

การพัฒนาไมโครแอสซิมบลีแบบไลอะสมสำหรับกรับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์

นายกฤษณ์กร ประไพพิทยาคุณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

DEVELOPMENT OF SHAPE MEMORY ALLOY MICRO-ACTUATOR FOR HANDLING
HEAD GIMBAL ASSEMBLY

Mr.Krissakorn Prapaipittayakhun

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาไมโครแอสซิมิเลเตอร์แบบโลหะผสมจำรูปสำหรับ การจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์
โดย	นายกฤษณ์กร ประไพพิทยาคุณ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิณ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร.วีระยุทธ ศรีธรรวานิช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ มณีรัตน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิณ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร.วีระยุทธ ศรีธรรวานิช)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนัดดี รัตนสุมาวงศ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไชยณรงค์ จักรธรรานนท์)

กฤษฎณ์กร ประไพพิทยาคุณ : การพัฒนาไมโครแอกชูเอเตอร์แบบโลหะผสมจำรูป
สำหรับการจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์. (DEVELOPMENT OF SHAPE MEMORY
ALLOY MICRO-ACTUATOR FOR HANDLING HEAD GIMBAL ASSEMBLY)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ.ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิณ, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
: อ.ดร.วีระยุทธ ศรีสุวรรณานิช 96 หน้า.

การจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ด้วยหัวจับแบบสูญญากาศในการประกอบฮาร์ดดิสก์
กลายเป็นเรื่องที่กำลังมาขึ้นเมื่อแนวโน้มของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์มีขนาดเล็กลง ดังนั้นการพัฒนา
วิธีการใหม่เพื่อใช้จับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ในระหว่างการประกอบจึงมีความจำเป็นมากขึ้น ใน
งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการใช้ไมโครแอกชูเอเตอร์ในหลักการโลหะผสมจำรูปที่มีรูปร่างคล้าย
นิ้วมือมนุษย์มาจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ที่ตำแหน่งรูบอส ซึ่งโครงสร้างของแอกชูเอเตอร์เป็น
ลักษณะคานที่มีวัสดุสองชนิดประกบกันประกอบด้วยโลหะผสม NiTi และอลูมิเนียม ใน
การศึกษานี้จะระบุดอกในแนวตั้งและระบุดอกในแนวขวางของไมโครแอกชูเอเตอร์ขณะ
ทำงาน และแรงกระทำระหว่างไมโครแอกชูเอเตอร์และหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ได้ถูกวิเคราะห์ด้วย
โปรแกรม ANSYS ทำให้ทราบขนาดไมโครแอกชูเอเตอร์ที่เหมาะสมและขนาดของแรงกระทำ
ซึ่งพบว่าปริมาณทั้งสองมีค่ามากในระดับที่น่าจะเพียงพอสำหรับงานประกอบนี้ งานวิจัยนี้ได้
พัฒนาขั้นตอนการสร้าง โดยเริ่มจากการกัดผิวอลูมิเนียมพอลิที่มีขนาดหนา 16 ไมโครเมตร
เพื่อสร้างโครงสร้าง แล้วนำไปสร้างผิว NiTi ที่มีความหนา 5 ไมโครเมตรโดยวิธีสปีดเตอริง
ด้านบน จากนั้นนำชิ้นงานไปผ่านขั้นตอนการอบที่อุณหภูมิ 500°C นาน 30 นาที แต่พบว่า
เกิดออกไซด์ขึ้นบนผิวชิ้นงาน อย่างไรก็ตามได้นำไมโครแอกชูเอเตอร์ที่มีความยาว 1000
และ 2000 ไมโครเมตร กว้าง 500 ไมโครเมตรซึ่งไม่ได้ผ่านการอบที่อุณหภูมิสูงมาทดสอบการ
ตอบสนองและระบุดอก โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 1.25-2.50A เป็นเวลา 10 วินาที และ
วัดระบุดอกด้วยเลเซอร์ดิสเพลสเมนต์มิเตอร์ พบว่าหลังการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปเพียง 1
วินาที ไมโครแอกชูเอเตอร์ที่มีความยาว 1000 และ 2000 ไมโครเมตร ต่างก็มีระบุดอก
เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเมื่อเวลาผ่านไประบุดอกจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ หลังจากหยุดจ่าย
กระแสไฟฟ้าพบว่าระบุดอกก็ลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน โดยพบว่าที่กระแสไฟฟ้าเท่ากับ
2.50 A ไมโครแอกชูเอเตอร์ที่ยาว 1000 และ 2000 ไมโครเมตร มีระบุดอกเท่ากับ 410
และ 490 ไมโครเมตรตามลำดับ

ภาควิชา..... วิศวกรรมเครื่องกล..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา..... วิศวกรรมเครื่องกล..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา..... 2554..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5170211021 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : SHAPE MEMORY ALLOY / NiTi / MICRO-ACTUATOR / HEAD GIMBAL ASSEMBLY

KRISSAKORN PRAPAIPITTAYAKHUN : DEVELOPMENT OF SHAPE MEMORY ALLOY MICRO-ACTUATOR FOR HANDLING HEAD GIMBAL ASSEMBLY.
 ADVISOR : ALONGKORN PIMPIN, Ph.D., CO-ADVISOR : WERAYUT SRITURAVANICH, Ph.D., 96 pp.

Handling of Head Gimbal Assembly (HGA) with conventional vacuum chuck will be the key problem in the near future due to the tendency of miniaturization. As a result, a development of new handling system for hard disk drive industry becomes an urgent issue. This study proposes a methodology to design a shape memory alloy micro-actuator as a new handling device of HGA. The actuator consists of several finger-like Nitinol/Aluminum bimorph beams which are able to deflect at high temperature due to thermally induced strain mismatch between these two materials. To design geometry of the actuator, the effects of beam dimensions including lengths, widths and thicknesses on deflection and exerting force are examined using the ANSYS software. The simulation results suggest a feasibility of using the proposed micro-actuator for HGA handling application due to its relatively large deflection and force of the application. For fabrication process, a 16 μm Aluminum foil is patterned to form the actuator finger-like structure, and 5 μm NiTi is then deposited by sputtering. Finally, an annealing is performed at 500°C for 30 minutes. However, oxide was observed on the actuator surface after the annealing. Despite of that, response and deflection of two actuators, i.e. 1000 x 500 and 2000 x 500 μm^2 , without annealing at high temperature were tested by applying current of 1.25-2.50A. The results show that their responses are in the order of 1 second after both applying and releasing current. When applying the current of 2.50 A, the deflection is 410 and 490 μm for 1000 and 2000 μm long, respectively.

Department : ...Mechanical Engineering... Student's Signature

Field of Study : Mechanical Engineering... Advisor's Signature

Academic Year :2011..... Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

เหนือสิ่งอื่นใดต้องขอกราบขอบพระคุณ นายจักกฤษณ์ ประไพพิทยาคุณ และ นางทิชากร ประไพพิทยาคุณ บิดาและมารดาของผู้วิจัยที่ได้เลี้ยงดูและได้สนับสนุนในทุกๆ ด้านมา โดยตลอด จนทำให้ประสบความสำเร็จในวันนี้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วย的帮助เหลือจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ “อ.ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิณ” ซึ่งท่านได้เสียสละทั้งเวลางานและเวลาส่วนตัวให้ความรู้ คำแนะนำ และการแลกเปลี่ยนความคิดเห็น ทั้งด้านงานวิจัยและการดำเนินชีวิตที่เป็นประโยชน์ยิ่ง ขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ที่ได้ผลักดันผู้วิจัยให้มีความตั้งใจในการทำงานวิจัยฉบับนี้

ขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร.วีระยุทธ ศรีธรรวานิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ร่วม ที่ได้ให้แนวคิด แนวทาง ข้อมูล และคำแนะนำต่างๆ ในการแก้ปัญหา ทำให้วิทยานิพนธ์นี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และยังเป็นผู้ให้กำลังใจในขณะที่งานวิจัยมีอุปสรรค ขอกราบขอบพระคุณ ครับ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากศูนย์วิจัยร่วมเฉพาะทางด้านการผลิตขั้นสูงใน อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระ จอมเกล้าธนบุรี ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ และสำนักงานพัฒนา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

ขอขอบพระคุณ ดร.อดิสร เตือนตรานนท์ และดร.อนุรัตน์ วิศิษฎ์สรอรรถ และ นักวิจัยของหน่วยปฏิบัติการวิจัยนาโนอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค ศูนย์เทคโนโลยี อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ได้สนับสนุนและเอื้อเฟื้อเครื่องมือการทดลองต่างๆ ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ตลอดระยะเวลา 3 ปี 6 เดือนที่ผ่านมา ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องกลไฟฟ้า จุลภาคและนาโนเทคโนโลยีแห่งนี้ ผู้วิจัยได้พบกับความสุขมากมายและได้รับกำลังใจ คำแนะนำ จากเพื่อนๆ และน้องๆ ในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ นายกรกช เพชรดี นายปริญญาเอก ร่ม ไตรรัตน์ น้อง ภากร นนทิวฒน์วิช นื่องเขวอนพันธ์ เหล็กขำ นื่องสมพงษ์ เจริญบุญลยวิวัฒน์ นื่องเอกยุทธ ว่องวีระ ยุทธ์ และทุกคนที่ไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้ ที่ได้สร้างความสุข ความสำเร็จต่างๆ ร่วมกัน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ	ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฒ
บทที่ 1.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 แนวทางการแก้ปัญหาด้วยการใช้ไมโครแอกชูเอเตอร์	4
1.2.1 Conductive polymer	5
1.2.2 Piezoelectric single crystal (PZN-PT)	6
1.2.3 Electrostrictive polymer (PVDE-TrFE)	6
1.2.4 โลหะผสมจำรูป (Shape memory alloy)	7
1.3 หลักการโลหะผสมจำรูป.....	8
1.3.1 การปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการให้ความร้อน	11
1.4 โลหะผสมจำรูปและการพัฒนาในอดีต	11
1.4.1 ไมโครปั๊มและไมโครวาล์ว	13
1.4.2 ไมโครเซนเซอร์ ไมโครสวิตช์ และไมโครรีเลย์	13
1.4.3 อุปกรณ์หยิบจับขนาดเล็ก (micro-gripper)	13
1.4.4 แอกชูเอเตอร์ขนาดเล็ก (Mini actuator).....	14
1.5 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	14
1.6 ขอบเขตของงานวิจัย.....	15
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	15

1.8 ระเบียบขั้นตอนการวิจัย	15
บทที่ 2.....	16
2.1 การเลือกวัสดุ	18
2.2 รูปร่างของไมโครแอกซ์เวเตอร์.....	22
2.3 การคำนวณโดยระเบียบวิธีทางไฟไนต์อีลิเมนต์	23
2.3.1 การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการคำนวณ	24
2.3.2 การคำนวณหาขนาดของไมโครแอกซ์เวเตอร์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์อีลิเมนต์	26
2.3.3 ผลการศึกษาระยะกระดกในแนวดิ่งและแนวขวางของไมโครแอกซ์เวเตอร์	27
2.3.3 การคำนวณหาแรงกระทำระหว่างไมโครแอกซ์เวเตอร์กับ HGA	32
2.4 สรุปผลการศึกษา.....	36
บทที่ 3.....	38
3.1 กระบวนการผลิตในระดับไมโครสเกล	38
3.1.1 Photolithography	38
3.1.2 Sputtering	40
3.1.3 Etching	40
3.1.4 Lift-off.....	41
3.2 ขั้นตอนการสร้างแบบที่หนึ่ง	42
3.2.1 การสร้างชั้นผิวซิลิกอนไดออกไซด์บนแผ่นซิลิกอน.....	44
3.2.2 การกัดซิลิกอนไดออกไซด์	44
3.2.3 การสร้างผิวโพลีอิมิด และ NiTi	46
3.2.4 การกัดรูแบบผิว NiTi และโพลีอิมิด	47
3.2.5 Crystallization และการสร้างผิวโฟโตริซิส	47
3.2.6 การกัดผิวซิลิกอนไดออกไซด์.....	47
3.2.7 สรุปปัญหาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการสร้างแบบที่หนึ่ง	47
3.3 ขั้นตอนการสร้างแบบที่สอง	48
3.3.1 การสร้างผิวทองแดง.....	48
3.3.2 การกัดรูปร่างผิวทองแดง	50

3.3.3 การสร้างผิว DLC และ NiTi	50
3.3.4 การ Lift-off โฟโตริสตีต	55
3.3.5 การสร้างผิวทองแดง และ crystallization	56
3.3.6 การกัดทองแดง	57
3.3.7 สรุปปัญหาของการสร้างแบบที่สอง	57
3.4 ขั้นตอนการสร้างแบบที่สาม	58
3.4.1 การสร้างผิวทองแดง	58
3.4.2 การกัดรูแบบผิวทองแดง	58
3.4.3 การสร้างผิวโครเมียมและ NiTi	58
3.4.4 การ Lift-off โฟโตริสตีต	60
3.4.5 การสร้างผิวทองแดงและ Crystallization	61
3.4.6 การกัดทองแดง	61
3.4.7 สรุปปัญหาจากการสร้างแบบที่สาม	62
3.5 ขั้นตอนการสร้างแบบที่สี่	62
3.5.1 การเคลือบโฟโตริสตีตบนแผ่นซิลิกอน	64
3.5.2 การหุ้มแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์	64
3.5.3 การสร้างรูปร่างโฟโตริสตีต (Photolithography)	64
3.5.4 การสร้างรูปร่างอลูมิเนียมฟอยล์	64
3.5.5 การสร้างผิว NiTi บนอลูมิเนียมฟอยล์	64
3.5.6 การอบชิ้นงาน crystallization	66
3.6 สรุปผลการศึกษา	66
บทที่ 4	68
4.1 การทดสอบการตอบสนองของไมโครแอกชูเอเตอร์	68
4.2 สรุปผลการศึกษา	75
บทที่ 5	79
รายการอ้างอิง	83

ภาคผนวก ก	87
ภาคผนวก ข	90
ภาคผนวก ค	93
ภาคผนวก ง.....	94
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	96

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของโพลีอิมิดชนิดต่างๆ	21
2.2 คุณสมบัติของ DLC อลูมินัม และโครเมียม	22
2.3 พารามิเตอร์ของไมโครแฮคซ์เวเตอร์ระหว่าง NiTi และโพลีอิมิด	24
2.4 พารามิเตอร์ของไมโครแฮคซ์เวเตอร์ NiTi และ DLC	24
2.5 ค่าเริ่มต้นของการศึกษาระยะกระดกในแนวตั้งและระยะกระดกในแนวขวาง	26
2.6 ค่าเริ่มต้นของการศึกษาแรงกระทำระหว่างไมโครแฮคซ์เวเตอร์และ HGA	33
2.7 ผลการคำนวณแรงกระทำระหว่างไมโครแฮคซ์เวเตอร์กับ HGA.....	35
3.1 ขั้นตอนการสร้างผิว DIAMOND-LIKE-CARBON (DLC)	54
3.2 ขั้นตอนการสร้างผิวโครเมียม.....	60
ก.1 โปรแกรมที่กำหนดบนเครื่องสปินเนอร์	87
ง.1 คุณสมบัติของวัสดุที่กำหนดในโปรแกรม ANSYS.....	94
ง.2 ค่าขอบเขตเริ่มต้นที่กำหนดในโปรแกรม ANSYS	94

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์	1
1.2 ขั้นตอนการประกอบ Head Stack Assembly (HSA)	2
1.3 ส่วนประกอบของ HGA และการประกอบ	3
1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแอคชูเอเตอร์ชนิดต่างๆ [8]	5
1.5 การทำงานของ Conductive polymer เมื่อมีประจุแพร่เข้าหรือออกจากวัสดุ [3]	6
1.6 การทำงานของไมโครแอคชูเอเตอร์แบบ electrostrictive polymer	7
1.7 ไดอะแกรมแสดงบริเวณที่วัสดุแสดงคุณสมบัติ shape memory effect และ	10
1.8 โครงสร้างผลึกของวัสดุ NiTi เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ [12]	10
1.9 ความเค้นที่มีผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ NiTi (1:1) บนแผ่นซิลิกอน [13]	11
1.10 เฟสไดอะแกรมของวัสดุ NiTi สำหรับอัตราส่วนของนิเกิลต่างๆ [14]	12
2.1 ลักษณะของการหีบจับ HGA ที่ตำแหน่งรูบอสด้วยไมโครแอคชูเอเตอร์	16
2.2 ลักษณะวงจรของแอคชูเอเตอร์ที่มีลักษณะเป็นขดลวดให้กระแสไฟฟ้าไหลทางเดียว	17
2.3 การปรับเปลี่ยนขั้นตอนการสร้างเพื่อให้เกิดลักษณะการทำงานที่ต่างกัน	19
2.4 อัตราส่วนผสมของนิเกิลที่มีผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส (Martensite start) [31]	20
2.5 โครงสร้าง 3 มิติของไมโครแอคชูเอเตอร์ในการศึกษานี้	23
2.6 ไดอะแกรม 3 มิติที่แสดงรูปร่างเริ่มต้นของไมโครแอคชูเอเตอร์	26
2.7 การกำหนด mesh ในโปรแกรมคำนวณโดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์	27
2.8 ความสัมพันธ์ของความยาว (L) ความกว้าง (W) และความหนาของโพลีอิมิดที่มีผลต่อ	29
2.9 ความสัมพันธ์ของความยาว (L) ความกว้าง (W) และความหนาของโพลีอิมิดที่มีผลต่อ	29
2.10 การเปรียบเทียบความโค้งของไมโครแอคชูเอเตอร์สำหรับโพลีอิมิดและ NiTi	30
2.11 ความสัมพันธ์ของความยาว (L) ความกว้าง (W) และความหนาของ NiTi ที่มีผลต่อ	31
2.12 ความสัมพันธ์ของความยาว (L) ความกว้าง (W) และความหนาของ NiTi ที่มีผลต่อ	32
2.13 การคำนวณเพื่อหาแรงกระทำระหว่างไมโครแอคชูเอเตอร์กับ HGA	34
3.1 Mask ที่วาดขึ้นเพื่อใช้ในกระบวนการ photolithography	39
3.2 ลักษณะภายในเครื่อง sputtering และหลักการทำงาน	40
3.3 ขั้นตอนตามกระบวนการ etching	41
3.4 ขั้นตอนกระบวนการ lift-off	42

ภาพที่	หน้า
3.5 ขั้นตอนการผลิตไมโครแอดซิวเอเตอร์แบบที่หนึ่ง.....	43
3.6 Mask ที่วาดขึ้นเพื่อสร้างรูปร่างของ SU-8	45
3.7 ชิ้นงานหลังการกัดชั้นผิวซิลิกอนไดออกไซด์.....	46
3.8 ขั้นตอนการสร้างแบบที่สอง.....	49
3.9 Mask ที่วาดขึ้นเพื่อใช้ในการสร้างรูปร่างของโฟโตริสซิส AZ4620	51
3.10 ชิ้นงานหลังจากการกัดทองแดงเพื่อเป็นฐานของแอดซิวเอเตอร์	51
3.11 Mask เพื่อใช้ในการสร้างรูปร่างโฟโตริสซิสสำหรับการ lift-off.....	52
3.12 โฟโตริสซิสเพื่อใช้ในการ lift-off.....	52
3.13 ชิ้นงานหลังจากการสร้างผิวDLCหนา 1 ไมโครเมตร และNiTi หนา 3 ไมโครเมตร	53
3.14 การเปรียบเทียบลักษณะของชิ้นงานระหว่างแกรไฟต์และ DLC	54
3.15 ชิ้นงานหลังการ lift-off โฟโตริสซิสออกด้วยอะซิโตนและเครื่องดูดตัวาโซนิค	55
3.16 เตาอบสำหรับการ crystallization	56
3.17 ชิ้นงานที่มีออกไซด์จากกระบวนการ crystallization	57
3.18 ขั้นตอนการสร้างแบบที่สาม	59
3.19 ชิ้นงานหลังการ lift-off โฟโตริสซิส	60
3.20 ปัญหาการขาดของชิ้นงานบริเวณรอยต่อของฐานไมโครแอดซิวเอเตอร์	61
3.21 การกัดในลักษณะ 2 ทิศทางของบริเวณรอยต่อทำให้โครงสร้างหัก [30]	62
3.22 ขั้นตอนการสร้างแบบที่สี่	63
3.23 ชิ้นงานหลังจากขั้นตอนการสร้างรูปร่างอลูมิเนียม	65
3.24 ชิ้นงานหลังการสัปดาห์เตอริง NiTi บนโครงสร้างอลูมิเนียม.....	65
4.1 อุปกรณ์การทดลองวัดสมรรถนะไมโครแอดซิวเอเตอร์	69
4.2 ภาพถ่ายการกระดกของไมโครแอดซิวเอเตอร์ขนาด 2000x500 μm^2 เมื่อป้อน.....	72
4.3 ผลการทดลองการตอบสนองของไมโครแอดซิวเอเตอร์ที่มีความยาว 1000 ไมโครเมตร	73
4.4 ผลการทดลองการตอบสนองของไมโครแอดซิวเอเตอร์ที่มีความยาว 2000 ไมโครเมตร	74
4.5 การเปรียบเทียบระยะกระดกของไมโครแอดซิวเอเตอร์ขนาด 1000 และ 2000.....	74
4.6 ระยะกระดก 0-2 วินาทีแรกของไมโครแอดซิวเอเตอร์ที่มีความยาว 1000 ไมโครเมตร	75
4.7 ระยะกระดก 0-2 วินาทีแรกของไมโครแอดซิวเอเตอร์ที่มีความยาว 2000 ไมโครเมตร	75
4.8 การทดสอบไมโครแอดซิวเอเตอร์โดยการยกวัตถุที่มีน้ำหนักต่างๆ กัน	77
4.9 ผลการทดลองการตอบสนองของไมโครแอดซิวเอเตอร์ที่มีความยาว 1500 ไมโครเมตร	78

ภาพที่	หน้า
ก.1 เครื่องสปินเนอร์.....	88
ก.2 เตาทอบชิ้นงาน.....	89
ก.3 ตู้ฉายรังสีอุลตราไวโอเลต.....	89
ข.1 เครื่องสปีดเตอริง.....	90
ข.2 แทนวางชิ้นงานในเครื่องสปีดเตอริง.....	91
ข.3 ตำแหน่งวาง target.....	91
ค.1 Chemical vapor deposition (CVD) (Wikipedia).....	93
ง.1 เปรียบเทียบระยะเวลากระดกของแอดซิวเอเตอร์ที่ผ่านและไม่ผ่าน crystallization.....	95

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

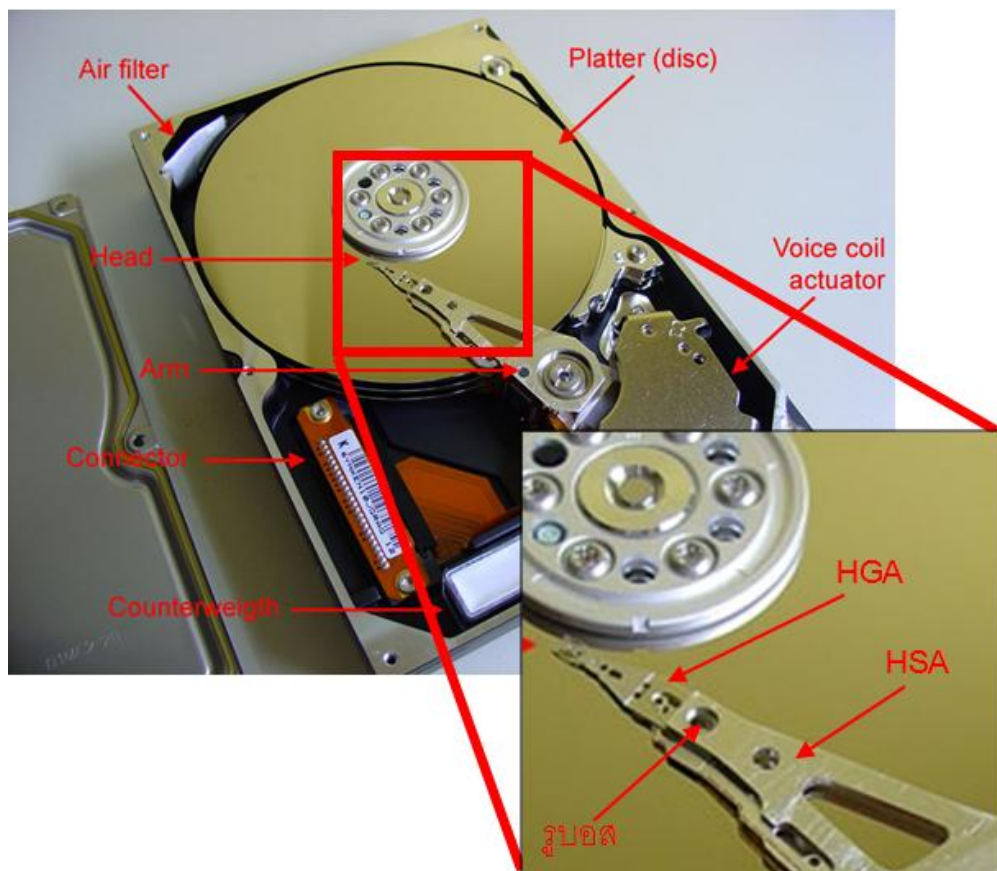
A_f	อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสออสเทนไนต์เสร็จสิ้น
A_s	อุณหภูมิเริ่มการเปลี่ยนเฟสเป็นออสเทนไนต์
M_f	อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสมาร์เทนไซต์เสร็จสิ้น
M_s	อุณหภูมิเริ่มการเปลี่ยนเฟสเป็นมาร์เทนไซต์
L	ความยาวของไมโครแอกซ์เวเตอร์
W	ความกว้างของไมโครแอกซ์เวเตอร์
t	ความหนาของไมโครแอกซ์เวเตอร์
E	โมดูลัสความยืดหยุ่น
อักษรกรีก	
ϵ	ความเครียด
α	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อน
σ	ความเค้น
อักษรย่อ	
SME	Shape Memory Effect
HGA	Head Gimbal Assembly
HSA	Head Stack Assembly
ESD	Electrostatic discharge
DLC	Diamond-Like-Carbon
NiTi	Nitinol

บทที่ 1

บทนำ

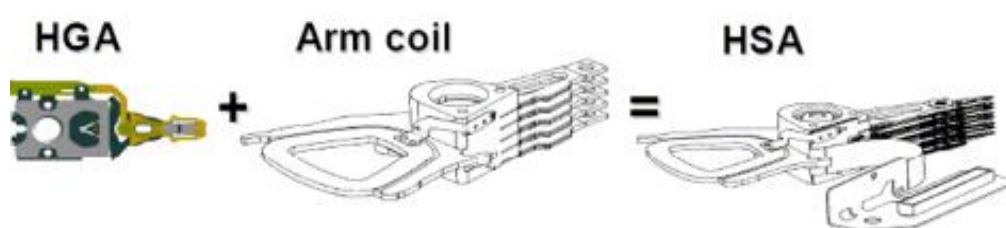
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ฮาร์ดดิสก์คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บรักษาข้อมูลซึ่งเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์โดยผ่านเมนบอร์ด ทำให้สามารถบันทึกข้อมูลต่างๆได้ทั้ง รูปภาพ เอกสาร เพลง และวิดีโอต่างๆ [1] ฮาร์ดดิสก์จะมีส่วนประกอบที่สำคัญในการอ่านและเขียนข้อมูลคือ หัวอ่าน/เขียนแม่เหล็กและแผ่นจานแม่เหล็กซึ่งหัวอ่าน/เขียนนี้จะเคลื่อนที่ไปมาบนแผ่นจานแม่เหล็กที่ใช้เก็บข้อมูลที่มีจำนวนแผ่นและขนาดที่หลากหลาย เช่น 2.5 หรือ 5.12 นิ้ว โดยที่จำนวนหัวอ่านเขียนแม่เหล็กนั้นจะขึ้นอยู่กับจำนวนของแผ่นจานแม่เหล็ก หัวอ่านเขียนจะถูกติดตั้งอยู่ที่ปลายของส่วนประกอบที่เรียกว่า Head Gimbal Assembly หรือ HGA ที่มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา มีขนาดแตกต่างกันไปสำหรับฮาร์ดดิสก์จากผู้ผลิตต่างๆ ซึ่งจะมีขนาดประมาณ 3 x 10 มม. และมีความหนาประมาณ 100 ไมโครเมตร ดังภาพที่ 1.1



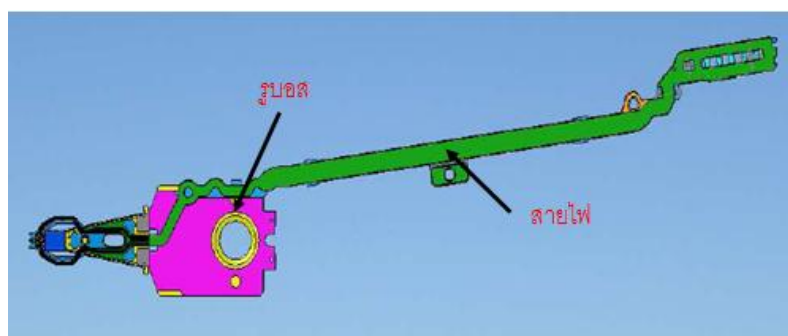
ภาพที่ 1.1 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ในการประกอบชิ้นงาน จะนำ HGA มาประกอบเป็น Head stack assembly หรือ HSA เพื่อเป็นแขนในการเคลื่อนที่หัวอ่านเขียนไปมาบนแผ่นแม่เหล็กของฮาร์ดดิสก์ โดยจะมีการจับยึด HGA เข้าประกอบกับ arm coil และจะถูกยึดให้ติดกันด้วยการยิงลูกบอล (swaging ball) ผ่านรูบอลหรือ เรียกว่า boss hole [2] ส่วนประกอบของ HSA และลักษณะการประกอบแสดงไว้ดังภาพที่ 1.2 ในการประกอบดังกล่าวหัวจับสัญญาณภาคจะหยิบจับ HGA ที่บริเวณโครงสร้างสี่เหลี่ยมขนาดใหญ่และบริเวณสายไฟฟ้าซึ่งแสดงบริเวณการจับและลักษณะชิ้นงานดังภาพที่ 1.3(ก) และ (ข)

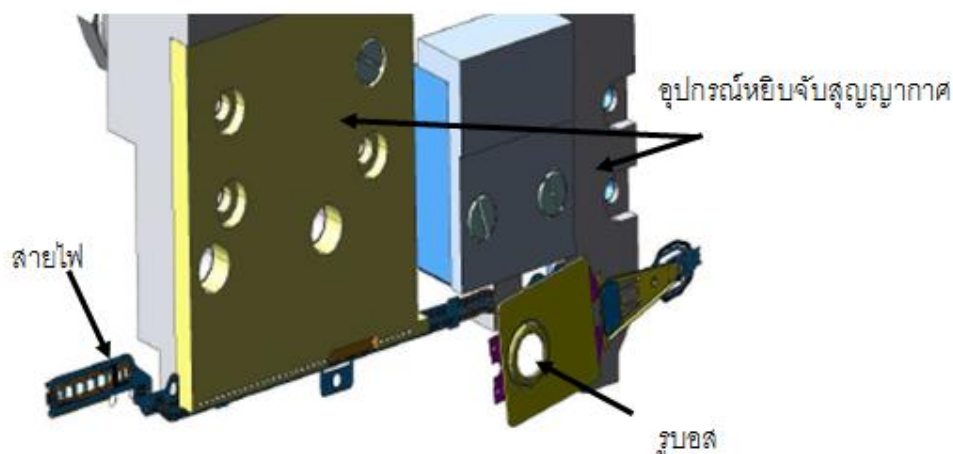


ภาพที่ 1.2 ขั้นตอนการประกอบ Head Stack Assembly (HSA)

อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันแนวโน้มของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้ชิ้นส่วนประกอบต่าง ๆ ภายในตัวฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นั้นรวมถึงหัวอ่านเขียนและ HGA ก็มีขนาดเล็กลงด้วย ดังนั้นการจับยึดด้วยหัวจับสัญญาณภาคนี้อาจเกิดปัญหาขึ้นจากการจับยึดไม่ติดเมื่อหัวจับสัญญาณภาคไม่อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม รวมไปถึงปัญหาการสูญเสียความดันในระบบ และการใช้ระบบสัญญาณภาคนี้เพื่อหยิบจับชิ้นงานยังใช้เวลาในการดูหรือปล่อยชิ้นงานค่อนข้างนาน นอกจากนั้นเมื่อชิ้นงานมีขนาดเล็กอาจจะทำให้เกิดปัญหาของการเยื้องศูนย์ระหว่างชิ้นส่วนต่างๆ ได้มากขึ้น ดังนั้นหากมีแนวทางใหม่ที่น่ามาทดแทนการใช้หัวจับสัญญาณภาคได้ก็จะช่วยแก้ปัญหาในการผลิตดังกล่าวได้



(ก)



(ข)

ภาพที่ 1.3 ส่วนประกอบของ HGA และการประกอบ

(ก) Head Gimbal Assembly (HGA)

(ข) อุปกรณ์หยิบจับแบบหัวจับสัญญาณภาคและลักษณะการจับ HGA [Seagate]

งานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะพัฒนาและค้นคว้าวิจัยหาอุปกรณ์ชนิดใหม่เพื่อใช้ในการจับยึดชิ้นงานเข้าประกอบกันให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งในขณะที่มีขนาดของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีแนวโน้มจะเล็กลงไปอีกในอนาคต

ข้อค้างของการออกแบบอุปกรณ์จับชิ้นงานนี้มีอยู่หลายส่วน เช่น มวลของ HGA ตำแหน่งและขนาดของบริเวณที่จะใช้จับชิ้นงาน ความแข็งแรงของชิ้นงาน ข้อจำกัดเรื่องความร้อน การนำไฟฟ้า รวมถึงปัญหาเรื่องความสกปรก ในรายงานส่วนนี้จะอธิบายรายละเอียดโดยสังเขปดังนี้ มวลของ HGA รวมถึงสายไฟมีค่าประมาณ 40-60 มิลลิกรัม ทำให้มีความจำเป็นต้องออกแบบอุปกรณ์จับยึดให้สามารถออกแรงได้เพียงพอเพื่อที่จะยก HGA เข้าประกอบกับ arm coil ได้ สำหรับตำแหน่งการจับชิ้นงานอาจจะเป็นตำแหน่งของรูบอสซึ่งมีขนาดค่อนข้างใหญ่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.3 มิลลิเมตร และอยู่บริเวณตรงกลางชิ้นงาน นอกจากนี้ในขณะที่อุปกรณ์จับยึดทำงานจะเกิดการสัมผัสกันระหว่างอุปกรณ์หยิบจับและชิ้นงาน HGA ซึ่งอุปกรณ์หยิบจับจะต้องไม่มีความร้อนที่สูงเกินไป เนื่องจากความร้อนที่สูงเกินไปอาจจะก่อให้เกิดออกไซด์ต่างๆ ซึ่งทำให้คุณสมบัติของวัสดุเปลี่ยนไปได้ อีกทั้งต้องไม่ก่อให้เกิดฝุ่นละออง หรือไฟฟ้าสถิต (ESD) มิเช่นนั้นอาจจะเกิดผลเสียต่อชิ้นงานขณะประกอบ HGA และอาจส่งผลเสียต่ออุปกรณ์ต่างๆใน

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ได้ เนื่องจากในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นั้นจำเป็นต้องควบคุมความ
สะอาดและต้องป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิตตลอดเวลา

1.2 แนวทางการแก้ปัญหาด้วยการใช้ไมโครแอกซ์เวเตอร์

ในงานวิจัยนี้ มีแนวคิดในการนำไมโครแอกซ์เวเตอร์มาใช้งาน ไมโครแอกซ์เวเตอร์น่าจะ
ทดแทนการจับยึดแบบระบบสูญญากาศแบบเดิมได้ เนื่องจากสามารถผลิตให้มีขนาดเล็ก
ใกล้เคียงกับขนาดของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ ขนาดของแรงที่กระทำไม่สูงนักทำให้หลีกเลี่ยงความ
เสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นงานได้ ใช้พลังงานน้อย รวมทั้งสามารถผลิตได้ที่ละหลายๆ ชิ้นทำให้
ราคาในการผลิตต่อชิ้นต่ำลง

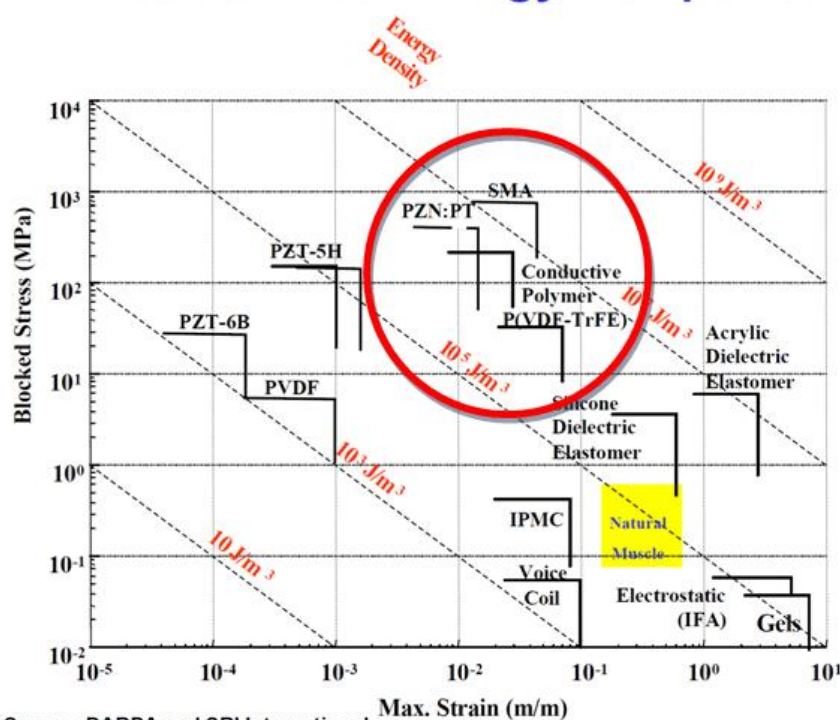
ในเบื้องต้นของการศึกษานี้จะศึกษาวัสดุและหลักการที่นำมาสร้างแอกซ์เวเตอร์ให้
เหมาะสมกับงานประกอบ HGA โดยไมโครแอกซ์เวเตอร์จะถูกออกแบบให้มีการจับยึด HGA
ด้วยการสอดเข้าไปในรูบอสของ HGA เนื่องจากบริเวณนี้จะมีความแข็งแรงสูง จากนั้นไมโคร
แอกซ์เวเตอร์จะกางออกเพื่อออกแรงกระทำกับผนังด้านในของรูบอสและจับยึด HGA ไว้และ
เคลื่อนย้าย HGA ไปยังตำแหน่งที่ต้องการประกอบ เมื่อประกอบกับชิ้นส่วนอื่นเสร็จแล้วแอกซ์เว
เตอร์จะคลายตัวออกจากชิ้นงาน HGA และเคลื่อนที่ไปจับชิ้นงาน HGA ชิ้นใหม่ต่อไป ในการ
ทำงานดังกล่าวไมโครแอกซ์เวเตอร์จะถูกติดตั้งอยู่บนแขนกลซึ่งมีการเคลื่อนที่กลับไปมาบน
เครื่องจักรอย่างรวดเร็ว ดังนั้นไมโครแอกซ์เวเตอร์จะขยับเพียงเพื่อใช้จับยึดหรือคลายตัวออกจาก
HGA ทำให้ความเร็วในการทำงานของไมโครแอกซ์เวเตอร์ไม่จำเป็นต้องสูงมากนัก

ในงานประกอบ HGA ในลักษณะดังกล่าว ไมโครแอกซ์เวเตอร์ต้องรับความเค้นที่ค่อนข้าง
สูงเพื่อให้เกิดแรงขณะจับยึด HGA ได้ดี อีกทั้งในงานประกอบยังอาจจะมีการชนกับตัวหยุดหรือที่
เรียกว่า stopper ทำให้เกิดการกระแทกส่งผลให้ HGA หลุดจากอุปกรณ์หนีบจับและเสียหายได้
นอกจากนั้นยังต้องรับความเครียดสูงเพื่อจะสามารถเปลี่ยนรูปร่างได้มาก จึงจะสามารถสอดผ่านรู
บอสซึ่งมีขนาดเล็กได้

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของหลักการแอกซ์เวเตอร์
ต่างๆ ดังภาพที่ 1.4 ของ DARPA และ SRI international ความเค้นในกราฟสามารถบ่งบอกได้ถึง
ความสามารถในการออกแรงของไมโครแอกซ์เวเตอร์ในขณะที่ความเครียดจะบ่งบอกได้ถึงระยะ
การเคลื่อนที่ ยิ่งความเค้นและความเครียดมีค่ามาก ไมโครแอกซ์เวเตอร์นั้นจะสามารถออกแรง
ได้ดีและมีระยะการเคลื่อนที่ (การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง) มาก จากกราฟแสดงให้เห็นว่ามีกลุ่มของ

แอคชูเอเตอร์ที่มีความเค้นและความเครียดสูง 4 ชนิด คือ Conductive polymer, PZn-PT, Electrostrictive polymer (p(VDE-TrFE)) และ โลหะผสมจำรูป หรือ shape memory alloy ซึ่งแอคชูเอเตอร์แต่ละแบบมีคุณสมบัติ หลักการของการทำงานและวิธีการสร้างที่แตกต่างกันไป โดยการเลือกหลักการทำงานของไมโครแอคชูเอเตอร์ที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานประกอบ HGA นั้นจะต้องคำนึงถึงข้อจำกัดของการประกอบ HGA ดังที่กล่าวไว้แล้วด้วย หลักการของไมโครแอคชูเอเตอร์ที่น่าสนใจมีรายละเอียดโดยสังเขปดังต่อไปนี้

Actuator Technology Comparisons

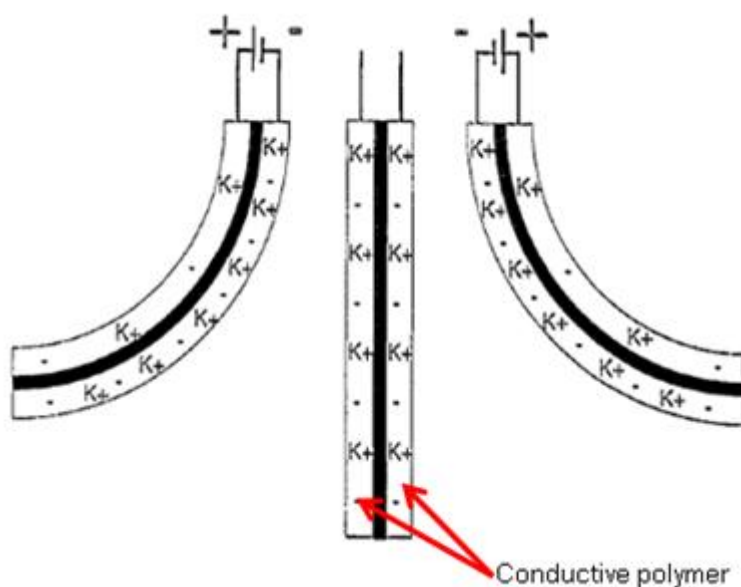


ภาพที่ 1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแอคชูเอเตอร์ชนิดต่างๆ [8]

1.2.1 Conductive polymer

ไมโครแอคชูเอเตอร์แบบ Conductive polymer จะเปลี่ยนรูปร่างเนื่องมาจาก electrochemical doping เมื่อมีประจุไหลเข้าหรือออกจากโพลิเมอร์ ซึ่งโพลิเมอร์ที่แสดงปรากฏการณ์ดังกล่าวได้แก่ Polypyrroles หรือ Polyanilines เมื่อป้อนความต่างศักย์ไฟฟ้าโพลิเมอร์จะเกิดการขยายตัวและหดตัวขึ้น ปรากฏการณ์นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์หยิบจับได้เช่นกันดังภาพที่ 1.5 หากออกแบบให้มีแถบอิเล็กโทรไลต์กั้นระหว่างโพลิเมอร์ทั้ง 2 ชั้น เมื่อมีการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเข้าไปจะเกิดการเคลื่อนที่ของประจุจากโพลิเมอร์ฝั่งหนึ่งไปยังอีกฝั่ง

หนึ่งทำให้เกิดการงอขึ้น [3] แต่การใช้แอคซิวเอเตอร์ชนิด conductive polymer นี้ยังไม่เหมาะสมนักที่จะนำมาใช้ในงานประกอบ HGA เนื่องจากความเร็วในการทำงานช้าและหากพบว่าเมื่อต้องการความถี่ของการทำงานสูงแอคซิวเอเตอร์ชนิด Conductive polymer มีความจำเป็นต้องใช้อิเลคโตรไลต์ที่เป็นของเหลวเพื่อเพิ่มอัตราการแพร่ (rate of diffusion) [4] ซึ่งไม่สามารถนำมาใช้ในงานประกอบนี้



ภาพที่ 1.5 การทำงานของ Conductive polymer เมื่อมีประจุแพร่เข้าหรือออกจากวัสดุ [3]

1.2.2 Piezoelectric single crystal (PZN-PT)

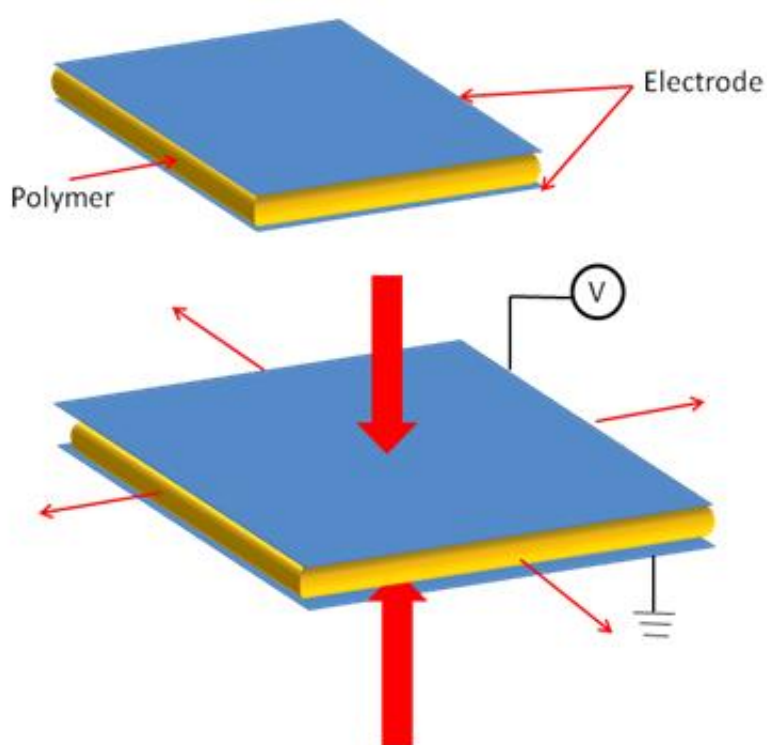
ไมโครแอคซิวเอเตอร์แบบนี้มีลักษณะการทำงานที่เหมือนกับ Piezoelectric ทั่วไปแต่การสังเคราะห์ผลึก (growth crystal) ของ PZN-PT นั้นทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากต้องใช้เตาหลอมที่มีความดันและอุณหภูมิสูงในบริเวณที่ปิดมิดชิด ผลึกที่ได้จะมีขนาดเล็กประมาณ 3-20 มิลลิเมตรเท่านั้นและใช้เวลาในการสังเคราะห์ค่อนข้างนาน รวมไปถึงค่าใช้จ่ายในการสร้างที่สูงอีกด้วย [5]

1.2.3 Electrostrictive polymer (PVDE-TrFE)

Electrostrictive polymer เป็นแอคซิวเอเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้า แอคซิวเอเตอร์ชนิดนี้เป็นที่นิยมนำไปใช้ในงานต่างๆ เช่น กล้ามเนื้อเทียม อวัยวะเทียม วัสดุสำหรับการควบคุมการสั่นสะเทือนหรือเสียง เป็นต้น [6] ไมโครแอคซิวเอเตอร์ชนิดนี้มีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับ Piezoceramics และ magnetostrictive เนื่องจากมีน้ำหนักเบา มีขั้นตอนการ

สร้างที่ง่ายและมีราคาถูก มีความเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในงานหยิบจับอุปกรณ์ เช่นเดียวกัน

หลักการทำงานของไมโครแอกชูเอเตอร์ชนิดนี้คล้ายกับหลักการไฟฟ้าสถิต (Electrostatic) โดยโพลิเมอร์ที่อยู่ระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดจะถูกบีบด้วยแรงจากไฟฟ้าสถิตและขยายออกในแนวระนาบ [7] ซึ่งแสดงไว้ดังภาพที่ 1.6 ดังนั้นความต่างศักย์ไฟฟ้าของไมโครแอกชูเอเตอร์ชนิดนี้จะสูงมาก โดยจะมีค่าประมาณ 1-2 kV/cm ซึ่งอาจก่อให้เกิดการเหนี่ยวนำ ESD (Electrostatic discharge) ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องหลีกเลี่ยงในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ดังที่กล่าวไว้ในเบื้องต้น



ภาพที่ 1.6 การทำงานของไมโครแอกชูเอเตอร์แบบ electrostrictive polymer

1.2.4 โลหะผสมจำรูป (Shape memory alloy)

โลหะผสมจำรูปมีคุณสมบัติในการออกแรงได้สูงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนัก มีความสามารถในการจดจำรูปร่าง โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงเฟสของวัสดุที่เป็นมาเทนไซต์ที่อุณหภูมิห้องไปสู่ข้อ

สเทนไนต์เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น [9] โดยอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสนี้ เรียกว่า transformation temperature ซึ่งจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาใช้เป็นโลหะผสมจำรูป โลหะผสมจำรูปมีลักษณะการทำงานที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนของวัสดุทำให้มีความถี่การทำงานที่ค่อนข้างช้ากว่าไมโครแอกซ์เวเตอร์ชนิดอื่นๆ [10] แต่ในงานประกอบ HGA เป็นงานประกอบที่มีขนาดเล็ก ดังนั้นไมโครแอกซ์เวเตอร์จะมีขนาดเล็กตามไปด้วยส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งความต่างศักย์ทำงานยังอยู่ในระดับต่ำประมาณ 1-3 V ทำให้สามารถใช้ได้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ดังนั้นโลหะผสมจำรูปจึงเหมาะสมที่จะนำมาสร้างเพื่อใช้ในงานประกอบ HGA ได้

ในปัจจุบันแอกซ์เวเตอร์แบบโลหะผสมจำรูปเป็นที่รู้จักแพร่หลายมากขึ้นเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพสูงและเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานทางด้านเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS) ถึงแม้ว่าโลหะผสมจำรูปจะมีข้อดีหลากหลายทั้งความสามารถในการออกแรง มีระยะการเคลื่อนที่ที่สูงและมีความต่างศักย์ไฟฟ้าในการทำงานที่ต่ำ โลหะผสมจำรูปก็ยังมีข้อเสียอยู่เช่นเดียวกัน เช่น ความถี่การทำงานที่ต่ำ และปัญหาจากความล้า (fatigue) ของวัสดุ แต่โลหะผสมจำรูปก็ยังเป็นเทคโนโลยีที่ถูกประยุกต์ใช้ในงานทางด้านเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค เนื่องด้วยข้อดีของโลหะผสมจำรูปดังที่ได้กล่าวไปแล้ว เมื่อเปรียบเทียบกับข้อดีข้อเสียของแอกซ์เวเตอร์แต่ละหลักการแล้ว งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะนำโลหะผสมจำรูปมาใช้ในการสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์สำหรับประกอบ HGA โดยในส่วนถัดไปจะอธิบายเกี่ยวกับวัสดุที่เป็นโลหะผสมจำรูปโดยละเอียด

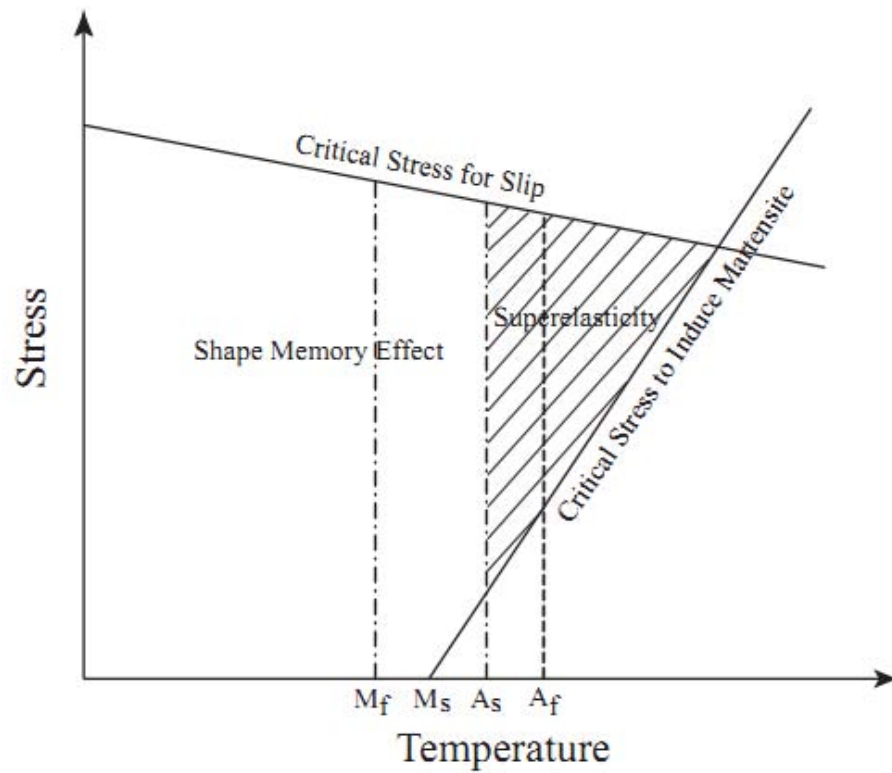
1.3 หลักการโลหะผสมจำรูป

โลหะผสมจำรูปคือวัสดุที่สามารถจดจำรูปร่างได้ซึ่งมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน เช่น วัสดุ Nitinol (NiTi) วัสดุ Cu-based alloy หรือ วัสดุ Fe-based alloy โดยโลหะผสมจำรูปจะสามารถบิดงอได้เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำที่อุณหภูมิห้องหรือในขณะที่มีเฟสของวัสดุเป็นมาเทนไซต์ เมื่อวัสดุได้รับความร้อนจะสามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้หรือกลับไปเป็นสภาวะก่อนที่จะมีแรงมากระทำ และแอกซ์เวเตอร์ประเภทนี้จะให้แรงขณะเปลี่ยนเฟสค่อนข้างสูง โดยแอกซ์เวเตอร์มีลักษณะการทำงานอยู่ 3 เฟส คือมาเทนไซต์, Stress induced martensite (หรือ superelastic) และออสเทนไนต์ เมื่อวัสดุมีเฟสเป็นมาเทนไซต์ วัสดุมีลักษณะอ่อนนุ่มและเหนียว สามารถดัดให้อยู่ในรูปร่างต่างๆได้ง่าย ในขณะที่เป็น superelastic วัสดุจะมีความยืดหยุ่นสูงคล้ายยาง และเมื่อมีเฟสเป็นออสเทนไนต์จะมีความแข็งแรงและมีความแข็งเทียบเท่าไททาเนียม

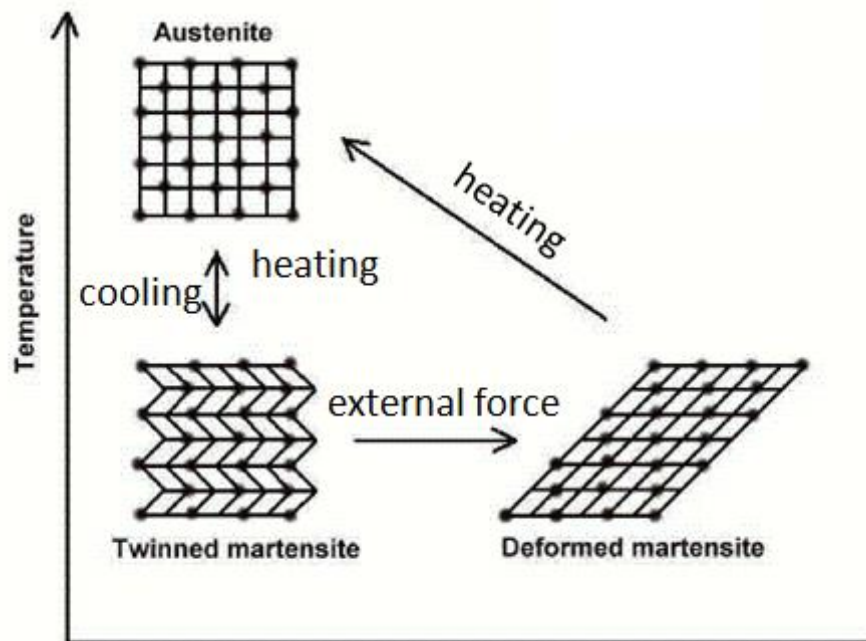
ภาพที่ 1.7 แสดงบริเวณที่วัสดุแสดงคุณสมบัติ shape memory effect และ superelastic เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า M_f เฟสของวัสดุจะเป็นมาเทนไซต์และเมื่อวัสดุได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิ A_s วัสดุจะเริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นออสเทนไนต์และเมื่อลดอุณหภูมิลงจนถึงอุณหภูมิ M_s อีกครั้งวัสดุจะเริ่มเปลี่ยนเฟสกลับมาเป็นมาเทนไซต์อีกครั้ง บริเวณที่วัสดุแสดงคุณสมบัติ shape memory effect นั้นจะต้องอยู่ในอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิ A_s และแรงภายนอกที่มากจะทำจะต้องไม่มากเกินไปกว่าความเค้นวิกฤติ (critical stress for slip) เนื่องจากจะทำให้วัสดุเสียรูปและไม่สามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้ สำหรับวัสดุโลหะผสมที่อยู่ในอุณหภูมิที่สูงกว่า A_s จะแสดงคุณสมบัติ superelastic กล่าวคือเมื่อมีแรงภายนอกที่ไม่เกินค่าความเค้นวิกฤติมากจะทำกับวัสดุ โลหะผสมที่มีคุณสมบัติ superelastic นั้นจะกลับคืนสู่รูปร่างเองโดยอัตโนมัติไม่ต้องอาศัยการเพิ่มอุณหภูมิเพื่อให้เกิดกลับคืนสู่รูปร่างเดิม ซึ่งจะแตกต่างกับคุณสมบัติ shape memory effect ที่ต้องอาศัยการเพิ่มอุณหภูมิจึงจะกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้

สำหรับโครงสร้างของวัสดุระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดังกล่าวอธิบายได้ดังนี้ วัสดุมีโครงสร้างผลึกดังภาพที่ 1.8 โดยที่เฟสวัสดุเป็นมาเทนไซต์จะมีโครงสร้างผลึกเป็น twinned martensite เมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกจนวัสดุเสียรูปจะทำให้โครงสร้างผลึกเป็น deformed martensite จากนั้นเมื่อวัสดุได้รับความร้อนจะเริ่มเปลี่ยนเฟสจากมาเทนไซต์เป็นออสเทนไนต์ซึ่งโครงสร้างผลึกจะเปลี่ยนแปลงเป็นออสเทนไนต์ซึ่งทำให้วัสดุกลับคืนสู่รูปร่างเหมือนก่อนที่จะได้รับแรงกระทำจากภายนอก และเมื่อลดความร้อนของวัสดุลงโครงสร้างผลึกจะกลับมาเป็น twinned martensite อีกครั้ง

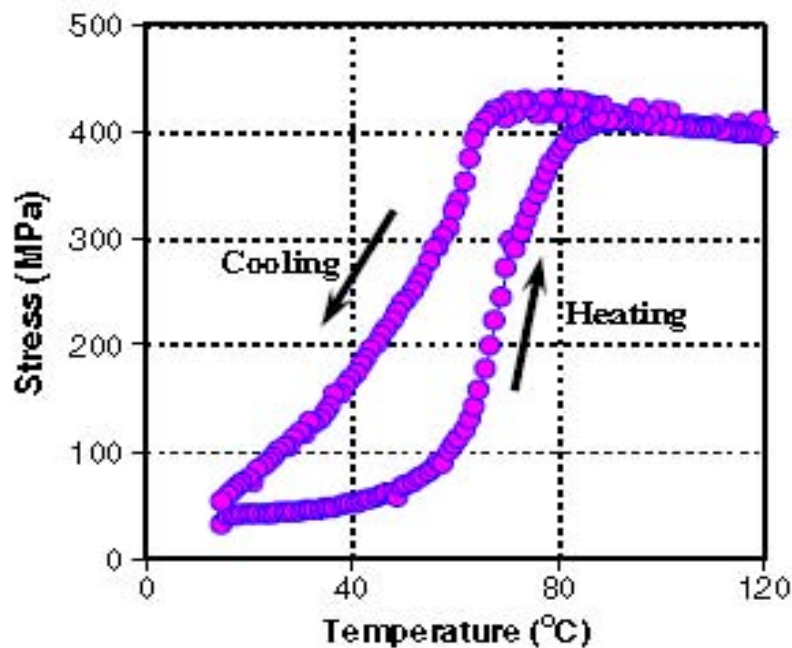
ภาพที่ 1.9 เป็นการวัดความเค้นที่เกิดขึ้นกับวัสดุโลหะผสมจำรูปที่สร้างไว้บนแผ่นซิลิกอนเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเฟสของวัสดุจะเริ่มเปลี่ยนจากมาเทนไซต์เป็นออสเทนไนต์ซึ่งจะเห็นว่าความเค้นของวัสดุจะเพิ่มสูงขึ้นถึง 400 MPa ในทางกลับกันเมื่อลดอุณหภูมิจากวัสดุลงเฟสของวัสดุจะกลับมาเป็นมาเทนไซต์อีกครั้งและพบว่าความเค้นของวัสดุก็จะลดลงไปด้วย การทดสอบนี้เป็นการทดสอบความเค้นของวัสดุซึ่งได้จากการสร้างผิววัสดุ NiTi บนแผ่นซิลิกอน ดังนั้นค่าความเค้นที่ได้จากกราฟจะเป็นความเค้นดึง (tensile stress) หมายความว่า เมื่อมีความเค้นสูงขึ้นที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการหดตัวของวัสดุเนื่องมาจากผลของ shape memory effect



