิมพ์ที่เป็นช่องเล็กๆซึ่งจะมีหน้าากที่พีดีเอ็มเอซังทั้งสองด้านดังนั้น บริเวณร่องจะเป็นวัสดุเซยู-8 จะถูกกัดออกเร็วกว่าและจะเป็นร่องลึกเข้าไปจนถึงเนื้อสแตนเลสที่ลจากภาพนี้แสดงให้เห็นว่าถ้าหากเราใช้ผงอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของช่องที่จะสร้างแม่พิมพ์ที่นี้คือ 50 ไมโครเมตร ช่องอาจแคบไปในที่นี้อาจทำให้อัตราการไม่กัดสม่ำเสมอและไม่เป็นผลดีต่อชิ้นงานแม่พิมพ์ ดังนั้นการกำหนดผงอนุภาคจึงควรใช้เฉพาะที่มีเกรดดีและมีมาตรฐานการผลิต การวัดค่าความชันจากแม่พิมพ์ที่บริเวณแคบๆ ลักษณะนี้จะได้จะความชันของแม่พิมพ์ดีกว่าผิวธรรมดา โดยผิวธรรมดาจะประมาณ 10 องศาจากผิวของสแตนเลส รูปถัดมาคือรูปที่ 6.4 จะโชว์ลักษณะของชิ้นงานที่ออกแบบเป็นวงกลมสำหรับไปประยุกต์ใช้งานในแลปส์ออนชิปซึ่งรูปเป็นทรงกลมดังกล่าวหมายถึงจุดต่อของรอยต่อระบบของไหลจุลภาคกับท่อขนาดไมโครเพื่อประโยชน์ในการใช้บางบางประเภท งานลักษณะนี้ก็จะได้แม่พิมพ์ที่ไม่ต่างจากช่องของไหลที่มีลักษณะเส้นตรง สำหรับรูปสุดท้ายคือรูปที่ 6.5 จะเห็นว่าผิวผนังของแม่พิมพ์จะเป็นร่องหายไปมองไม่เห็นเนื่องจากอยู่ลึกเมื่อส่องให้ใกล้และกำลังขยายมากขึ้นจะเห็นว่าจะเห็นโครงสร้างของพีดีเอ็มเอซังที่ยังสภาพที่อยู่และยังพบว่าความชันบริเวณที่ร่องแคบๆจะมองไม่เห็นเนื่องจากอัตราการกัดทำได้ช้าแต่ถ้าหากลอกหน้าากที่พีดีเอ็มเอซังออกจะทำให้ได้ความชันของแม่พิมพ์ชันมาก



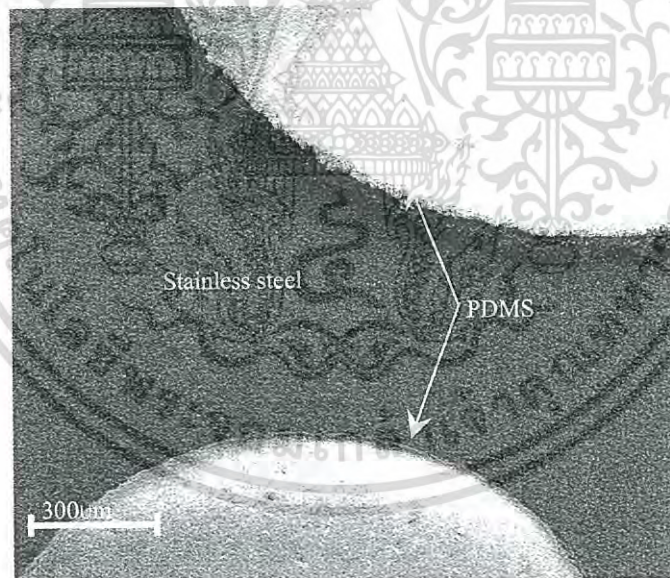
รูปที่ 6.2 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนหรือภาพจาก SEM ที่ได้จากแม่พิมพ์นูนที่

หนา 50 ไมโครเมตรและลึก 50 ไมโครเมตรภายใต้หน้าากที่พีดีเอ็มเอซัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

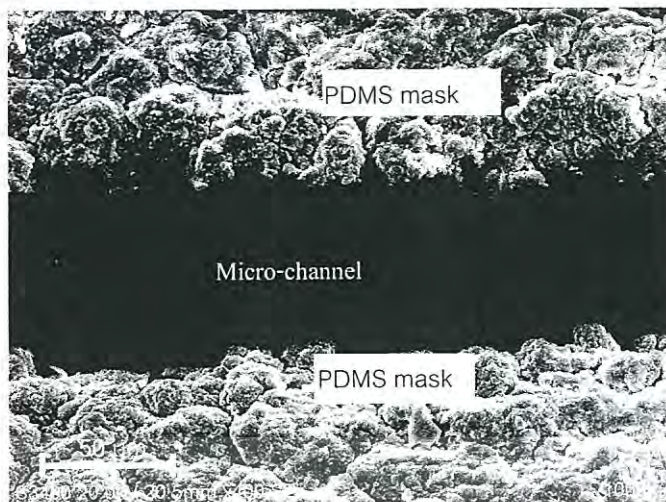


รูปที่ 6.3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของแม่พิมพ์แบบพ่นอนุภาคบางรูปแบบที่มีมีผนังขนาดใหญ่มากอยู่ที่ยังช่องขนาดเล็ก



รูปที่ 6.4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของแม่พิมพ์แบบพ่นอนุภาคที่เป็นรูปทรงกลมของงานสำหรับประยุกต์ใช้สำหรับแล็ปส์ออนชิป

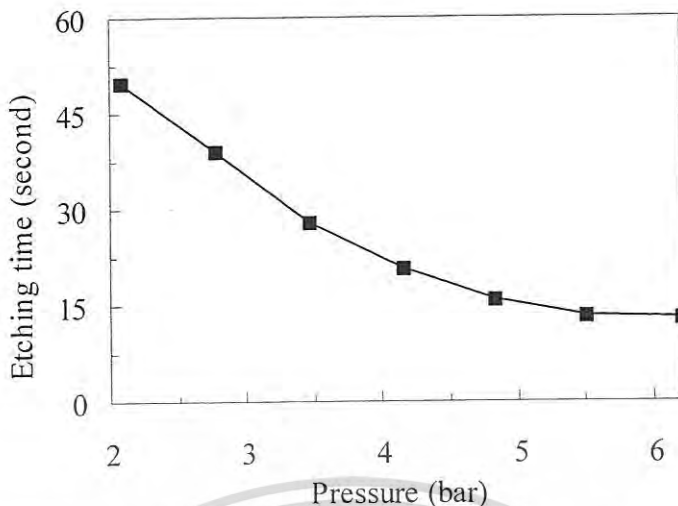
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



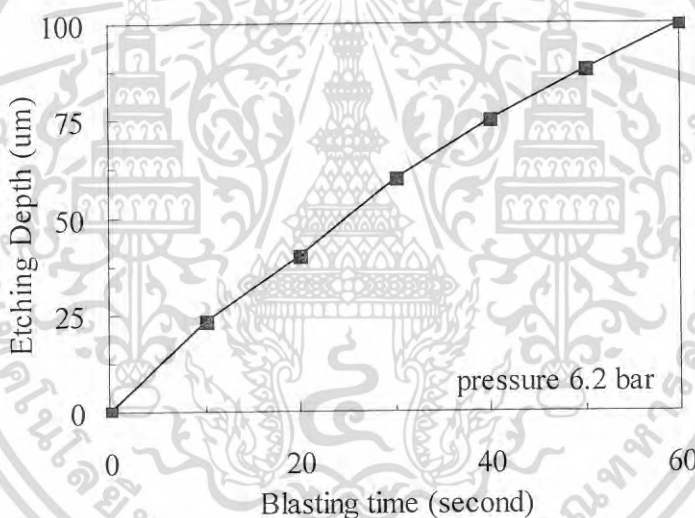
รูปที่ 6.5 ภาพแสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีความละเอียดสูงที่แสดงบริเวณช่องที่กัดด้วยการพ่นอนุภาคมีขนาดเล็กและลึกมากกว่า

6.2.3 อัตราการสึกหรอของแม่พิมพ์และหน้ากากที่เป็นสารเอชยู-8

การทดลองสร้างแม่พิมพ์นูนแบบร้อนโดยโลหะสแตนเลสโดยรวมแล้วพบว่าอัตราการกัดของผงอนุภาคมีความเรียบและได้ผลสม่ำเสมอ จากการทดสอบพ่นอนุภาคเพื่อดูการสึกกร่อนของวัสดุที่เป็นสารไวแสงประเภทโฟโตรีซิสชื่อเอชยู-8 จะพบว่าเมื่อนำเอชยู-8 ที่มีความหนา 100 ไมโครเมตรมาทำการพ่นอนุภาคและดูลักษณะอัตราการกัดเทียบเวลาเป็นนาทีที่ได้พบว่าเมื่อเปลี่ยนแรงดันลมจาก 2- 4.5 บาร์ อัตราการกัดที่แรงดันลม 2 บาร์สามารถทำให้เอชยู-8 หหมดไปในเวลาประมาณ 50 วินาที อัตราการกัดที่แรงดันลม 4 บาร์สามารถทำให้เอชยู-8 หหมดไปในเวลาประมาณ 22 วินาทีและอัตราการกัดที่แรงดันลม 6 บาร์สามารถทำให้เอชยู-8 หหมดไปในเวลาประมาณ 15 วินาที หลังจากแรงดัน 6.2 บาร์ลักษณะการสึกหรอของเอชยู-8 ค่อนข้างคงที่ จึงพอสรุปได้ว่าแรงดันที่ทำให้การกัดได้รวดเร็วและเหมาะสมคือที่แรงดัน 6.2 บาร์ ดังกราฟในรูปที่ 6.6 สำหรับกราฟในรูปที่ 6.7 เป็นอัตราการสึกกร่อนของโลหะสแตนเลสเพื่อพ่นด้วยอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์เมื่อเทียบกับความลึกเป็นไมโครเมตร ผลที่ได้จะพบว่าอัตราการกัดของแรงดันลมที่ดีที่สุดที่ประมาณ 6.2 บาร์เมื่อพ่นอนุภาคด้วยเวลา 10 วินาทีจะได้ความลึกในการกัดกร่อนประมาณ 25 ไมโครเมตร เมื่อใช้เวลาในการพ่นอนุภาคนาน 40 วินาทีจะได้ความลึกที่กัดได้ 75 ไมโครเมตรและถ้าหากต้องการให้วัสดุที่เป็นแม่พิมพ์นูนที่เป็นโลหะสแตนเลสสึกกร่อนระยะ 100 ไมโครเมตรจะต้องใช้เวลาประมาณ 1 นาที ซึ่งเส้นกราฟของอัตราการกัดที่ได้มีลักษณะค่อนข้างคงที่ ดังกราฟในรูปที่ 6.7



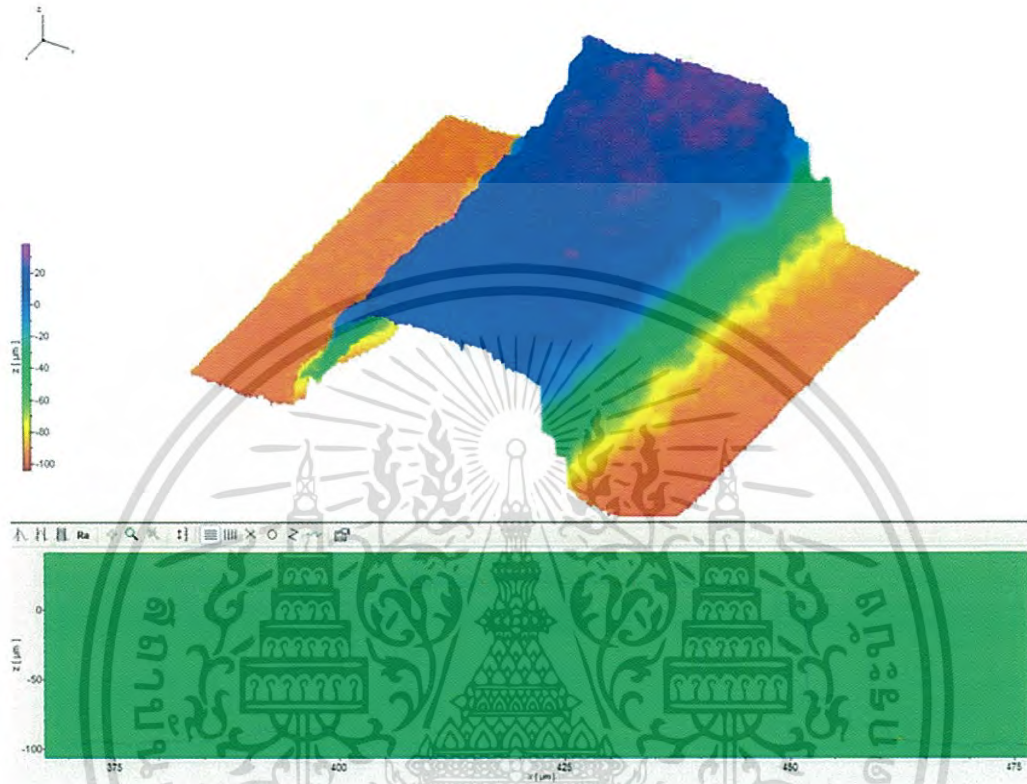
รูปที่ 6.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันลมและเวลาที่ทำการกัดหน้ากากเฮชยู-8 หน้า 100 ไมโครเมตรเมื่อพ่นด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์



รูปที่ 6.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและระยะลึกกร่อนของแม่พิมพ์ปูนที่เป็นวัสดุสแตนเลสเมื่อพ่นด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ที่แรงดันคงที่ 6.2 บาร์

การกัดด้วยวิธีการพ่นอนุภาคดังกล่าวจะให้ผลดีกว่าการทำโดยวิธีที่เคยทำโดยทั่วไปที่เป็นการกัดแบบแห้งในเครื่องมือทางขบวนการไมโครแฟริเคชันเนื่องจากอัตราการที่ได้เร็วกว่าและหากเทียบการกัดด้วยกระบวนการที่ใช้น้ำยาเคมีแล้ว วิธีแบบพ่นอนุภาคเป็นวิธีการกัดที่มีอัตราการกัดที่ไวกว่าวิธีทางเคมี ในการวิเคราะห์แม่พิมพ์ที่ได้ด้วยเครื่องวิเคราะห์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์แบบใช้ย่านแสงขาว (White-light Interferometer) เพื่อดูสภาพความเรียบจะพบว่ามีความสูงที่ประมาณ 100 ไมโครเมตรภาพที่ได้จะเห็นหยาบของผิวโลหะสแตนเลสที่สร้างไว้ก่อนหน้านี้เพื่อให้เฮชยู-8 ยึดเกาะและความหยาบจากการกัดเพื่อเป็นแม่พิมพ์นั้นสามารถแก้ไขได้ในขั้นตอนสุดท้ายเนื่องจากการเกิดความหยาบดังกล่าวเมื่อต้องการทำให้หายไปและให้ความเรียบมากขึ้นอาจนำแม่พิมพ์ดังกล่าวไปจุ่มในน้ำยาเคมีประเภทกรดไฮโดรคลอริกโดยใช้เวลาเล็กน้อยก็จะทำให้ผิวเรียบพร้อมที่จะเป็นแม่พิมพ์ของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบของไหลจุลภาคแบบใหม่ที่ทนต่อแรงดัน ทนต่อการกระแทกและทนต่อความร้อนกว่าแม่พิมพ์
อื่นที่เคยพัฒนามาแล้ว ดังนั้นเราจึงสามารถนำแม่พิมพ์ดังกล่าวไปอัดรีดบนพลาสติกได้เพื่อพัฒนาเป็น
แลปส์ออนชิปต่อไป



รูปที่ 6.6 ภาพสามมิติที่แสดงลักษณะของแม่พิมพ์หุ่นแบบพ่นด้วยอนุภาคที่มีความสูง
ประมาณ 100 ไมโครเมตรและความกว้างประมาณ 50 ไมโครเมตร ที่วัดโดยใช้
เครื่องวัดอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์แบบใช้ย่านแสงขาว (White-light interferometer
ยี่ห้อ: PolyTech)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบสร้างเพื่อประยุกต์ใช้แม่พิมพ์นูนแบบร้อนโดยวิธีการพ่นผงอนุภาคซึ่งใช้เทคโนโลยีการสร้างหน้ากากจากสารไวแสงชื่อเอชยู-8 ร่วมกับสารโพลีเมอร์ชื่อพอลิไดเมทิลไซลอกเซน งานดังกล่าวนี้เพื่อประยุกต์ทำต้นแบบแม่พิมพ์นูนแบบร้อนขนาดเล็กสำหรับสร้างลวดลายระดับไมครอนเพื่อใช้ในงานประเภทแลปส์ออนชิป เป็นกระบวนการสร้างแบบโดยเทคโนโลยีหน้ากากฟิติเอ็มเอชบนแม่พิมพ์โลหะเป็นครั้งแรก และสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นแม่พิมพ์ที่มีโครงสร้างเล็กที่สุดได้คล้ายกับเทคโนโลยีทางโฟโตลิโทกราฟี ใช้ผงอนุภาคชนิดซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เล็กกว่า 50 ไมครอนเมตรเป็นตัวสร้างแม่พิมพ์นูนในขั้นตอนสุดท้าย ซึ่งจะให้อัตราการกัดกร่อนสูง หากมีผงอนุภาคที่เล็กระดับนาโนผสมอยู่ก็สามารถสร้างให้มีแม่พิมพ์ที่เป็นแบบเส้นนูนขึ้นที่เล็กระดับนาโนเมตรได้ เทคนิคการทำหน้ากากด้วยเอชยู-8 และฟิติเอ็มเอชจะทำให้เราสามารถใช่ประโยชน์จากการฉายแสงวัสดุ SU-8 ได้อย่างดีและนำมาประยุกต์ใช้กับคุณสมบัติด้านทานการกัดกร่อนสูงของฟิติเอ็มเอชได้ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสร้างโครงสร้างระดับไมครอนเมตรที่ให้เอ็กสเปกเรโซมี ค่าประมาณ 1 หากโครงสร้างที่เล็กลงไปในระดับต่ำมากจนถึงมากกว่า 100 ไมครอนเมตรได้ ผลการแพบริเคทที่ได้นั้นใช้เวลาสั้นมากหากเปรียบเทียบกับอัตราการกัดแบบใช้เคมีและใช้ก๊าซ กระบวนการพ่นอนุภาคใช้แรงดันลมที่ประมาณ 4-6 bars เพื่อให้เกิดรูบนแผ่นสแตนเลสในระดับที่เล็กมากและลึกตามต้องการและสามารถสร้างให้เล็กตามขนาดของโฟโตรีซิส จากการทดสอบพบว่า การออกแบบช่องของไหลที่มีหน้ากาสารโพลีเมอร์ขนาดกว้าง 50 ไมครอนเมตร จะให้ความลึกได้ถึงประมาณ 150 ไมครอนเมตร โดยได้เรโซที่ตีมากถึงประมาณ 3 การพ่นอนุภาคที่ดีที่สุดจะอยู่ที่ความดัน 6.2 บาร์ ผลการศึกษาเรื่องดังกล่าวจะเกิดประโยชน์คือลดขั้นตอนการผลิตที่ซับซ้อนทำให้การสร้างแม่พิมพ์มีราคาถูกลง ทำให้แม่พิมพ์เล็กลงได้ตามที่ต้องการ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังได้ศึกษาการสร้างแม่พิมพ์นูนวิธีอื่นเพื่อทดสอบความเป็นไปได้ก่อนที่จะได้ศึกษาวิธีการสร้างแม่พิมพ์นูนแบบการพ่นอนุภาคและรวบรวมกระบวนการสร้างแม่พิมพ์นูนไว้โดยละเอียดซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการพัฒนาการวิจัยในด้านเทคโนโลยีแลปส์ออนชิปและเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องในอนาคต

7.2 ปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางในการแก้ปัญหา

7.2.1 ปัญหาจากกระบวนการทางโฟโตลิโทกราฟี

ในการสร้างแม่พิมพ์ที่เป็นเอชยู-8 ปัญหาที่พบบ่อยคือการสร้างแม่พิมพ์หนาแต่จะเกิดปัญหาการดีเวลลอปหรือล้างออกด้วยน้ำยาเคมีแล้วหลุดลอกอันเนื่องมาจากแม่พิมพ์จากเอชยู-8 ไม่แข็งแรง ซึ่งการดำเนินการแก้ปัญหาประการแรกในกระบวนการดังกล่าวจำเป็นต้องสำรวจคุณภาพของโฟโตรีซิสประเภทเอชยู-8 ก่อนการนำไปใช้เช่น เวลาหมดอายุของน้ำยาดีเวลลอปเปอร์และสารต่างๆที่นำมาใช้ ปัญหาที่สองคือ การทำตามกระบวนการมาตรฐานในทางลิโทกราฟีแต่ปรากฏว่าชิ้นงานที่ได้นั้นเกิดความบกพร่องหรือเสียหายซึ่งไม่ได้เป็นไปตามตามผลที่อ้างอิงไว้ในคู่มือมาตรฐานของผู้ผลิตดังนั้นจึงควรหาข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นควบคู่ไปด้วย เช่นฉายแสงด้วยลิโทกราฟีแล้วแม่พิมพ์เอชยู-8 แสงไม่พอ การแก้ปัญหาที่ใช้ได้ผลคือ ต้องศึกษาโดยทดสอบฉายแสงโดยเปลี่ยนแปลงเวลาเอกซเรย์เป็นเอกซเรย์ที่สว่างไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉายแสงเองเพื่อเลือกเวลาที่เหมาะสมที่สุด เหตุที่จำเป็นต้องศึกษาเวลาการดำเนินการเองแทนการทำตามกระบวนการในคู่มือมาตรฐานเนื่องจากขบวนการที่เราใช้นั้นอาจมีข้อบกพร่องและมีข้อจำกัดบางประการดังนั้นจึงต้องเลือกใช้วิธีการที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด ปัญหาในกระบวนการนี้ที่พบอีกประการหนึ่งคือหากสร้างแม่พิมพ์เอชยู-8 ให้มีความหนาแล้วก็จะทำให้ความหนาของของเอชยู-8 ที่เคลือบบนแผ่นสแตนเลสบริเวณกลางแผ่นและบริเวณด้านขอบนอกของแผ่นสแตนเลสนั้นหนาไม่เท่ากัน ซึ่งเป็นปัญหาข้อจำกัดที่บ่งบอกของการสปีนหรือหมุนเวียงสารไวแสงเอชยู-8 ซึ่งเพื่อให้เกิดเทิร์นหรือโครงสร้างทั่วบริเวณมีขนาดใกล้เคียงกันมากที่สุด จึงควรสร้างชิ้นงานให้มีขนาดเล็กและอยู่ตรงกลางของแผ่นที่สุด เพื่อให้ได้ขนาดตรงตามที่เรากำหนดมากที่สุด

7.2.2 ปัญหาจากขนาดของแม่พิมพ์

ปัญหาการสร้างแม่พิมพ์นั้นก่อนออกแบบต้องเลือกขนาดความกว้าง ความยาวของชิ้นงานแม่พิมพ์ให้เหมาะสมกับเครื่องมือในกระบวนการ เช่น การออกแบบระบบของไหลจุลภาคที่ช่องของไหลยาวเกินไปก็อาจจะต้องหาซีพสเตอร์หรือฐานรองที่เป็นสแตนเลสที่ใหญ่มากเกินไป ซึ่งจะเกิดปัญหาในกระบวนการทำความสะอาดผิวด้วยเครื่องออกซิเจนพลาสมาด้วย เนื่องจากเครื่องดังกล่าวมีขนาดของท่อวางชิ้นงานภายในเครื่องนั้นอาจเล็กและเหมาะสำหรับซิลิกอนเวเฟอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแค่ 3 นิ้วเท่านั้น ดังนั้นหากไม่พิจารณาขนาดของครุภัณฑ์ที่สนับสนุนในตอนแรกอาจทำให้เราต้องทิ้งวัสดุที่เราทำไว้แล้วใช้ไม่ได้จำเป็นต้องทิ้งไป ทำให้เสียเวลาในการสร้างแม่พิมพ์และการเริ่มทำขั้นตอนใหม่ทั้งหมด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแม่พิมพ์นั้นจึงควรออกแบบให้เล็กไว้เพื่อป้องกันขนาดแผ่นสแตนเลสและอุปกรณ์สนับสนุนไม่สามารถรองรับได้ ปัญหาที่พบขณะดำเนินการศึกษาวิจัยคือการสร้างขนาดของแม่พิมพ์นั้นหากต้องการใช้ในกระบวนการที่ใช้ชิ้นงานตัวอย่างขนาด 3 นิ้ว สมควรให้ขนาดที่ชิ้นงานที่ออกแบบมีขนาดเล็กกว่า 3 นิ้วหรือตัดชิ้นงานให้เหมาะสมให้เรียบร้อยและลองวางในทุกกระบวนการก่อนดำเนินการทำจริง เนื่องจากจะติดปัญหาขนาดของแม่พิมพ์ใช้ไม่ได้ตัวอย่างเช่นการติดแผ่นสแตนเลสนอกจากจะต้องหาแหล่งเครื่องมือเครื่องตัดด้วยเลเซอร์ที่สามารถตัดแผ่นสแตนเลสได้ให้ชิ้นงานเรียบและมีคุณภาพแล้ว จำเป็นต้องปาดบางส่วนทิ้งเพื่อลดขนาดก่อนนำไปวางกับช่องวางหรือแชมเบอร์ต่างๆในระบบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้วพอดี เช่นแชมเบอร์ในเครื่องออกซิเจนพลาสมาขนาด 3 นิ้วจำเป็นต้องเตรียมชิ้นงานให้เล็กกว่า 3 นิ้วเป็นต้น

7.2.3 ปัญหาความเสียหายขณะทำการทดสอบ

ปัญหาจากการทดสอบเป็นปัญหาทั่วไปที่พบในกระบวนการวัดและทดสอบ ในที่นี้ที่พบและกล่าวในที่นี้คือการควบคุมเครื่องมือที่จะนำมาทดสอบให้ถูกต้องและมีความแม่นยำในการใช้ ปัญหาที่พบจากการทดสอบประการแรกคือ แม่พิมพ์ที่สร้างจาก เอชยู-8 ใหม่เสียหายอันเนื่องมาจากการทดสอบในที่ความร้อนสูงเกินไปมากกว่า 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลานานซึ่งจะมีผลให้แม่พิมพ์ใหม่และแม่พิมพ์เสียหายทั้งหมด ดังนั้นการทดสอบชิ้นงานทุกกระบวนการต้องทราบคุณสมบัติของสารหรือวัสดุที่จะนำมาทดลองโดยดูจากข้อมูลบ่งชี้คุณสมบัติของวัสดุนั้น (Material Safety Data Sheets) เช่นนำเอชยู-8 มาทำการทดลองก็ควรทราบคุณสมบัติของสารดังกล่าวให้ดีเสียก่อนว่าจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิเท่าไรและเป็นพิษหรือไม่เป็นต้น ปัญหาที่ต้องพิจารณาจากการเสียหายขณะทดสอบอีกประการหนึ่งคือ การผิดพลาดของเครื่องมือเองเช่นการใช้ระบบเครื่องอัดพิมพ์แบบร้อนที่มีการปรับแต่งความร้อนเพื่อควบคุมอุณหภูมิในการอัดพิมพ์ซึ่งปกติเครื่องดังกล่าวได้ออกแบบและสร้างให้สามารถปรับแต่งอุณหภูมิได้อย่างอัตโนมัติดังนั้นควรศึกษาผลการตอบสนองของอุณหภูมิจริงเทียบกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าแสดงผลที่ได้เพื่อป้องกันการความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่ได้ หากศึกษาการใช้เครื่องมือไม่เพียงพอมาจทำให้ทำงานผิดพลาดและชิ้นงานเสียหาย

7.3 แนวทางในการพัฒนาและข้อเสนอแนะ

การออกแบบแม่พิมพ์นูนแบบร้อนโดยวิธีการพ่นผงอนุภาคซึ่งใช้เทคโนโลยีการสร้างหน้าจากจากสารไวแสงชื่อเอชยู-8 ร่วมกับสารโพลีเมอร์ชื่อพอลิไดเมทิลไซลอกเซน เพื่อประยุกต์ทำต้นแบบแม่พิมพ์นูนแบบร้อนขนาดเล็กสำหรับสร้างลวดลายระดับไมครอน ได้เริ่มทำการศึกษาวิจัยหลายองค์ความรู้และมีระยะการวิจัยนานหลายปีเริ่มจากตั้งแต่การสร้างแม่พิมพ์ด้วยโลหะอลูมิเนียมที่ขึ้นรูปโดยซีเอ็นซีที่มีความละเอียดสูงเพื่อทดลองสร้างแม่พิมพ์สำหรับสร้างระบบของไหลจุลภาคจากพลาสติก จากนั้นสร้างระบบเครื่องอัดพิมพ์แบบร้อนด้วยแรงดันลมจากกระบอกสูบ 4 แกนเพื่อใช้สำหรับติดตั้งแม่พิมพ์นูนแบบอลูมิเนียมเพื่ออัดพิมพ์เป็นช่องของไหลจุลภาคบนพลาสติกพีเอ็มเอ็มเอ จากนั้นสร้างระบบเครื่องอัดพิมพ์แบบร้อนด้วยแรงดันลมจากกระบอกสูบแกนเดียวใช้สำหรับติดตั้งแม่พิมพ์นูนแบบแบบโฟโตรีซิสแบบเอชยู-8 บนแผ่นสแตนเลสเพื่ออัดพิมพ์เป็นช่องของไหลจุลภาคบนพลาสติกพีเอ็มเอ็มเอ จากนั้นจึงได้ข้อดีและข้อเสียของวิธีการดังกล่าวและพัฒนามาเป็นแม่พิมพ์นูนแบบเทคโนโลยีพ่นอนุภาคที่มีความละเอียดสูง เพื่อเป็นแม่พิมพ์เป็นเนื้อวัสดุโลหะทั้งแผ่นที่มีความละเอียดมากเท่ากับแม่พิมพ์แบบที่สร้างจากโฟโตรีซิส การสร้างแม่พิมพ์ดังกล่าวสามารถใช้งานได้จริงเนื่องจากได้ลักษณะของแม่พิมพ์ที่ทำบนวัสดุสแตนเลสเช่นเดียวกับแม่พิมพ์นูนจากวัสดุเอชยู-8 ดังนั้นผลการทดสอบก็จะสามารถทำได้เหมือนกัน ในการพัฒนาดังกล่าวจึงขอเสนอแนะให้ออกแบบสร้างแลบส์ออนชิปที่มีระบบของไหลจุลภาคเพื่อทดสอบจริงกับงานการวัดและทดสอบประเภทต่างๆที่ได้เคยทดสอบเป็นแลบส์ออนชิปบนระบบของไหลจุลภาคที่เป็นวัสดุแก้วและสารโพลีเมอร์มาแล้วเช่น การวัดวิเคราะห์หาสารเร่งเนื้อแดง การวิเคราะห์ภาวะการเป็นโรคไตระยะเริ่มต้น การวิเคราะห์และแยกเม็ดเลือดแดงของสัตว์ที่เป็นโรคด้วยวิธีทางระบบของไหลจุลภาค เป็นต้น การสร้างเพื่อประยุกต์ใช้งานจริงดังกล่าวจะช่วยทำให้มีการพัฒนาแลบส์ออนชิปทั้งการออกแบบให้ดีขึ้นและถูกลงอีกทั้งยังเป็นวิธีใหม่ในการพัฒนาการวิจัยซึ่งเป็นประโยชน์ต่อมวลมนุษยชนอย่างมากจนประมาณมิได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. W. Youn, H. Goto, M. Takahashi, S. Oyama, "A Replication Process of Metallic Micro Mold by Using Parylene Embossing and Electroplating," *Microelectronic Engineering*, pp. 405-412, 2007.
- [2] D. A. Mair, E. Geiger, A. P. Pisano, "Injection molded microfluidic chips featuring integrated interconnects," *Lab on a Chip*, pp.101-109, 2006.
- [3] C. H. Lin, C. H. Chao, C. W. Lan, "Low azeotropic solvent for bonding of PMMA micro fluidic devices," *Sensors and Actuators*, pp. 698-705, 2007.
- [4] C. Y. Chang, S. Y. Yang, M. H. Chu, "Rapid fabrication of ultraviolet-cured polymer microlens arrays by soft roller stamping process," *Microelectronic Engineering*, pp. 94-99, 2006.
- [5] N. Fertig, C. Meyer, R. H. Blick, C. Trautmann, and J. C. Behrends, "Microstructured glass chip for ion-channel electrophysiology," *Physical Review E*, Vol. 64, 2001.
- [6] T. Abe and M. Esashi, "One-chip multichannel quartz crystal microbalance (QCM) fabricated by deep RIE," *Sensors and Actuators*, Vol. 82, pp. 139-143, 2000.
- [7] X. Li, T. Abe, and M. Esashi, "Deep reactive ion etching of Pyrex glass using SF₆ plasma," *Sensors and Actuators A, Phys.*, Vol. 87, pp. 139-145, 2001.
- [8] S. W. Youn, H. Goto, M. Takahashi, S. Oyama, Y. Oshinomi, K. Mitsutani, R. Meada, "A replication process of metallic micro-mould by using parylene embossing and electroforming," *Microelectronics Engineering* 85, pp. 161-167, 2008.
- [9] Y. Guo, G. Liu, Y. Xiong, J. Wang, X. Huang, and Y. Tian, "Study of hot embossing using nickel and Ni-PTFE LIGA mold inserts," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 16, no. 3, pp. 589-597, 2007.
- [10] X. J. Shen, L. W. Pan, L. Lin, "Microplastics embossing process: experimental and theoretical characterizations," *Sensors and Actuator A* 97-92, 428-433, 2002.
- [11] J. T. Kim, K. B. Yoon, and C. G. Choi, "Passive Alignment Method of Polymer PLC Devices by Using a Hot Embossing Technique," *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, VOL. 16, NO. 7, JULY 2004.
- [12] J. Mazuno, "Fabrication of Micro-channel Device by Hot Emboss and Direct bonding of PMMA", *Proceedings of the 2004 International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems (ICMENS'04)*, 2004.
- [13] L. Du, C. Liu, H. Liu, J. Qin, Y. Wei, "Micro Hot Embossing Metal Mold For Microfluidic Chip Based On No Back Plate Growing Method," *Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, January 18 – 21, Zhuhai, China, 2006.
- [14] R. D. Chien, "Micromolding of biochip devices designed with microchannels" *Sensors and Actuators A*, 128, 238-247, 2006.