ภาพที่ 1.7 ไดอะแกรมแสดงบริเวณที่วัสดุแสดงคุณสมบัติ shape memory effect และ superelastic effect [11]



ภาพที่ 1.8 โครงสร้างผลึกของวัสดุ NiTi เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ [12]



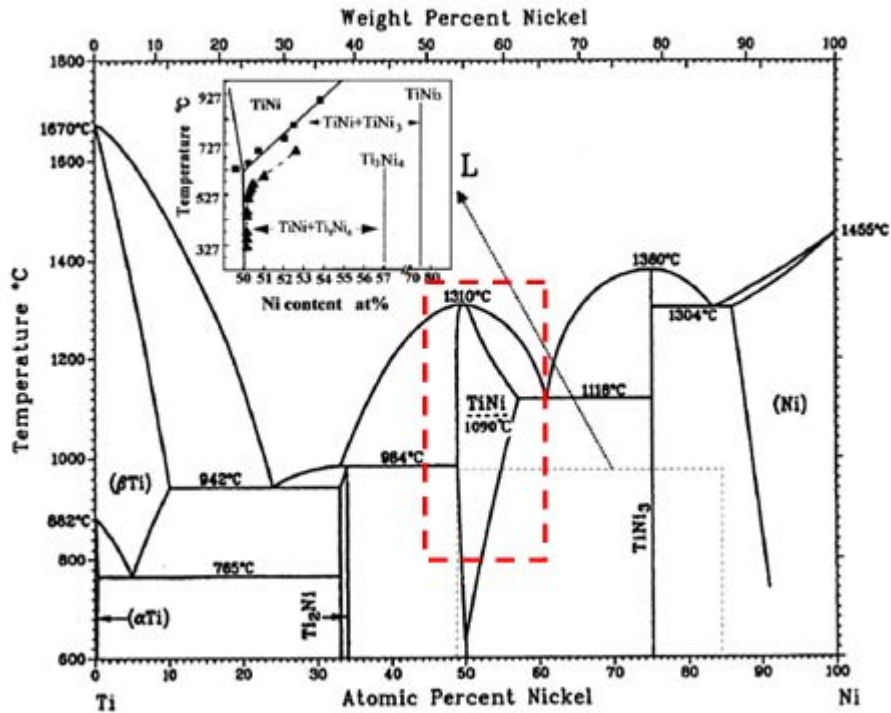
ภาพที่ 1.9 ความเค้นที่มีผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ NiTi (1:1) บนแผ่นซิลิกอน [13]

1.3.1 การปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการให้ความร้อน

ในขั้นตอนของการสร้าง NiTi ให้มีความสามารถในการแสดงคุณสมบัติเป็น shape memory effect นั้นจำเป็นที่จะต้องผ่านกระบวนการ crystallization ซึ่งเป็นการอบชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงประมาณ 500-600°C ดังแสดงในเฟสไดอะแกรมของ NiTi ดังภาพที่ 1.10 จึงมีความสำคัญโดยแกนในแนวตั้งเป็นอุณหภูมิ ในขณะที่แกนในแนวนอนเป็นส่วนหนึ่งของจำนวนอะตอมของนิกเกิล และบริเวณที่วัสดุแสดงความสามารถของ shape memory effect คือบริเวณที่มีกรอบสี่เหลี่ยมตรงกลาง สำหรับส่วนผสมระหว่างนิกเกิลและไททาเนียม 50:50 at% จากเฟสไดอะแกรมจะพบว่าใช้อุณหภูมิในการ crystallization ต่ำที่สุดประมาณช่วง 400 องศาเซลเซียส

1.4 โลหะผสมจำรูปและการพัฒนาในอดีต

เนื่องจากโลหะผสมจำรูปมีความสามารถในการออกแรงและมีระยะการเคลื่อนที่ที่สูง ดังนั้นการนำโลหะผสมจำรูปไปประยุกต์ส่วนใหญ่จะเน้นไปในงานวิจัยทางด้านไมโครแอกชูเอเตอร์ เช่น ไมโครปั๊ม ไมโครวาล์ว อุปกรณ์หยิบจับขนาดเล็ก (micro-gripper) สปริง เป็นต้น [9]



ภาพที่ 1.10 เฟสไดอะแกรมของวัสดุ NiTi สำหรับอัตราส่วนของนิกเกิลเกิดต่างๆ [14]

โลหะผสมจำรูปมีคุณสมบัติอยู่ 2 แบบคือ shape memory effect และ superelastic ดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว สำหรับ shape memory effect นั้นจะแบ่งได้อีก 2 ชนิดย่อย คือ one-way shape memory effect และ two-way shape memory effect โดยที่ one-way shape memory effect นั้นเมื่อให้ความร้อนแก่วัสดุจนเกิดการเปลี่ยนเฟสจากมาร์เทนไซต์เป็นออสเทนไนต์วัสดุจะกลับคืนรูปร่างที่ได้กำหนดไว้ที่อุณหภูมิสูง และเมื่อลดอุณหภูมิลงวัสดุจะคงรูปร่างนั้นไว้จนกว่าจะมีแรงภายนอกมากจะทำให้เกิดการเสียรูปอีก เมื่อต้องการให้กลับคืนสู่รูปร่างก่อนมีแรงมากกระทำก็ให้ความร้อนอีกครั้ง ซึ่งต่างกับ two-way shape memory effect ที่เมื่อวัสดุได้รับความร้อนจะสามารถเปลี่ยนรูปร่างตามที่ได้กำหนดไว้ที่อุณหภูมิสูง และเมื่อลดอุณหภูมิลงวัสดุก็จะเปลี่ยนรูปร่างกลับมาโดยไม่ต้องอาศัยแรงภายนอกมากจะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่าง [26] สำหรับ superelastic นั้นวัสดุจะเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อมีแรงภายนอกมากกระทำและหากนำเอาแรงภายนอกที่กระทำต่อวัสดุออกไปก็จะกลับคืนสู่รูปร่างที่กำหนดไว้โดยอัตโนมัติ ซึ่งมีผลิตภัณฑ์ต่างๆ อาศัยคุณสมบัติของ superelastic ของวัสดุนี้ในการผลิต เช่น ขาแว่นตา หรือกรอบแว่นตาต่างๆ ที่สามารถหักงอได้โดยไม่เสียรูป

1.4.1 ไมโครปั๊มและไมโครวาล์ว

ไมโครปั๊มและไมโครวาล์วเป็นที่สนใจในงานวิจัยต่างๆ มากมาย เช่น อุปกรณ์จ่ายยาแบบปลูกถ่าย (implant drug delivery) อุปกรณ์วิเคราะห์ทางด้านเคมี เป็นต้น NiTi ซึ่งเป็นวัสดุที่เหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างไมโครวาล์วและปั๊ม ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้เป็นเมมเบรนที่ใช้ผลักดันของเหลวในอุปกรณ์ดังกล่าว ถึงแม้ว่าโครงสร้างลอยตัว (free standing) ของ NiTi จะแสดงคุณสมบัติเป็นปรากฏการณ์แบบสองทาง (two-way effect) ซึ่งมีระยะการเคลื่อนที่ที่สูงแต่จะให้แรงกระทำค่อนข้างน้อย

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของปรากฏการณ์นี้ต้องอาศัยกระบวนการอื่นเพิ่มเติม เช่น 3-D hot-shaping membrane หรือ สร้างโครงสร้างที่ประกอบด้วยวัสดุสองชนิด externally biased structure เช่น polyimide [27] Si cap [28] หรือ Glass cap [29] ซึ่งจะทำให้เมมเบรนมีโครงสร้างที่ซับซ้อนและมีกระบวนการสร้างที่ยากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ด้วยลักษณะการทำงานของไมโครปั๊มและไมโครวาล์วส่วนใหญ่จะใช้งานกับของเหลว ดังนั้นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือการป้องกันความร้อนที่เกิดขึ้นจากไมโครปั๊มและไมโครวาล์วที่จะส่งผลเสียต่อของเหลวที่ไหลผ่าน งานวิจัยต่างๆ จึงนิยมใช้ NiTi ร่วมกับซิลิกอนมาสร้างเป็นเมมเบรนเนื่องจากสามารถออกแรงได้มาก อีกทั้งยังมีกระบวนการสร้างที่ง่ายและไม่ต้องมีฉนวนป้องกันความร้อนเนื่องจากซิลิกอนจะป้องกันของเหลวจากโครงสร้าง NiTi จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนต่ำและไม่ส่งผลเสียต่อของเหลวที่ไหลผ่านได้

1.4.2 ไมโครเซนเซอร์ ไมโครสวิตช์ และไมโครรีเลย์

ฟิล์ม NiTi มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความเค้น แม่เหล็ก หรือ สนามไฟฟ้า ซึ่งเป็นสิ่งที่เหมาะสมอย่างยิ่งในงานสร้างไมโครเซนเซอร์ อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยไม่มากนักที่ศึกษาและนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ทางวิศวกรรม ทั้งนี้สาเหตุที่การศึกษานี้ไม่เป็นที่นิยมมากนักเนื่องมาจากความถี่การทำงานของโลหะผสมจำรูปที่น้อยเกินไปซึ่งไม่เหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้งาน [9]

1.4.3 อุปกรณ์หยิบจับขนาดเล็ก (micro-gripper)

ความแม่นยำในการหยิบจับสิ่งของขนาดเล็กเป็นสิ่งที่จำเป็นในงานประกอบทางด้านระบบจุลภาค การผ่าตัด หรือการหยิบจับเข็มฉีดยาเพื่อฉีดยาเข้าสู่เซลล์ อุปกรณ์หยิบจับขนาดเล็กนั้นควรมีคุณสมบัติที่ดีเช่น แรงในการหยิบจับสิ่งของ ระยะการเคลื่อนที่ที่สามารถใช้ในงานประกอบ

ขนาดเล็ก เป็นต้น ซึ่ง NiTi สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้เช่นเดียวกัน งานวิจัยที่น่าสนใจคืออุปกรณ์หีบจับที่มีการทำงานแบบ out-of-plane bending ส่วนใหญ่จะเป็นคานที่ประกอบด้วย NiTi/Si หรือ SU-8 หรือโพลีอิมิด [15-16] แรงที่ได้จากอุปกรณ์หีบจับขนาดเล็กนี้จะสูงมาก ข้อดีของอุปกรณ์หีบจับแบบโลหะผสมจำรูป คืออุณหภูมิการทำงานและมีความต่างศักย์ไฟฟ้าขณะทำงานไม่สูงมากนักซึ่งเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการหีบจับโดยเฉพาะงานที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ งานทางด้านชีวเวช เป็นต้น

1.4.4 แอคชูเอเตอร์ขนาดเล็ก (Mini actuator)

งานวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาคุณสมบัติของโลหะผสมจำรูปและนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างแอคชูเอเตอร์ขนาดเล็ก เช่น Linear SMA actuator ที่สามารถออกแรงได้สูงมากถึง 4 นิวตัน และมีระยะการเคลื่อนที่ถึง 30 มิลลิเมตร สามารถปรับเปลี่ยนลักษณะการติดตั้งจนออกแรงได้ถึง 56 นิวตัน แต่จะมีระยะการเคลื่อนที่ที่น้อยลงหรือประมาณ 2.2 มิลลิเมตร โดยที่ขนาดของแอคชูเอเตอร์ชนิดนี้มีขนาดเพียงแค่ว่า 75x20x20 ลูกบาศก์มิลลิเมตร [17] เท่านั้น rotational SMA actuator สามารถหมุนได้ถึง 60 องศา โดยอาศัยลวดโลหะผสมจำรูปที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 ไมโครเมตร และสามารถให้แรงบิดได้ 0.08 นิวตัน-มิลลิเมตร [18] Ferromagnetic SMA actuator ที่สามารถเปลี่ยนรูปร่างเมื่อมีแรงจากภายนอกหรือสนามแม่เหล็กมากระทำ [19-21] โดยแอคชูเอเตอร์ชนิดนี้มีการตอบสนองที่ไวและมีการตอบสนองเร็วกว่ามิลลิวินาที อีกทั้งยังมีระยะการเคลื่อนที่สูง ซึ่งพบว่าโลหะผสมระหว่าง NiMnGa นั้นทำงานได้ดีที่สุดและเป็นที่รู้จักแพร่หลายในงานวิจัยเกี่ยวกับ ferromagnetic SMA actuator นี้ [22-25]

จากงานวิจัยที่ผ่านมา การพัฒนาแอคชูเอเตอร์แบบโลหะผสมจำรูปจะศึกษาขนาดของแอคชูเอเตอร์อยู่ในช่วงของขนาดที่ค่อนข้างใหญ่ในระดับเซนติเมตร โดยแอคชูเอเตอร์ในระดับมิลลิเมตรหรือเล็กกว่ายังมีไม่มากนัก การวิเคราะห์ การออกแบบ และการสร้างแอคชูเอเตอร์ในขนาดที่สามารถจับชิ้นงาน HGA ได้ จึงยังไม่มีตัวอย่างในงานวิจัยมากนัก ดังนั้นจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการหาแนวทางดำเนินการวิเคราะห์ ออกแบบ และการสร้างแอคชูเอเตอร์แบบโลหะผสมจำรูปสำหรับเป็นตัวจับยึดในงานประกอบสำหรับอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์นี้

1.5 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ในการจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ที่ตำแหน่งรูบอสโดยการออกแบบผลิตและทดสอบไมโครแอคชูเอเตอร์แบบโลหะผสมจำรูป

1.6 ขอบเขตของงานวิจัย

- ออกแบบ ผลิตและทดสอบไมโครแอกซ์เวเตอร์เพื่อใช้งานแทนอุปกรณ์หยิบจับด้วยหัวจับ สูญญากาศแบบเดิม
- ทดสอบไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ผลิตขึ้น เช่น ระยะเวลาตก ความเร็วในการทำงาน เป็นต้น

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

กลุ่มอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ต้องการเพิ่มผลผลิต และลดต้นทุนการผลิตจากการใช้ชิ้นส่วนในการประกอบฮาร์ดดิสก์ที่มีขนาดใหญ่ที่ทำให้สิ้นเปลือง อีกทั้งยังเป็นการลดปริมาณชิ้นส่วนต่างๆของโรงงานอุตสาหกรรม หรือต้นทุนในการกำจัดสิ่งของเหลือใช้ (scraps) จากโรงงาน โดยที่การผลิตแบบ Micro-fabrication ยังทำให้ต้นทุนของอุปกรณ์หยิบจับชนิดใหม่ต่ำลงด้วย รวมไปถึงกลุ่มนิสิต นักศึกษา ผู้ที่สนใจที่ต้องการนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยอื่นๆเพิ่มเติม

1.8 ระเบียบขั้นตอนการวิจัย

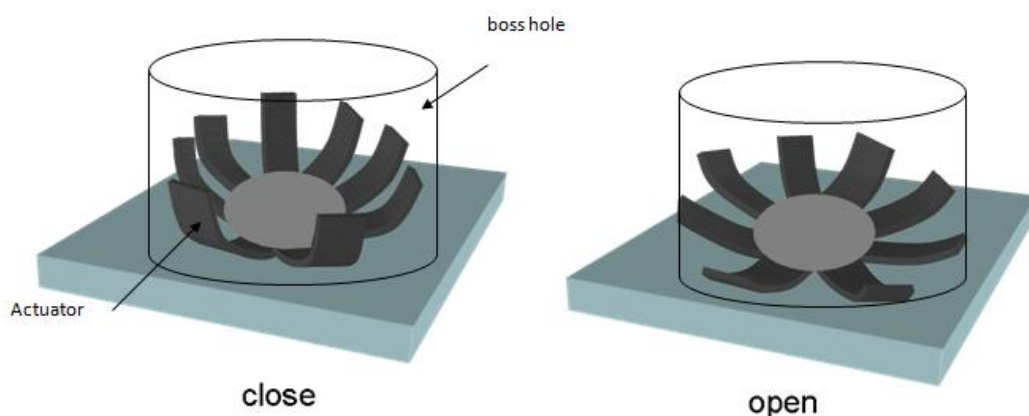
- ศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องกับไมโครแอกซ์เวเตอร์หลักการต่าง ๆ เช่น Shape memory alloy, PZN-PT, Electrochemical เป็นต้น
- ศึกษาหลักการ วัสดุ และรูปร่างของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่เลือกใช้อย่างละเอียด
- คำนวณระยะเวลาตกและแรงที่กระทำระหว่างอุปกรณ์หยิบจับกับ HGA เมื่ออุปกรณ์มีขนาดเปลี่ยนแปลงไปโดยวิธีทางไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อหาขนาดที่เหมาะสมที่จะใช้ในการสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์
- ศึกษาและออกแบบขั้นตอนการผลิต เนื่องจากในขั้นตอนการสร้างมีข้อจำกัดต่างๆ และเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับเครื่องจักร
- ทดลองผลิตและปรับปรุงแก้ไขขั้นตอนการผลิต
- ทดสอบไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ผลิตขึ้นมา
- วิเคราะห์ผลการทดสอบและปรับปรุงรูปร่างของอุปกรณ์ในการหยิบจับ
- สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ พร้อมจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

การออกแบบไมโครแอกชูเอเตอร์

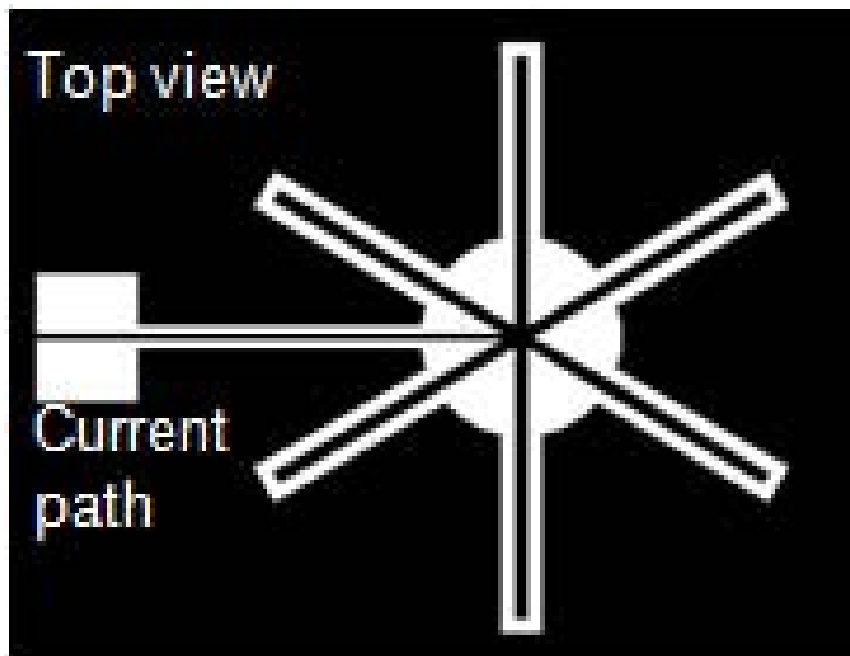
เนื่องจากปัจจุบันชิ้นงาน HGA กำลังจะมีขนาดเล็กลงในอนาคตทำให้การประกอบในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ทำได้ยากขึ้นดังที่กล่าวไว้แล้วในบทแรก ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำไมโครแอกชูเอเตอร์มาใช้ทดแทนระบบสูญญากาศและพบว่าตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดที่จะหยิบจับ HGA ด้วยไมโครแอกชูเอเตอร์คือที่ตำแหน่งรูปอสดังภาพที่ 1.3(ก)

การออกแบบเบื้องต้นจะออกแบบไมโครแอกชูเอเตอร์ให้มีลักษณะคล้ายกับนิ้วมือของมนุษย์ ซึ่งคล้ายคลึงกับงานวิจัยที่สร้างแอกชูเอเตอร์เพื่อดักจับอนุภาคขนาดเล็ก (microcage) [13] ส่วนประกอบของส่วนที่คล้ายนิ้วมือของแอกชูเอเตอร์จะเป็นโครงสร้างประกบกันระหว่างวัสดุสองชนิดคือ Nitinol (NiTi) และ Diamond-Like-Carbon (DLC) โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงความเครียดภายในวัสดุที่แตกต่างกันซึ่งจะส่งผลให้ไมโครแอกชูเอเตอร์เกิดการโก่งขึ้นและทิศทางการโก่งขึ้นนั้นก็ขึ้นอยู่กับว่าวัสดุชนิดไหนจะมีความเครียดมากกว่ากัน ถ้าหากวัสดุทางด้านล่างมีความเครียดมากกว่าวัสดุที่อยู่ทางด้านบนก็จะส่งผลให้เกิดการกระดกขึ้น ในทางกลับกันหากวัสดุด้านบนมีความเครียดมากกว่าก็จะทำให้ไมโครแอกชูเอเตอร์กระดกลง โดยภาพที่ 2.1 แสดงลักษณะการจับยึด HGA ด้วยไมโครแอกชูเอเตอร์ที่มีลักษณะคล้ายกับนิ้วของมนุษย์นี้ โดยไมโครแอกชูเอเตอร์จะสอดเข้าไปในรูปอส จากนั้นจะอัดออกและออกแรงกระทำต่อผนังด้านในของรูปอสเพื่อจับยึด HGA ไว้ และไมโครแอกชูเอเตอร์จะหุบเข้าอีกครั้งเมื่อต้องการปล่อยชิ้นงานออก



ภาพที่ 2.1 ลักษณะของการหยิบจับ HGA ที่ตำแหน่งรูปอสด้วยไมโครแอกชูเอเตอร์

วิธีการที่จะทำให้ไมโครแอกซ์เอเตอร์เกิดความเครียดภายในวัสดุต่างกันสามารถทำได้โดยการให้กระแสไฟฟ้าไหลไปในโครงสร้างของ NiTi เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะทำให้เกิดความร้อนซึ่ง NiTi เป็นโลหะผสมจำรูปก็จะเกิดการหดตัว ในขณะที่ DLC จะขยายตัวออกเนื่องจากการขยายตัวทางความร้อน ทำให้เกิดความเครียดที่แตกต่างกันของทั้งสองวัสดุซึ่งทำให้ไมโครแอกซ์เอเตอร์สามารถกระดกได้ ดังนั้นการออกแบบรูปร่างของโครงสร้างแอกซ์เอเตอร์จึงจำเป็นต้องมีลักษณะดังภาพที่ 2.2 ซึ่งมีลักษณะเป็นขดลวดไฟฟ้าที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปทางเดียว ทำให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปบนผิวของ NiTi เท่ากันทุกนิ้วของแอกซ์เอเตอร์ เมื่อแอกซ์เอเตอร์ทำงานนิ้วทุกอันจะมีความร้อนเกิดขึ้นเท่ากันและมีการโก่งตัวเท่ากันด้วย



ภาพที่ 2.2 ลักษณะวงจรรของแอกซ์เอเตอร์ที่มีลักษณะเป็นขดลวดให้กระแสไฟฟ้าไหลทางเดียว

ถึงแม้ว่า DLC จะเป็นวัสดุที่มีโมดูลัสความยืดหยุ่นสูง เมื่อนำมาประกบกับ NiTi เป็นไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่มีโครงสร้างของวัสดุสองชั้นจะสามารถสร้างระยะกระดกที่สูงและมีรัศมีความโค้งน้อยก็ตาม แต่การใช้ DLC มีข้อจำกัดเนื่องจากสามารถสร้างได้หนาเพียง 1 ไมโครเมตรเท่านั้น ซึ่งถ้าหากมีความหนามากกว่า 1 ไมโครเมตรจะเกิดปัญหาเรื่องการยึดติดของผิววัสดุทั้งสองชั้น [13]

ในอีกงานวิจัยหนึ่ง แสดงวิธีการนำ NiTi มาใช้ควบคู่กับโพลีอิมิด [30] ได้เช่นเดียวกัน ซึ่งค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของโพลีอิมิดจะน้อยกว่า DLC ค่อนข้างมาก ดังนั้นรูปร่างของแอกซ์เอเตอร์ที่อุณหภูมิห้องจะโก่งงอมาก เนื่องจาก residual stress จากการผลิตค่อนข้างสูง โดยมีขั้นตอนการ

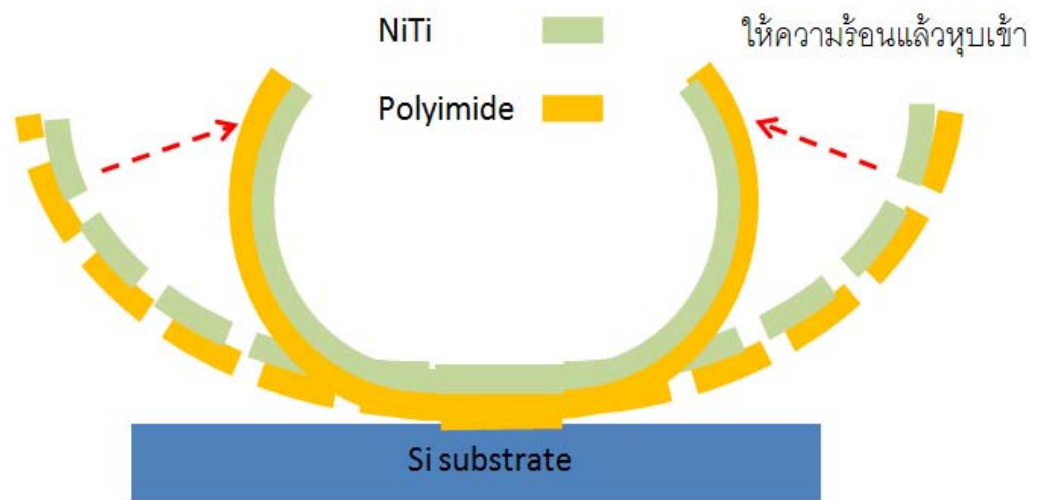
สร้างที่แตกต่างออกไปสำหรับงานวิจัยทั้งสอง กล่าวคือมีการสร้างผิวของโพลีอิมิตอยู่ด้านบนของ NiTi ดังนั้นลักษณะการทำงานจะแตกต่างกันกับงานวิจัยที่กล่าวถึงชิ้นแรก เมื่อมีการให้กระแสไฟฟ้าที่ผิว NiTi แล้วไมโครแอคชัวเอเตอร์จะอำอก ดังนั้นหากต้องการลักษณะการทำงานที่สลับกัน ตัวอย่างเช่นให้กระแสไฟฟ้าแล้วมีการหุบเข้า จึงจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนขั้นตอนของการสร้างดังภาพที่ 2.3 โพลีอิมิตเป็นวัสดุที่มีโมดูลัสความยืดหยุ่นค่อนข้างน้อยซึ่งจะทำให้ไมโครแอคชัวเอเตอร์มีระยะกระดกไม่สูงมากนัก แต่โพลีอิมิตก็มีคุณสมบัติในการป้องกันกระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิที่อาจจะส่งผลเสียต่อชิ้นงาน HGA ได้ดี เช่นเดียวกับกับ DLC อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาวัสดุชนิดอื่นๆ ควบคู่ไปด้วย เช่น โครเมียม ทองแดง หรือ อลูมิเนียม

2.1 การเลือกวัสดุ

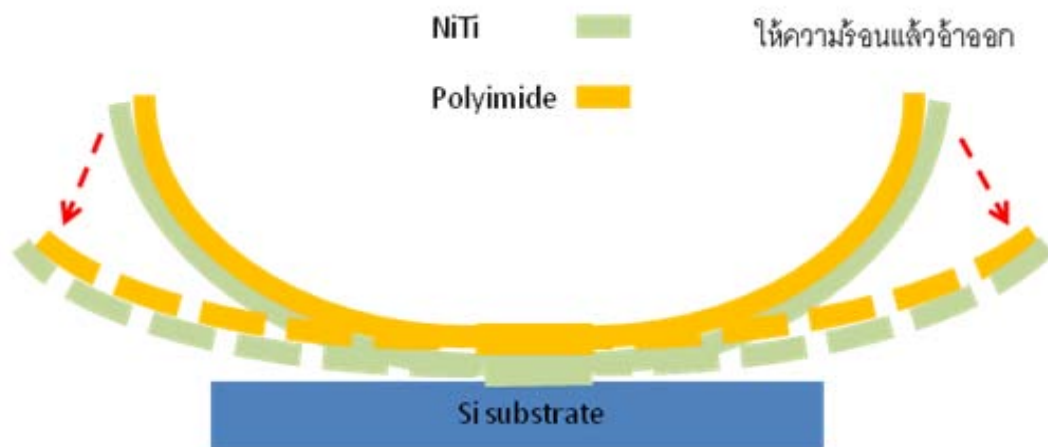
วัสดุที่นำมาใช้เป็น shape memory alloy นั้นมีหลายชนิด ไม่ว่าจะเป็น NiTi หรือ Fe-based alloys หรือ Cu-based alloys ซึ่งเหมาะที่จะใช้ในงานที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม NiTi เป็นที่รู้จักและแพร่หลายมากที่สุด มีความต้านทานค่อนข้างสูง และมีอุณหภูมิการทำงานไม่สูงนัก NiTi คือวัสดุที่มีส่วนผสมของนิกเกิลและไททาเนียมผสมกันอยู่ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงปริมาณต่างๆกัน เช่น 50:50 at% หรือ 50.2:49.8 at% โดยที่อัตราส่วนผสมของนิกเกิลจะมีผลต่ออุณหภูมิการเริ่มต้นเปลี่ยนเฟส (M_s) ดังภาพที่ 2.4 โดยแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของนิกเกิลใน NiTi ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเริ่มต้นเปลี่ยนเฟสและพบว่า การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของนิกเกิลเพียงเล็กน้อยจะส่งผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสอย่างมีนัยสำคัญ

อัตราส่วนของนิกเกิลสูงจะทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นเปลี่ยนเฟสต่ำลง อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิต่ำลงความเค้นที่เกิดขึ้นก็มีค่าน้อย ซึ่งจำเป็นที่จะต้องหาจุดที่เหมาะสมกับงานวิศวกรรมต่างๆ ในงานวิจัยนี้จะใช้ NiTi ที่มีอัตราส่วน 50:50 at% ซึ่งเป็นส่วนผสมที่นิยมใช้กันมากที่สุด อีกทั้งอุณหภูมิการทำงานก็ไม่สูงเกินไปหรือประมาณ 80°C

เมื่อพิจารณาถึงข้อจำกัดในงานประกอบ HGA จึงได้ศึกษาหาวัสดุที่จะนำมาใช้ร่วมกับ NiTi ที่สามารถป้องกันการเหนียว ESD และสามารถป้องกันอุณหภูมิของไมโครแอคชัวเอเตอร์ไม่ให้สูงเกินไปในบริเวณที่ต้องสัมผัสกับชิ้นงานเพื่อป้องกันการเสียหาย โดยมีวัสดุที่น่าสนใจได้แก่ โพลีอิมิต diamond-like-carbon (DLC) อลูมิเนียม และโครเมียม ในส่วนถัดไปจะอธิบายเกี่ยวกับรายละเอียดของวัสดุแต่ละชนิด