- [15] X.C. Shana, T. Ikeharab, Y. Murakoshi, R. Maedab, "Applications of micro hot embossing for optical switch formation," *Sensors and Actuators A*, 119, 433–440, 2005.
- [16] S. H. Hong, J. H. Lee, H. Lee, "Fabrication of 50 nm patterned nickel stamp with hot embossing and electroforming process," *Microelectronic Engineering* 84, 977–979, 2007.
- [17] T. Koerner, L. Brown, R. Xie, R. D. Oleschuk, "Epoxy resins as stamps for hot embossing of microstructures and microfluidic channels," *Sensors and Actuators B* 107, 632–639, 2005.
- [18] E. Belloy, S.Thurre, E.Walckiers, A.Sayah, M.A.M Gijs, "The introduction of powder blasting for sensor and microsystem applications," *Sensors and Actuators A*, Vol. 84, Issues 3, pp. 330-337, 2000.
- [19] P.J. Slikkerveer, P. C. P. Bouten and F. C. M. de Haas, "High quality mechanical etching of brittle materials by powder blasting," *Sensors and Actuators A*, Vol. 85, Issues 1-3, pp. 296-303, 2000
- [20] P.J. Slikkerveer, P.C.P. Bouten, F.H. Veld, and H. Scholten, "Erosion and damage by sharp particles", *Wear* 217, pp. 237-250, 1998.
- [21] A. Manz, N. Graber and H.M. Widmer, "Miniaturized total chemical analysis systems: A novel concept for chemical sensing," *Sensors and Actuators*, B 1 (1990)244-248.
- [22] D.J. Sadler, T.M. Liakopoulos, J. Cropp, C.H. Ahn, H.T. Henderson, "Prototype microvalve using a new magnetics microactuator," *Proceeding of the SPIE Symposium on Micromachining and Microfabrication* 3515 (1998) 46-52.
- [22] D.J. Sadler, K.W. Oh, C.H. Ahn, S. Bhansali, H.T. Henderson, "A new magnetically actuated microvalve for liquid and gas control applications," *Process of Transducers'99, The 10th International Conference on solid-state Sensors and Actuators*, pp.1815-1882, 1999.
- [24] K.D. Skrobaneck, M. Kohl, S. Miyazaki, "Stress optimised shape memory microvalves," *Proceedings of the IEEE MEMS Workshop*, pp.256-261, 1997.
- [25] M. Pater, H.T. Hederson, S. Bhansali, C.H. Ahn, "An integrated reservoir for on-chip aqueous storage in microfluidic system, *Proceedings of the International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Nashville*, pp.449-453, 1999.
- [26] S. Bhansali, A Han, M. Patel, K.W. Oh, C.H. Ahn, H.T. Henderson, "Resolving chemical/bio-compatibility issues in microfluidic MEMS systems," *Process of the SPIE Symposium on Microfluidic Devices and Systems II, Santa Clara, CA* 3877, pp.101-110, 1999.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [27] S. Bhansali, H.T. Henderson, S.B. Hoath, "Probing human skin as an information-rich smart biological interface using MEMS sensors", *Microelectronics Journal* 33, pp. 121-127, 2002
- [28] C. Haber, "Microfluidics in commercial applications; an industry perspective," *Lab on a Chip*, vol. 6, pp. 1118-1121, 2006
- [29] S. C. Terry, J. H. Jerman, and J. B. Angell, "A gas chromatographic air analyzer fabricated on a silicon wafer," *IEEE transactions Electronic Devices*, vol. 26, pp. 1880-1886, 1979.
- [30] S. Shoji, M. Esashi, and T. Matsuo, "Prototype. Miniature blood gas analyser fabricated on a silicon wafer," *Sensors and actuators*, vol. 14, no. 2, pp. 101-107, 1988.
- [31] H. T. G. Van Lintel, F. C. M. Van de Pol, and S. Bouwstra, "A piezoelectric micropump based on micromachining of silicon," *Sensors and actuators*, vol. 15, no. 2, pp. 153-167, 1988.
- [32] A. Manz et al., "Design of an open-tubular column chromatograph using silicon chip technology," *Sensors and Actuators B*, vol. 1, pp. 249-255, 1990.
- [33] B. D. Iverson and S. V. Garimella, "Recent advances in microscale pumping technologies: a review," *Microfluidics and Nanofluidics*, pp. 145-174, 2008.
- [34] K. W. Oh and C. H. Ahn, "A review of microvalves," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 16, pp. R13-R39, 2006.
- [35] D. Erickson and D. Li, "Integrated microfluidic devices," *Analytica Chimica Acta*, vol. 507, pp. 11-26, 2004.
- [36] C. Zhang, D. Xing, and Y. Li, "Micropumps, microvalves, and micromixers within PCR microfluidic chips: Advances and trends," *Biotechnology advances*, vol. 25, pp. 483-514, 2007.
- [37] K. Itoga, J. Kobayashi, Y. Tsuda, M. Yarnato, and T. Okano, "Second-generation maskless photolithography device for surface micropatterning and microfluidic channel fabrication," *Analytical chemistry*, vol. 80, pp. 1323-1327, 2008.
- [38] H. Sato, H. Matsumura, S. Keino, and S. J. Shoji, "All Su-8 microfluidic device with built-in 3-D fine microstructures," *Journal of micromechanics and microengineering*, vol. 16, pp. 2318-2322, 2006.
- [39] F. Larmer and A. Schilp, "Method of anisotropically etching silicon," DE 4241045, US 5501893, EP 625285, 1996.
- [40] R. M. Guijit et al., "New approaches for fabrication of microfluidic capillary electrophoresis devices with on-chip conductivity detection," *Electrophoresis*, vol. 22, p. 235, 2001.

- [41] J. Y. Cheng, M. H. Yen, C. W. Wei, Y. C. Chuang, and T. H. Young, "Crack-free, direct writing on glass using a low-power UV laser in the manufacture of a microfluidic chip," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 15, p. 1147, 2005.
- [42] T. Ichiki, Y. t. R. Sugiyama, T. Kodeisawa, and Y. Horiike, "Plasma application for biochip technology," *Thin Solid Films*, vol. 62, p. 435, 2003.
- [43] L. Cerriotti, K. Weible, N. F. de Rooij, and E. Verpoorte, "Rectangular channels for lab-on-a-chip applications," *Microelectronics Engineering*, vol. 67-68, p. 865, 2003.
- [44] I. M. Ward and J. Sweeney, *Mechanical properties of solid polymers*. New York: Wiley, 2004.
- [45] R. J. Young and P. A. Lovell, *Introduction to Polymers* routledge 2nd edition. London: Chapman and Hall, 1991.
- [46] P. Abgrall and A. M. Gué, "Lab-on-chip technologies: making a microfluidic network and coupling it into a complete microsystem - a review," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 17, pp. R15-R49, Elisa Morganti Bibliography December 19, 2008 94 2007.
- [47] M. Hecke and W. K. Schomburg, "Review on micro molding for thermoplastic polymers," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 14, p. 1, 2004.
- [48] M. A. Roberts, J. S. Rossier, P. Bercier, and H. Girault, "UV laser machined polymer substrates for the development of microdiagnostic systems," *Analytical Chemistry*, vol. 69, p. 2035, 1997.
- [49] H. Sato, T. Kakinum, J. S. Go, and S. Shoji, "A novel fabrication of in-channel 3-D micromesh structure using maskless multi-angle exposure and its microfilter application," in *Proceedings IEEE MEMS'03*, 2003, p. 223.
- [50] K. H. Becker, K. H. Schoenbach, and J. G. Eden, "Microplasmas and applications," *Journal of Physics D: applied physics*, pp. R55-R70, 2006.
- [51] K. Y. Lee et al., "Micromachining applications of a high resolution ultrathick photoresist," *J. Vac. Sci. Technol.*, vol. 13, p. 3012, 1995.
- [52] G. Kotzar et al., "Evaluation of MEMS material devices," *Biomaterials*, vol. 23, p. 2737, 2002.
- [53] H. Becker and C. Gartner, "Polymer microfabrication technologies for microfluidic systems," *Anal. Bioanal. Chem.*, vol. 390, pp. 89-111, 2008.
- [54] C. H. Ahn et al., in *Proc IEEE*, vol. 92, pp. 154-173.
- [55] Y. Y. Huang, P. Castrataro, A. Lee, and S. R. Quake, *Lab on chip*, vol. 7, pp. 24-26, 2007.

- [56] M. Madou, *Fundamentals of Microfabrication* (Boca Raton, FL: Chemical Rubber Company), 1997.
- [57] G.T. Kovacs, *A 1998 Micromachined Transducers Sourcebook* (Boston, MA: McGraw-Hill)
- [58] H. C. Meng, K.C. Ludema, “Wear models and predictive equations - Their form and content”, *Wear* 181 (1995) pp. 443-457
- [59] D.B. Marshall, B.R.Lawn, A.G.Evans, “Elastic/Plastic Damage in Ceramics: The Lateral Crack System “, *J. Am. Ceram. Soc.* 65 (1982) pp. 561-566
- [60] P.J. Slikkerveer, P.C.P. Bouten, F.H. in’t Veld, H. Scholten, “Erosion and damage by sharp particles”, *Wear* 217 (1998) pp. 237-250
- [61] Z. Feng, A. Ball, “The erosion of four materials using seven erodents — towards an understanding”, *Wear* 233-235 (1999) pp. 674-684
- [62] D.F. Wang, J.H. She, Z.Y. Ma, “Effect of microstructure on erosive wear behavior of SiC ceramics“, *Wear* 180 (1995) pp. 35-41
- [63] J. Zhou, S. Bahadur, “The effect on material composition and operational variables on the erosion of alumina ceramics “, *Wear* 150 (1991) pp. 343-354
- [64] J. E. Ritter, L. Rosenfeld, K. Jakus, “Erosion and strength degradation in alumina”, *Wear* 111 (1986) pp. 335-346
- [65] G.L.Sheldon, I.Finnie, “On the ductile behaviour of nominally brittle materials during erosive cutting “, *Trans. ASME* 88B (1966) pp. 387-392.
- [66] I. Finnie, “Some reflections on the past and future of erosion”, *Wear* 186-187 (1995) pp. 1-1030.
- [67] Y. Ballout, J.A. Mathis, J.E. Talia, “Solid particle erosion mechanism in glass”, *Wear* 196 pp. 263-269, 1996.
- [68] Y.I. Oka, H. Ohnogi, T. Hosokawa, M. Matsumura, “The impact angle dependence of erosion damage caused by solid particle impact“, *Wear* 203 (1997) pp. 573-579
- [69] P.G. Shewmon, “Particle size threshold in the erosion of metals “, *Wear* 68 (1981) pp. 253-258
- [70] J. Zhou, S. Bahadur, “Effect of blending of silicon carbide particles in varying sizes on the erosion of Ti-6Al-4V “, *Wear* 132 (1989) pp. 235-246
- [71] G. Sundararajan, M. Roy, “Solid particle erosion behaviour of metallic materials at room and elevated temperatures,” *Tribology International* 30 (1997) pp. 339-359
- [72] Y.A. Ballout, J.A. Mathis, J.E. Talia, “Effect of particle tangential velocity on erosion ripple formation “, *Wear* 184 (1995) pp. 17-21
- [73] J.C. Arnold, I.M. Hutchings, “The mechanisms of erosion of unfilled elastomers by solid particle impact “, *Wear* 138 (1990) pp. 33-46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [74] A.J. Sparks, I.M. Hutchings, "Effects of erodent recycling in solid particle erosion testing", *Wear* 162-164 (1993) pp. 139-147
- [75] P.H. Shipway, I.M. Hutchings, "The role of particle properties in the erosion of brittle materials", *Wear* 193 (1996) pp. 105-113
- [76] P.J. Slikkerveer, H. in't Veld, M. Verspui, B. de With, D. Reefman, "Alumina Particle Degradation during Solid Particle Impact on Glass", *J. Am. Ceram. Soc.* 83 (2000) pp. 2263-2266
- [77] I.M. Hutchings, "Strain rate effects in microparticle impact", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 10 (1977) pp. L179-L184
- [78] D.B. Marshall, A.G. Evans, M.E. Gulden, J.L. Routbort, R.O. Scattergood, "Particle size distribution effects on the solid particle erosion of brittle materials", *Wear* 71 (1981) pp. 363-373
- [79] P.J.Slikkerveer, M.Verspui, E.Skerka, "Erosion and damage by hard spherical particles on glass," *J. Am. Ceram. Soc.*, 82 (1999), pp. 3173-3178.
- [80] S.P. Timoshenko, J.N. Goodier, "Theory of elasticity, Int. 3rd edn.", McGraw-Hill Int. Engineering Mechanics Series, London, United Kingdom (1970)
- [81] A.P. Verma, G.K. Lal, "An experimental study of abrasive jet machining", *Int. J. Mach. Tool Des. Res.* 24 (1984) pp. 19-24
- [82] J.E. Fackrell, "Aerodynamic effects on PFBC erosion target experiments", *Wear* 134 (1989) pp. 237-252
- [83] P. Chevallier, A.B. Vannes, "Effects on a sheet surface of an erosive particle jet upon impact", *Wear* 184 (1995) pp. 87-91
- [84] A.N.J. Stevenson, I.M. Hutchings, "The influence of nozzle length on the divergence of the erodent particle stream in a gas-blast
- [85] F.H. in't Veld, P.J. Slikkerveer, "Towards prediction of flux effects in powder blasting nozzles", *Wear* 215 (1998) pp. 131-13
- [86] P.H. Shipway, I.M. Hutchings, "Influence of nozzle roughness on conditions in a gas-blast erosion rig", *Wear* 162-164 (1993) pp. 148-158
- [87] F.M. White, *Fluid Mechanics* 4th edn (Boston, MA: McGraw-Hill), 1999
- [88] H. Chih-Ming, and T. Yu-Chong, *ASME 1997, MEMS for fluidic controls Proc. Symp. On Micromechanical Systems* (Dallas, TX, 1997)
- [89] P. Stout, H.Q. Yang, P. Dionne, A. Leonard, Z. Tan, A. Przekwas and A. Krishnan, "1999 CFD-ACE+MEMS: a CAD system for simulation and modeling of MEMS," *Proc. SPIE—Int. Society for Optical Engineering (Design, Test, and Microfabrication of MEMS and MOEMS, Vol. 3680)*, Paris, pp 1-2, 1999
- [90] S.D. Senturia, "Simulation and design of microsystems: a 10-year perspective," *Sensors and Actuators A*, 67, pp. 1-7, 1998.
- [91] A.J. Tobin, R.E. Morel, *Asking about Cells* (Fort Worth, TX: Saunders), 1997.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [92] P.M. Osterberg and S.D. Senturia, "M-TEST: a test chip for MEMS material property measurement using electrostatically actuated test structures," *J. Microelectromech. Syst.* 6, pp.107–18, 1997.
- [93] L. Liwei, A. P. Pisano and R.T. Howe, "A micro strain gauge with mechanical amplifier," *J. Microelectromech. Syst.* 6, pp.313–21, 1997.
- [94] H. Guckel, T. Randazzo and D.W. Burns, "A simple technique for the determination of mechanical strain in thin films with applications to polysilicon," *J. Appl. Phys.* 57, pp.1671–5, 1985.
- [95] H Guckel, D.W Burns, H.A.C Tilmans, D.W. DeRoo and C.R Rutigliano, "Mechanical properties of fine grained polysilicon-the repeatability issue" 1988 Solid State Sensor and Actuator Workshop Technical Digest (Hilton Head Island, SC, 1988) Cat. No 88TH0215-4.
- [96] M. Biebl and H.V. Philipsborn, "Fracture strength of doped and undoped polysilicon," 8th Int. Conf. On Solid-State Sensors and Actuators (Stockholm, 1995)vol 2, pp 25–9, 1995.
- [97] M. Biebl, G.T. Mulhern and R.T. Howe, "In situ phosphorus-doped polysilicon for integrated MEMS" 8th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, (Stockholm, 1995) vol 1, pp 25–9, 1995.
- [98] R.J. Roark and W.C. Young, "Roark's Formulas for Stress and Strain 6th edn (New York: McGraw-Hill), 1989.
- [99] F. Paschen, *Ann. Phys., Lpz.* 37, 69, 1889
- [100] A.R. Von Hippel, *Molecular Science and Molecular Engineering* (New York: MIT Press–Wiley), 1959.
- [101] J.W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, 2nd edn (New York: McGraw-Hill), 1996
- [102] D.S. Park, T. I. Seo and M.W. Cho, "Mechanical etching of micro pockets by powder blasting," *Int. J. Adv. Manufac. Technol.* 25, pp. 1098-1104, 2004.
- [103] A. G. Pawlowski, A. Sayah and M. A. M. Gijs, "Accurate masking technology for high resolution powder blasting," *J. Micromech. Microeng.* 15, pp. S60-S64, 2005.