(ก)

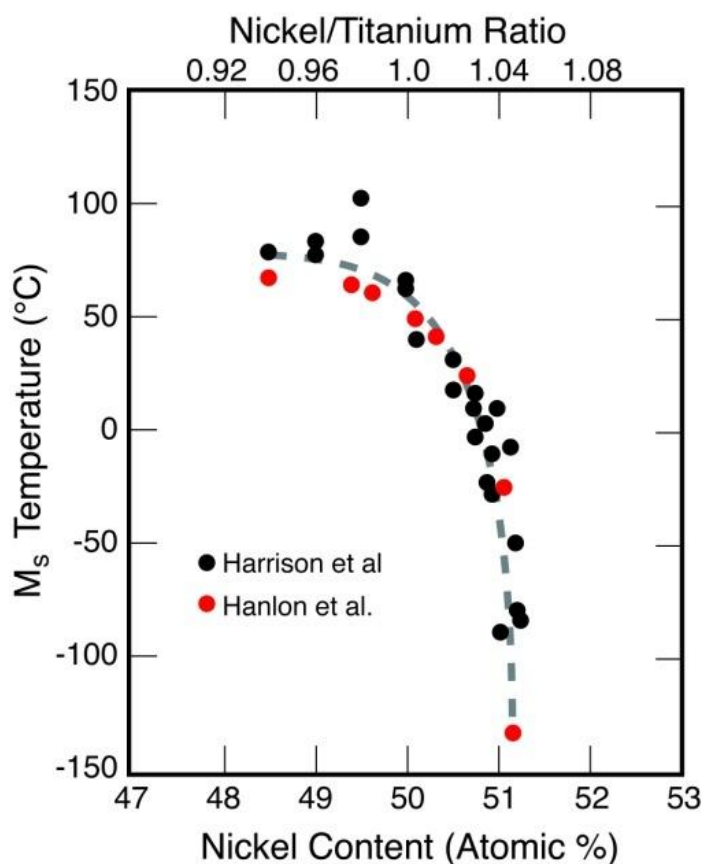


(ข)

ภาพที่ 2.3 การปรับเปลี่ยนขั้นตอนการสร้างเพื่อให้เกิดลักษณะการทำงานที่ต่างกัน

(ก) นิตินอลอยู่ด้านบน

(ข) นิตินอลอยู่ด้านล่าง



ภาพที่ 2.4 อัตราส่วนผสมของนิกเกิลที่มีผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส (Martensite start) [31]

สำหรับโพลีอิมิดเป็นวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงและสามารถสร้างได้หนาถึง 20 ไมโครเมตร เนื่องจากการเคลือบบนเครื่องเคลือบผิวโดยควบคุมความเร็วของการหมุนปั่น อีกทั้งโพลีอิมิดยังมีคุณสมบัติการป้องกัน ESD และสามารถทนความร้อนได้ดี ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของโพลีอิมิดรุ่นต่างๆ ซึ่งพบว่าโพลีอิมิดที่เหมาะสมคือ PI-5878G ของบริษัทฮิตาชิ-ดูปองต์ซึ่งมีอุณหภูมิ Glass transition ที่สูงมากกว่า 400°C และยังมีอุณหภูมิ decomposition ที่สูงถึง 500°C อีกด้วย

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของโพลีอิมิดชนิดต่างๆ

Properties	HD-4100	HD-8820	HD-8930	PI-2600	PI-5878G
Tensile strength (MPa)	200	114-168*	170	360	260
Modulus of elasticity (GPa)	3.5	2.0-2.6*	1.7-1.9*	8.5	2.3
Decomposition temperature (°C)	600	N/A	N/A	620	580
Glass temperature (°C)	N/A	257-306*	240-245*	360	>400
Coefficient of thermal expansion(CTE), (ppm/°C)	35	52-67*	80	3	20

* ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการอบความร้อน (curing temperature)

จากตารางข้างต้นหาก decomposition และ glass temperature ของวัสดุสูง สามารถบ่งบอกได้ถึงความสามารถในการทนความร้อน ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญในงานวิจัยนี้เนื่องจากการใช้วัสดุโลหะผสมจำรูปนั้น หนึ่งในขั้นตอนการสร้างจะต้องผ่านขั้นตอนของการ crystallization ซึ่งเป็นการอบวัสดุที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นหากวัสดุที่นำมาใช้ร่วมกับ NiTi ไม่สามารถทนอุณหภูมิของขั้นตอนการ crystallization ได้ก็จะเกิดความเสียหายขึ้น ดังนั้นในระหว่างโพลีอิมิดที่นำมาพิจารณานั้นโพลีอิมิดชนิด PI-5878G นั้น เหมาะสมที่จะนำมาใช้งานในการศึกษา

ในส่วนของ DLC มีความสามารถในการป้องกันการเหนียวนำ ESD และอุณหภูมิได้ดี ผิว DLC สามารถสร้างได้ด้วยวิธีการสเปคโตรริง เช่นเดียวกับการสร้างผิว NiTi และเนื่องจาก DLC เป็นวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้าดังนั้นการสร้างผิวด้วยวิธีการสเปคโตรริงจะทำได้ค่อนข้างช้าอีกทั้ง DLC สามารถสร้างได้ไม่เกิน 1 ไมโครเมตรเท่านั้น

ถึงแม้ว่าอลูมินัม และโครเมียม จะเป็นวัสดุที่นำไฟฟ้าซึ่งสามารถก่อให้เกิดการเหนียวนำ ESD ได้ อีกทั้งยังนำความร้อนได้ดีแต่อย่างไรก็ตามการสร้างผิวของ อลูมินัมและโครเมียม นั้นสามารถสร้างได้ง่าย ในการศึกษานี้จึงจะทดลองสร้างควบคู่กันไปด้วย โดยการเปรียบเทียบคุณสมบัติของอลูมินัม โครเมียม และ DLC จะแสดงไว้ใน

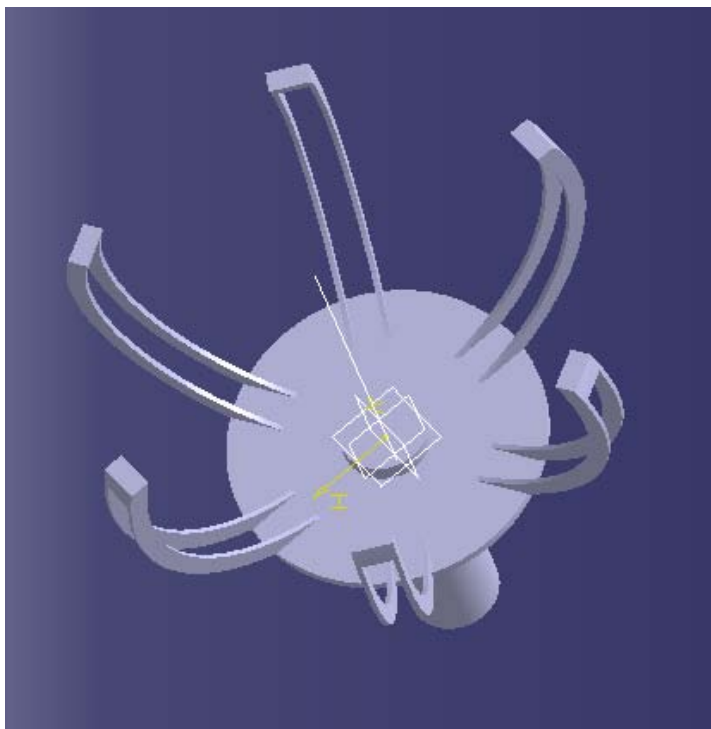
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของ DLC อลูมิเนียม และโครเมียม

Properties	DLC	Cr	Al
Specific density (g/cc)	3.5	7.2	2.7
Tensile strength (MPa)	-	362	-
Modulus of elasticity (GPa)	600	279	68
Coefficient of thermal expansion (ppm/°C)	1	6.2	24

จากตารางที่ 2.2 ซึ่งเป็นตารางแสดงคุณสมบัติของวัสดุที่สนใจที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ พบว่าโครเมียมเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นสูงซึ่งหมายความว่าวัสดุจะมีมวลมากเมื่อมีปริมาตรเท่ากัน และเป็นวัสดุที่มี tensile strength ที่สูงก็บ่งบอกได้ถึงความสามารถในการทนต่อแรงดึง สำหรับ DLC เป็นวัสดุที่มีโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงซึ่งจะเปลี่ยนรูปร่างอิลาสติกได้น้อย โดย DLC มีค่ามากกว่า Cr และ Al ตามลำดับ ในทางกลับกันวัสดุที่มีโมดูลัสความยืดหยุ่นที่น้อยกว่าจะสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างอิลาสติกได้ดีกว่า สำหรับคุณสมบัติสุดท้ายคือสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อนซึ่งจะพบว่า Al มีค่ามากกว่า Cr และ DLC ตามลำดับ ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถของการขยายตัวออกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้มากกว่า

2.2 รูปร่างของไมโครแอคชูเอเตอร์

ไมโครแอคชูเอเตอร์จะมีรูปร่างที่คล้ายนิ้วมือของมนุษย์ซึ่งจะมีจำนวนนิ้วประมาณ 6-8 นิ้ว เพื่อให้เกิดความสมมาตรและสามารถจัดศูนย์ได้โดยอัตโนมัติหากนำไปใช้ในการจับยึดต่างๆ และมีลักษณะของการนำไฟฟ้าในทิศทางเดียว สำหรับการดำเนินงานจะอาศัยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ได้จากแหล่งกำเนิดความร้อนเพื่อสร้างความเค้นขึ้น โดยภาพที่ 2.2 แสดงลักษณะวงจรที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านโดยกระแสไฟฟ้าจะไหลไปบนโครงสร้างของ NiTi ซึ่งมีลักษณะคล้ายขดลวดความร้อน เมื่อให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปในโครงสร้างของ NiTi จะเกิดความร้อนสูญเสียและทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น ถ้าหากว่าอุณหภูมิสูงขึ้นจนเพียงพอจนทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสของ NiTi จากมาเทนไซต์เป็นออสเทนไนต์แล้วจะทำให้วัสดุมีความเค้นสูงขึ้นจนวัสดุเกิดการหดตัวในขณะที่วัสดุที่มาประกบกับ NiTi นั้นจะขยายตัวออกเมื่อได้รับความร้อน ไมโครแอคชูเอเตอร์จึงเปลี่ยนรูปร่างเป็นลักษณะที่โค้งงอได้ โดยโครงสร้างของแอคชูเอเตอร์แบบ 3 มิติแสดงไว้ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 โครงสร้าง 3 มิติของไมโครแอกชูเอเตอร์ในการศึกษาชิ้น

2.3 การคำนวณโดยระเบียบวิธีทางไฟไนต์อีลิเมนต์

ในส่วนของการออกแบบมุ่งเน้นใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์อีลิเมนต์ เพื่อศึกษาระยะกระดกในแนวตั้งและระยะกระดกในแนวขวางของไมโครแอกชูเอเตอร์ที่อุณหภูมิ 80°C และแรงของไมโครแอกชูเอเตอร์ที่มีขนาดต่างๆ ด้วยโปรแกรม ANSYS เพื่อหาขนาดของแอกชูเอเตอร์ที่สามารถสอดผ่านรูบอสที่มีขนาดประมาณ 1.3 มิลลิเมตร รวมทั้งสามารถออกแรงเพื่อรับน้ำหนักของ HGA ที่มีค่าประมาณ 40 มิลลิกรัมได้

ในการศึกษาชิ้นนี้จะคำนวณเพื่อหาระยะกระดกในแนวตั้งและระยะกระดกในแนวขวางของไมโครแอกชูเอเตอร์ที่อุณหภูมิ 80°C และมีความยาว 750, 1000 และ 1500 ไมโครเมตร โดยที่มีความหนาของ NiTi 1 ไมโครเมตรคงที่ ในขณะที่มีความหนาโพลีอิมิด 5, 10 และ 20 ไมโครเมตร และมีความกว้างของไมโครแอกชูเอเตอร์ 100, 200 และ 300 ไมโครเมตร ดังแสดงพารามิเตอร์ในตารางที่ 2.2 รวมเป็นการศึกษาทั้งหมด 27 กรณี

นอกจากนั้น ยังได้คำนวณไมโครแอกชูเอเตอร์ที่ประกบกันด้วยวัสดุ NiTi และ DLC ด้วย โดยเปลี่ยนแปลงความหนาของ NiTi เป็น 3, 5 และ 7 ไมโครเมตร ในขณะที่ความหนาของ DLC

คงที่ เท่ากับ 1 ไมโครเมตร โดยที่มีความกว้างของไมโครแอสซ์เอเตอร์เท่ากับ 100 และ 300 ไมโครเมตร ดังแสดงพารามิเตอร์ในตารางที่ 2.4 รวมเป็นการศึกษาทั้งหมด 18 กรณี

ตารางที่ 2.2 พารามิเตอร์ของไมโครแอสซ์เอเตอร์ระหว่าง NiTi และโพลีอิมิด

ความยาว (μm)	ความหนา NiTi (μm)	ความหนาโพลีอิมิด (μm)			ความกว้าง (μm)		
750	1	5	10	20	100	200	300
1000	1	5	10	20	100	200	300
1500	1	5	10	20	100	200	300

ตารางที่ 2.3 พารามิเตอร์ของไมโครแอสซ์เอเตอร์ NiTi และ DLC

ความยาว (μm)	ความหนา DLC (μm)	ความหนา NiTi (μm)			ความกว้าง (μm)	
750	1	3	5	7	100	300
1000	1	3	5	7	100	300
1500	1	3	5	7	100	300

2.3.1 การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการคำนวณ

การกำหนดคุณสมบัติในการวิเคราะห์ นอกจากจะใช้ข้อมูลคุณสมบัติทางกล ดังที่แสดงในตารางที่ 2.1-2.2 แล้วยังต้องกำหนดคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ซึ่งพารามิเตอร์ที่สำคัญคือสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อน โดยทั่วไปแล้ววัสดุเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการขยายตัวออกแต่ใน NiTi จะเกิดการหดตัว ซึ่งเป็นการหดตัวจาก shape memory effect และไม่สามารถป้อนค่าการหดตัวได้โดยตรงจากโปรแกรม ดังนั้นเพื่อทำให้การคำนวณไม่ซับซ้อนจึงต้องแปลงความเค้นลัพท์ที่เกิดขึ้นในวัสดุให้เป็นสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อนก่อน จากนั้นจะทำการกำหนดอุณหภูมิของวัสดุเพื่อคำนวณระยะกระดกทั้งสองแนวของไมโครแอสซ์เอเตอร์ที่อุณหภูมิ 80°C ต่อไป วิธีการสร้างแบบจำลองของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อนของ NiTi เป็นดังต่อไปนี้

สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อน (α) ของ NiTi จะมีค่าเท่ากับ 9 ppm/°C และค่าความเครียด ($\Delta\varepsilon$) ที่อุณหภูมิ 80°C จะแสดงได้จากสมการที่ (1) โดย ΔT คิดจากอุณหภูมิที่เพิ่มจาก 25°C เป็น 80°C

$$\Delta\varepsilon = \alpha \times \Delta T \quad (1)$$

เมื่อได้ค่าความเครียดเนื่องจาก thermal effect ที่อุณหภูมิ 80°C แล้ว สามารถหาความเค้น (σ_{CTE}) ที่เกิดจากการขยายตัวเชิงความร้อนที่อุณหภูมิ 80°C ได้ดังสมการที่ (2) ดังนี้

$$\Delta\sigma_{CTE} = \Delta\varepsilon \times E \quad (2)$$

โดยที่ Young's modulus (E) ของ NiTi ที่อุณหภูมิ 80°C มีค่าเท่ากับ 75 GPa

จากข้อมูลในภาพที่ 1.9 พบว่าที่อุณหภูมิ 80°C และ 25°C วัสดุ NiTi มีค่าความเค้น 400 และ 50 MPa ตามลำดับ และมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น เท่ากับ 75 GPa และ 30 GPa ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเนื่องจาก NiTi จะขยายตัวออกเนื่องจากผลของอุณหภูมิ thermal expansion effect ที่สูงขึ้นโดยจะกำหนดให้เป็นค่าบวก แต่จะหดตัวเนื่องจากผลของ Shape memory effect (SME) ซึ่งมีค่าเป็นลบ โดยมีค่า $\Delta\sigma_{SME}$ เท่ากับ -400 MPa เมื่อนำความเค้นที่ได้จากทั้งสองกรณีมาหักล้างกันจะได้เป็นความเค้นลัพธ์ดังแสดงในสมการที่ (3) และแปลงกลับไปเป็นความเครียด ($\Delta\varepsilon_{total}$) ได้จากสมการที่ (4) จากนั้นแทนค่าในสมการที่ (5) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อน (α_{total}) ซึ่งรวมทั้งผล thermal effect และ shape memory effect ต่อไป

$$\Delta\sigma_{total} = \Delta\sigma_{CTE} + \Delta\sigma_{SME} \quad (3)$$

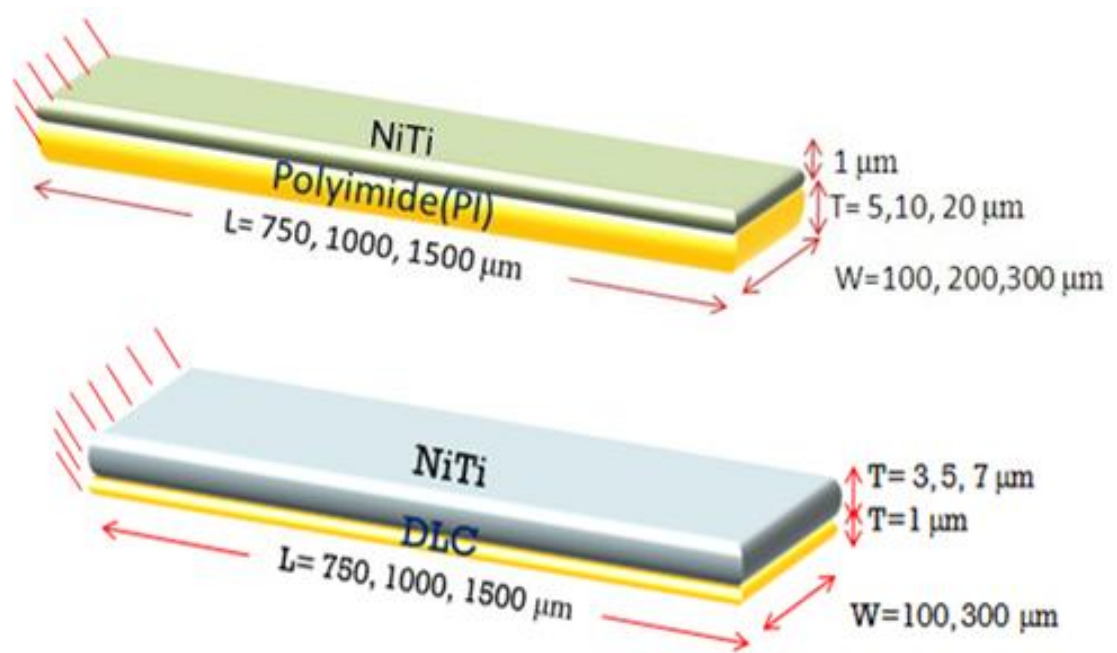
$$\Delta\varepsilon_{total} = \frac{\Delta\sigma_{total}}{E} \quad (4)$$

$$\alpha_{total} = \frac{\Delta\varepsilon_{total}}{\Delta T} \quad (5)$$

จากการวิเคราะห์เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 25°C เป็น 80°C จะได้สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อนลัพธ์ประมาณ -88 ppm/°C ซึ่งจะนำไปใช้ในโปรแกรม ANSYS ต่อไป

2.3.2 การคำนวณหาขนาดของไมโครแอกซ์เอเตอร์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

จากแบบจำลองค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อนดังกล่าวและใช้โหมด Static structural ด้วยสภาวะขอบเขตของอุณหภูมิ จะสามารถคำนวณค่าระยะกระดกของไมโครแอกซ์เอเตอร์ต่อไปได้ ลักษณะของแอกซ์เอเตอร์แสดงในภาพที่ 2.6 โดยแสดงขนาดของแอกซ์เอเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงในการศึกษานี้ สำหรับพารามิเตอร์อื่นได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.4 สำหรับตัวอย่างความละเอียดของการกำหนด mesh ได้แสดงในภาพที่ 2.7



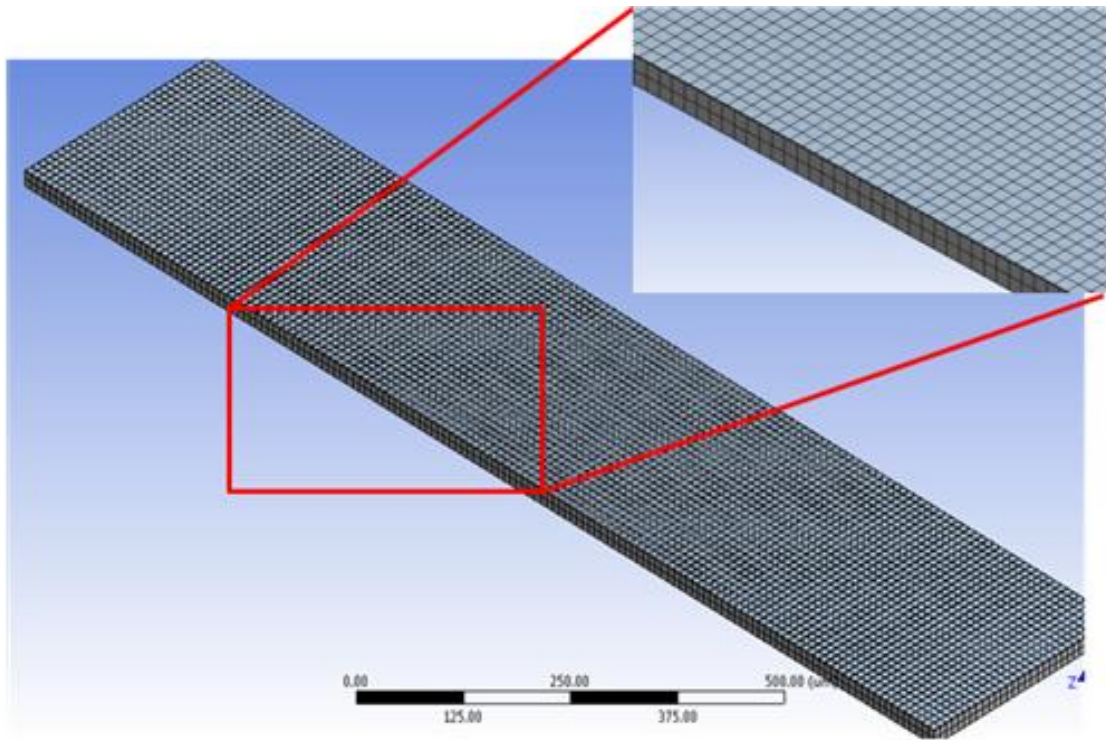
ภาพที่ 2.6 ไดอะแกรม 3 มิติที่แสดงรูปร่างเริ่มต้นของไมโครแอกซ์เอเตอร์

ตารางที่ 2.4 ค่าเริ่มต้นของการศึกษาระยะกระดกในแนวตั้งและระยะกระดกในแนวขวาง

Parameter	Condition
Environment temperature	25 °C
Mesh	Auto(Proximity and curvature)
	5,880 – 13,470* elements
Fixed support	One end of the beam
Contact region (NiTi/Polyimide),(NiTi/DLC)	Bonded
Large deflection	On

*ขึ้นอยู่กับกรณี

สำหรับการคำนวณระยะกระดกในแนวตั้งและระยะกระดกในแนวขวางของไมโครแอกซ์ฮูเอเตอร์ที่อุณหภูมิ 80°C นี้จะกำหนดสภาวะขอบเขตเริ่มต้นดังนี้ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเป็น 25°C กำหนดการสร้าง mesh แบบอัตโนมัติด้วยโหมด proximity and curvature ซึ่งมีจำนวน mesh 5,880-13,470 elements กำหนดปลายด้านหนึ่งเป็น fixed support ซึ่งบริเวณที่ประกบกันระหว่าง NiTi และโพลีอิมิต หรือ DLC จะกำหนดให้เป็นแบบ bonded และกำหนดการคำนวณเป็นแบบไม่เชิงเส้น หรือกำหนดให้เป็นโหมด large deformation จากนั้นกำหนดอุณหภูมิของ NiTi และโพลีอิมิตให้เพิ่มขึ้นจาก 25°C เป็น 80°C สำหรับการคำนวณไมโครแอกซ์ฮูเอเตอร์ที่ประกบกันด้วยวัสดุ NiTi และ DLC กำหนดพารามิเตอร์ในลักษณะเดียวกัน



ภาพที่ 2.7 การกำหนด mesh ในโปรแกรมคำนวณโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

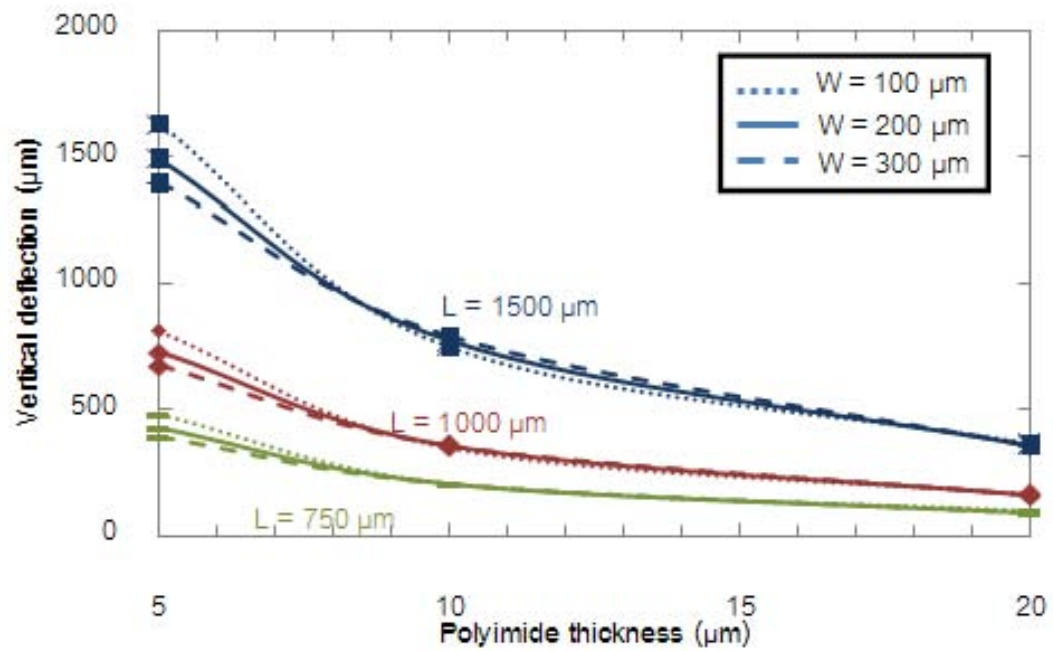
2.3.3 ผลการศึกษาระยะกระดกในแนวตั้งและแนวขวางของไมโครแอกซ์ฮูเอเตอร์

2.3.3.1 NiTi/Polyimide

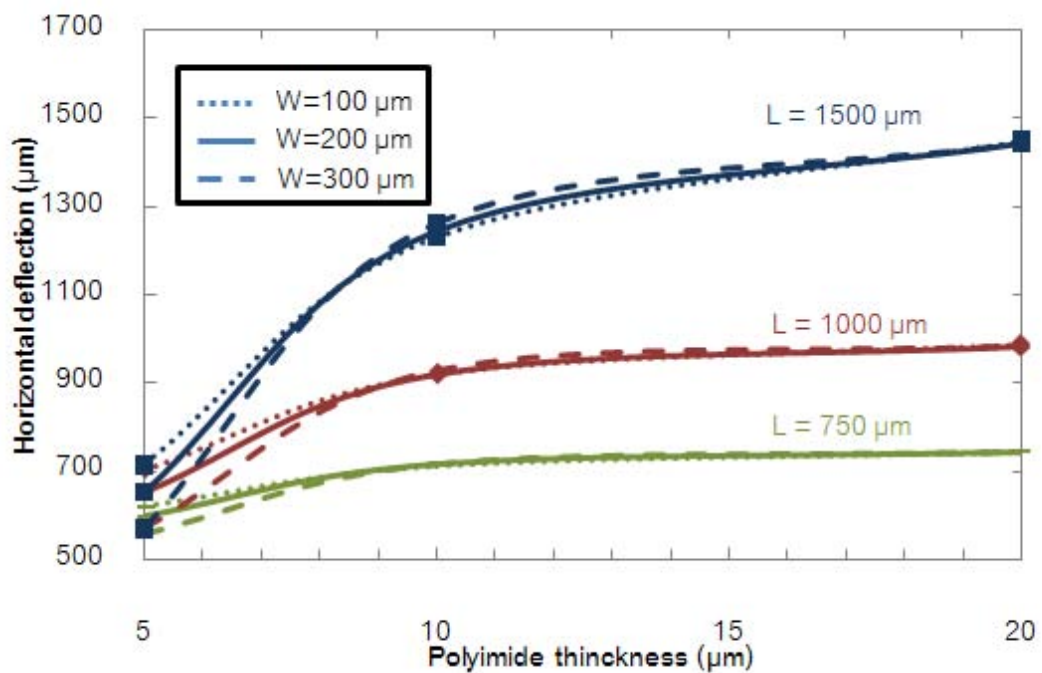
ผลการคำนวณระยะกระดกในแนวตั้งและระยะกระดกในแนวขวางของไมโครแอกซ์ฮูเอเตอร์สำหรับกรณีวัสดุ NiTi/Polyimide ที่ไมโครแอกซ์ฮูเอเตอร์มีความกว้างเท่ากับ 100, 200 และ 300

ไมโครเมตร และมีความยาวเท่ากับ 750, 1000 และ 1500 ไมโครเมตร แสดงดังภาพที่ 2.8 และภาพที่ 2.9 ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าระยะกระดกในแนวตั้งของไมโครแอกซ์เอเตอร์จะสูงขึ้น ถ้าความยาวของไมโครแอกซ์เอเตอร์มากขึ้น เมื่อพิจารณาผลของความกว้างต่อระยะกระดกนั้น พบว่าความกว้างจะมีผลก็ต่อเมื่อความหนาของโพลีอิมิดน้อย ซึ่งสามารถเห็นผลของความกว้างต่างๆ ที่แตกต่างกันได้ชัดเจนเมื่อไมโครแอกซ์เอเตอร์มีความหนาของโพลีอิมิด 5 ไมโครเมตร โดยที่ความกว้างมากขึ้นจะส่งผลให้ระยะกระดกในแนวตั้งลดน้อยลง แต่ผลของความเปลี่ยนแปลงความกว้างนี้จะน้อยลงที่ไมโครแอกซ์เอเตอร์มีความหนาโพลีอิมิด 10 และ 20 ไมโครเมตร ตามลำดับ สำหรับผลจากการเพิ่มความหนาโพลีอิมิดนั้นพบว่าส่งผลให้ระยะกระดกในแนวตั้งของไมโครแอกซ์เอเตอร์ลดลง