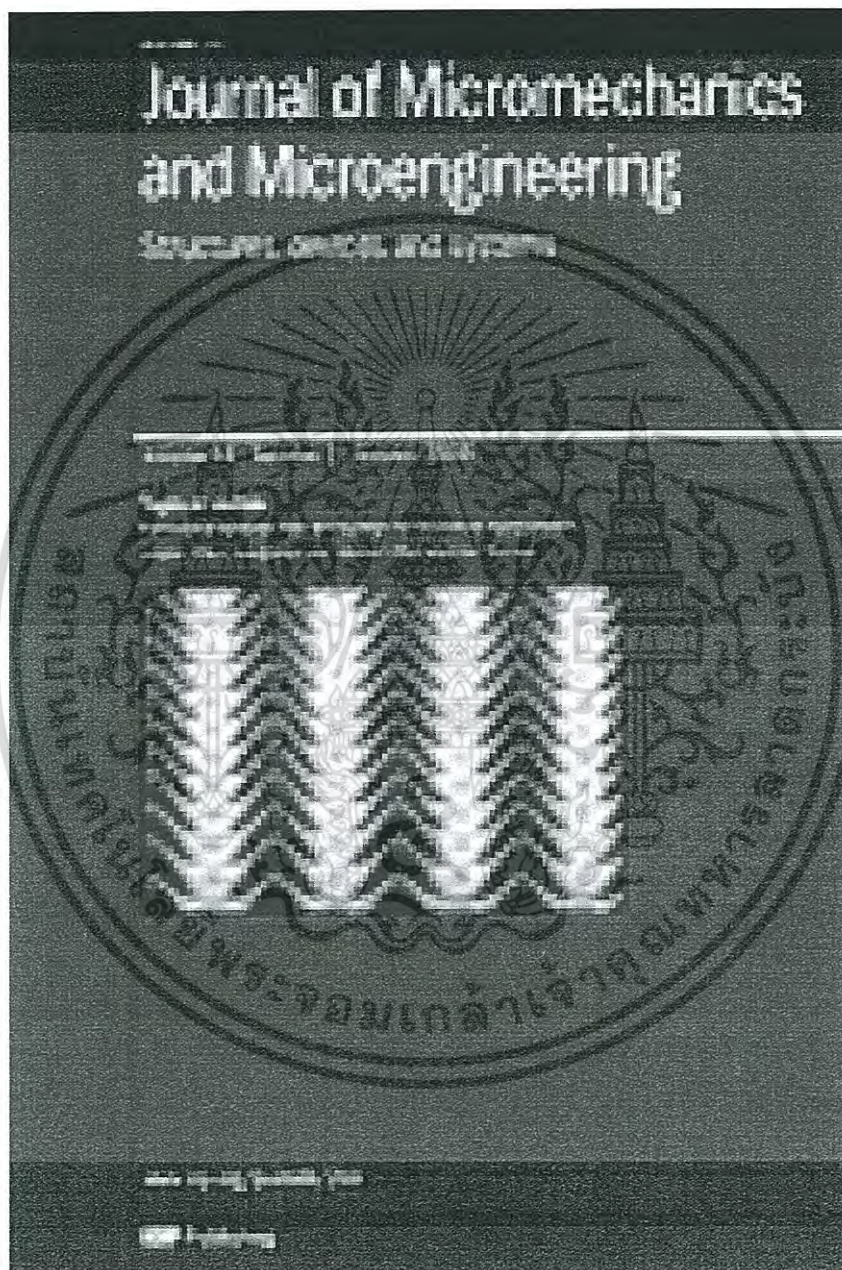
ภาคผนวก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ ที่มี Impact Factor

1. T. Lomas, A. Wisitsoraat, F. Chevasuvit and A. Tuantranont, “Precision Hot Embossing Mold Fabricated by High-Resolution Powder Blasting with Polydimethylsiloxane and SU-8 Masking Technology”, J. Micromech. Microeng., Volume 19, 035002 (6pp), 2009.

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการนานาชาติ

1. T. Lomas, S. Mongpraneet, A. Wisitsoraat, K. Jaruwongrungeee, A. Sappat, T. Maturros, F. Chevasuvit, A. Tuantranont, “Low Cost Hot Embossing Process for Plastics Microfluidic Chips Fabrication,” 6th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2009), Volume: 01 Page 462 – 464, Pattaya, Thailand, 2009.
2. T. Lomas, S. Mongpraneet, A. Sappat, A. Wisitsora-at, F. Cheevasuvit, and A. Tuantranont, “Low Cost based Microfluidic Chips Fabricated by Hot Embossing with SU-8 Micromold on Stainless Steel Substrate,” Asia-Pacific Conference On Transducers and Micro-Nano Technology (APCOT 2008), 22-25 Jun 25, Tainan, Taiwan, 2008



Journal of Micromechanics and Microengineering

(2011 Impact Factor = 2.105)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A precision hot embossing mold fabricated by high-resolution powder blasting with polydimethylsiloxane and SU-8 masking technology

T Lomas^{1,2}, A Wisitsoraat¹, F Chevasuvit² and A Tuantranont¹

¹ Nanoelectronics and MEMS Lab., National Electronics and Computer Technology Center, 112 Thailand Science Park, Klong 1, Klong Luang, Pathumthani 12120, Thailand

² Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalokkrung Rd., Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

E-mail: adisorn.tuantranont@nectec.or.th

Received 21 September 2008, in final form 21 December 2008

Published 30 January 2009

Online at stacks.iop.org/JMM/19/035002

Abstract

In this paper, we applied a three-dimensional micromold by using micropowder and micropattern masking technology. High-resolution powder blasting with polydimethylsiloxane (PDMS) and SU-8 masking is developed for the fabrication of a precision microfluidic mold for hot embossing fabrication. The PDMS is a suitable masking material for powder blasting due to its high erosion resistance. First, a 100 μm SU-8 negative pattern was developed on a stainless steel substrate by standard photolithography. A PDMS solution was then applied to the substrate, mainly filling recessed regions. Excess of PDMS was then physically removed by a blade. The PDMS/SU-8 structure was then cured. Next, silicon carbide (SiC) powder with an average diameter of 50 μm was blasted on a PDMS/SU-8 coated stainless sheet at a constant pressure between 4 and 6 bar and a PDMS mask was removed by ultrasonic cleaning in isopropanol. The three-dimensional structure was examined by an optical microscope, optical white light interferometer and scanning electron microscope. The PDMS pattern is found to be 50 μm wide, and the maximum etched depth at this thickness is around 150 μm at a blasting pressure of 6.2 bar; thus, an aspect ratio of 3 is easily obtained. In principle, the low-cost micromachining hot embossing mold developed can be improved to yield submicrometer- and nanometer-scale resolution.

(Some figures in this article are in colour only in the electronic version)

1. Introduction

Hot embossing is one of the most preferred methods for plastic structure fabrication due to simplicity, low cost and high production rate. Hot embossing or thermal stamping techniques have been utilized extensively for the fabrication of micron-sized features with a high throughput and at a low cost. Recently, hot-embossing techniques have been applied not only to the formation of a micropattern but also to the high volume production of microdevices such as microreactors, microoptical devices

and microfluidic systems including capillary electrophoresis (CE), polymerized chain reaction (PCR) and micrototal analysis system (μTAS) [1–5]. One of the main costs of this technique is a micromold. A variety of materials and processes have been developed for micromold fabrication. These include a silicon mold fabricated by dry or wet etching [6, 7], nickel mold prepared by electroforming [8, 9] and epoxy mold formed by casting. The disadvantages of nickel and epoxy molds are limited complexity with low aspect ratio features while that of the silicon mold is high cost.

Thus, a novel, low-cost and effective technique for the fabrication of a hot embossing mold is still needed. Glass and metal are preferred materials for mold fabrication because of mechanical stability, ruggedness and low cost. However, these materials are generally difficult to machine due to their high hardness, erosion resistance and brittleness. Conventional machining technologies involving chemical and mechanical machining methods have limitations in productivity and accuracy. Micro powder blasting has been considered a simple, fast and low-cost method suitable for glass and brittle material micromachining [10–12] because of high productivity and low heat transfer. The cost is considerably lower than other techniques including RIE etching, laser machining. In powder blasting, a particle jet of hard materials such as glass bead, brown alumina, white alumina or silicon carbide is directed toward a target for mechanical material removal. The material is selectively removed by an application of patterned masking material over the substrate.

A major issue of the powder blasting method is to find patternable masking materials that have high erosion resistance to powder blasting. Typical photoresist masking materials do not have sufficiently high erosion resistance to powder blasting. Polydimethylsiloxane (PDMS) is an elastomer with excellent powder blasting erosion resistance but it cannot be patterned directly. In this work, we develop a pattern transfer casting technique by using an SU-8 photoresist template to fabricate a PDMS-based high-resolution powder blasting mask on a stainless steel micromold for hot embossing applications. Conventionally, powder blasting is applied to a glass substrate but in this work we employ this technique on a stainless steel substrate. The characteristics of the PDMS powder blasting mask were studied as a function of process parameters including blasting pressure and time.

1.1. Basic principle of powder blasting

The powder blasting process is shown in figure 1. The powder blasting was performed by a venturi-type powder blaster with SiC powder. In this system, the nozzle has two inputs: one for the powder and the other for the pressurized air, and the SiC powder was transported to the nozzle by underpressure generated by a venturi in the nozzle. The powder tank is at atmospheric pressure and the powder is continuously replenished in the tank after being used in the blasting process. Micropowder collides with hard and brittle workpieces at a very high velocity ($80\text{--}200\text{ m s}^{-1}$) and density as shown in figure 1(a). According to the machining model [11, 12], when a sharp indenter tip moves down to the inside of the workpiece, a plastic deformation zone is formed under the indenter tip due to the compressive force as illustrated in figure 1(b). The plastic zone formed becomes larger as the compressive force increases. Eventually, radial/median and lateral cracks are formed along the perpendicular and parallel directions of the surface, respectively. During this time, it can be assumed that the lateral cracks initiate the workpiece removal process and the radial/median cracks induce the surface crack formation. It plays a key role in accelerating the removal process at some level as the machined depth is increased.

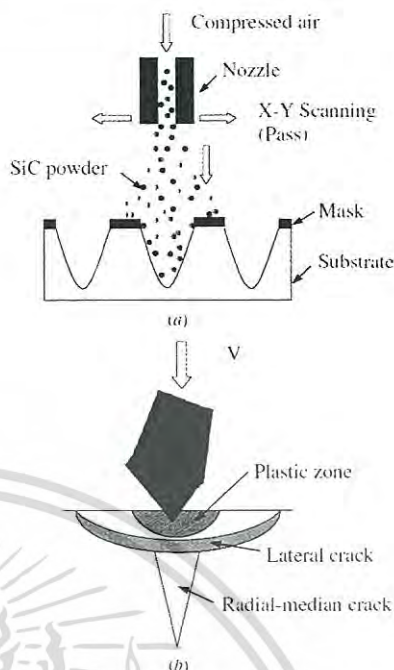


Figure 1. (a) The principle of the powder blasting process and (b) schematic view of the cracks generated by an indenting particle [11–13].

The erosion efficiency (E_{eff}) of a substrate or masking material is a function of the kinetic energy of particles and its material parameters according to [11]

$$E_{\text{eff}} = \frac{E^{5/4}}{H^{17/12} K_{Ic}} U_{\text{kin}}^{1/6} \quad (1)$$

where U_{kin} is the kinetic energy, E is Young's modulus, H is the indentation hardness and K_{Ic} is the fracture toughness of the substrate.

2. Experimental setup

2.1. Setup

All experiments were conducted using a commercial microblaster (Blastburn Machine, Model: Burn SME, Thailand). In the powder blasting system, the particles hit the target substrate sitting on a fixed X–Y stage at a high speed through an 8 mm braze nozzle in a box that is ventilated by a cyclone, which can separate the powder from the airflow and bring dispersed powder back to a micron filtering system for the user's safety. The powder is periodically dosed to the exit nozzle by an air valve (50 Hz pressure pulses). The nozzle is scanned at a fixed distance of ~ 50 mm several times over the target to achieve a uniform etched surface. The nozzle scan rate is about 5 cm s^{-1} . The particle jet (which is about 2 cm in diameter) can be optimized for etching, while the mask defines the small and complex structures. The mass flow rate

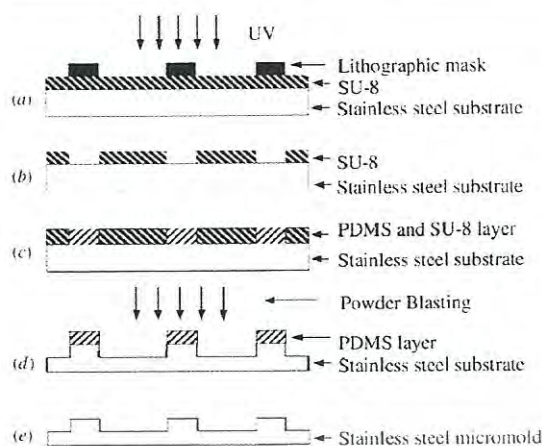


Figure 2. Schematic diagram of the SU-8/PDMS masking technology: (a) lithographic exposure of spin-coated SU-8 resist, (b) developed SU-8 pattern, (c) complimentary PDMS mask, (d) powder-blasted stainless steel structure and (e) powder-blasted stainless steel structure after PDMS mask removal [14].

and approximated velocity of powder blasting at a pressure of 6 bar are 20 g s^{-1} and 120 m s^{-1} , respectively. The mass flow rate was obtained by directly measuring the weight of SiC injected in a closed bag for 10 s. The velocity was then estimated from the mass flow rate, SiC density and nozzle area. The high-resolution powder used is SiC with a diameter less than $50 \mu\text{m}$. SiC powder was obtained by filtering commercial SiC powder to remove any particles larger than $50 \mu\text{m}$. SiC has very high hardness and strength. Thus, it is highly suitable for powder blasting. For this blasting study, the etching rate is measured as a function of air pressure from 2 to 6 bar. In this system, a Ceccato-screw compressor (series CSA, Model CSA7.5/10, Italy) is used with a class 1 oil/water filter. It can produce a maximum pressure of 10 bar and an air delivery of 630 l min^{-1} . A high capacity air compressor is used to ensure that the air pressure is constant throughout the blasting period.

2.2. Fabrication of SU-8 and the PDMS mask

The schematic diagram for the fabrication of the precision hot embossing mold is shown in detail in figure 2. The process begins with SU-8 photoresist patterning by spin coating and the photolithography process. The substrate for the micromold is a 3 inches diameter circular stainless steel disk (2.5 mm thick). Before spin coating, the substrate is ground and cleaned by oxygen plasma treatment at 35 Watts RF power for 10 min. SU-8 No. 2100 (MicroChem Corp., USA) is then coated on the wafer by a two-step spinning process. The photoresist is pre-spun at 1000 rpm for 5 s and then spun at 3000 rpm for 30 s. Next, an SU-8 film is pre-baked on a hot plate at 60, 70 and 80°C for 5 min at each temperature and then soft-baked at 95°C for 30 min, respectively. The multi-step baking process is developed to minimize stress in the photoresist layer on the stainless steel substrate. After slowly cooling down to

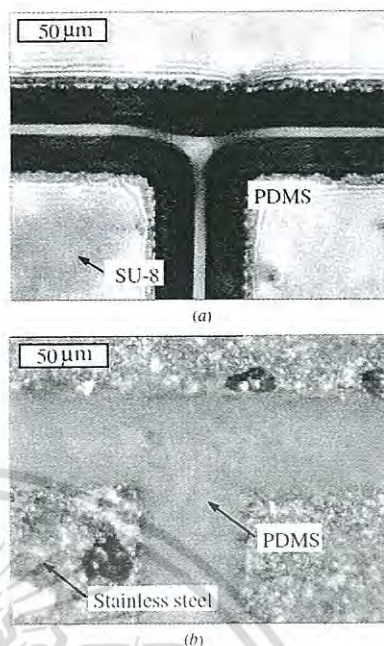


Figure 3. Optical micrograph of a (a) PDMS-filled SU-8 pattern focused on the root of the PDMS channel and (b) powder-blasted structure demonstrating that the PDMS mask still remains on the substrate after powder blasting.

room temperature, the photoresist is exposed under 380 nm UV light for 10 s (see figure 2(a)). It is then post-baked at 95°C for 30 min. It is slowly cooled down and remains at room temperature for 12 h to release stress due to UV exposure. Finally, it is developed in an SU-8 developer for 20 min (see figure 2(b)). A PDMS mixture is then prepared to fill in the recessed regions of the SU-8 template on the stainless steel substrate. A Sylgard 184 Silicone Elastomer kit (Dow Corning, USA) is prepared by mixing the precursors with a curing agent at a ratio of 10:1 by volume. The prepolymer mixture is degassed at 20–50 mTorr at ambient temperature in a desiccator with a mechanical vacuum pump for 10 min to remove any air bubbles in the mixture. PDMS mixtures were gradually poured onto the SU-8 master mold to a height just below the thickness of the SU-8 layer (see figure 2(c)). Any excess PDMS on the SU-8 template will be removed by hand scraping on the SU-8 layer. Hand scraping can be replaced by an automated scraping machine equipped with robots to give more reproducible result. The PDMS is then cured at 100°C for 30 min. The micropatterned PDMS/SU-8 structure on the stainless steel substrate that is ready for powder blasting is shown in figure 3(b).

2.3. Fabrication of the micromold

A precision hot embossing mold was then fabricated by powder blasting on the PDMS/SU-8 structure. Since the SU-8 photoresist has much lower erosion resistance than the

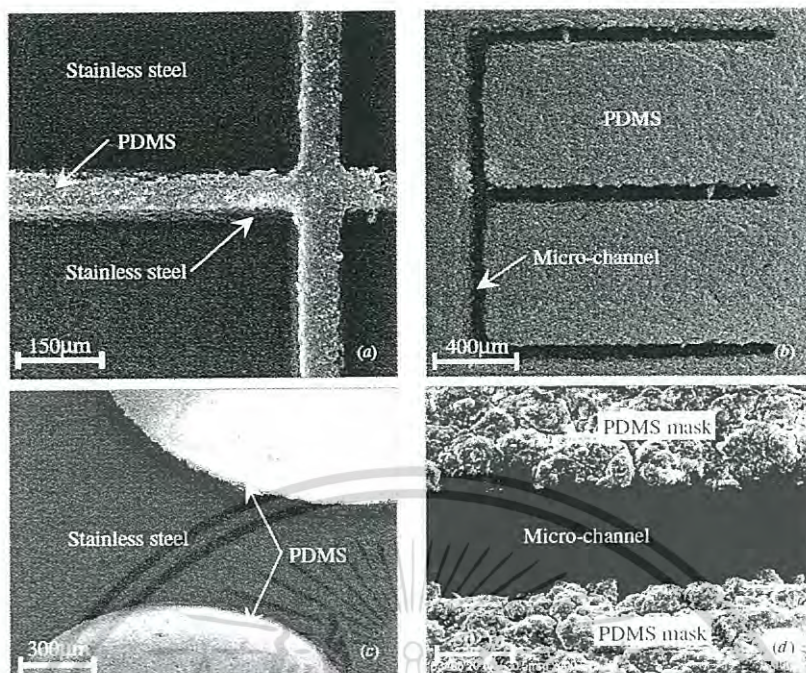


Figure 4. Scanning electron micrograph (SEM) of a (a) 50 μm deep and 50 μm wide channel pattern of a 50 μm thick PDMS mask. (b) typical recessed pattern of a micromold fabricated from the PDMS/SU-8 micromask. (c) typical powder-blasted stainless steel mold with a circular PDMS masking pattern for the chamber of a microfluidic chip and (d) high-magnification PDMS masking layer after deep etching by powder blasting.

PDMS, the SU-8 photoresist will be removed after the first blasting phase, the substrate below is exposed to the powder blasting and the substrate material in these areas is removed (see figure 2(d)). Finally, the PDMS masking layer is removed by peeling off (see figure 2(e)). For this blasting experiment, the air pressure is varied from 2 to 6 bar.

2.4. Sample characterization

During fabrication of SU-8 and the PDMS mask and micromold, the workpiece was examined under a high-resolution microscope (Olympus BX51 3D Microscope, Japan) and the image was recorded on a PC via a color video camera (Sony super exwave, Japan) after every step. The final structure was then analyzed by a scanning electron microscope (SEM) and an interferogram by a microsystem analyzer (Polytec Inc., Germany). Figure 3 shows an optical micrograph of the PDMS layer filled in an SU-8 pattern before and after powder blasting.

3. Experimental results and discussion

Typical SEM micrographs of powder-blasted structures fabricated from PDMS/SU-8 micromasks are shown in figure 4. Figure 4(a) illustrates a 50 μm deep and 50 μm wide cross-channel pattern of a 50 μm thick PDMS mask

before powder blasting. It can be seen that the sidewall of the PDMS masking layer is well defined and it can be further seen that it is nearly vertical from its three-dimensional and cross-sectional interferometric profiles as shown in figure 5. It is thus a good mask for powder blasting. Figure 4(b) demonstrates a typical recessed pattern of a powder-blasted micromold fabricated from the PDMS/SU-8 micromask. It illustrates a clogging problem that is likely to occur because the maximum diameter of SiC particles is about 50 μm and the recess pattern line width is also 50 μm . It can be seen that there are few large particles left in the cavity. With the present SiC powder system, the minimum feature size or lateral resolution of this process is approximately 50 μm . Thus, it is essential to select a smaller particle size to improve the lateral resolution especially for powder blasting of narrow recessed patterns. In addition, it is found that the etching rate and sidewall angle recessed pattern depends on its width. The etching rate is higher and the sidewall angle is less vertical by $\sim 10^\circ$ for a wider pattern.

Figure 4(c) shows a typical extruded pattern of the powder-blasted micromold with the PDMS micromask. It can be seen that the sidewall angle of the powder-blasted structure is nearly vertical. This nearly vertical sidewall appears to be a problem for hot embossing conformality; however, the conformality problem no longer exists after PDMS mask removal as shown in figure 4(d) because the top

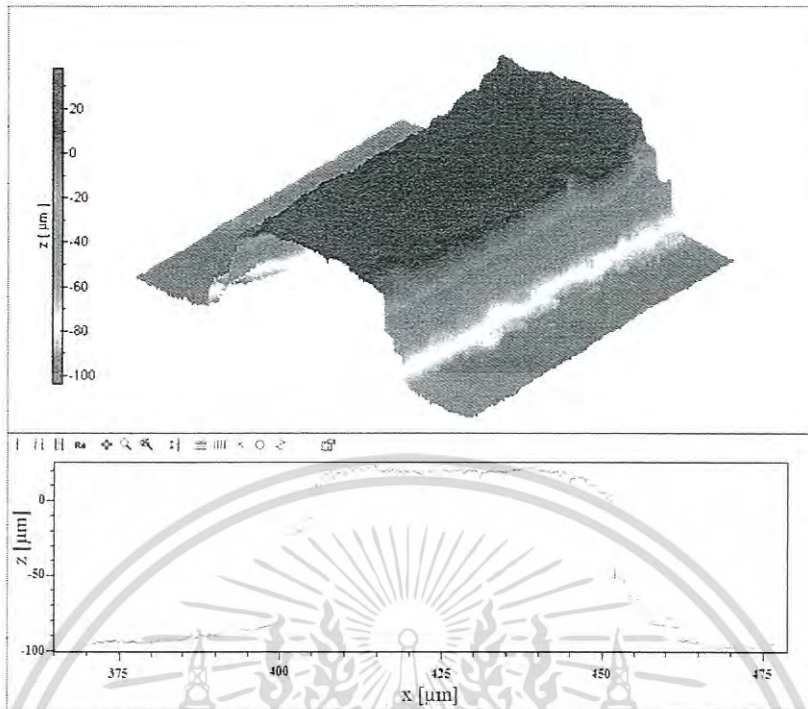


Figure 5. Three-dimensional and cross-sectional profile of a $50\ \mu\text{m}$ wide powder-blasted microchannel pattern measured by a white-light interferometer (Polytec Inc.).

edges of the patterns are round. In addition, the surrounding etched surfaces are quite smooth and no clogging problem occurs like a recessed pattern. In order to determine the true substrate etching rate of powder blasting on the PDMS/SU-8 micromask, the etching time to remove $100\ \mu\text{m}$ thick SU-8 regions is measured as a function of the blasting pressure as shown in figure 6(a). The required etching time is first rapidly decreased linearly as the pressure increases from 2 to 4.5 bar and it is decreased less rapidly as the pressure increases further. This can be explained by the effect of particle concentration in the air jet as a function of pressure. At low pressure, the particle concentration is rapidly increased and the increment is less at high pressure due to limited space in the air jet. After SU-8 has been removed, the substrate etching can be evaluated. The typical etching depth at a blasting pressure of 6.2 bar is shown in figure 6(b). It is evident that the etching depth increases almost linearly with the blasting time, and a high etching rate of $100\ \mu\text{m}\ \text{min}^{-1}$ is achieved by SiC powder blasting. The powder blasting etching rate is significantly higher than that of conventional wet and dry etching. Thus, the developed powder blasting process is suitable for the mass production of a micromold for hot embossing applications. Although high-resolution powder blasting produce relatively high quality surface finish compared to standard powder blasting because very fine powder is used, the blasted surface is still rougher than that from conventional wet chemical etching and the quality may not be sufficient for microfluidic applications.

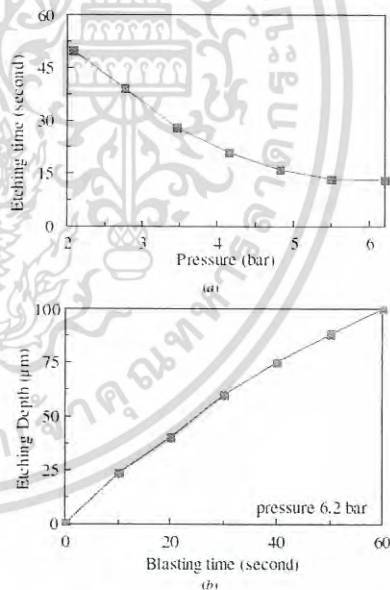


Figure 6. (a) Etching time versus blasting pressure of SiC powder blasting to remove a $100\ \mu\text{m}$ thick SU-8 micromask and (b) etching depth on stainless steel versus blasting time of SiC powder blasting conducted at a pressure of 6.2 bar (optimized pressure).

This problem can be solved by performing short-time wet etching of the powder-blasted structure to produce a smoother surface finish. In this case, wet etching of the stainless steel mold can be done in a concentrated hydrochloric acid for a few seconds.

4. Conclusion

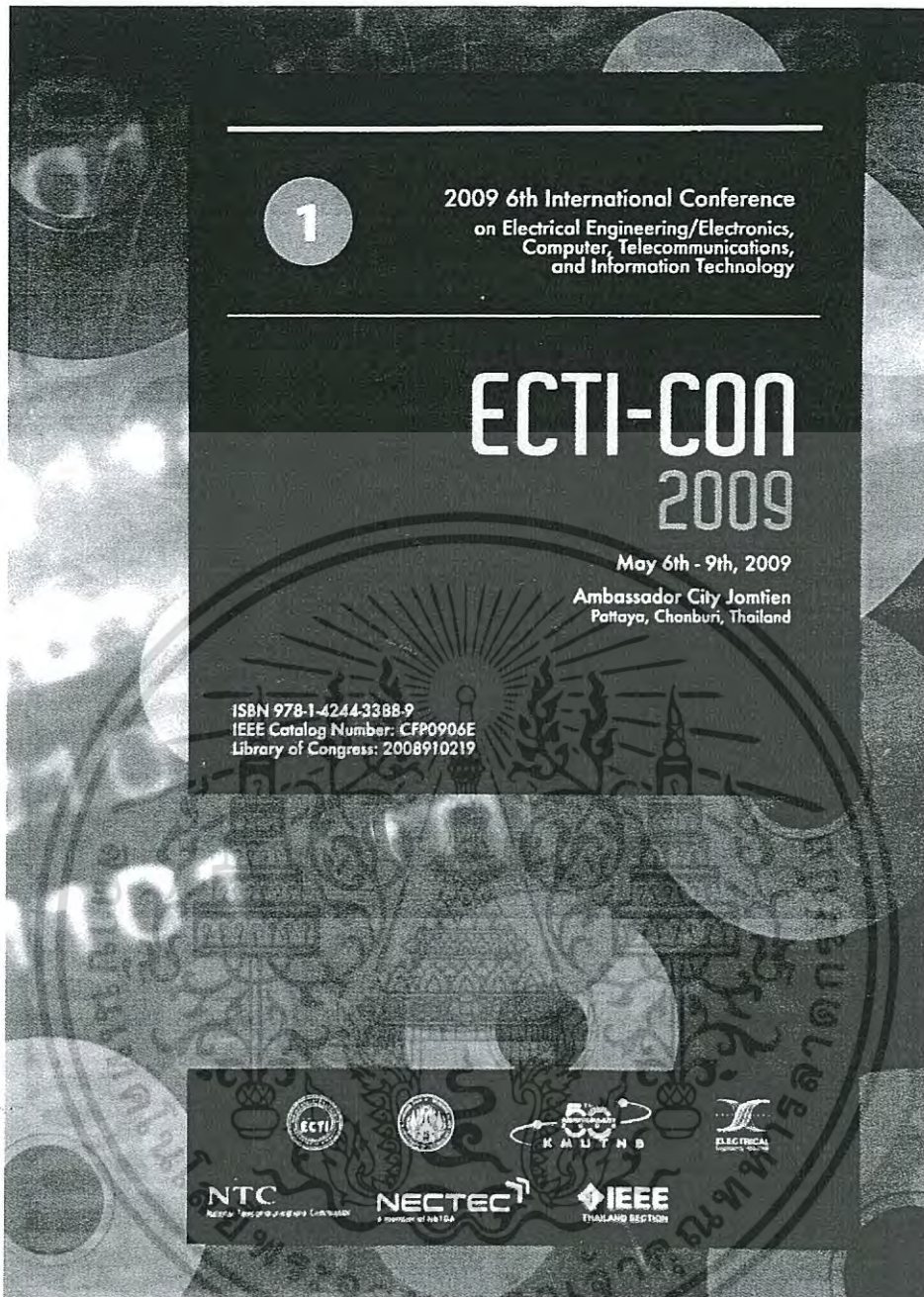
In conclusion, we have developed a precision hot embossing metal mold by high-resolution powder blasting with the PDMS and SU-8 masking technology. This technique utilizes patternability of the SU-8 photoresist and high erosion resistance of PDMS material. It can be used to fabricate a micromold structure with a minimum feature size of approximately 50 μm . With smaller SiC particles, a finer micromold structure may be achieved. The performances of the PDMS/SU8 mask for powder blasting were studied as a function of process parameters such as blasting pressure and time. A structure with an aspect ratio higher than 1 can be formed, and the required etching time is significantly shorter than that of conventional wet and dry etching.

Acknowledgment

This work has been funded by Sensor Platform Cluster under NSTDA's Strategic Program Alliance (SPA), Project ME5001 NECTEC.