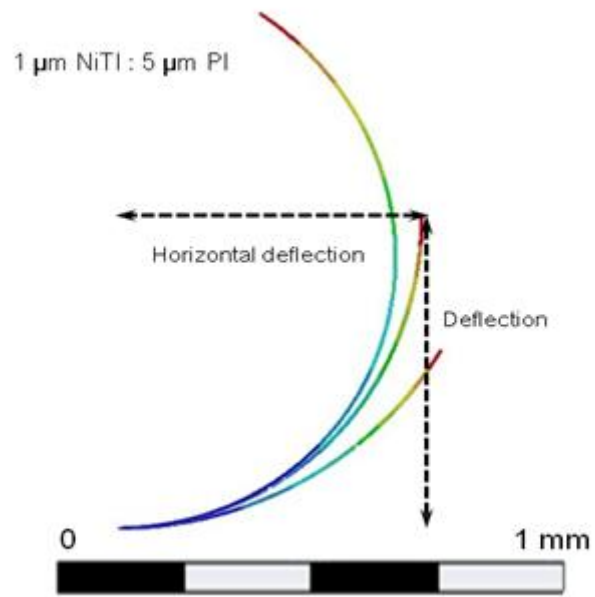
ผลการคำนวณระยะกระดกในแนวขวางของไมโครแอกซ์เอเตอร์ พบว่าไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่มีความหนาโพลีอิมิด 5 ไมโครเมตร ของทุกๆ ความกว้างและความยาวจะมีระยะกระดกในแนวขวางที่ไม่ต่างกันมากนัก อยู่ในช่วง 600-700 ไมโครเมตร เมื่อพิจารณาผลจากความกว้างต่อระยะกระดกในแนวขวางของไมโครแอกซ์เอเตอร์พบว่าความกว้างที่มากขึ้นระยะกระดกในแนวขวางของไมโครแอกซ์เอเตอร์จะลดลงและจะเห็นผลได้ชัดเจนก็ต่อเมื่อมีความหนาของโพลีอิมิด 5 ไมโครเมตร สำหรับความหนาโพลีอิมิด 10 และ 20 ไมโครเมตร นั้น ผลจากความกว้างจะน้อยมากหรือไม่แตกต่างกัน ในขณะที่ผลจากความยาวจะส่งผลต่อระยะกระดกในแนวขวางของไมโครแอกซ์เอเตอร์ให้มากขึ้น ผลจากความหนาโพลีอิมิดต่อระยะกระดกในแนวขวางของไมโครแอกซ์เอเตอร์ พบว่าที่ความหนาโพลีอิมิดมากขึ้นจะส่งผลให้มีระยะกระดกในแนวขวางมากขึ้นด้วย แต่ว่าการเปลี่ยนแปลงความหนาโพลีอิมิดต่อระยะกระดกในแนวขวางนี้จะมีผลน้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงความยาว ตัวอย่างการเปรียบเทียบความโค้งของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่มีความยาว 750, 1000 และ 1500 ไมโครเมตร กว้าง 100 ไมโครเมตร และมีความหนาโพลีอิมิด 5 ไมโครเมตร แสดงไว้ดังภาพที่ 2.10(ก) ซึ่งจะเห็นว่าไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่มีความยาวมากขึ้นจะมีความโค้งที่แตกต่างกันมากขึ้นและการเปรียบเทียบความโค้งสำหรับไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่มีความยาว 750, 1000 และ 1500 ไมโครเมตร กว้าง 100 ไมโครเมตร และมีความหนาโพลีอิมิด 10 ไมโครเมตร แสดงดังภาพที่ 2.10(ข) พบว่าความโค้งจะแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



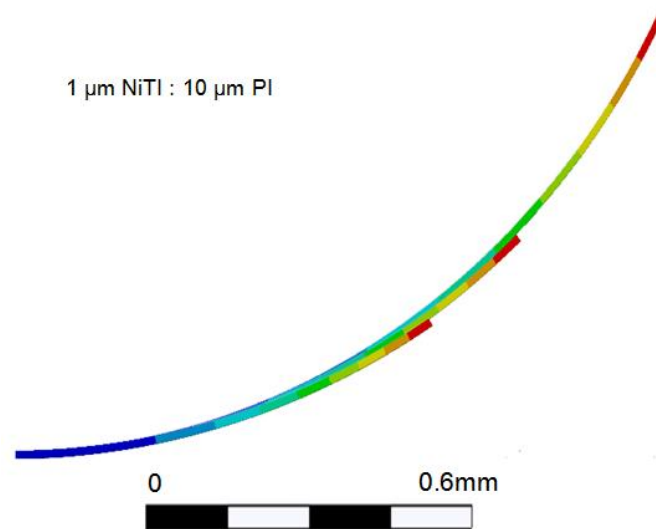
ภาพที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของความยาว (L) ความกว้าง (W) และความหนาของโพลีอิมิดที่มีผลต่อระยะกระดกในแนวตั้งสำหรับโพลีอิมิดและ NiTi



ภาพที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของความยาว (L) ความกว้าง (W) และความหนาของโพลีอิมิดที่มีผลต่อระยะกระดกในแนวขวางสำหรับโพลีอิมิดและ NiTi



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.10 การเปรียบเทียบความโค้งของไมโครแอกชูเอเตอร์สำหรับโพลีอิมิดและ NiTi

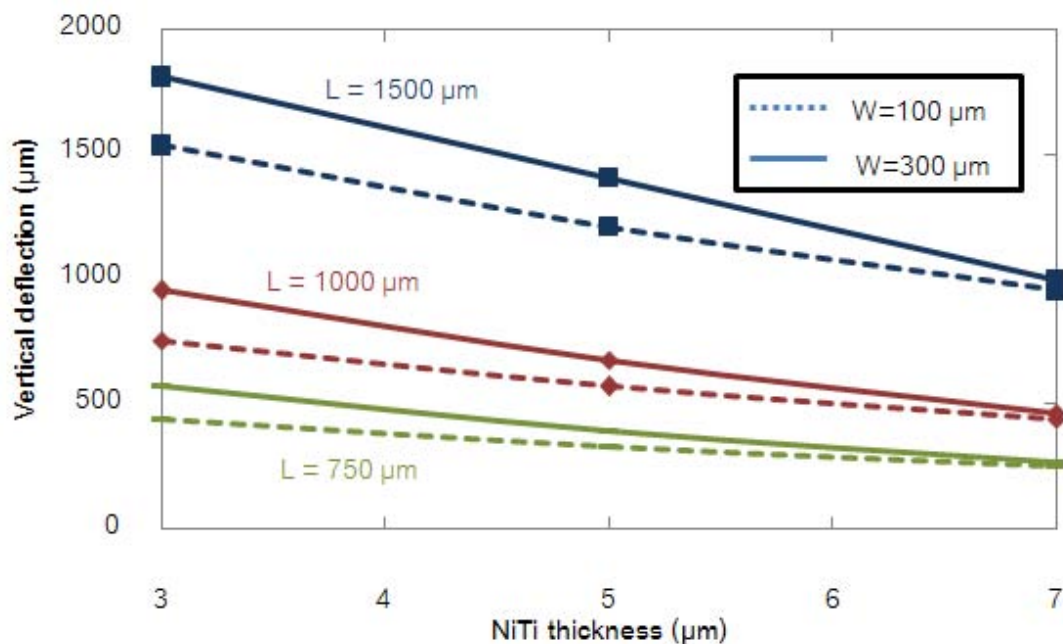
(ก) ความยาว 750, 1000 และ 1500 ไมโครเมตร ความกว้าง 100 ไมโครเมตร และความหนาโพลีอิมิด 5 ไมโครเมตร

(ข) ความยาว 750, 1000 และ 1500 ไมโครเมตร ความกว้าง 100 ไมโครเมตร และความหนาโพลีอิมิด 10 ไมโครเมตร

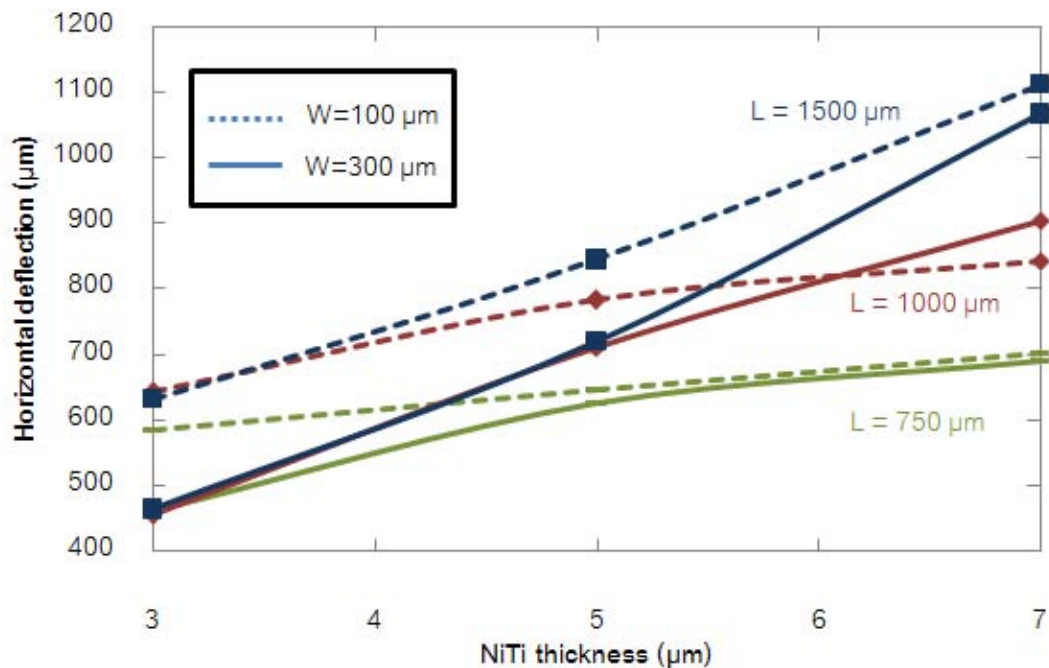
2.3.3.2 NiTi/DLC

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการคำนวณผลของระยะกระดกในแนวตั้งและระยะกระดกในแนวขวางของไมโครแอคชูเอเตอร์ที่ใช้วัสดุ NiTi/DLC ด้วย โดยไมโครแอคชูเอเตอร์มีความยาว 750, 1000 และ 1500 ไมโครเมตร ความกว้าง 100, 200 และ 300 ไมโครเมตร โดยมีความหนาของ DLC คงที่ 1 ไมโครเมตร และความหนาของ NiTi เป็น 3, 5 และ 7 ไมโครเมตร จากการคำนวณระยะกระดกของไมโครแอคชูเอเตอร์พบว่าความยาวที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ระยะกระดกของไมโครแอคชูเอเตอร์สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ไมโครแอคชูเอเตอร์มีความกว้างมากขึ้นจะส่งผลให้ระยะกระดกเพิ่มสูงขึ้นด้วยแต่ผลจากความกว้างจะเห็นผลได้น้อยลงเมื่อ NiTi มีความหนามากขึ้นและแทบจะไม่แตกต่างกันที่ NiTi มีความหนา 7 ไมโครเมตร สำหรับผลจากการเพิ่มความหนาของ NiTi จะทำให้ระยะกระดกลดลง ผลการคำนวณแสดงไว้ในภาพที่ 2.11

ในส่วนของการคำนวณระยะกระดกในแนวขวางของไมโครแอคชูเอเตอร์พบว่า ทั้งการเพิ่มความยาวหรือเพิ่มความหนาของ NiTi จะทำให้ระยะกระดกในแนวขวางของไมโครแอคชูเอเตอร์เพิ่มสูงขึ้น ในทางกลับกันหากเพิ่มความกว้างของไมโครแอคชูเอเตอร์จะส่งผลให้ระยะกระดกในแนวขวางของไมโครแอคชูเอเตอร์ลดลงดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.11 ความสัมพันธ์ของความยาว (L) ความกว้าง (W) และความหนาของ NiTi ที่มีผลต่อระยะกระดกในแนวตั้งสำหรับ DLC และ NiTi



ภาพที่ 2.12 ความสัมพันธ์ของความยาว (L) ความกว้าง (W) และความหนาของ NiTi ที่มีผลต่อระยะกระดกในแนวขวางสำหรับ DLC และ NiTi

2.3.3 การคำนวณหาแรงกระทำระหว่างไมโครแอคชูเอเตอร์กับ HGA

ในการคำนวณหาแรงที่กระทำระหว่างไมโครแอคชูเอเตอร์กับ HGA จะนำรูปร่างไมโครแอคชูเอเตอร์ที่ได้มาจากขั้นตอนของการคำนวณระยะกระดกในแนวตั้งและระยะกระดกในแนวขวางของไมโครแอคชูเอเตอร์ที่อุณหภูมิ 80°C หรือในหัวข้อ 2.3.2 เป็นรูปร่างเริ่มต้น โดยจะเลือกขนาดของไมโครแอคชูเอเตอร์ที่สามารถสอดเข้าไปในรูบอสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.3 มิลลิเมตรได้ ในการวิเคราะห์จะสร้างแขนของแอคชูเอเตอร์บนผนังของ HGA ไว้ดังภาพที่ 2.13 (ก) โดยทำการลดอุณหภูมิ ซึ่งแอคชูเอเตอร์จะคลายตัวออกและสร้างแรงกระทำบนผนังของ HGA แล้วจึงคำนวณแรงที่กระทำบริเวณ contact region โดยลดอุณหภูมิของไมโครแอคชูเอเตอร์จาก 80°C เป็น 25°C จะทำให้ NiTi เกิดการขยายตัวออกเนื่องจากไม่มีผลของ shape memory effect ในขณะที่เดียวกันโพลิอิมิดก็เกิดการหดตัวเนื่องจากอุณหภูมิลดลง

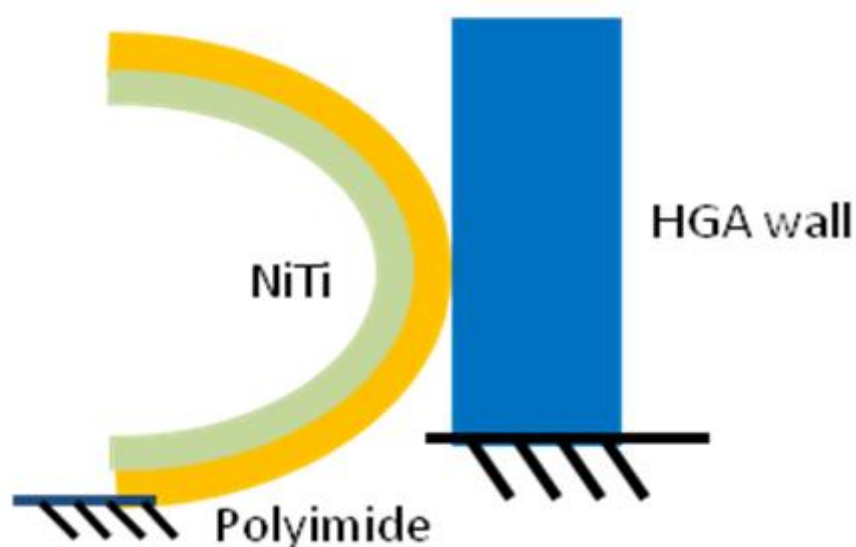
ในการคำนวณหาแรงที่กระทำจากไมโครแอคชูเอเตอร์ ที่มีขนาดความยาว 1000 ไมโครเมตร และกว้าง 100 ไมโครเมตร ที่เป็นวัสดุ NiTi/Polyimide โดยมีความหนา NiTi 1 ไมโครเมตร และโพลิอิมิดหนา 5 ไมโครเมตร NiTi/DLC ที่มีความหนาของ NiTi และ DLC เป็น 3 และ 1 ไมโครเมตร

ตามลำดับ อีกทั้งยังคำนวณแรงที่กระทำจากไมโครแอกชูเอเตอร์ที่เป็นวัสดุ NiTi/Cr ที่มีความหนา NiTi และ Cr เป็น 2 และ 4 ไมโครเมตร ตามลำดับ โดยคุณสมบัติของวัสดุกำหนดไว้เหมือนกับขั้นตอนการคำนวณระยะกระดกในแนวตั้งและระยะกระดกในแนวขวางของไมโครแอกชูเอเตอร์ที่กล่าวไปแล้วข้างต้น และการกำหนดค่าเริ่มต้นดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.5 บริเวณ contact region จะมีลักษณะของการกำหนด mesh แสดงไว้ดังภาพที่ 2.13(ข)

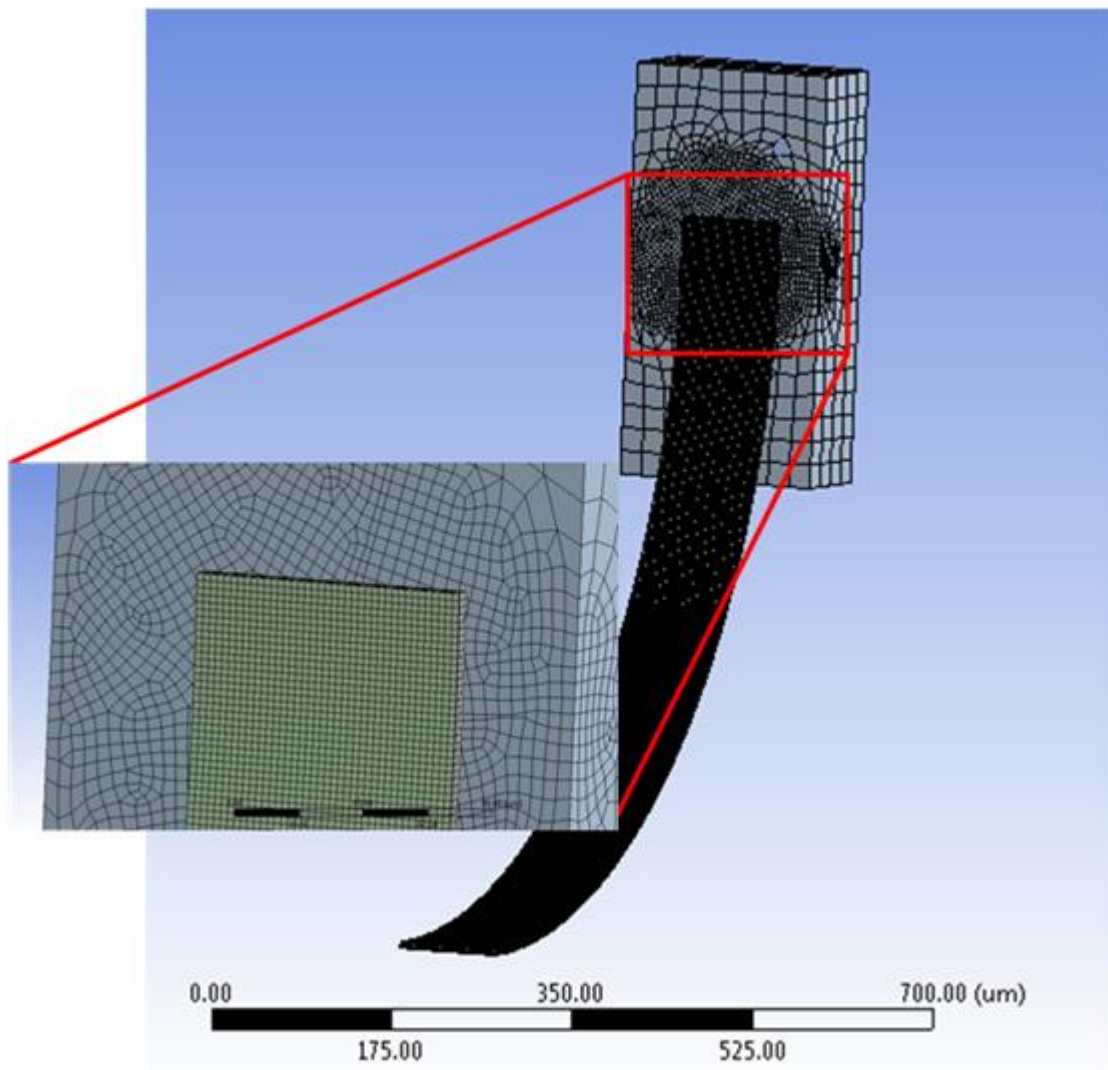
ตารางที่ 2.5 ค่าเริ่มต้นของการศึกษาแรงกระทำระหว่างไมโครแอกชูเอเตอร์และ HGA

Parameter	Condition
Environment temperature	80°C - 25°C
Mesh	Auto(Proximity and curvature)
	33,583 – 48,072* elements
Fixed support	One end of the beam
Contact region (NiTi/Polyimide)	Bonded
Contact region (actuator/HGA)	Frictionless
Large deflection	On

*ขึ้นอยู่กับกรณี



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.13 การคำนวณเพื่อหาแรงกระทำระหว่างไมโครแอกซ์เวเตอร์กับ HGA

(ก) ไดอะแกรมแสดงโดเมนการวิเคราะห์

(ข) โปรแกรมแสดง mesh ของบริเวณที่มีการสัมผัสกัน

เมื่อทำการคำนวณแรงที่กระทำแล้วจะพบว่าแรงที่ได้ต่อไมโครแอกซ์เวเตอร์ต่อแขนหนึ่งสำหรับไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่เป็นการประกบกันระหว่าง NiTi/Polyimide NiTi/DLC และ NiTi/Cr แสดงไว้ดังตารางที่ 2.6 พบว่าไมโครแอกซ์เวเตอร์ NiTi/Cr ที่มีความยาว 1000 ไมโครเมตร กว้าง 100 ไมโครเมตร มีความหนา NiTi และ Cr เป็น 1 และ 5 ไมโครเมตร ตามลำดับ เมื่อลดอุณหภูมิจาก 80°C เป็น 25°C จะสามารถออกแรงกระทำได้ 12.6 มิลลินิวตัน ในขณะที่ไมโครแอกซ์เว

เตอร์ที่ใช้วัสดุ NiTi/DLC ที่ยาว 1000 ไมโครเมตร กว้าง 100 ไมโครเมตร มีความหนา NiTi และ DLC เป็น 3 และ 1 ตามลำดับ เมื่อลดอุณหภูมิจาก 80°C เป็น 30°C จะออกแรงกระทำได้ 3.7 มิลลินิวตัน และสำหรับไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ใช้วัสดุ NiTi/polyimide ที่มีความยาว 1000 ไมโครเมตร กว้าง 100 ไมโครเมตร มีความหนา NiTi และโพลีอิมิดเป็น 1 และ 5 ไมโครเมตร ตามลำดับ เมื่อลดอุณหภูมิจาก 80°C เป็น 25°C จะสามารถออกแรงกระทำได้ 1.6 มิลลินิวตัน

เนื่องจากการเคลื่อนที่บนเครื่องจักรซึ่งอาจจะมีการหยุดหรือการเคลื่อนที่แบบกะทันหัน เช่น เมื่อหัวจับวิ่งมาชน stopper เป็นต้น ดังนั้นการที่ไมโครแอกซ์เอเตอร์สามารถออกแรงได้มาก ก็ยังเป็นผลดี ทว่าไมโครแอกซ์เอเตอร์จะต้องไม่ทำความเสียหายให้กับชิ้นงาน HGA ดังนั้นควรเลือกไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ออกแรงได้เพียงพอต่อการยก HGA เข้าไปประกอบกับ arm coil เท่านั้น จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าขนาดของแรงที่กระทำจะมีค่ามากกว่าน้ำหนักของ HGA (0.4 มิลลินิวตัน) ค่อนข้างมากแต่อย่างไรก็ตามยังมีความจำเป็นที่จะต้องออกแบบรูปร่าง และขนาดของไมโครแอกซ์เอเตอร์ให้มีลักษณะที่เหมาะสมสำหรับลักษณะการจับยึดแบบต่างๆ รวมทั้งความเร่งของการเคลื่อนที่ขนาดต่างๆ ต่อไป

ตารางที่ 2.6 ผลการคำนวณแรงกระทำระหว่างไมโครแอกซ์เอเตอร์กับ HGA

โครงสร้าง	ขนาด (ไมโครเมตร)	ความหนา (ไมโครเมตร)		อุณหภูมิ °C	แรง (มิลลินิวตัน)
	ยาว x กว้าง	NiTi	PI/DLC/Cr		
NiTi/Polyimide	1000 x 100	1	5	25	1.6
NiTi/DLC	1000 x 100	3	1	30	3.7
NiTi/Cr	1000 x 100	1	5	25	12.6

2.4 สรุปผลการศึกษา

ไมโครแอคชัวเอเตอร์ถูกออกแบบให้มีลักษณะคล้ายนิ้วมือของมนุษย์ที่เป็นโครงสร้างประกบกันระหว่างวัสดุ 2 ชนิด โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงความเครียดภายในวัสดุที่แตกต่างกันซึ่งจะส่งผลให้ไมโครแอคชัวเอเตอร์เกิดการโก่งงอขึ้น ความเครียดภายในวัสดุที่ต่างกันสามารถทำได้โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในโครงสร้างของ NiTi เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะทำให้เกิดความร้อน ซึ่ง NiTi เป็นโลหะผสมจำรูปก็จะเกิดการหดตัว ในขณะที่วัสดุอีกชนิดจะขยายตัวออกเนื่องจากการขยายตัวทางความร้อน ทำให้ไมโครแอคชัวเอเตอร์สามารถกระดกได้ นอกจากนี้ยังได้อาศัยโปรแกรม ANSYS ช่วยในการศึกษาระยะกระดกในแนวตั้งและระยะกระดกในแนวขวางของไมโครแอคชัวเอเตอร์เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 25°C เป็น 80°C ทำให้ทราบว่ามีความยาวของไมโครแอคชัวเอเตอร์ขนาดใดบ้างที่สามารถสอดเข้าไปในรูบอสของ HGA ได้

การศึกษาระยะกระดกทั้งสองแนวของไมโครแอคชัวเอเตอร์ที่อุณหภูมิ 80°C ที่ใช้วัสดุ NiTi/Polyimide ด้วยโปรแกรม ANSYS พบว่าระยะกระดกทั้งสองแนวของไมโครแอคชัวเอเตอร์จะสูงขึ้น ถ้าหากความยาวของไมโครแอคชัวเอเตอร์สูงขึ้น ความกว้างที่มากขึ้นจะส่งผลต่อระยะกระดกในแนวตั้งให้เพิ่มสูงขึ้นด้วยในขณะที่ระยะกระดกในแนวขวางของไมโครแอคชัวเอเตอร์บนระนาบจะลดลง แต่จะสามารถเห็นผลที่แตกต่างกันได้ชัดเจนเมื่อไมโครแอคชัวเอเตอร์มีความหนาโพลีอิมิต 5 ไมโครเมตร และระยะกระดกทั้งสองแนวของไมโครแอคชัวเอเตอร์ที่ความกว้างต่างๆ จะแตกต่างกันน้อยลงเมื่อไมโครแอคชัวเอเตอร์มีความหนาโพลีอิมิต 10 และ 20 ไมโครเมตร สำหรับผลจากความหนาโพลีอิมิตนั้นพบว่ายิ่งโพลีอิมิตหนาขึ้นจะทำให้ไมโครแอคชัวเอเตอร์งอได้น้อยลงจึงส่งผลโดยตรงต่อระยะกระดกทั้งสองแนวของไมโครแอคชัวเอเตอร์ซึ่งจะทำให้ระยะกระดกในแนวตั้งลดลงและระยะกระดกในแนวขวางเพิ่มขึ้น

การศึกษาระยะกระดกในแนวตั้งและระยะกระดกในแนวขวางของไมโครแอคชัวเอเตอร์ที่อุณหภูมิ 80°C ที่ใช้วัสดุ NiTi/DLC ด้วยโปรแกรม ANSYS พบว่ามีแนวโน้มของระยะกระดกในแนวตั้งและระยะกระดกในแนวขวางไปในทางเดียวกันกับไมโครแอคชัวเอเตอร์ที่ใช้วัสดุ NiTi/Polyimide ซึ่งความยาวที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะกระดกในแนวตั้งและระยะกระดกในแนวขวางของไมโครแอคชัวเอเตอร์สูงขึ้น ในขณะที่ความกว้างที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะกระดกในแนวตั้งเพิ่มขึ้นแต่ระยะกระดกในแนวขวางจะลดลง เมื่อพิจารณาผลจากการเพิ่มความหนาของ NiTi นั้นจะพบว่าความหนา NiTi ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะกระดกในแนวตั้งลดลงและระยะกระดกในแนวขวางเพิ่มขึ้นทุกกรณี

การศึกษาแรงกระทำระหว่างไมโครแอกซ์เอเตอร์และ HGA จะคำนวณไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่มีความยาว 1000 ไมโครเมตร กว้าง 100 ไมโครเมตร ทำจากวัสดุ NiTi 1 ไมโครเมตร/Polyimide 5 ไมโครเมตร และ NiTi 3 ไมโครเมตร/DLC 1 ไมโครเมตร และ NiTi 1 ไมโครเมตร/Cr 5 ไมโครเมตร ซึ่งสามารถที่จะสอดไปในรูบอสของ HGA เพื่อใช้งานประกอบนี้ได้ พบว่าแรงที่ได้จากไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่มีความยาว 1000 ไมโครเมตร และกว้าง 100 ไมโครเมตร และใช้วัสดุ NiTi/Cr มีความหนา 1 และ 5 ไมโครเมตร และ NiTi/DLC มีความหนา 3 และ 1 ไมโครเมตร และ NiTi/Polyimide มีความหนา 1 และ 5 ไมโครเมตร ตามลำดับ มีแรงกระทำเป็น 12.6 และ 3.7 และ 1.6 ตามลำดับ ซึ่งไมโครแอกซ์เอเตอร์สามารถออกแรงได้เพียงพอที่จะใช้ในการจับยึด HGA ที่มีมวล 40 มิลลิกรัมได้ ดังนั้นจากการศึกษาในส่วนนี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้งานไมโครแอกซ์เอเตอร์ทั้งในเรื่องขนาดและแรงกระทำสำหรับการจับ HGA นี้

บทที่ 3

การบวนการสร้างไมโครแอสเซมบลี

ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวทางการสร้างไมโครแอสเซมบลีซึ่งอาศัยเทคนิคการผลิตในระดับไมโครสเกล โดยในเบื้องต้นได้ใช้วัสดุระหว่าง NiTi และโพลีอิมิด แต่ด้วยข้อจำกัดเรื่องการนำเข้ามาจากต่างประเทศ ทำให้ต้องเปลี่ยนเป็นวัสดุอื่น นอกจากนั้นด้วยข้อจำกัดต่างๆ ในการผลิต ทำให้มีการใช้วัสดุหลากหลายประเภทในการศึกษานี้ ได้แก่ DLC โครเมียม และอลูมิเนียม ตามลำดับซึ่งรายละเอียดจะกล่าวถึงต่อไป