References

- [1] Youn S W, Goto H, Takahashi M and Oyama S 2008 A replication process of metallic micro mold by using parylene embossing and electroplating *Microelectron. Eng.* 85 161–7
- [2] Mair D A, Geiger E and Pisano A P 2006 Injection molded microfluidic chips featuring integrated interconnects *Lab Chip* 6 1346–54
- [3] Lin C H, Chao C H and Lan C W 2007 Low azeotropic solvent for bonding of PMMA micro fluidic devices *Sensors Actuators* 121 698–705
- [4] Chang C Y, Yang S Y and Chu M H 2007 Rapid fabrication of ultraviolet-cured polymer microlens arrays by soft roller stamping process *Microelectron. Eng.* 84 355–61
- [5] Fertig N, Meyer C, Blick R H, Trautmann C and Behrends J C 2001 Microstructured glass chip for ion-channel electrophysiology *Phys. Rev. E* 64 040901
- [6] Abe T and Esashi M 2000 One-chip multichannel quartz crystal microbalance (QCM) fabricated by deep RIE *Sensors Actuators* 82 139–43
- [7] Li X, Abe T and Esashi M 2001 Deep reactive ion etching of Pyrex glass using SF₆ plasma *Sensors Actuators A* 87 139–45
- [8] Youn S W, Goto H, Takahashi M, Oyama S, Oshinomi Y, Mitsutani K and Meada R 2008 A replication process of metallic micro-mould by using parylene embossing and electroforming *Microelectron. Eng.* 85 161–7
- [9] Guo Y, Liu G, Xiong Y, Wang J, Huang X and Tian Y 2007 Study of hot embossing using nickel and Ni-PTFE LIGA mold inserts *J. Microelectromech. Syst.* 16 589–97
- [10] Belloy E, Thurre S, Walekiers E, Sayah A and Gijs M A M 2000 The introduction of powder blasting for sensor and microsystem applications *Sensors Actuators A* 84 330–7
- [11] Shikerveer P J, Bouten P C P and de Haas F C M 2000 High quality mechanical etching of brittle materials by powder blasting *Sensors Actuators A* 85 296–303
- [12] Shikerveer P J, Bouten P C P, in't Veld F H and Scholten H 1998 Erosion and damage by sharp particles *Wear* 217 237–50
- [13] Park D S, Seo T I and Cho M W 2004 Mechanical etching of micro pockets by powder blasting *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 25 1098–104
- [14] Pawlowski A G, Sayah A and Gijs M A M 2005 Accurate masking technology for high resolution powder blasting *J. Micromech. Microeng.* 15 S60–4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Low Cost Hot Embossing Process for Plastics Microfluidic Chips Fabrication

T. Lomas^{1,2}, S. Mongpraneet¹, A. Wisitsoraat¹, K. Jaruwongrungruengsee¹, A. Sappat¹, T. Maturus¹,
F. Chevasuvit² and Adisorn Tuantranont^{1,*}

¹Nanoelectronics and MEMS Laboratory, National Electronics and Computer Technology Center,
112 Pahol Yothin Rd., Klong 1, Klong Luang, Pathumthani 12120, THAILAND

²Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalokkrung Road,
Ladkrabang Bangkok 10520 THAILAND

*Corresponding Authors: adisorn.tuantranont@nectec.or.th

Abstract—In this work, we develop plastic microfluidic chips based on low cost hot embossing process with metal micromold. Metal micromold was formed on aluminum substrates by CNC milling machine and high precision micromachine. The hot embossing system is in-house made with computer aid design by Solid Work program. The system consists of four main parts, structural body, heating system, compressive system and control electronics. The compressive system consists of two top hydraulic single-stage pistons and four middle-stage pistons. Polymethyl methacrylate (PMMA) microfluidic chips were then produced by hot embossing under different applied temperatures and time. It was found that optimum temperature and time for minimum contraction and depth error were 80 degree C and 2-5 minutes. The developed technique offer advantages for microfluidic chip fabrication in term of quality, complexity and cost.

I. INTRODUCTION

Microfluidic systems increasingly gain importance in modern life sciences as well as in diagnostic and therapeutic biomedical engineering. Thus, there has been a large demand for the development of a portable and inexpensive clinical diagnostic biochip using fully integrated microfluidic chip. Plastic and polymer substrates such as poly, polymethyl methacrylate (PMMA), polyethylene (PE), or polycarbonate (PC) are excellent choices as they offer a wide range of physical and chemical material parameters for the microfluidic chip and low cost replication approach. One of the main costs of this technique is micromold. A number of materials and processes have been developed for micromold fabrication. These include nickel mold prepared by electroforming [1], epoxy mold formed by casting and silicon mold fabricated by plasma etching [2]. Hot embossing is one of the lowest cost techniques for mass production of plastic based microfluidic chip. The hot embossing or thermal stamping techniques have been utilized extensively for the definition of micro features with a high throughput at a low cost. Recently, hot-embossing techniques have been applied not only to the formation of micro pattern but also to the high volume production of micro devices such as micro reactors, micro fluidic systems and micro optical devices [3-6]. Injection molding is regarded as the best mass-production method to replicate microfluidic chip. The processes can be automated and used to fabricate micro reactors, micro fluidic systems and micro optical devices structures with high productivity. However, the processes

involve high temperature and high pressure. They are time-consuming batch wise processes. To reduce heating/cooling times, micro molding using electroformed metal mold has been explored. This low pressure/low temperature process reduces cycle time. To further improve the productivity, we have developed a hot embossing with mold for rapid fabrication of microfluidic chip. The microfluidic feature is formed and cured by the UV light radiation and processed at room temperature. Although this technique is a mass-production process, the fabrication procedure of metal mold by CNC milling machine with microfluidic cavity is complicated. In this study, hot-embossing technique is employed for PMMA micro structuring as it is a simpler and faster process than other parylene micro structuring methods, also including direct deposition with/without a sacrificial layer, dry etching and micro molding. In addition, hot-embossing process is carried out with varying temperatures, pressures and processes time. The detailed process is described in the next section.

II. EXPERIMENTAL

A. Design of Low Cost Hot Embossing System

The hot embossing system used in this work as shown in Figure 1 is in-house made with computer aid design by Solid Work program. The system consists of four main parts, structural body, heating system, compressive system and control electronics. The structural body composes of working stage and mold holder with compressive piston. The working stage is centrally bored to reduce heat loss. Both working stage and mold holder are embedded with 250W heater, whose temperature is precisely controlled by PID microcontroller. The compressive system consists of two top hydraulic single-stage pistons and four middle-stage pistons. The pistons are working successively to make work piece and mold in contact under a desired pressure and depth controlled by magnetic switch and microcontroller.

B. Plastics Microfluidic Chip Fabrication

The schematic diagram for micromold fabrication and hot-embossing utilized in this work is detailed in Figure 2. The process began with the aluminum micro mold manufactured by a high precision CNC milling machine with 1 μ m resolution. A typical photograph of CNC micromachined Aluminum

micromold is shown in Figure 3(a). The inverted microchannel for this mold is designed to be 200 μm wide and 120 μm high. The 2D profile across microchannel of the aluminum micromold is measured by Dektak profiler as shown in Fig. 4. It can be seen that the measured dimension is in agreement with the design with very small error. Polymethyl methacrylate (PMMA) sheet is then placed for 5 minutes on the micromold, which is already heated by a hot plate at 200 $^{\circ}\text{C}$. The purpose of this step is to make PMMA soften. It should be noted that the PMMA melting, softening and glass transition temperatures are 290 $^{\circ}\text{C}$, 200 $^{\circ}\text{C}$ and 90 $^{\circ}\text{C}$, respectively. Next, the mold and PMMA assembly is then transferred into the hot-embossing machine. The hot-embossing machine is in-house designed and developed. It is equipped with a hot plate capable of heating up to 200 $^{\circ}\text{C}$ and hydraulic compressor. Hot embossing experiment is then carried out with different embossing temperatures and embossing times. The embossing time is changed from 2 to 6 seconds while the embossing temperature is varied from 60 to 80 $^{\circ}\text{C}$, below the PMMA's glass transition temperature. The quality of fabricated PMMA microchannel is characterized by Dektak surface profile as illustrated in Figure 4. Percentage of contraction and depth error are estimated as shown in Figure. 6 and 7. It can be seen that optimum temperature and time for minimum contraction and depth error were 80 $^{\circ}\text{C}$ and 2-5 minutes. For temperature lower than 80 $^{\circ}\text{C}$, depth error a contraction are found to be very large due temperature difference between mold and PMMA substrate.

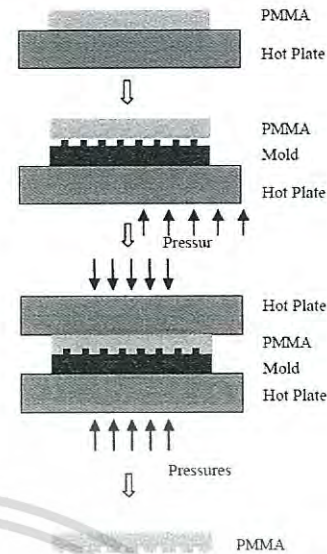


Figure 2. Process diagram for replicating metallic micromold by PMMA embossing

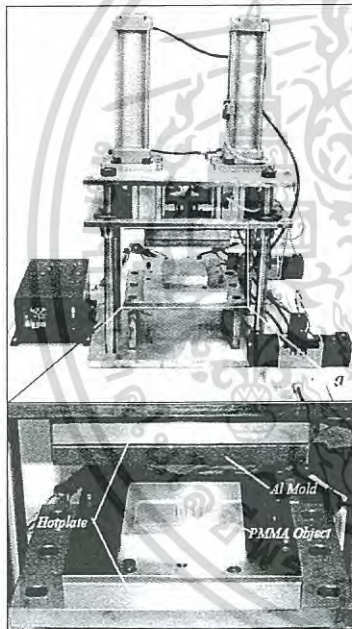


Figure 1. Fabrication System for PMMA Microfluidic Chip (a) and Zoom in to Hot Embossing Chamber (b).

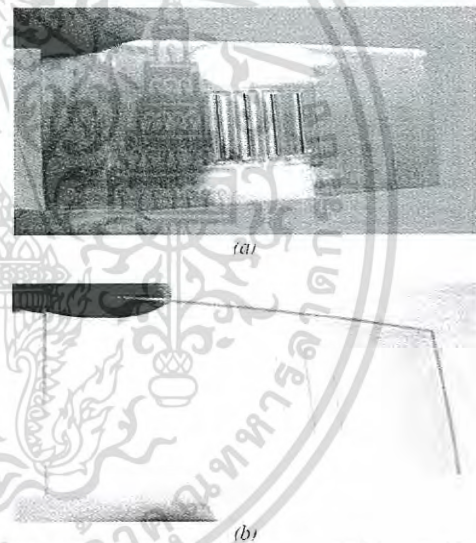


Figure 3. Typical photograph of CNC micromachined of Al micromold (a) and hot embossed PMMA sheet (b).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

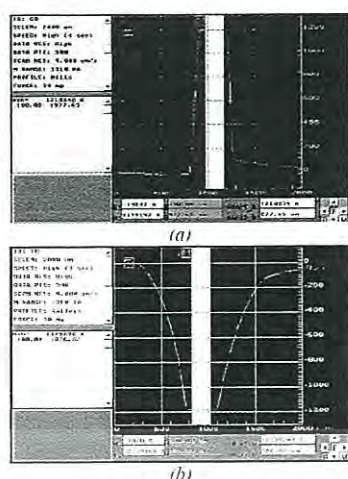


Figure 4 2D Step profile across microchannel mold measured by Dektak Surface Profiler (a), and hot embossed PMMA sheet (b).

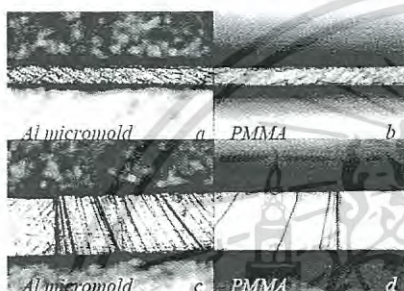


Fig. 5(a) Top view of 100 micron wide of Aluminum micromold (middle rib). (b) fabricated microchannel on PMMA chip. (c) 400 micron wide of Aluminum micromold, and (d) fabricated microchannel on PMMA chip.

III. RESULT AND DISCUSSION

Typical photograph of the hot-embossed PMMA microfluidic chip is shown in Figure 3(b). It can be seen that PMMA remains optically transparent. The embossing temperature is 70 °C. It can be seen that the microchannel profile significantly deviates from the step profile of the original mold as seen in Figure 4. In particular, the edges of PMMA microchannel are much more round than the original mold. In addition, lateral and vertical dimension of microchannel is less than those of the mold. The effect of embossing time on the percentage of lateral contraction of microchannel at various embossing temperatures is shown in Figure 6. It can be seen that the lateral contraction is decreased and change toward lateral expansion as the embossing time increases. In addition, the lateral contraction is lowest at the highest embossing temperature of 80 °C. The effect of embossing time on the percentage of vertical contraction or

depth error of microchannel at various embossing temperatures is shown in Figure 7. It can be seen that the vertical contraction is fluctuated up and down as the embossing time increases. Similarly, the vertical contraction is lowest at the highest embossing temperature of 80 °C.

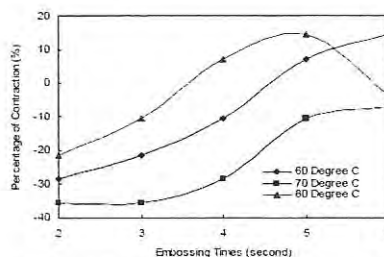


Figure 6: The effect of embossing time on percentage of lateral contraction of microchannel at various embossing temperatures.

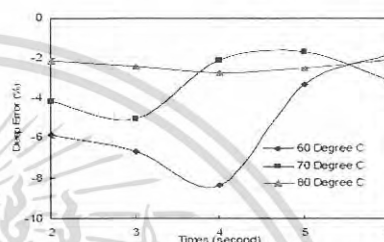


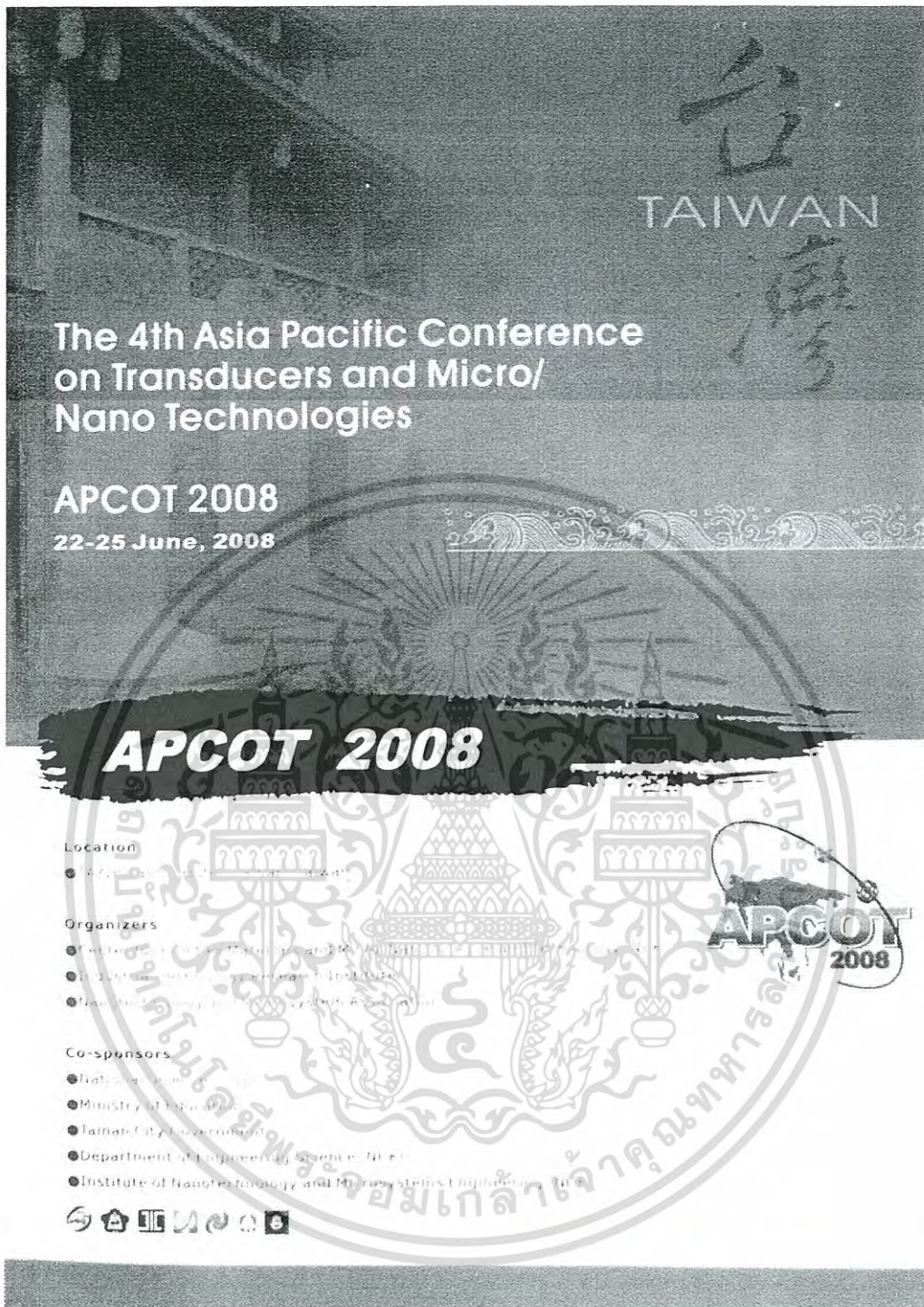
Figure 7: The effect of embossing time on percentage of depth error of microchannel at various embossing temperatures.

IV. CONCLUSION

In conclusion, we have developed hot embossing instrument and process for production of polymer-based microfluidic chip. The effect of hot embossing temperature and time on the quality of hot-embossed microchannel is studied to optimize microfluidic fabrication. It is found that temperature and pressing time is more important factor for the quality of hot embossed microfluidic chip. In addition, good hot-embossing quality will be obtained with high embossing temperature and moderately long embossing time.

REFERENCES

- [1] S.H. Hong, J.H. Lee, and H. Lee, *J. Microelectromech. Eng.* 84 (2007), pp. 977-979.
- [2] T. Koerner, L. Beown, R. Xie, and R.D. Oleschuk, *J. Sensor and Actuators B*, 107 (2005), pp. 632-639.
- [3] S.W. Youn, H. Goto, M. Takahashi, and S. Oyama, *J. Microelectronic Engineering* (2007), pp. 405-412.
- [4] D. A. Mau, Emul Geiger, A.P. Pisano, *J. Lab on a Chip*, (2006), pp.101-109.
- [5] C.H. Lin, C.H. Chao, C.W. Lan, *J. Sensors and Actuators*, (2007), pp. 698-705.
- [6] C.Y. Chang, S.Y. Yang, M.H. Chu, *J. Microelectronic Engineering*, (2006), pp. 94-99.



The 4th Asia Pacific Conference
on Transducers and Micro/
Nano Technologies

APCOT 2008
22-25 June, 2008

APCOT 2008

Location
● National Sun Yat-sen University, Taiwan

Organizers
● Faculty of Engineering, National Sun Yat-sen University, Taiwan
● Institute of Microelectronics and Technology, National Sun Yat-sen University, Taiwan
● Nanotechnology Center, National Sun Yat-sen University, Taiwan

Co-sponsors
● National Science Council
● Ministry of Education
● Tainan City Government
● Department of Engineering Science, NKSU
● Institute of Nanotechnology and Microsystems Engineering, NKSU

APCOT 2008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 09.50 — 09.55 3D1-3 **FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF AN AMMONIA SENSOR WITH NANOSTRUCTURE POLYANILINE**
M. C. Liu, C. L. Dai and C. H. Chen
Department of Mechanical Engineering, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan
- 09.05 — 09.20 3D1-4 **32 X 32 CMOS DNA SENSOR ARRAY USING CHARGE TRANSFER TECHNIQUE**
T. Matsuda, S. Terai, H. Takao, M. Ishikawa and K. Suzuki
Department of Electrical and Electronic Engineering, Toyoohashi University of Technology, Japan; Japan Science and Technology Agency - Core Research for Evolutional Science and Technology; Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science
- 09.20 — 09.35 3D1-5 **NH₃ GAS SENSORS BASED ON PLASMA FUNCTIONALIZED MULTIWALL CARBON NANOTUBES POLYANILINE COMPOSITES**
T. J. Kim, K. P. Joo, S. J. Ahn, S. H. Kim, C. J. Lee, J. J. Park and N. K. Min
Department of Control and Instrumentation Engineering, Korea University, Seoul, Korea; Department of Biomechanical Technology, Korea University, Seoul, Korea; School of Electrical Engineering, Korea University, Seoul, Korea
- 09.35 — 09.50 3D1-6 **DEVELOPMENT OF AN ULTRASmall SEMICONDUCTING METAL OXIDE NO₂ GAS SENSOR WITH INTEGRATED MICRO HEATER**
Leopoldo D. Del Rio De La Puente, Jose Antonio Sempere-Serrano and Susana Nakano
Research Center for Advanced Science and Technology, University of Tokyo, Tokyo, Japan; Science and Engineering Faculty, Ritsumeikan University, Shiga, Japan

Parallel Session (Room: 4F-E): (4) Fabrication Technologies
Chair: Franck Alexis Chollet
Co-Chair: Da-Jeng Yao

- 09.20 — 09.35 3E1-4 **FOCUS BEAM INDUCED GALLIUM NITRIDE SWELLING APPLIED IN NANOPILLAR FABRICATION**
Shuang-Yu Wu, Jian-Hong Hong, Jian-Hong Hong and Chuan-Yu Lu
Department of Materials Science and Engineering, Center for Micro/Nano Science and Technology, Institute of Electro-Optical Science and Engineering, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan
- 09.35 — 09.50 3E1-2 **THREE-DIMENSIONAL CARBON NANOTUBE ARCHITECTURE ON HIGHLY STRUCTURED SURFACES**
Woo-Young Kim, Chae-Hyun Lee, Jong-Hwan Cho, Heon-Kwang Hyeon and Woon-Gwang Yoo
National Nano Device Laboratories, Hwasung, Incheon, NanoEngineering and MicroSystem Institute, Department of Materials Science and Engineering, Dept. of Power Mechanical Engineering, National Tsing Hua University, Hsinchu, Taiwan
- 09.50 — 09.05 3E1-3 **MODELING OF POSITIVE TONE TYPE THICK PHOTORESIST DISSOLUTION AND SEQUENTIAL DEVELOPMENT PROFILE SIMULATION**
T. Hara, T. Inamoto, K. Sugano, T. Higuchi and O. Ishida
Department of Micro-Electromechanical System Engineering, Kyoto JAU, Kyoto, Japan

- 09.05 — 09.20 3E1-4 **LOW COST PLASTIC BASED MICROFLUIDIC CHIPS FABRICATED BY HOT EMBOSHING WITH SU-8 MICROMOLD ON STAINLESS**

- 09.20 — 09.35 3E1-5 **TECHNIQUES FOR IMPROVEMENT OF 45° MICROMIRRORS FABRICATED IN s-Si/SiO₂ SILICON**
Y. Wu, J. Liu, M. Hsieh and C. Chen
School of EE&E, University of New South Wales, Sydney, Australia, 2052
 - 09.35 — 09.50 3E1-6 **SOURCE-FOLLOWER AMPLIFIER ARRAY WITH VAPOR-LIQUID-SOLID GROWN SILICON MICROPROBE ELECTRODES ON SILICON (111) SUBSTRATE**
K. Murota, K. Tera, T. Kawahara, T. Kawanishi, H. Takano, K. Sasaki and M. Ishida
Toyoohashi University of Technology, Core Research for Evolutional Science and Technology (CREST), Research Fellow of the Japan Society for Promotion of Science

Coffee/Tea Break

Parallel Session (Room: 4F-B): (2) Nano Device & Nanotechnology
Chair: Chien-Chung Fu
Co-Chair: Yuh-Chung Hu

- 10.10 — 10.25 3B2-1 **FABRICATION OF NOVEL SIDI ALAFM TIPS WITH NARROW GAP**
S. Morita, T. Akita, E. Makino, and T. Shirota
Graduate School of Science and Technology, Hiroshima University, Hiroshima, Japan; Toyoohashi University of Technology, Toyoohashi, Japan
- 10.25 — 10.40 3B2-2 **MANIPULATION OF THE NEAR-FIELD SCATTERING FIELDS BY NANOSTRUCTURED METALLIC THIN FILM**
Fu-Ho Ho, Feng-Ji Chen, and C. Shi Wei Lin
Nanotechnology Division, Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories, Department of Electrophysics, National Chung Hsing University
- 10.40 — 10.55 3B2-3 **PATTERNABLE SILICON NANOTIPS CREATED USING DEEP REACTIVE ION ETCHING PROCESSES**
S. M. Lee, J. D. Jung, G. K. Song, S. J. Hwang, P. G. Jung, and J. S. Ko
Graduate School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan, Korea
- 11.55 — 11.10 3B2-4 **USING GELATIN AS PROTECTING AGENT AND ORGANIC TEMPLATE TO SYNTHESIZE THE NOBLE METAL NANOPARTICLES AND METAL NANOPARTICLES MESPOROUS SILICA FOR SERS AND CO-OXIDATION APPLICATION**
Hsiang-Jung Chang, Jung-Her Tang, Chih-Chang Lin, Yen-Chia Liao, Hsiang-Chang Chen, Hsiang-Cheng Lin, Jui-Cheng Lin, Chih-Hsun Tang and C. Shih-Wei Lin
Department of Chemistry, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan; Institute of Biomedical Engineering, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan; Department of Chemistry, National Tainan University, Tainan, Taiwan; Department of Engineering Science, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan; Instrumentation Center, National Tainan University, Tainan, Taiwan

Parallel Session (Room: 5F-A): (8) Bio-Microsystems & Fluidic Systems



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LOW COST PLASTIC BASED MICROFLUIDIC CHIPS FABRICATED BY HOT EMBOSsing WITH SU-8 MICROMOLD ON STAINLESS STEEL SUBSTRATE

T. Lomas^{1,2}, S. Mongpranee¹, A. Sapphat¹, A. Wisitsora-at¹, F. Cheevasuvit² and A. Tuantranont¹

¹Nanoelectronic and MEMS Laboratory, National Electronics and Computer Technology Center, Thailand

²Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

ABSTRACT

In this work, we develop low cost plastic based microfluidic chips based on hot embossing process with SU-8 photoresist micromold on stainless steel substrate. SU-8 photoresist micromold layer was formed on stainless steel substrate by standard photolithography. Polymethyl methacrylate (PMMA) microfluidic chips were then produced by hot embossing under different applied temperatures and time. It was found that optimum temperature and time for minimum contraction and depth error were 80 °C and 2-5 minutes. The developed technique offer advantages for microfluidic chip fabrication in term of quality, complexity and cost.

Keywords: Hot Embossing; Micromolding; PMMA

1. INTRODUCTION

Miniaturized microfluidic devices fabricated using MEMS techniques have revolutionized bioanalytical applications. Recently, polymer based microfluidic chips have been proposed as viable alternatives to established silicon and glass-based microchip devices. A number of practical methods, including injection molding, hot stamping and laser ablation, have been developed for the rapid fabrication of polymer-based microfluidic chips. Injection molding is regarded as the best mass-production method to replicate microfluidic devices. The processes can be automated and used to fabricate micro reactors, micro fluidic systems and micro optical devices structures with high productivity. To reduce heating/cooling times, micro molding using photoresist metal mold has been explored. This low pressure/low temperature process reduces cycle time. However, the processes involve high temperature and high pressure. They are time-consuming batch wise processes.

Hot embossing is one of the most preferred methods due to simplicity, low cost, and high production rate. The hot embossing or thermal stamping techniques have been utilized extensively for the fabrication of micron-sized features with a high throughput and at a low cost. Recently, hot-embossing techniques have been applied not only to the formation of micro pattern but also to the high volume production of micro devices such as micro reactors, micro fluidic systems and micro optical devices [1-4]. To further improve the productivity, we have developed micromolding and hot embossing process for rapid fabrication of microfluidic chips. Plastic and polymer substrates such as polymethylmethacrylate (PMMA), polyethylene (PE) and polycarbonate (PC) are excellent choices as they offer a wide range of physical and chemical material parameters for the microfluidic chip and low cost

replication approach. Hot embossing is one of the lowest cost techniques for mass production of plastic based microfluidic chip. One of the main costs of this technique is micromold. A number of materials and processes have been developed for micromold fabrication. These include silicon mold fabricated by plasma etching and nickel mold prepared by electroforming [5], and epoxy mold formed by casting [6]. The disadvantages of nickel and epoxy molds are limited complexity with low aspect ratio micromold feature while that of silicon mold is high cost. In this work, we develop hot-embossing micromold based on SU-8 photoresist layer on stainless steel substrate by standard photolithography, which offer advantages in term of complexity and cost.

2. EXPERIMENTAL DETAILS

Design of Hot Embossing System

The hot embossing system used in this work as shown in Fig. 1 is in-house made with computer aid design by Solid Work program. The system consists of four main parts: structural body, heating system, compressive system and control electronics. The structural body composes of working stage and mold holder with compressive piston. The working stage is centrally set to reduce heat loss. Both working stage and mold holder are embedded with 250W heater, whose temperature is precisely controlled by PID microcontroller. The compressive system consists of two top hydraulic single-stage pistons and four middle-stage pistons. The pistons are working successively to make work piece and mold in contact under a desired pressure and depth controlled by magnetic switch and microcontroller.

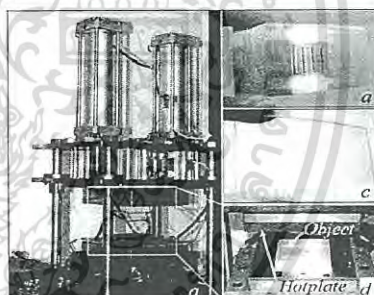


Fig. 1 (a) In-house system for PMMA microfluidic chip, (b) Aluminum micromold, (c) photograph of typical hot embossed PMMA sheet, and (d) closed-up on hot embossing chamber.

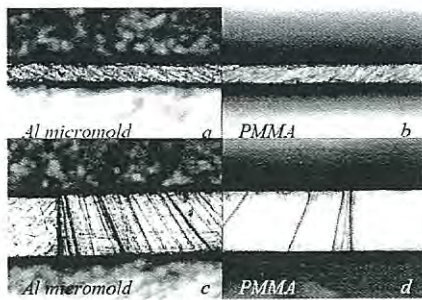


Fig. 2 (a) Top view of 100 micron wide of Aluminum micromold (middle rib), (b) fabricated microchannel on PMMA chip, (c) 400 micron wide of Aluminum micromold, (d) fabricated microchannel on PMMA chip.

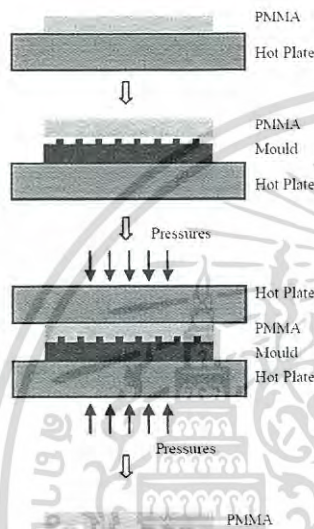


Fig. 3 Process diagram for replicating metallic micromold by PMMA embossing

Micromold Fabrication

The schematic diagram for micromold fabrication and hot-embossing utilized in this work is detailed in Fig. 3. The process begins with the SU-8 photoresist micromold fabrication by spin coating and photolithography process. The substrate for SU-8 micromold is a 2.5 mm-thick 3" circular stainless steel disk. Before spin coating, the substrate is ground and cleaned by oxygen plasma treatment at 35 W RF power for 10 minutes. SU-8 No. 2100 is then coated on the wafer by

two-step spinning process. The photoresist is pre-spun at 1000 rpm for 5 second and then spun at 3000 rpm for 30 second. Next, SU-8 film is pre-baked on a hot plate at 60, 70 and 80 °C for 5 minutes at each temperature and then soft-baked at 95 °C for 30 minutes, respectively. The multi-step baking process is developed to minimize stress in the photoresist layer on stainless steel substrate. After slowly cooling down to room temperature, the photoresist is exposed under 380 nm UV light for 10 s. It is then post-baked at 95 °C for 30 minutes. It is slowly cooled down and remains at room temperature for 12 hours to release stress due to UV exposure. Finally, it is developed in SU-8 developer for 20 minutes.

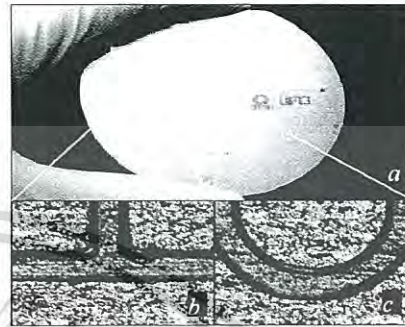


Fig. 4(a) SU-8 micromold on stainless steel substrate, (b) SU-8 T-shaped rib and (c) serpentine shaped rib.