3.1 กระบวนการผลิตในระดับไมโครสเกล

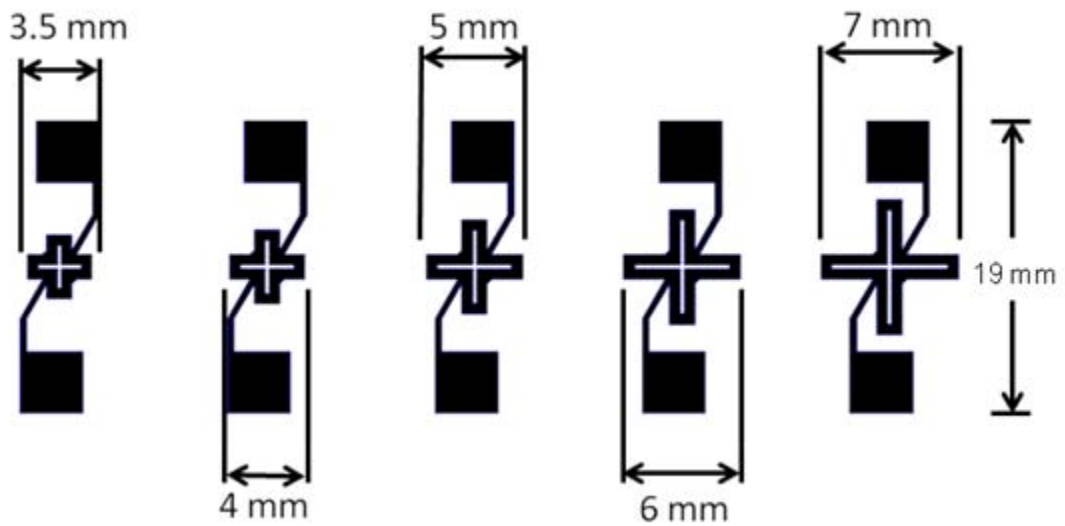
การผลิตในระดับไมโครสเกลคือการผลิตโครงสร้างขนาดเล็กในระดับไมโครเมตรหรือเล็กกว่าซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ในการสร้างอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น ไมโครเซนเซอร์ ไมโครแอสเซมบลี ฯลฯ การผลิตในระดับไมโครสเกลประกอบด้วยหลายกระบวนการและมีกระบวนการหลักที่จำเป็นต้องใช้ในงานวิจัยนี้ดังต่อไปนี้

3.1.1 Photolithography

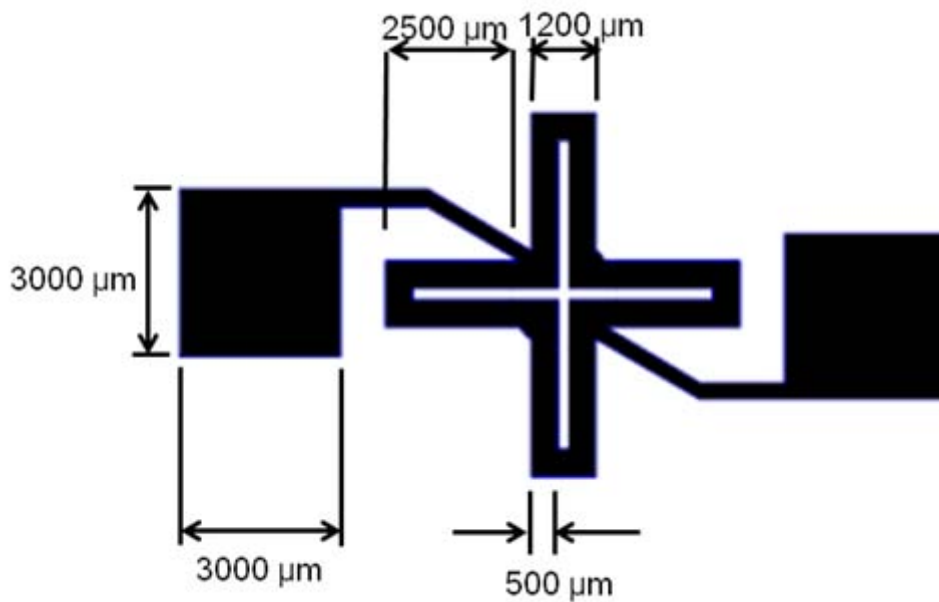
กระบวนการผลิตในระดับไมโครสเกลมีความสำคัญมากในงานวิจัยทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการสร้างรูปร่างวงจรที่มีขนาดเล็กมากๆ ลงบนชิ้นงาน เช่น แผ่นเวเฟอร์ โดยชิ้นงานจะต้องถูกเคลือบด้วยสารที่มีความไวและเกิดปฏิกิริยากับรังสีอัลตราไวโอเล็ตซึ่งเรียกว่าโฟโตเรซิส การสร้างลวดลายบนโฟโตเรซิสจะใช้แสงส่องผ่าน mask ที่วาดขึ้นตามรูปร่างที่ต้องการ ขั้นตอนนี้เรียกว่า UV exposure จากนั้นโฟโตเรซิสที่โดนแสงจะเปลี่ยนคุณสมบัติไปและสามารถละลายออกได้ด้วย developer ทำให้เกิดเป็นรูปร่างที่ต้องการ โฟโตเรซิสแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ ชนิดลบ (negative) และชนิดบวก (positive) ความแตกต่างระหว่างโฟโตเรซิส 2 ชนิดนี้คือเมื่อโฟโตเรซิสชนิดลบได้รับรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะเกิดปฏิกิริยาและไม่สามารถละลายออกได้ด้วย developer ในขณะที่ส่วนอื่นที่ไม่โดนแสงจะสามารถละลายออกได้ สำหรับโฟโตเรซิสชนิดบวกนั้นส่วนที่ได้รับรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะสามารถละลายออกได้ด้วย developer ในขณะที่ส่วนอื่นซึ่งไม่ได้รับแสงจะไม่สามารถละลายได้

สำหรับ Mask ที่ใช้ในกระบวนการ photolithography แสดงไว้ดังภาพที่ 3.1 ซึ่งจะมีขนาดต่างๆกันตามความยาวของแขนของไมโครแอสเซมบลีที่ต้องการ โดยจะมีความยาวของแขน

เรียงจากซ้ายไปขวา ดังนี้ 750, 1000, 1500, 2000, และ 2500 ไมโครเมตร และมีความกว้างของ ไมโครแอดซัวเอเตอร์ 500 ไมโครเมตรเท่ากันทั้งหมด



(ก)



(ข)

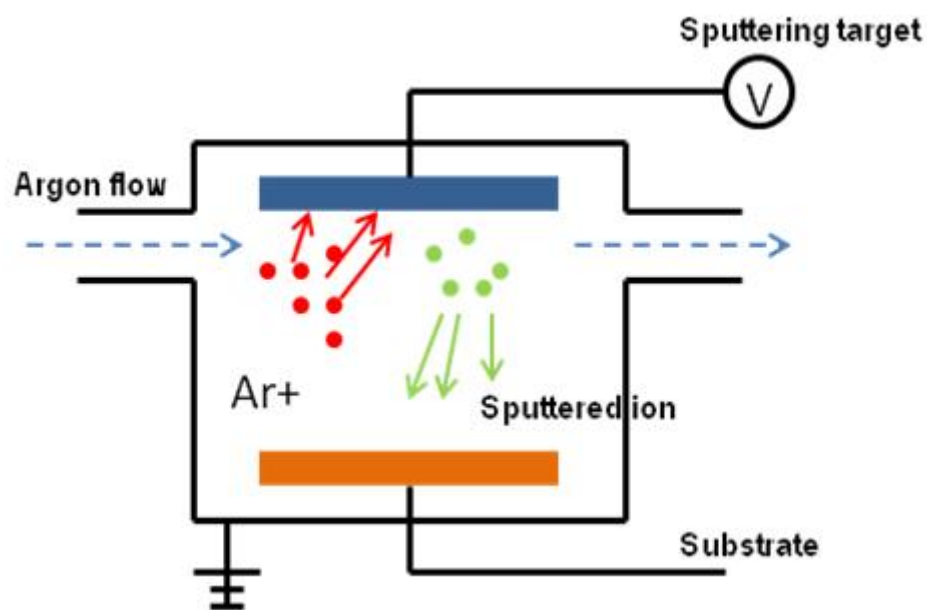
ภาพที่ 3.1 Mask ที่วาดขึ้นเพื่อใช้ในกระบวนการ photolithography

(ก) รูปแสดงแขนของแอดซัวเอเตอร์ที่มีความยาวต่างๆ

(ข) ภาพขยายของแอดซัวเอเตอร์ที่มีความยาว 2500 ไมโครเมตร

3.1.2 Sputtering

การสร้างฟิล์มบางของวัสดุด้วยการยิงประจุของอาร์กอนให้ไปชนกับ target ของวัสดุ จนทำให้อนุภาคของวัสดุหลุดออกจาก target และเคลื่อนที่ไปตามทิศทางสนามไฟฟ้าและเกาะกับชิ้นงานที่ต้องการสร้างฟิล์มบาง ดังภาพที่ 3.2 การสร้างฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริงจะต้องทำที่ความดันสุญญากาศต่ำมากๆ เพื่อให้ประจุของอาร์กอนมีพลังงานสูงพอจนเมื่อพุ่งไปชนกับ target แล้ว อนุภาคของ target จะหลุดออกไปเคลือบที่ชิ้นงานได้ ดังนั้นการสร้างผิวด้วยวิธีการสปัตเตอริงนี้จะใช้เวลาค่อนข้างนาน อีกทั้งยังเกิดความร้อนที่สูงเนื่องจากภายในเครื่องสปัตเตอริงเป็นสุญญากาศดังนั้นการถ่ายเทความร้อนจะเป็นไปได้ยาก ชิ้นงานที่ไม่สามารถทนความร้อนได้อาจจะเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นการสร้างฟิล์มบางด้วยวิธีการสปัตเตอริงนั้นจึงมีข้อจำกัดเนื่องจากชิ้นงานที่จะนำมาเคลือบผิวนั้นจะต้องทนสภาวะภายในเครื่องสปัตเตอริงได้ดี

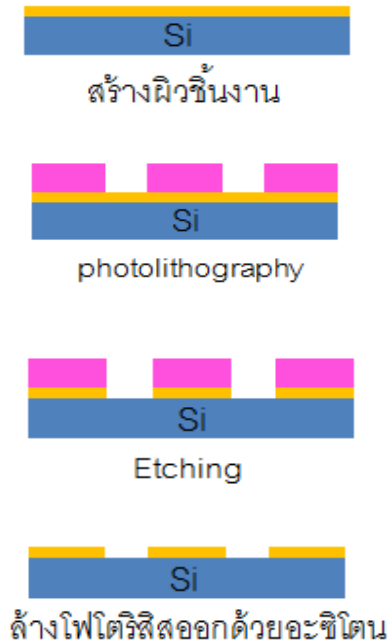


ภาพที่ 3.2 ลักษณะภายในเครื่อง sputtering และหลักการทำงาน

3.1.3 Etching

การสร้างรูปร่างของชิ้นงานโดยส่วนใหญ่แล้วจะเป็นขั้นตอนที่ต่อเนื่องมาจากกระบวนการ photolithography กล่าวคือโฟโตริซิสที่ผ่านการ develop แล้วจะทำให้เกิดเป็นลวดลายขึ้น ซึ่งบางส่วนของโฟโตริซิสจะปิดทับชิ้นงานวัสดุบางส่วนอยู่คล้ายหน้ากาก เมื่อนำชิ้นงานไปแช่ในสารเคมีกัดวัสดุจะทำให้สารเคมีสามารถเข้าไปกัดวัสดุที่ไม่มีโฟโตริซิสปกคลุมอยู่ได้ ในขณะที่

สารเคมีไม่สามารถกัดวัสดุในส่วนที่มีโฟโตริสซิสปิดทับอยู่ เมื่อล้างโฟโตริสซิสออกด้วยอะซิโตนก็จะได้รูปร่างของวัสดุตามต้องการ ขั้นตอนของกระบวนการแสดงไว้ดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 ขั้นตอนตามกระบวนการ etching

3.1.4 Lift-off

การสร้างผิวของโฟโตริสซิสให้มีลักษณะเป็นร่องหรือช่องว่างตามรูปแบบที่ต้องการทำให้วัสดุอื่นที่สร้างทับลงไปนั้นแทรกอยู่ในช่องว่างของโฟโตริสซิสนี้ และเมื่อทำลายโฟโตริสซิสออกด้วยอะซิโตน วัสดุที่อยู่ด้านบนโฟโตริสซิสจะหลุดออกไปพร้อมกัน ในขณะที่วัสดุอีกส่วนหนึ่งจะเหลือเป็นโครงสร้างอยู่ ซึ่งวิธีการนี้จะสามารถสร้างรูปร่างของวัสดุที่ต้องการโดยที่ไม่จำเป็นต้องนำชิ้นงานไปแช่ในสารเคมี ขั้นตอนกระบวนการแสดงไว้ดังภาพที่ 3.4

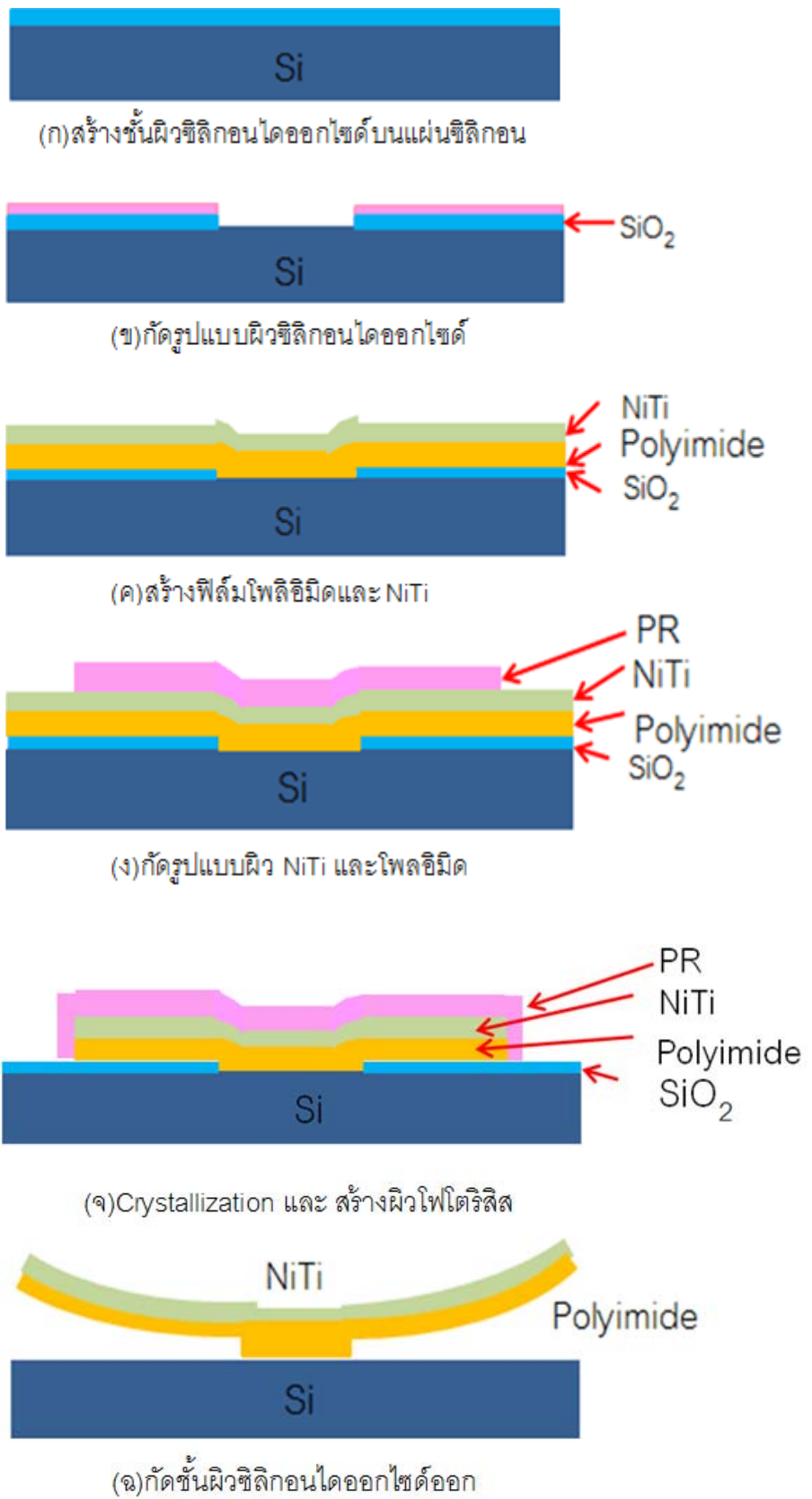
ในการสร้างชิ้นงานในงานวิจัยนี้ได้มีการใช้เทคนิคหลายอย่างประกอบกัน โดยได้นำเสนอวิธีการหลัก 2 ประเภทคือ ประเภทแรกเป็นการสร้างชิ้นงานบนแผ่นซิลิกอนโดยการอาศัยเทคนิค lift off และใช้ sacrificial layer เพื่อทำให้เกิดโครงสร้างคานแบบลอยตัว และวิธีการที่สองเป็นการสร้างโครงสร้างแบบลอยตัวอิสระจากวัสดุอื่น ในรายงานฉบับนี้จะรายงานวิธีการสร้างตามลำดับที่ได้พัฒนาขึ้น



ภาพที่ 3.4 ขั้นตอนกระบวนการ lift-off

3.2 ขั้นตอนการสร้างแบบที่หนึ่ง

วิธีการนี้ใช้วัสดุ NiTi และโพลีอิมิดประกอบเข้าด้วยกัน โดยเริ่มแรกจะสร้างฟิล์มบางของ sacrificial layer (SiO_2) ลงบน silicon substrate จากนั้นจึงสร้างรูปร่างให้มีลักษณะเป็นฐานของ ไมโครแอกซ์เอเตออร์ ขั้นตอนต่อไปเคลือบผิวโพลีอิมิด (PI-5878G) ด้วยเครื่องสปินเนอร์เพื่อป้องกันการเหนียวน้ำ ESD และป้องกันการอุณหภูมิที่สูงเกินไปขึ้นงาน จากนั้นจึงสเปคเตอร์เพื่อสร้างฟิล์มบางของโลหะผสมจำรูป NiTi เมื่อมีชั้นของ NiTi และโพลีอิมิดแล้ว ต่อไปจึงสร้างรูปร่างของไมโครแอกซ์เอเตออร์ให้มีลักษณะเป็นขดลวดเพื่อใช้ในการปล่อยกระแสไฟฟ้าด้วยกระบวนการ photolithography และการกัดด้วยสารเคมี หลังจากนั้นนำโฟโตริซิสออกแล้วเคลือบโพลีอิมิดอีกครั้งเพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์บน NiTi ในกระบวนการ crystallization ที่ใช้อุณหภูมิสูงถึง 500°C ดังนั้นโพลีอิมิดที่ทำการเคลือบผิวไปก่อนหน้านี้ต้องมีความสามารถในการทนความร้อนที่สูง 500°C ได้ ซึ่งตรงกับคุณสมบัติของ PI-5878G และหลังจากการ crystallization นี้จะต้องเคลือบขึ้นงานด้วยโฟโตริซิสอีกครั้งเพื่อสร้างรูปร่างและปกป้องขึ้นงานจากการถูกสารเคมีกัดกร่อน ในขั้นตอนสุดท้าย คือการนำ sacrificial layer ออกด้วยสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกและน้ำด้วยอัตราส่วน 1:10 ซึ่งจะทำให้ไมโครแอกซ์เอเตออร์อยู่ในสถานะพร้อมทำงาน ขั้นตอนการสร้างตามกระบวนการที่ผ่านมาแสดงดังภาพที่ 3.5 สำหรับรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนจะอธิบายต่อไป



ภาพที่ 3.5 ขั้นตอนการผลิตไมโครแอกชูเอเตอร์แบบที่หนึ่ง

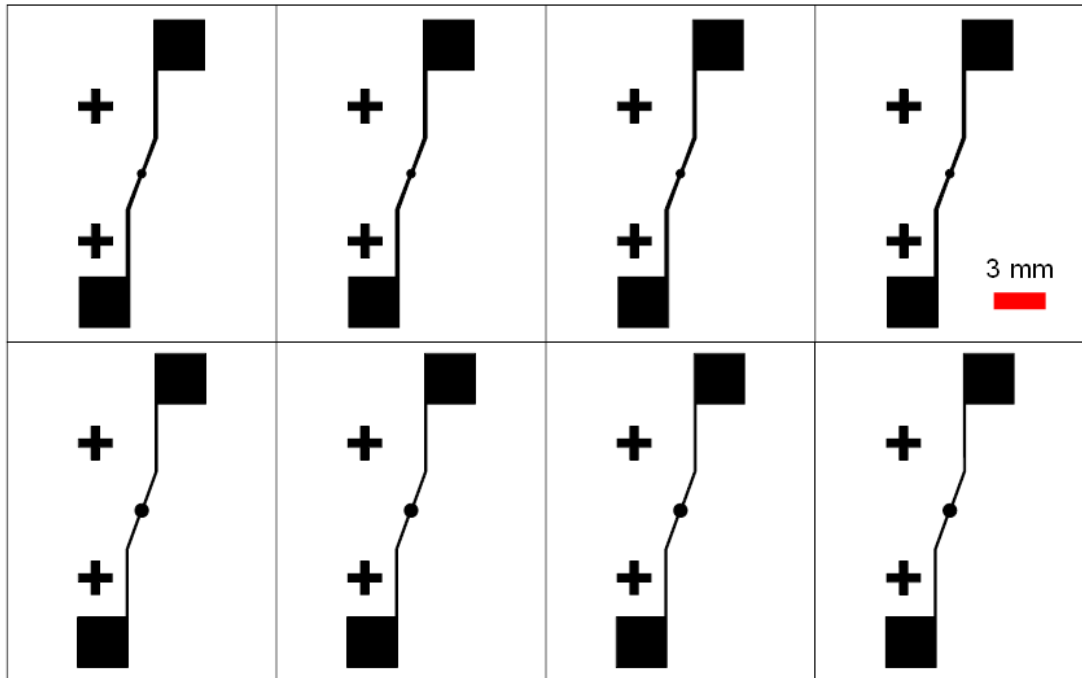
3.2.1 การสร้างชั้นผิวซิลิกอนไดออกไซด์บนแผ่นซิลิกอน

แผ่นซิลิกอนที่มีซิลิกอนไดออกไซด์เคลือบผิวอยู่เป็นวัสดุที่ใช้อยู่ทั่วไปในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นจึงมีผู้ผลิตหลายรายผลิตแผ่น wafer ที่มีซิลิกอนไดออกไซด์อยู่เพื่อจำหน่ายให้แก่โรงงานอุตสาหกรรมซึ่งได้มาตรฐานทั้งความสะอาดและมีความหนาของซิลิกอนไดออกไซด์เท่ากันทั่วทั้งแผ่น ดังนั้นในขั้นตอนนี้จึงดำเนินการสั่งซื้อแผ่นซิลิกอนที่สร้างชั้นผิวซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีความหนา 1 ไมโครเมตร มาใช้ในงานวิจัยนี้

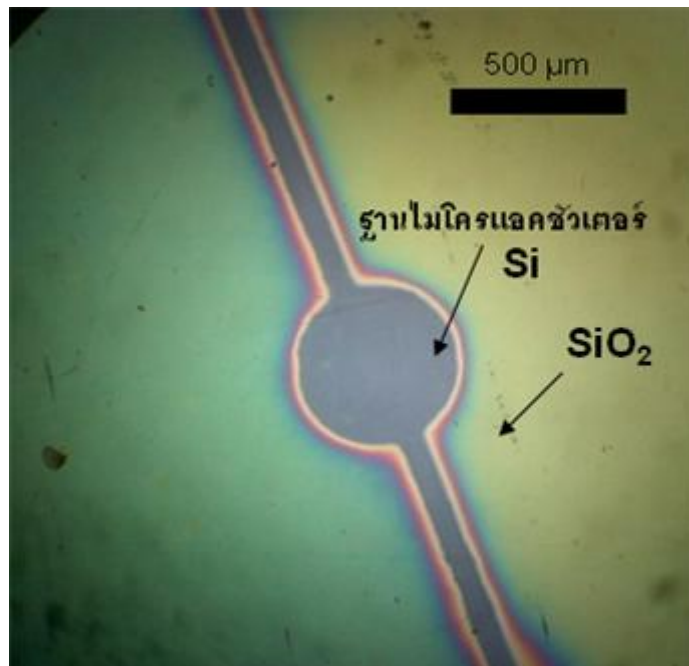
3.2.2 การกัดซิลิกอนไดออกไซด์

ซิลิกอนไดออกไซด์สามารถถูกกัดได้ด้วยสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ผสมกับน้ำ (H₂O) ในอัตราส่วน 1:10 [32] โดยต้องเคลือบผิวและสร้างรูปแบบของ SU-8 photoresist mask ด้วยวิธี photolithography มาเคลือบเพื่อให้มีการกัดซิลิกอนไดออกไซด์เฉพาะในส่วนของที่ต้องการ โดยขั้นตอนของการสร้างชั้นผิว SU-8 เริ่มต้นด้วยการเคลือบผิวของ SU-8 บนเครื่องสปินเนอร์ที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที นาน 15 วินาที จากนั้นเร่งความเร็วเป็น 4000 รอบต่อนาที นาน 45 วินาที จะได้ความหนาของ SU-8 ประมาณ 10 ไมโครเมตร หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบ SU-8 แล้วไปอบที่อุณหภูมิ 95°C นาน 2 นาที (pre-bake) บน hot plate แล้วจึงนำไปฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 25 วินาที เนื่องจาก SU-8 เป็นโฟโตรีซิสแบบลบ ทำให้ส่วนที่ไม่โดนรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะสามารถล้างออกได้ด้วย developer ซึ่งก่อนการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตชิ้นงาน SU-8 จะต้องถูกประกบกับ mask ที่วาดขึ้นเพื่อสร้างรูปร่างดังภาพที่ 3.6 หลังจากขั้นตอนของการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตนำชิ้นงานไปอบอีกครั้งที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 2 นาที (post-bake) รอให้ชิ้นงานเย็นลงแล้วนำไปแช่ใน developer เป็นเวลา 2 นาที เมื่อได้รูปร่างของ SU-8 แล้ว นำไปล้างด้วยไอโซโพรพานอล (IPA) น้ำ DI และเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนตามลำดับ เมื่อได้ SU-8 photoresist mask แล้วสามารถกัดชั้นผิวซิลิกอนไดออกไซด์ได้ด้วยกรดไฮโดรฟลูออริกผสมกับน้ำในอัตราส่วน 1:10 และได้ชิ้นงานดังภาพที่ 3.7

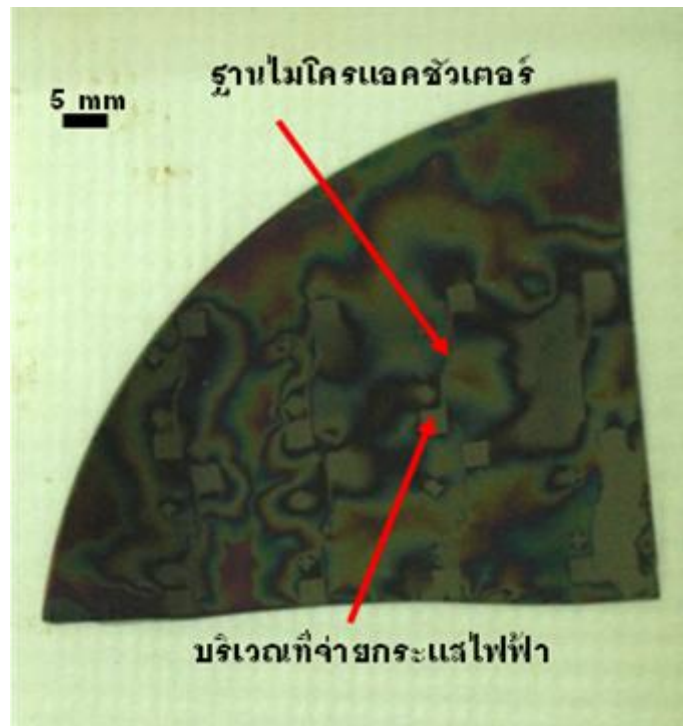
จากการกัดชั้นผิวซิลิกอนไดออกไซด์พบว่า SU-8 หลุดลอกจากชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ ซึ่งทำให้กรดไฮโดรฟลูออริกสามารถแทรกเข้าไปในชั้นรอยต่อระหว่าง SU-8 กับ ซิลิกอนไดออกไซด์และเกิดการกัดซิลิกอนไดออกไซด์ในส่วนที่ไม่ต้องการออกไปด้วย ซึ่งเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นนี้มีชื่อเรียกว่า undercut ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องเลือกวัสดุที่สามารถถูกกัดได้เร็ว เช่น ทองแดง แทนซิลิกอนไดออกไซด์เพื่อป้องกันการเกิด undercut เนื่องจากไม่จำเป็นต้องแช่ชิ้นงานในสารละลายไว้นานเกินไปอีกทั้งยังมีการยึดเกาะระหว่างโฟโตรีซิสกับทองแดงดีด้วย



ภาพที่ 3.6 Mask ที่วาดขึ้นเพื่อสร้างรูปร่างของ SU-8



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.7 ชิ้นงานหลังการกัดชั้นผิวซิลิกอนไดออกไซด์

(ก) ภาพถ่ายใต้กล้องไมโครสโคปแสดงส่วน Si และ SiO₂

(ข) ชิ้นงานที่ผ่านการกัดออกไซด์มีสีที่ไม่สม่ำเสมอแสดงถึงการยึดเกาะของ SU-8 ไม่ดี

3.2.3 การสร้างผิวโพลีอิมิต และ NiTi

หลังขั้นตอนของการสร้างผิวโพลีอิมิตด้วยเครื่องสปิเนนเนอร์แล้ว จะเป็นการสร้างชั้นผิวของ NiTi โดยวิธี sputtering โดยขั้นตอนทั้งหมดนี้จะเกิดขึ้นในเครื่องสปิตเตอร์ที่เป็นสุญญากาศต่ำมาก และในขั้นตอนของการสร้างผิว NiTi นี้ต้องมีสุญญากาศก่อนการสปิตเตอร์ต่ำกว่า 1×10^{-5} มิลลิบาร์ ซึ่งในความดันที่กล่าวไปนั้นมีชื่อเรียกว่า base pressure จากนั้นจะปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าไปให้ความดันประมาณ 3×10^{-3} มิลลิบาร์ โดยปรับอัตราการไหลของอาร์กอนซึ่งจะมีค่าประมาณ 10 sccm เมื่อได้สภาวะในเครื่องสปิตเตอร์ที่เหมาะสมดังกล่าวแล้ว หลังจากนั้นจะเป็นขั้นตอนทำความสะอาดชิ้นงานที่จะสร้างผิวด้วยวิธี RF clean โดยใช้กำลัง 75 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำความสะอาด NiTi target ด้วย DC sputtering ที่ 0.2 แอมแปร์เป็นเวลา 2 นาที แล้วจึงเปิด shutter เพื่อเคลือบผิว NiTi บนชิ้นงานโดยใช้เวลาในการสปิตเตอร์ประมาณ 35 นาที และจะได้ความหนาของ NiTi ประมาณ 1 ไมโครเมตร