Microfluidic Chips Fabrication

A Polymethylmethacrylate (PMMA) sheet is then placed on the SU-8 micromold, which has already been heated on a hot plate at 200 °C for 5 minutes. The purpose of this step is to make PMMA soften. It should be noted that the PMMA melting, softening and glass transition temperatures are 290 °C, 200 °C and 90 °C, respectively. Next, the mold and PMMA assembly are transferred to the hot-embossing machine. Hot-embossing experiment is then carried out with different embossing temperatures and embossing times while the embossing pressure is fixed at approximately 3 bars. The embossing time is changed from 2 to 6 seconds while the embossing temperature is varied from 60 to 80 °C, below the PMMA's glass transition temperature.



Fig. 5 Microchannel pattern successfully stamped on a sheet of PMMA material.

3. RESULT AND DISCUSSION

Microfabricated SU-8 micromold is shown in Fig. 4. Typical photograph of the PMMA microfluidic chip embossed at temperature of 70 °C is shown in Fig. 5. It can be seen that PMMA remains optically transparent. The optimum. The 2D profile across microchannel of the SU-8 micromold is measured by Dektak profiler as shown in Fig. 6. It can be seen that the measured dimension is in agreement with the design with very small error. However, the measured microchannel profile has deviated from the step profile of the original mold as seen in Fig. 6. In particular, the edges of PMMA microchannel are much more round than the original mold. In addition, lateral and vertical dimension of microchannel is less than that of the mold. The percentage of contraction and depth error of PMMA microchannels are estimated from the 2D profile as shown in Figs. 7-8. It can be seen that the lateral contraction is decreased and becomes positive (expansion) as the embossing time increases. In addition, the contraction is highest at 70 °C embossing temperature and lowest at 80 °C embossing temperature. Similarly, the depth error is minimized at 80 °C embossing temperature but it is highest at 60 °C embossing temperature. Thus, the optimum temperature of PMMA hot embossing of PMMA is 80 °C, which is slightly below the glass transition temperature of PMMA. This is expected because PMMA is moderately softened at this temperature, thus it can well conform to the mold under low applied pressure.

After hot embossing process, embossed PMMA microfluidic chip need to be bonded to another sheet of PMMA with drilled through holes for appropriate applications. Most of the lab-on-a-chip need to be transparent for convenience, thus surface of PMMA sheet before and after embossing and bonding process need to be very smooth, no rough is desired. Interferometric surface profiler (Micro System Analyzer, Polytec, Germany) is used to investigate the surface roughness of fabricated SU-8 micromold. Standard deviation or RMS is found to be average of 278,9 nm and surface flatness is measured as 2.02 as shown in Fig. 9. This flatness is acceptable for hot stamping on PMMA substrate due to the transparency of fabricated chip is observed. No roughness and traces on SU-8 micromold are transferred to PMMA sheet.

After SU-8 micromold with 100 micron height is used for hot embossing on PMMA sheet at stamping temperature of 80 °C for various stamping time of 2-5 seconds, the contraction and depth of fabricated PMMA microchannel is measured by Dektak surface profiler. The depth variation of hot embossed microchannel measured at various stamp holding time is plotted in Fig. 10. The average depth of microchannel is measured as 60 micrometers. From the experiment, we found that SU-8 micromold causes more deep error than Al micromold, at the same time SU-8 micromold is more easier and quicker to make the copy and finer dimension of microchannel can be achieved. Also the cost of SU-8 micromold fabrication is substantially lower than Al micromold that is fabricated by Micro Electro Discharge Machining (Micro-EDM) or Micro Precision Machining.

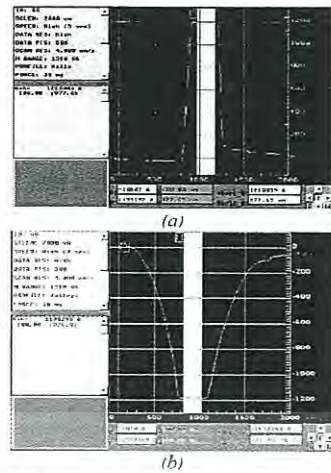


Fig. 6 (a) 2-Step profile across micromold and (b) PMMA microchannel profile measured by Dektak Surface Profiler.

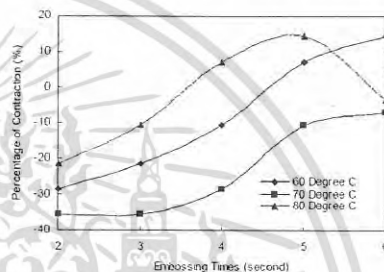


Fig. 7 The effect of embossing time on percentage of lateral contraction of microchannel at various embossing temperatures.

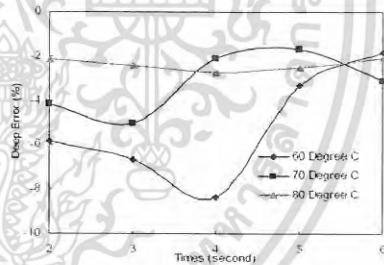


Fig. 8 The effect of embossing time on percentage of depth error of microchannel at various embossing temperature.

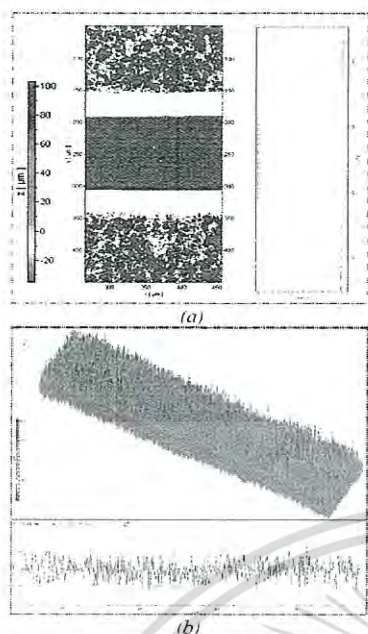


Fig. 9 (a) Step profile across SU-8 micromold and (b) graph of surface roughness measured by Interferometric surface profiler (Polytec).

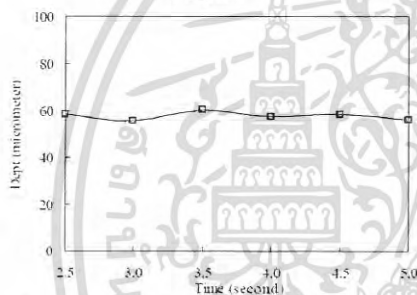


Fig.10 Measured depth variation of hot embossed PMMA microchannel.

4. CONCLUSION

In conclusion, we have developed low cost plastic based microfluidic chips based on hot embossing process with SU-8 photoresist micromold on stainless steel substrate. SU-8 photoresist micromold layer was formed on stainless steel substrates by standard photolithography. The effect of hot embossing temperature and time on the quality of hot-embossed microchannel is studied to optimize microfluidic fabrication. It is found that embossing temperature and time is more important factor for the quality of hot embossed microfluidic chip. In addition, good hot-embossing quality will be obtained with high embossing temperature and moderately long embossing time. PMMA microfluidic chips were then produced by hot embossing under different applied temperatures and time. The optimum temperature and time for minimum contraction and depth error were 80 °C and 5 seconds, respectively. For temperature lower than 80 °C, depth error and contraction are found to be very large due to large temperature difference between mold and PMMA substrate.

REFERENCES

- [1] S. W. Youn, H. Goto, M. Takahashi, S. Oyama, "A Replication Process of Metallic Micro Mold by Using Polyethylene Embossing and Electroplating," *Microelectronic Engineering*, 2007, pp. 405-412.
- [2] D. A. Mair, E. Geiger, A. P. Pisano, "Injection molded microfluidic chips featuring integrated interconnects," *Lab on a Chip*, 2006, pp.101-109.
- [3] C. H. Lin, C. H. Chao, C. W. Lan, "Low azeotropic solvent for bonding of PMMA micro fluidic devices," *Sensors and Actuators*, 2007, pp. 698-705.
- [4] C. Y. Chang, S. Y. Yang, M. H. Chu, "Rapid fabrication of ultraviolet-cured polymer microlens arrays by soft roller stamping process," *Microelectronic Engineering*, 2006, pp. 94-99.
- [5] S.H. Hong, J.H. Lee, and H. Lee, *J. Microelectronics Eng.*, 84 (2007), pp. 977-979.
- [6] T. Koerner, L. Brown, R. Xie, and R.D. Oleschuk, *J. Sensor and Actuators B*, 107 (2005), pp. 632-639.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายถนอม โลมาศ
สถานที่เกิด	อำเภอโพธิ์ทอง จังหวัดศรีสะเกษ
ที่อยู่	50/294 หมู่บ้านบุศรินทร์รังสิต 2 ซอยหมู่บ้านชัยพลฤกษ์ ถ.เสมาฟ้าคราม ตำบลคูคต อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี 12130
ประวัติการศึกษา	2536 อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุมทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2546 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุมทาง
อุตสาหกรรม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) ระบบของไหลจุลภาค (Microfluidic) 2.) ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS) 3.) แลปส์ ออน ชิป (Lab on chips) 4.) อุปกรณ์และระบบเครื่องมือวัดทางอุตสาหกรรม
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย	
พ.ศ.2535-2540	ตำแหน่งวิศวกรเครื่องมือวัด บริษัท โพรมิเนนท์ ฟลูอิด คอนโทรล (ประเทศไทย) จำกัด
พ.ศ.2539-2543	ตำแหน่งวิศวกรอาวุโส บริษัท โพลีเทคโนโลยี จำกัด
พ.ศ.2544-ปัจจุบัน	ตำแหน่งนักวิจัย ห้องปฏิบัติการนาโนอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องกลจุลภาค ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ศูนย์พัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ผลงานวิจัยที่เคยได้ตีพิมพ์

วารสารทางวิชาการระดับนานาชาติ (SCI Index and Refereed Journals)

1. Johannes Philipp Mensing, Teerakiat Kerdcharoen, Chakrit Sriprachuabwong, Anurat Wisitsoraat, Ditsayut Phokharatkul, Tanom Lomas and Adisorn Tuantranont, "Facile preparation of graphene-metal phthalocyanine hybrid material by electrolytic exfoliation" , J. Mater. Chem, Volume 22, Pages 1709-17099. (ISI IF 2009 = 5.9)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. C. Sriprachuabwong, C.Karuwan, A.Wisitsorrat, D.P. Hokharatkul, T.Lomas, P.Sritongkham and A.tuantranont, "Inkjet-printed graphene-PEDOT:PSS modified screen printed carbon electrode for biochemical sensing", DOI:10.1039/c2jm14005e, pages 5478 - 5485. (ISI IF 2009 = 5.9)
3. K. Rodaree, T. Maturos, S. Chaotheing, T. Pogfay, N. Suwanakitti, C. Wongsombat, K. Jaruwongrungsee, A. Wisitsoraat, S. Kamchonwongpaisan, T. Lomas, A. Tuantranont*, "DNA hybridization enhancement using piezoelectric microagitation through a liquid coupling medium, " Lab Chip, vol. 11, pp. 1059, 2011 (ISI IF 2009 = 6.30)
4. D. Phokharatkul, C. Karuwan, T. Lomas, D. Nacapricha, A. Wisitsoraat, A. Tuantranont, "AAO-CNTs electrode on microfluidic flow injection system for rapid iodide sensing," Talanta 84(5), pp. 1390-1395, June 2011. (ISI IF 2009 = 3.79)
5. A. Sappat, W. Jaroenram, T. Puthawibool, T. Lomas, A. Tuantranont, W. Kiatpathomchai, "Detection of shrimp Taura syndrome virus by loop-mediated isothermal amplification using a designed portable multi-channel turbidimeter," Journal of Virological Methods, Vol.175, Issue 2, Pages 141-148, August 2011. (ISI IF 2009 = 2.13)
6. W. Laiwattanapaisal, T. Songjaroen, T. Maturos, T. Lomas, A. Sappat and A. Tuantranont, "On-Chip Immunoassay for Determination of Urinary Albumin," Sensors, 9(12), pp. 10066-10079, 2009. (ISI IF 2009 = 1.903)
7. C. Karuwan, T. Maturos, D. Phokharatkul, A. Sappat, K. Jaruwongrungsee, T. Lomas, A. Wisitsoraat, A. Tuantranont, "Flow Injection based Microfluidic Device with Carbon Nanotube Electrode for Rapid Salbutamol Detection," Talanta, Vol. 79(4), pp. 995-1000, 2009. (ISI IF 2009 = 3.29)
8. T. Lomas, A. Wisitsorrat, F. Chevasuvit, A. Tuantranont, " A Precision Hot Embossing Mold Fabricated by High-resolution Powder Blasting with Polydimethylsiloxane and SU-8 Masking Technology," J. Micromechanics and Microengineering, vol. 19(3), 19 035002 (6pp), Mar. 2009. (ISI IF 2009 = 1.997)
9. Adisorn Tuantranont, T. Lomas, K. Jaruwongrungsee, A. Jompheuk, A. Wisitsoraat, "Symmetrical PolyMUMPs-based Piezoresistive Microcantilever Sensors with On-chip Temperature Compensation for Microfluidics Applications," IEEE Sensor Journal, Vol. 8, No. 5, pp. 543-547, May 2008.
10. A. Wisitsoraat, V. Patthanasetakul, T. Lomas, Adisorn Tuantranont, " Low cost thin film based piezoresistive MEMS tactile sensor," Sensors and Actuators A: Physical, vol. 139, pp. 17-22, 2007.
11. Adisorn Tuantranont, T. Lomas, T. Maturos, A. Wisitsoraat, P. Thavarungkul, P. Kanatharana, W. Limbut, S. Loyprasert, "Development of Low-cost Microfluidic Systems

for Lab-on-a-chip Biosensor Applications,” *NanoBiotechnology*, Vol. 2, No. 3-4, pp.143-149, 2006.

12. Adisorn Tuantranont, S. Rahong, A. Wisitsoraat, N. Prontheerapat and T. Lomas, “Glass Micromachining by Powder Blasting for Microfluidic Application,” *International Journal for Manufacturing Science and Technology*, Vol. 9, No.1, pp. 83-86, 2006.

13. A. Wisitsoraat, Adisorn Tuantranont, and T. Lomas, “Design and Simulation of Electro-fabricated MEMS Micro-hotplate for Gas Sensor Applications,” *Journal of Physics*, Vol., 34, pp.183-188, 2006.

บทความการประชุมวิชาการนานาชาติ (International Conference Papers)

14. Adisak Khaengsarigid, Tanom Lomas, and Fusak Cheevasuvit, “Embedded Cutting Force Estimator from Feed Current for CNC Milling Machine” *International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST 2012)*, November 21-24, Bangkok, Thailand

15. T. Lomas, S. Mongpraneet, A. Wisitsoraat, K. Jaruwongrangsee, A. Sappat, T. Mathuros, F. Chevasuvit, A. Tuantranont, “Low Cost Hot Embossing Process for Plastics Microfluidic Chips Fabrication,” *2009 6th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology (ECTI-CON 2009)*, pp. 458-461, 6-9 May 2009, Pattaya, Thailand.

16. T. Lomas, S. Mongpraneet, A. Wisitsorratt, F. Cheevasuvit, A. Tuantranont, “Precision Hot Embossing Mold Fabricated by High-Resolution Powder Blasting with Polydimethylsiloxane and SU-8 Masking Technology,” *The 1st International Conference on nanoManufacturing (nanoMan2008)*, pp. 318, Singapore, 13-16 July, 2008.

17. T. Lomas, S. Mongpraneet, A. Sappat, A. Wisitsorratt, F. Cheevasuvit, A. Tuantranont, “Fabrication of Patterned SU-8 Micromold Stamp for Low Cost Hot Embossing,” *Smart/intelligent materials and Nanotechnology (SmartMat 2008& IWOFM-2)*, pp. 107, Chaingmai Thailand, 22-25 April, 2008.

18. T. Lomas, S. Mongpraneet, A. Sappat, A. Wisitsorratt, F. Cheevasuvit, A. Tuantranont, “Low Cost Plastic based Microfluidic Chips Fabricated by Hot Embossing with SU-8 Micromold on Stainless Steel Substrate,” *The 4th Asia Pacific Conference on Transducers and Micro/Nano Technologies*, pp. 112, Taiwan, 22-25 June, 2008.

19. T. Mathuros, A. Wisitsoraat, T. Lomas, K. Jaruwongrangsee, A. Sappat, Adisorn Tuantranont, “Fabrication and Characterization of Traveling Wave Dielectrophoretic (twDEP) Microfluidic Devices,” *2nd IEEE International Nanoelectronics Conference (INEC2008)*, pp.163, Shanghai, China, 24-27 March 2008.