3.2.4 การกัดรูปแบบผิว NiTi และโพลีอิมิด

หลังจากสร้างชั้น NiTi ด้วยวิธีการ sputtering แล้วต่อไปเป็นการกัดชั้น NiTi และโพลีอิมิดให้มีลักษณะคล้ายขดลวดเพื่อเป็นทางผ่านกระแสไฟฟ้า โดยต้องเคลือบผิวด้วยโฟโตริซิสเช่นเดียวกับขั้นตอนของการกัดซิลิกอนไดออกไซด์เพื่อให้สารเคมีกัดเฉพาะส่วนที่ต้องการเท่านั้น โดยสารเคมีที่ใช้ในการกัด NiTi จะใช้กรดไนตริก:กรดไฮโดรฟลูออริก:น้ำ ในอัตราส่วน 1:1:20 ซึ่งการกัด NiTi ที่มีความหนา 1 ไมโครมิเมตร จะใช้เวลา 1 นาที 30 วินาทีและหลังจากกัด NiTi เสร็จแล้วขั้นตอนต่อไปคือการกัดโพลีอิมิดให้มีรูปร่างคล้ายขดลวดเช่นเดียวกันโดยทั่วไปซึ่งโพลีอิมิดสามารถกัดได้ด้วยสารละลาย developer เหมือนกับโฟโตริซิสทั่วไป

3.2.5 Crystallization และการสร้างผิวโฟโตริซิส

การ crystallization คือการนำชิ้นงานไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงเพื่อคงการจำรูปร่างของวัสดุ และทำให้วัสดุมีคุณสมบัติ shape memory effect โดยทั่วไปแล้วการนำชิ้นงานโลหะไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงที่ความดันบรรยากาศจะทำให้เกิดออกไซด์ของโลหะได้ง่าย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องป้องกันการเกิดออกไซด์บนผิว NiTi ซึ่งหากเกิดออกไซด์จะทำให้วัสดุเปราะลงได้ ในขั้นตอนนี้การให้ความร้อนควรจะให้ความร้อนในขณะที่วัสดุอยู่ในสถานะสุญญากาศที่ต่ำมากๆ ในระดับ 2×10^{-5} Pa (base pressure) แต่ถ้าหากเตาอบไม่สามารถทำ ความดันสุญญากาศได้ต่ำมากในระดับที่กล่าวไปแล้ว จึงต้องเคลือบผิว NiTi ด้วยวัสดุที่เกิดออกไซด์ได้ยาก เช่น โฟโตริซิส โดยจะต้องเป็นโฟโตริซิสชนิดที่ทนความร้อนได้และพบว่าโพลีอิมิด PI-5878G สามารถทนความร้อนได้ดี อย่างไรก็ตามสามารถใช้วัสดุชนิดอื่นๆทดแทนได้ เช่น ทองแดง อลูมิเนียม หรือ DLC ซึ่งสามารถป้องกันการเกิดออกไซด์บนผิว NiTi ได้เช่นเดียวกัน

3.2.6 การกัดผิวซิลิกอนไดออกไซด์

ในขั้นตอนสุดท้ายเพื่อให้ไมโครแอคชูเอเตอร์ทำงานได้ต้องกัดผิวของซิลิกอนไดออกไซด์ออกเพื่อให้ไมโครแอคชูเอเตอร์หลุดจากฐานและสามารถขยับไปมาได้

3.2.7 สรุปปัญหาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการสร้างแบบที่หนึ่ง

นอกจากปัญหาเรื่องการสังชื่อโพลีอิมิดแล้วยังมีปัญหาจากการกัดซิลิกอนไดออกไซด์ในส่วนที่ไม่ต้องการ ซึ่งเกิดจากการยึดติดระหว่าง SU-8 และซิลิกอนไดออกไซด์ไม่แน่น ปัญหานี้สามารถแก้ได้ 2 วิธีคือ เปลี่ยนการใช้ SU-8 เป็นโฟโตริซิสชนิดอื่นแทน หรือเปลี่ยนซิลิกอนไดออกไซด์เป็น

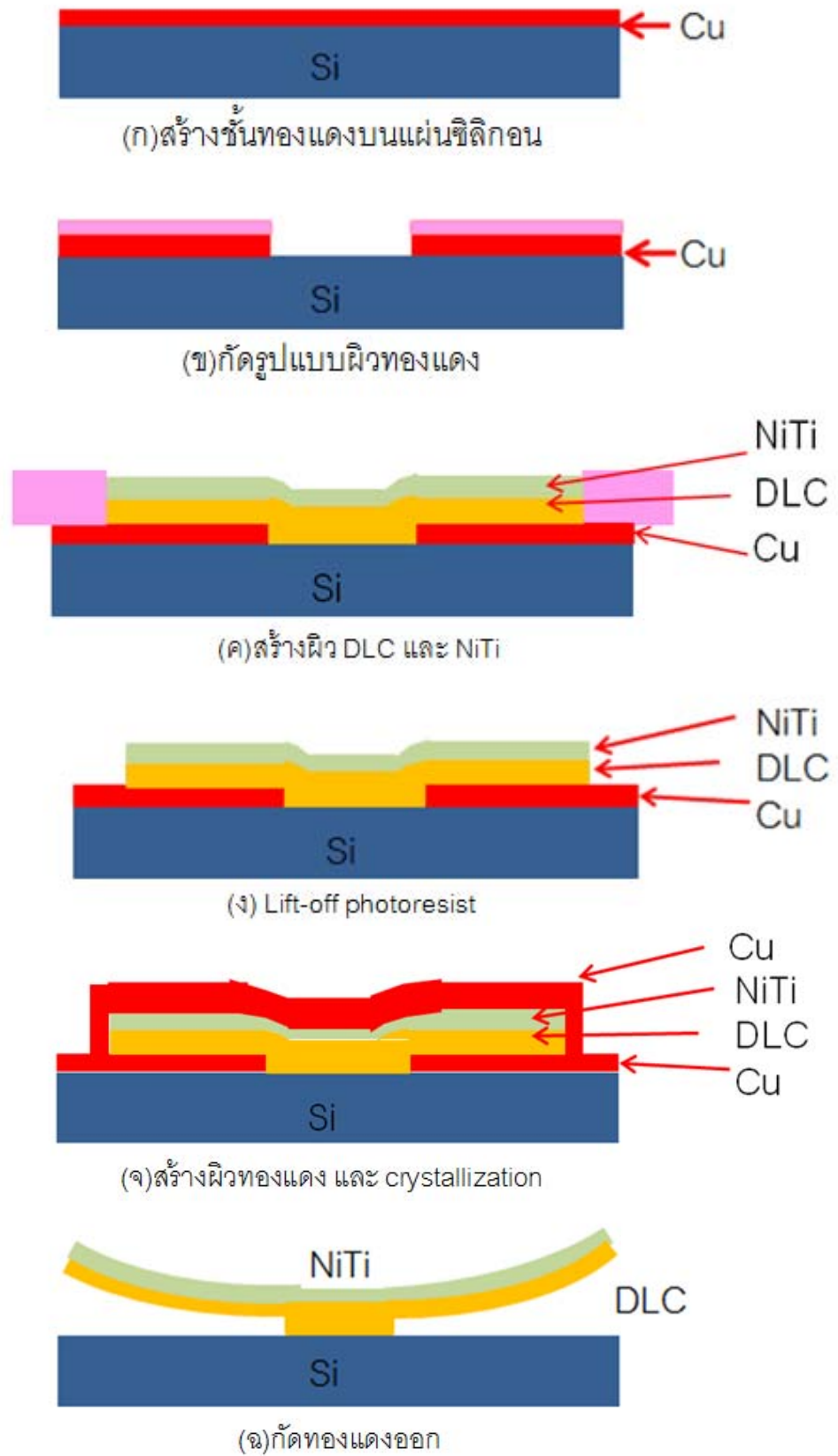
วัสดุอื่นที่มีอัตราการกัดที่เร็วกว่า ซึ่งจะใช้เวลาในการแซ่ชิ้นงานในสารละลายน้อยลง ทำให้ไม่มี undercut เกิดขึ้น สำหรับปัญหาเรื่องโพลิอิมิดจะแก้ไขด้วยการใช้วัสดุอื่นทดแทน

3.3 ขั้นตอนการสร้างแบบที่สอง

จากขั้นตอนของการสร้างแบบที่หนึ่งได้พบปัญหาต่างๆซึ่งจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนแก้ไข ขั้นตอนการสร้าง ในเบื้องต้นได้มีการเปลี่ยนโพลิอิมิดมาใช้ DLC โดยมีขั้นตอนการสร้างแบบที่สอง ดังนี้ ขั้นตอนแรกจะสร้างผิวทองแดงที่มีความหนาประมาณ 1 ไมโครเมตร ด้วยวิธีสปัตเตอริง จากนั้นจะสร้างรูปร่างของทองแดงเพื่อเป็นฐานของไมโครแอกซ์ฮอเตอร์ซึ่งสามารถกัดทองแดงได้ด้วยน้ำยาที่มีส่วนผสมของ กรดฟลูออริก:กรดไนตริก:กรดแอสติค:น้ำDI ในอัตราส่วน 16:2:1:1 เมื่อได้ฐานของไมโครแอกซ์ฮอเตอร์แล้วจะทำ photolithography โดยมีรูปร่างของโครงสร้างไมโครแอกซ์ฮอเตอร์ ต่อไปจะสร้างผิวของชั้น DLC และ NiTi ด้วยวิธีสปัตเตอริง จากนั้นจะ lift-off โฟโตเรซิสซึ่งจากขั้นตอนนี้จะได้รูปร่างของชั้น DLC และชั้น NiTi ที่มีลักษณะเป็นขดลวดตามโครงสร้างของไมโครแอกซ์ฮอเตอร์ จากนั้นจะสร้างผิวทองแดงทับอีกชั้นเพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์บนผิว NiTi แล้วจึงนำไปอบที่ 500°C และขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการกัดทองแดงออกเพื่อให้ไมโครแอกซ์ฮอเตอร์พร้อมทำงาน ขั้นตอนการสร้างแบบที่สองแสดงไว้ดังภาพที่ 3.8

3.3.1 การสร้างผิวทองแดง

การสร้างผิวทองแดงเพื่อใช้ทดแทนซิลิกอนไดออกไซด์จะสร้างโดยวิธีสปัตเตอริง ซึ่งในขั้นตอนแรกจะเป็นการทำทำความสะอาดผิวหน้าของชิ้นงานที่ต้องการเคลือบผิวด้วย RF clean ด้วยกำลัง 75 วัตต์ และใช้เวลาในการทำทำความสะอาดทั้งหมด 5 นาที หลังจากนั้นเปลี่ยนเป็น DC sputtering เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าของ Cu target โดยใช้กระแสไฟฟ้า 0.2 แอมแปร์ เป็นเวลา 2 นาที แล้วจึงเปิดชัตเตอร์เพื่อสร้างฟิล์มบางของทองแดงบนชิ้นงานซึ่งในขั้นตอนนี้จะใช้เวลาประมาณ 8 นาที และจะให้ความหนาของทองแดงประมาณ 1 ไมโครเมตร



ภาพที่ 3.8 ขั้นตอนการสร้างแบบที่สอง

3.3.2 การกัดรูปร่างผิวทองแดง

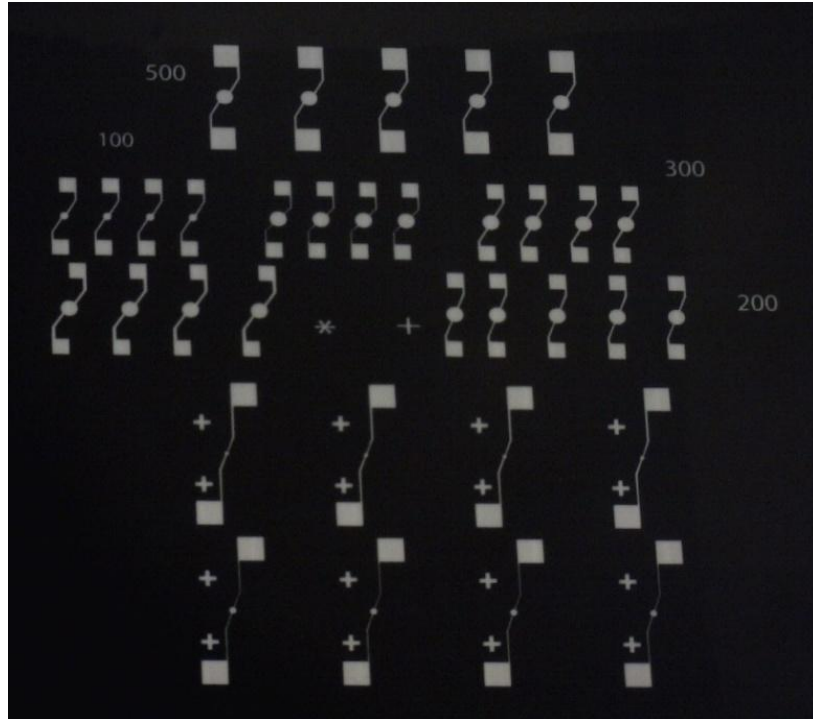
หลังจากการเคลือบผิวทองแดงที่หนา 1 ไมโครเมตรแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการกัดรูปร่างทองแดงเพื่อเป็นฐานของไมโครแอดซิวเอเตอร์ ขั้นตอนแรกจะเคลือบผิวโฟโตริสโอสลงบนผิวทองแดง โดยเปลี่ยนจาก SU-8 เป็น AZ4620 แทน เนื่องจากในขั้นตอนของการล้างโฟโตริสโอสสามารถทำได้ง่ายกว่า SU-8 โดยจะเคลือบโฟโตริสโอสด้วยเครื่องสปินเนอร์ที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 20 นาที แล้วฉายแสงอุลตราไวโอเลตลงบนโฟโตริสโอส โฟโตริสโอสชนิด AZ4620 เป็นโฟโตริสโอสแบบบวกทำให้ส่วนที่โดนแสงอุลตราไวโอเลตสามารถล้างออกได้ด้วยสารละลาย developer ซึ่งตรงกันข้ามกับ SU-8 ซึ่งเป็นโฟโตริสโอสแบบลบทำให้ต้องวาด mask ในลักษณะที่ต่างออกไปดังภาพที่ 3.9 ระยะเวลาที่ใช้ในการฉายแสงประมาณ 1 นาที 30 วินาที จากนั้นนำไปแช่ในสารละลาย developer เพื่อล้างโฟโตริสโอสในส่วนที่โดนแสงออก แล้วจึงนำไปแช่ในสารละลาย Al etch A ซึ่งเป็นสารเคมีที่ใช้กัดอลูมิเนียมแต่มีความสามารถในการกัดทองแดงได้ด้วยอัตราการกัด >2900 นาโนเมตร/นาที [32] โดย Al etch A นี้มีส่วนผสมของกรดฟอสฟอริก:กรดแอสติติก:กรดไนตริก:น้ำ ในอัตราส่วน 16:1:1:2 การกัดทองแดงด้วยสารละลาย Al etch A จำเป็นต้องทำที่อุณหภูมิ 50°C เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำลาย ขั้นตอนนี้ใช้เวลาประมาณ 15-25 วินาที ทองแดงจะถูกกัดออกและสร้างเป็นฐานของไมโครแอดซิวเอเตอร์ จากนั้นล้างชิ้นงานด้วยอะซิโตน ไอโซโพรพานอล และน้ำ แล้วจึงเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนจะได้ชิ้นงานในขั้นตอนนี้ดังภาพที่ 3.10

3.3.3 การสร้างผิว DLC และ NiTi

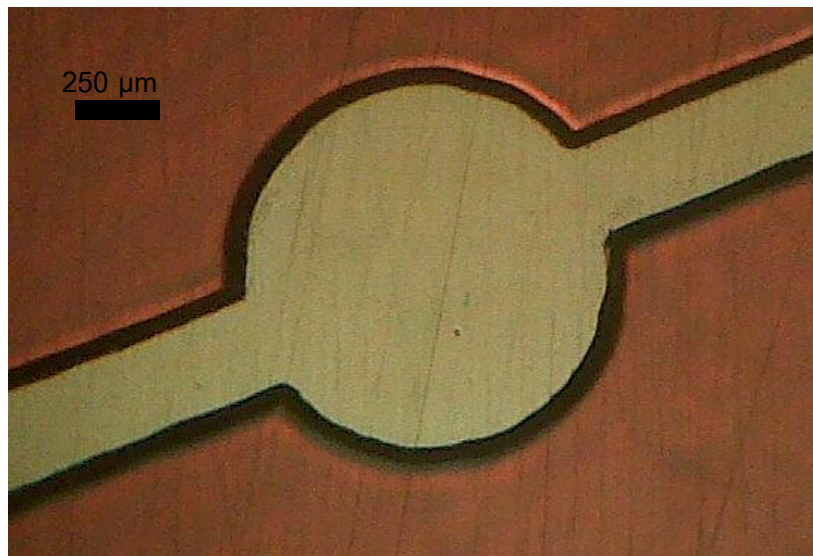
จากปัญหาในการสั่งซื้อโพลีอิมิดทำให้ต้องเลือกใช้ DLC ทดแทน และเพื่อกระบวนการสร้างง่ายขึ้น จะอาศัยการสร้างรูปแบบด้วยวิธี lift-off โดยใช้ mask ดังภาพที่ 3.11 แล้วจึงนำชิ้นงานไปสร้างฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริง จากนั้นล้างโฟโตริสโอสออกก็จะได้รูปแบบของชิ้นงานที่ต้องการดังภาพที่ 3.12

เนื่องจากความร้อนของกระบวนการสปัตเตอริงจะทำให้โฟโตริสโอสไหม้ได้ ดังนั้นขั้นตอนในการสร้าง DLC และ NiTi จะต้องระมัดระวังไม่ให้อุณหภูมิสูงเกินไป ในขั้นตอนแรกชิ้นงานจะถูกทำความสะอาดด้วย RF clean เป็นเวลา 5 นาที เช่นเดียวกับกับขั้นตอนการสร้างฟิล์มบางของทองแดง หลังจากนั้นทำความสะอาด DLC target ด้วยกระแสไฟฟ้า 0.2 แอมแปร์ นาน 2 นาที แล้วจึงเปิดชัตเตอร์เพื่อเริ่มสร้างฟิล์มบางบนชิ้นงานที่ต้องการ อัตราการสร้างผิว DLC ที่เครื่อง

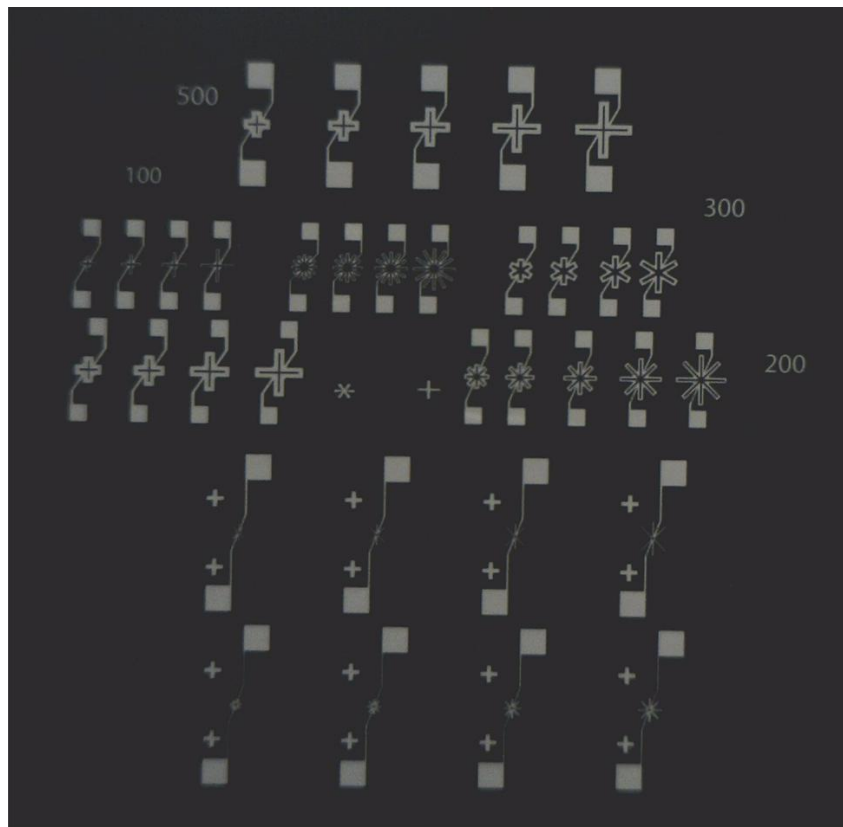
สปีดเตอริงทำได้คือ 6.67 นาโนเมตร/นาที่ โดยในขั้นตอนนี้จะต้องสร้างผิว DLC ด้วยจำนวนครั้ง และเวลาตามตารางที่ 3.1 เพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิสูงเกินไปจนโฟโตริซิสไหม้ได้



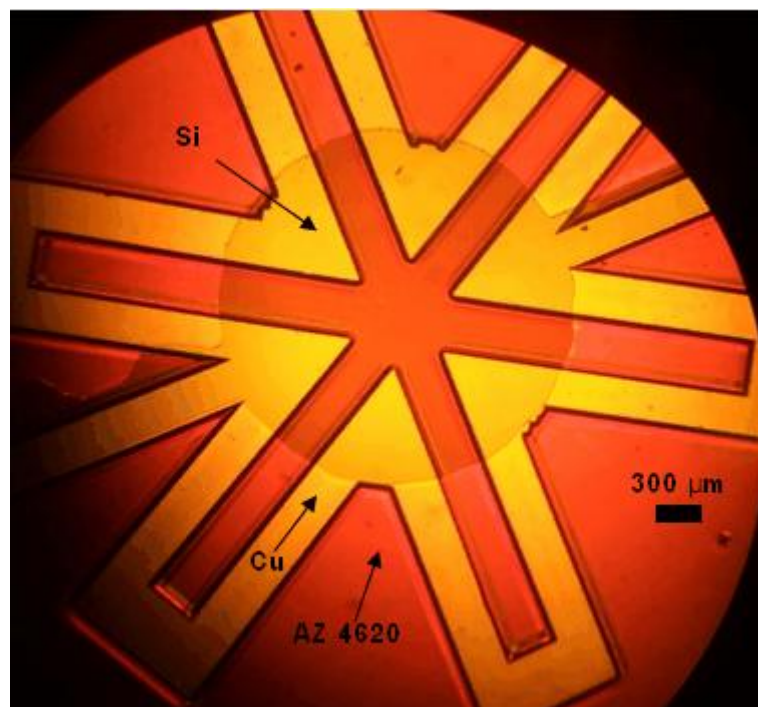
ภาพที่ 3.9 Mask ที่วาดขึ้นเพื่อใช้ในการสร้างรูปร่างของโฟโตริซิส AZ4620



ภาพที่ 3.10 ชิ้นงานหลังจากการกัดทองแดงเพื่อเป็นฐานของแอคซิวเอเตอร์



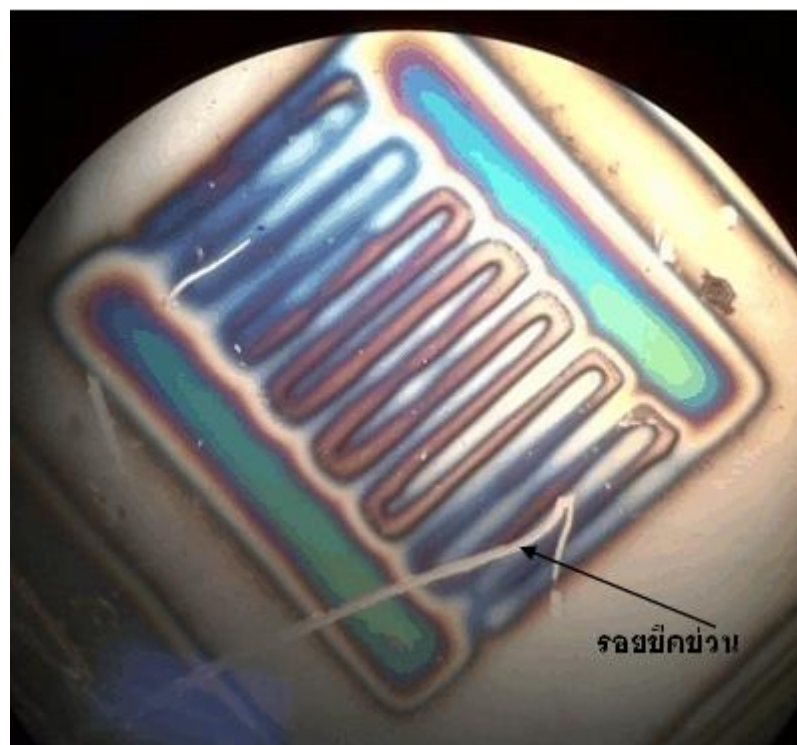
ภาพที่ 3.11 Mask เพื่อใช้ในการสร้างรูปร่างโฟโตริซิสสำหรับการ lift-off



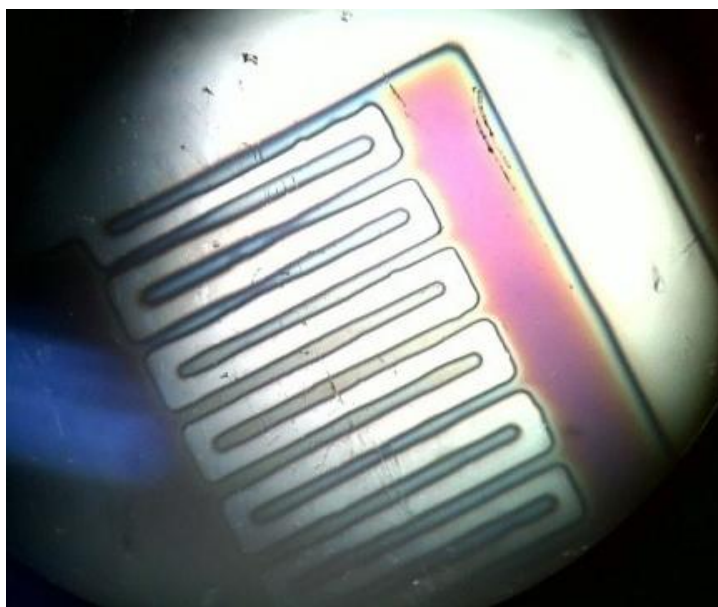
ภาพที่ 3.12 โฟโตริซิสเพื่อใช้ในการ lift-off



ภาพที่ 3.13 ชิ้นงานหลังจากการสร้างผิวDLCหนา 1 ไมโครเมตร และNiTi หนา 3 ไมโครเมตร



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.14 การเปรียบเทียบลักษณะของชั้นงานระหว่างแกรไฟต์และ DLC

(ก) ลักษณะชั้นงานที่เป็นแกรไฟต์

(ข) ลักษณะชั้นงานที่เป็น DLC

ตารางที่ 3.1 ขั้นตอนการสร้างผิว Diamond-like-carbon (DLC)

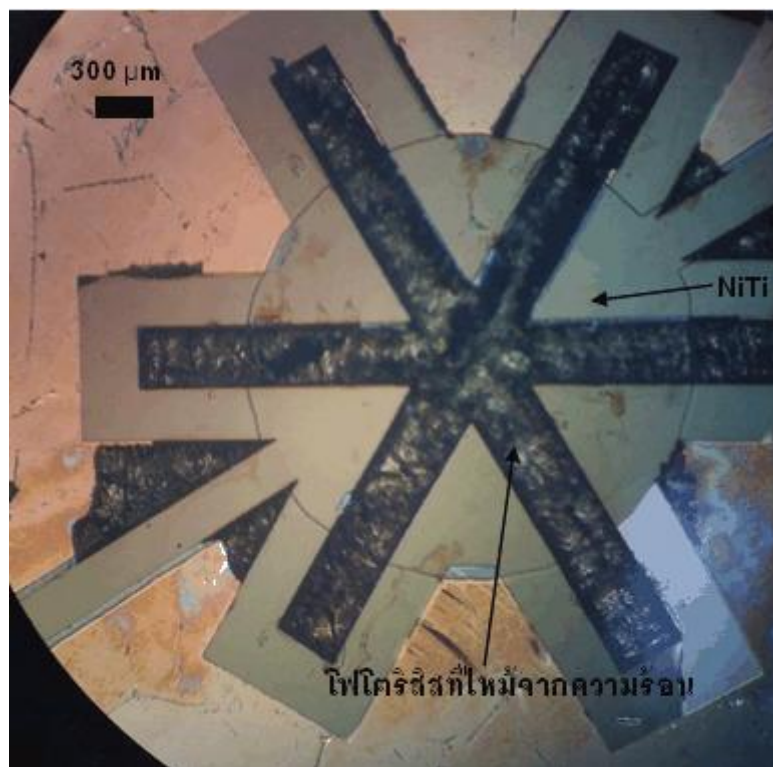
เวลาสปัตเตอร์ริง(นาทีก)	เวลาพัก(นาทีก)	จำนวนครั้ง	ความหนารวม(nm)
1	3	5	33.35
2	4	4	86.71
3	5	3	146.74
4	5	2	200.1
5	5	24	1000.5

หลังจากได้ชั้นผิวของ DLC ที่มีความหนา 1 ไมโครเมตรแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการสร้างผิว NiTi ความหนา 3 ไมโครเมตร และมีอัตราการสร้างผิว 2.86 นาโนเมตร/นาทีก ซึ่งจะใช้เวลาสปัตเตอร์ริงนาน 5 นาทีก และพัก 5 นาทีก ทั้งหมด 21 ครั้ง ชั้นงานในขั้นตอนนี้แสดงไว้ดังภาพที่ 3.13 หลังจากการสร้างผิวชั้นงาน DLC พบว่าเกิดการไหม้ของไฟโตริสเนื่องจากมีความร้อนสูงเกินไป การลดความร้อนในเครื่องสปัตเตอร์ริงนั้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มความดันในเครื่องสปัตเตอร์ริงให้สูงขึ้น แต่การสร้างผิว DLC มีข้อจำกัดที่จะต้องทำที่สุญญากาศต่ำในระดับ 10^{-3} มิลลิบาร์เท่านั้น ถ้าหากสร้างฟิล์มบางที่ความดันมากกว่า 10^{-3} มิลลิบาร์ จะได้ฟิล์มบางที่มีลักษณะเป็นแกรไฟต์ ซึ่ง

สามารถขูดออกได้ง่าย ในทางกลับกัน DLC จะมีความสามารถป้องกันรอยขีดข่วนได้ดีกว่ามากดังภาพที่ 3.14 เนื่องจากการสร้างฟิล์มบางที่สุญญากาศต่ำจะทำให้มีพลังงานสูงและเกิดความร้อนซึ่งสามารถทำให้ไฟไตรลิสเสียหาย ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาในขั้นตอนนี้จะต้องเปลี่ยนวัสดุจาก DLC เป็นวัสดุอื่นที่สามารถสร้างผิวที่ความดันสูงกว่า 10^{-3} ได้ เช่น โครเมียม หรือ อลูมินัม โดยจะขอกล่าวถึงในหัวข้อของขั้นตอนการสร้างแบบที่สามต่อไป

3.3.4 การ Lift-off ไฟไตรลิส

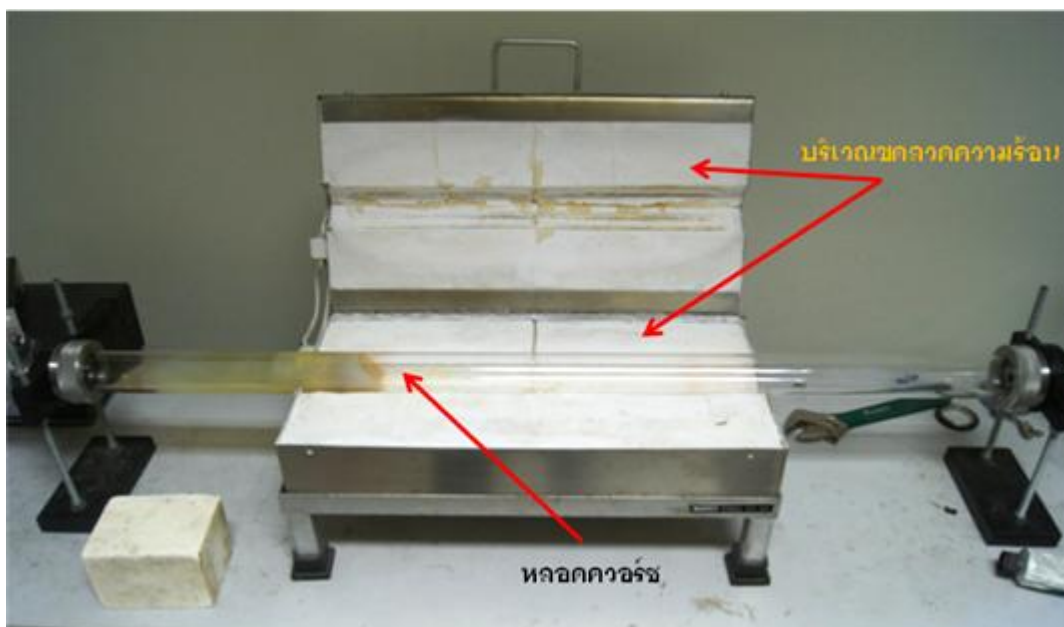
ขั้นตอนหลังจากการสร้างผิว DLC และ NiTi แล้วคือการ lift-off เพื่อนำไฟไตรลิสออกและจะเหลือเพียงรูปร่างโครงสร้างของไมโครแอคชูเอเตอร์ของ DLC และ NiTi โดยการ lift-off ไฟไตรลิสชนิด AZ4620 สามารถทำได้โดยนำชิ้นงานไปแช่ในบีกเกอร์ที่มีอะซิโตนโดยนำบีกเกอร์ไปไว้ในเครื่องอัลตราโซนิกเพื่อให้การ lift-off ไฟไตรลิสเป็นไปได้อย่างยิ่งยั้ง แต่พบว่าไม่สามารถ lift-off ไฟไตรลิสได้ทั้งหมด เนื่องจากไฟไตรลิสที่ใหม่ไม่หลุดออก ชิ้นงานในขั้นตอนนี้แสดงไว้ดังภาพที่ 3.15



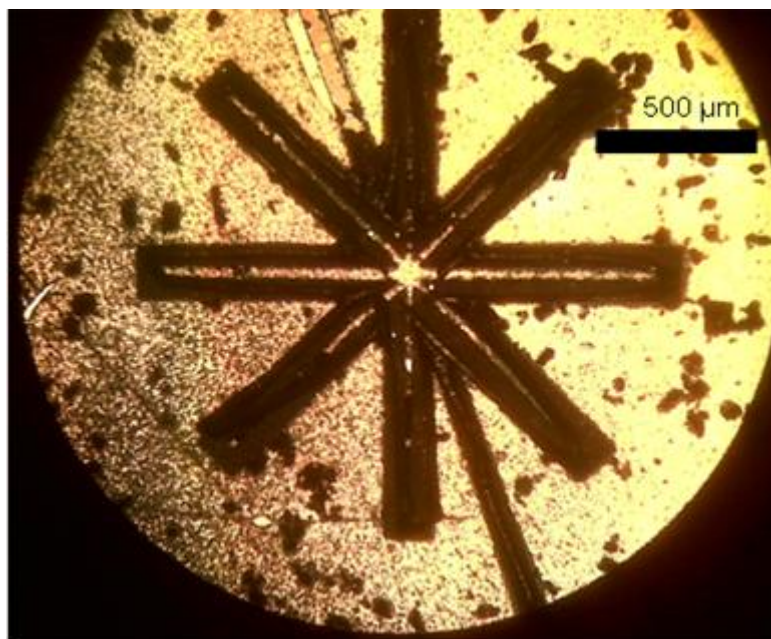
ภาพที่ 3.15 ชิ้นงานหลังการ lift-off ไฟไตรลิสออกด้วยอะซิโตนและเครื่องอัลตราโซนิก

3.3.5 การสร้างผิวทองแดง และ crystallization

เนื่องจากการ crystallization จะนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิสูง 500-600°C โดยทั่วไปแล้ว การ crystallization จะทำในสภาวะสุญญากาศต่ำมากๆในระดับ 10^{-6} มิลลิบาร์ แต่เนื่องจากเตาอบที่สามารถทำสุญญากาศได้ดีในระดับดังกล่าวหาได้ยาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้เตาอบที่ป้อนก๊าซอาร์กอนเข้าไปในเตาได้ระหว่างการอบ อย่างไรก็ตามยังพบออกไซด์ของ NiTi ขึ้นในกระบวนการ crystallization เพื่อป้องกันออกไซด์บนผิว NiTi จึงจะสร้างผิวทองแดงทับอีกชั้น แล้วจึงนำไปอบในเตาอบ โดยการสร้างผิวทองแดงจะใช้วิธีการสปัตเตอริงเช่นเดียวกับการสร้างผิวทองแดงในหัวข้อ 3.3.1 เมื่อได้ผิวของทองแดงแล้วจะตัดแบ่งชิ้นงานให้มีขนาดเล็กลงเพื่อให้สามารถใส่เข้าไปในเตาอบซึ่งมีลักษณะเป็นหลอดทรงกระบอกที่ทำมาจากควอร์ซดังภาพที่ 3.16 ในระหว่างการอบจะทำให้หลอดควอร์ซมีสภาวะเป็นสุญญากาศที่ความดันประมาณ 10^{-1} torr แล้วจึงปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าไปในหลอดด้วยอัตราการไหล 2,000 sccm ซึ่งทำให้ความดันในหลอดควอร์ซเพิ่มเป็น 3.2 torr จากนั้นเริ่มให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจึงปล่อยให้เย็นลง แต่พบว่ายังมีออกไซด์เกิดขึ้นบนทองแดงดังภาพที่ 3.17 ซึ่งอาจจะไม่มีผลต่อชิ้นงานด้านล่าง หากสามารถนำทองแดงและออกไซด์ออกได้



ภาพที่ 3.16 เตาอบสำหรับการ crystallization



ภาพที่ 3.17 ชิ้นงานที่มีออกไซด์จากกระบวนการ crystallization

3.3.6 การกัดทองแดง

เมื่อผ่านการ crystallization มาแล้ว ขั้นตอนสุดท้ายคือการกัดทองแดงทั้งหมดออกเพื่อให้ไมโครแอคชูเอเตอร์พร้อมที่จะทำงาน โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการ crystallization ไปแช่ในสารละลาย Al etch A ที่อุณหภูมิ 50°C แต่พบว่า การกัดทองแดงเป็นไปได้ยากขึ้นเนื่องจากมีออกไซด์ของทองแดงอยู่บนชิ้นงาน ดังนั้นต้องมีการปรับเปลี่ยนวิธีการสร้างให้เหมาะสมโดยจะกล่าวในหัวข้อของขั้นตอนการสร้างแบบที่สามต่อไป

3.3.7 สรุปปัญหาของการสร้างแบบที่สอง

ปัญหาที่เกิดจากการสร้างผิว DLC ซึ่งต้องสร้างผิวที่สุญญากาศต่ำในระดับ 10^{-3} มิลลิบาร์ ซึ่งทำให้ไฟโตรลิสเสียหาย ดังนั้นในขั้นตอนต่อไปจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนไปใช้โครเมียมแทน เพราะสามารถสร้างฟิล์มบางที่มีความดันสูงกว่า 10^{-3} มิลลิบาร์ได้ สำหรับปัญหาจากการเกิดออกไซด์บนผิวทองแดงในกระบวนการ crystallization ซึ่งการกัดออกไซด์ของทองแดงนั้นทำได้ยาก จึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมและพบว่ากรดอะซิติกเข้มข้นสามารถกัดออกไซด์ของทองแดงได้ [33] และเมื่อได้ทดลองกัดออกไซด์ของทองแดงด้วยกรดอะซิติกเข้มข้นพบว่าเมื่ออัตราการกัดที่ต่ำมากซึ่งจะใช้เวลาานานเกินไปและอาจจะทำให้ชิ้นงานส่วนอื่นเสียหายได้ ดังนั้นปัญหานี้จะแก้ไขโดยการเคลือบผิว DLC บนทองแดงก่อนการ crystallization ทับบนผิวทองแดงอีกชั้นหนึ่ง

3.4 ขั้นตอนการสร้างแบบที่สาม

ขั้นตอนแรก คือสร้างผิวทองแดงบนแผ่นซิลิกอนและกัดรูปร่างทองแดงเพื่อเป็นฐานของไมโครแอกซ์เวเตอร์ จากนั้นเคลือบและสร้างรูปร่างโฟโตริซิสเพื่อทำการ lift-off แล้วจึงสร้างฟิล์มบางของโครเมียมและ NiTi ตามลำดับ ด้วยวิธีการสเปตเตอริง ขั้นตอนต่อไปคือ lift-off โฟโตริซิสออก แล้วจึงสร้างฟิล์มบางของทองแดง และ DLC ตามลำดับ ทับบนชิ้นงานอีกครั้งเพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์ในขั้นตอนของการ crystallization แต่ลดอุณหภูมิจาก 600°C เป็น 500°C เป็นเวลาครึ่งชั่วโมง ขั้นตอนสุดท้ายคือการกัด DLC และ ทองแดงออกเพื่อให้ไมโครแอกซ์เวเตอร์พร้อมทำงาน ขั้นตอนการสร้างแบบที่สามแสดงดังภาพที่ 3.18

3.4.1 การสร้างผิวทองแดง

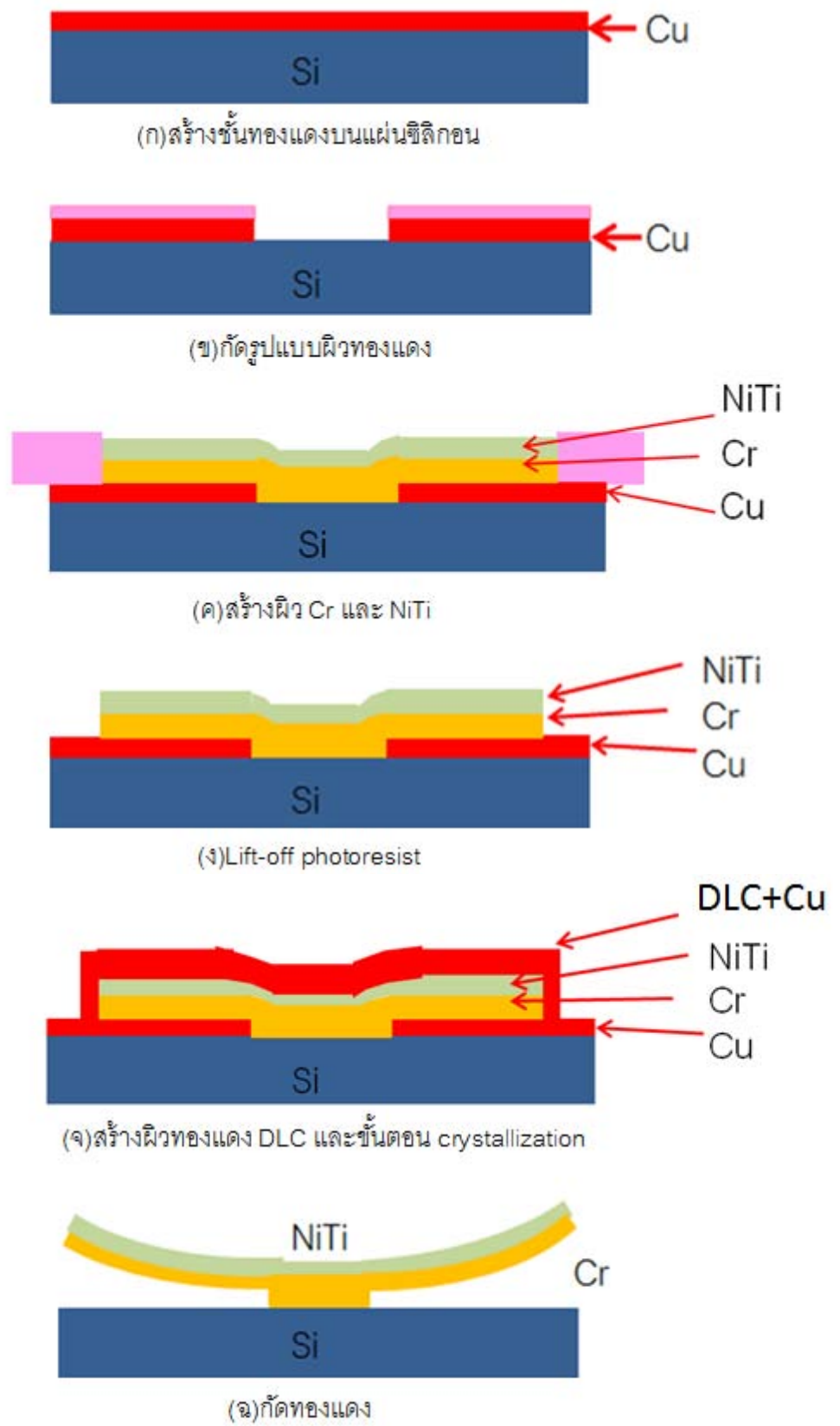
ขั้นตอนการสร้างผิวทองแดงนี้จะเหมือนกันกับการสร้างผิวทองแดงในขั้นตอน 3.3.1

3.4.2 การกัดรูปแบบผิวทองแดง

ขั้นตอนการกัดรูปแบบผิวทองแดงจะเหมือนกันกับการกัดรูปแบบทองแดงในขั้นตอน 3.3.2

3.4.3 การสร้างผิวโครเมียมและ NiTi

การสร้างฟิล์มบางโครเมียมจะใช้วิธีสเปตเตอริงที่มี base pressure ต่ำกว่า 1×10^{-5} มิลลิบาร์ แล้วปรับอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนจนทำให้ความดันสูงขึ้นเป็น 1×10^{-2} มิลลิบาร์ โดยในขั้นตอนแรกจะเป็นการทำทำความสะอาดผิวหน้าของชิ้นงานที่ต้องการเคลือบผิวด้วย RF clean ด้วยกำลัง 75 วัตต์ และใช้เวลาในการทำทำความสะอาดทั้งหมด 5 นาที หลังจากนั้นเปลี่ยนเป็น DC sputtering เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าของ Cr target โดยใช้กระแสไฟฟ้า 0.2 แอมแปร์ เป็นเวลา 2 นาที แล้วจึงเปิดชัตเตอร์เพื่อสร้างผิวโครเมียมบนชิ้นงานซึ่งในขั้นตอนนี้จะใช้เวลาค่อนข้างนาน โดยมีอัตราการสร้างฟิล์มบาง 0.05 ไมโครเมตร/นาที และต้องระมัดระวังเรื่องความร้อนเช่นเดียวกับการสร้างผิว DLC เพื่อป้องกันโฟโตริซิสไหม้ โดยขั้นตอนการสร้างผิวโครเมียมแสดงไว้ในตารางที่ 3.2 จะได้ความหนาของโครเมียมประมาณ 4 ไมโครเมตร จากนั้นสร้าง NiTi ด้วยวิธีการสเปตเตอริง ทำความสะอาดชิ้นงานที่จะสร้างผิวด้วยวิธี RF clean โดยใช้กำลัง 75 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที แล้วทำความสะอาด NiTi target ด้วย DC sputtering ที่ 0.2 แอมแปร์เป็นเวลา 2 นาที จึงเปิด shutter เพื่อสร้างผิว NiTi บนชิ้นงานโดยใช้เวลาในการสเปตเตอริงนาน 5 นาที และพัก 5 นาที ทั้งหมด 14 ครั้ง จะได้ความหนาของ NiTi ประมาณ 2 ไมโครเมตร



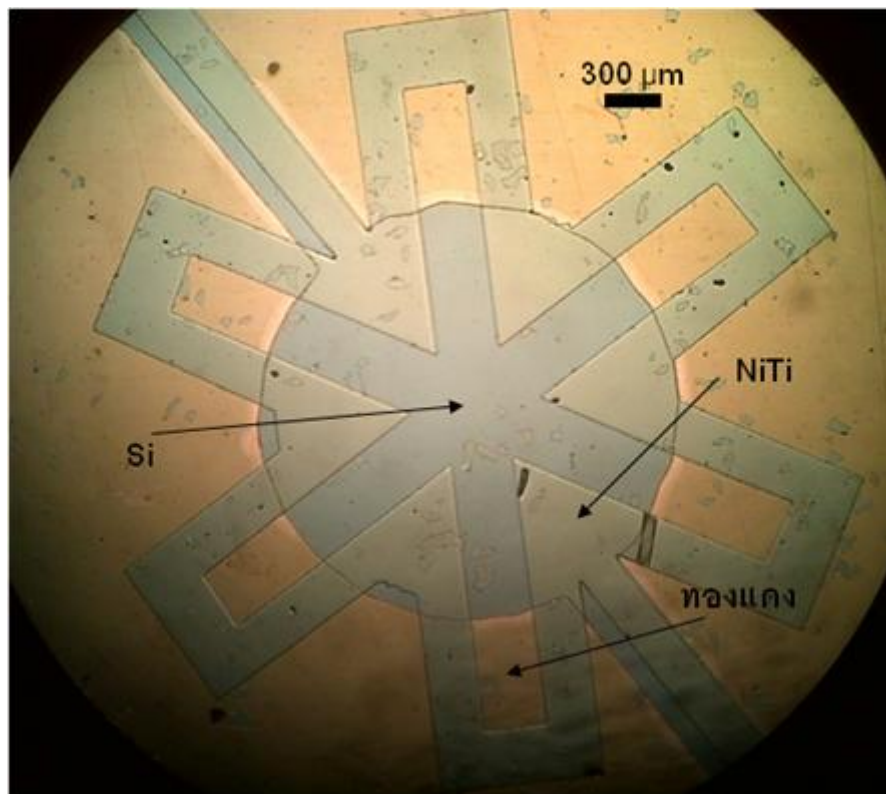
ภาพที่ 3.18 ขั้นตอนการสร้างแบบที่สาม

ตารางที่ 3.2 ขั้นตอนการสร้างผิวโครเมียม

เวลาสับเตอร์ริง(นาทีก)	เวลาพัก(นาทีก)	จำนวนครั้ง	ความหนารวม(μm)
1	3	5	0.25
2	4	4	0.65
3	5	3	1.1
4	5	2	1.5
5	5	10	4

3.4.4 การ Lift-off โฟโตริสซิส

การ lift-off เพื่อนำโฟโตริสซิสออก เพื่อให้เหลือเพียงแต่รูปร่างโครงสร้างของ Cr และ NiTi โดยการ lift-off โฟโตริสซิสชนิด AZ4620 สามารถทำได้โดยนำชิ้นงานไปแช่ในบีกเกอร์ที่มีอะซิโตนในเครื่องดูดตัวไซนิกเพื่อให้การ lift-off โฟโตริสซิสเป็นไปได้อย่างยิ่งขึ้น ชิ้นงานในขั้นตอนนี้แสดงไว้ดังภาพที่ 3.19



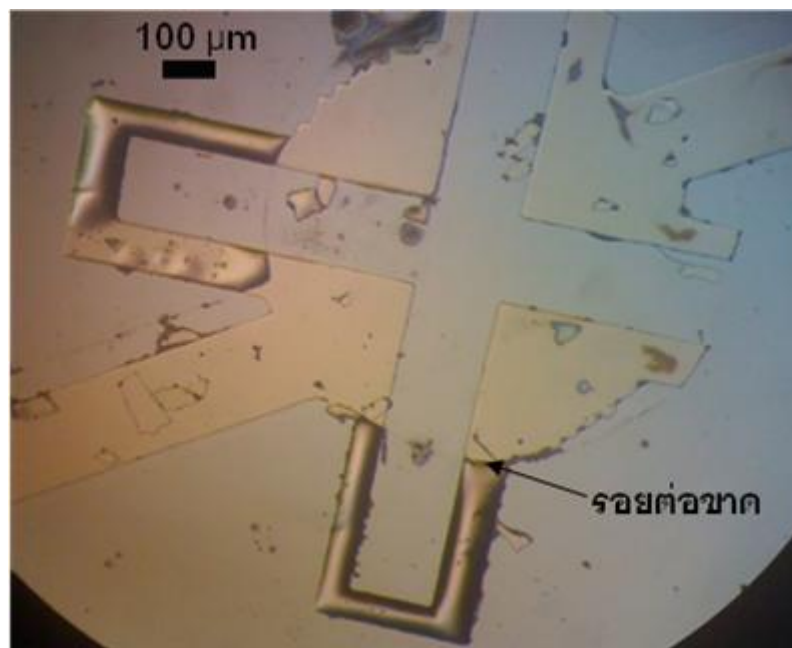
ภาพที่ 3.19 ชิ้นงานหลังการ lift-off โฟโตริสซิส

3.4.5 การสร้างผิวทองแดง DLC และ Crystallization

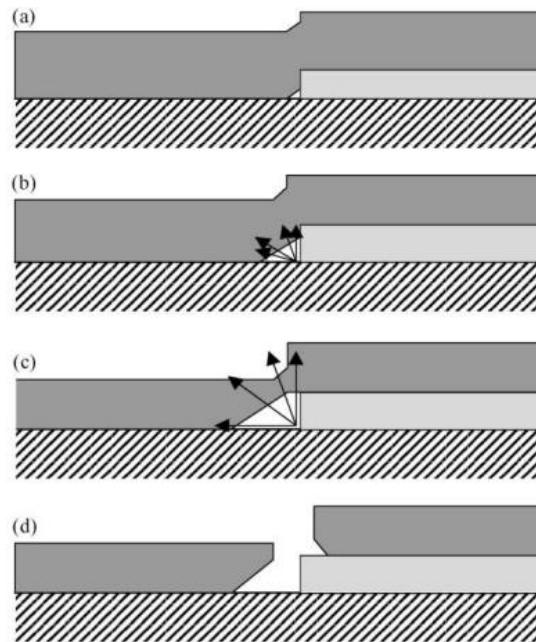
เพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์บนชิ้นงานในกระบวนการ crystallization จึงจำเป็นต้องสร้างผิวทองแดง และฟิล์มบางของ DLC เพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์ อีกทั้งยังลดอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการ crystallization ลงเหลือ 500°C เป็นเวลา 30 นาที หลังจากอบในอุณหภูมิและเวลาดังกล่าวไม่พบปัญหาการเกิดออกไซด์บนผิวทองแดง

3.4.6 การกัดทองแดง

ขั้นตอนการกัดทองแดงนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายเพื่อให้ไมโครแอดซิวเอเตอร์พร้อมทำงานโดยชิ้นงานจะถูกนำไปแช่ใน Al etch A ในขั้นตอนนี้พบปัญหาการขาดของชิ้นงานบริเวณรอยต่อของฐานดังภาพที่ 3.20 ในงานวิจัยอื่นได้พบปัญหาเช่นเดียวกันนี้ [30] ในงานดังกล่าวต้องการสร้างรูปร่างของ NiTi แต่การสร้างผิวในบริเวณรอยต่อของฐานไมโครแอดซิวเอเตอร์จะมีรูขนาดเล็กอยู่ การกัด NiTi ด้วยการแช่ในสารละลาย จะทำให้สารละลายไหลเข้าไปในรูนั้นและสามารถกัดได้สองทิศทาง ตามลูกศรในภาพที่ 3.21 ดังนั้นบริเวณที่เป็นรอยต่อของฐานไมโครแอดซิวเอเตอร์จะเสียหายก่อน อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้น่าจะเกิดจากโครงสร้างของ NiTi บางมาก ดังนั้นเมื่อละลายทองแดงด้านล่างออกจะทำให้โครงสร้าง NiTi หักทันที



ภาพที่ 3.20 ปัญหาการขาดของชิ้นงานบริเวณรอยต่อของฐานไมโครแอดซิวเอเตอร์



ภาพที่ 3.21 การกัดในลักษณะ 2 ทิศทางของบริเวณรอยต่อทำให้โครงสร้างหัก [30]

3.4.7 สรุปปัญหาจากการสร้างแบบที่สาม

ปัญหาการสร้างแบบที่สามพบว่าเกิดปัญหาจากการกัดทองแดงในขั้นตอนสุดท้ายเพื่อให้ไมโครแอดซิวเอเตอร์พร้อมทำงาน โดยพบว่าบริเวณที่เป็นรอยต่อระหว่างฐานไมโครแอดซิวเอเตอร์กับแขนของไมโครแอดซิวเอเตอร์ขาดออกจากกัน ซึ่งสามารถแก้ได้ด้วยการหลีกเลี่ยงโครงสร้างแบบขั้นบันไดหรือใช้วิธีการสร้างแบบ bulk โดยจะอธิบายการสร้างแบบ bulk ในหัวข้อขั้นตอนการสร้างแบบที่สี่ต่อไป

3.5 ขั้นตอนการสร้างแบบที่สี่

สำหรับขั้นตอนการสร้างแบบที่สี่นี้จะมีการปรับปรุงการสร้างใหม่เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาการขาดของชิ้นงานบริเวณรอยต่อของฐานด้วยการสร้างชิ้นงานแบบลอยตัวขึ้นมาก่อน โดยในขั้นตอนแรกจะเคลือบโฟโตริซิสแล้วจึงนำอลูมิเนียมพอยล์มารีดด้านบนให้เรียบแล้วเคลือบโฟโตริซิสเพื่อสร้างรูปร่างอีกครั้ง จากนั้นกัดผิวอลูมิเนียมด้วยสารละลาย Al etch A ชิ้นงานอลูมิเนียมจะหลุดออกมาเป็นชิ้นโครงสร้างของไมโครแอดซิวเอเตอร์แต่ละตัว และนำไปสร้างฟิล์มบาง NiTi หนา 5 ไมโครเมตร ทับด้านบนด้วยวิธีสปัตเตอริงและขั้นตอนสุดท้ายจึงนำชิ้นงานไป crystallization ในเตาอบที่อุณหภูมิ 500°C โดยขั้นตอนการสร้างแบบที่สี่แสดงดังภาพที่ 3.22



(ก)เคลือบโฟโตริซิสบนแผ่นซิลิกอน



(ข)หุ้มด้วยแผ่นอลูมิเนียมฟอสต์



(ค)สร้างรูปร่างโฟโตริซิส (photolithography)



(ง)สร้างรูปร่างอลูมิเนียมฟอสต์



(จ)สร้างผิว NiTi บนอลูมิเนียมฟอสต์



(ฉ)อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 500°C (crystallization)

ภาพที่ 3.22 ขั้นตอนการสร้างแบบที่สี่

3.5.1 การเคลือบโฟโตริซิสบนแผ่นซิลิกอน

เคลือบโฟโตริซิสเพื่อให้อลูมิเนียมพอยล์ยึดติดได้โดยเคลือบด้วยเครื่องสปินเนอร์ที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที นาน 30 วินาที

3.5.2 การหุ้มแผ่นอลูมิเนียมพอยล์

ตัดแผ่นอลูมิเนียมพอยล์ที่มีความหนา 16 ไมโครเมตร แล้ววีรดเข้ากับแผ่นซิลิกอนที่มีโฟโตริซิสให้เรียบ

3.5.3 การสร้างรูปร่างโฟโตริซิส (Photolithography)

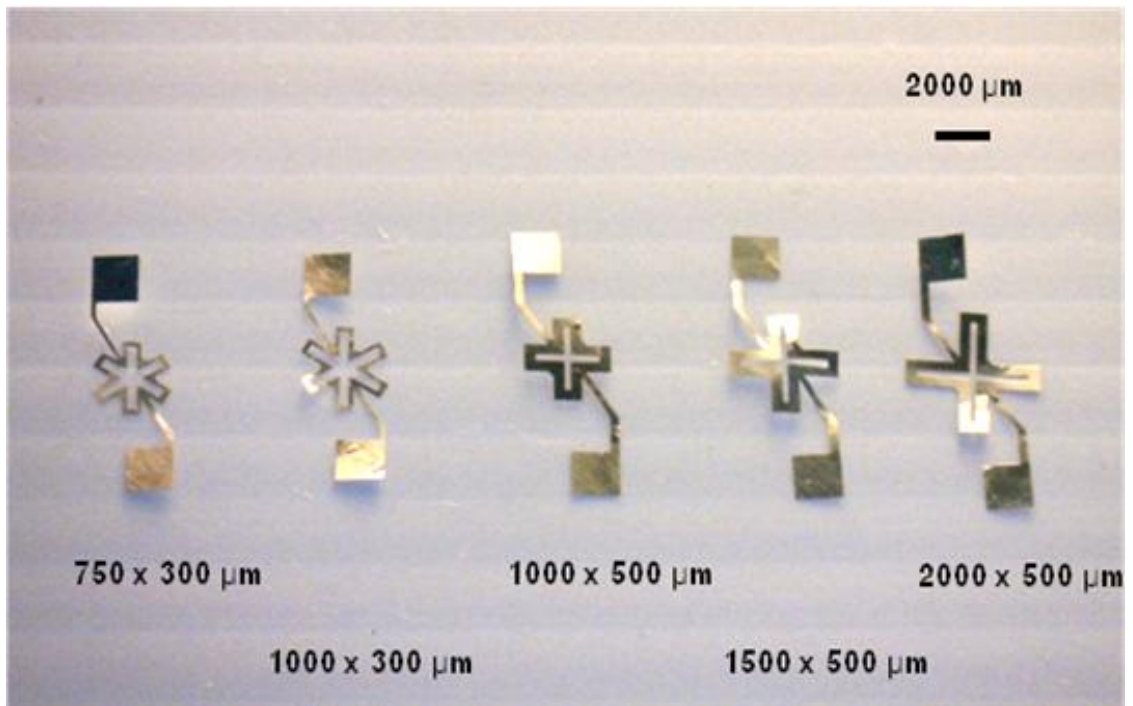
ขั้นตอนแรกต้องเคลือบโฟโตริซิสด้วยเครื่องสปินเนอร์ที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที นาน 30 วินาที จากนั้นนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 20 นาที แล้วจึงนำมาฉายรังสีอุลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 1 นาที 30 วินาที แล้วนำชิ้นงานไปแช่ในสารละลาย developer จะได้รูปร่างของโฟโตริซิสตามต้องการ

3.5.4 การสร้างรูปร่างอลูมิเนียมพอยล์

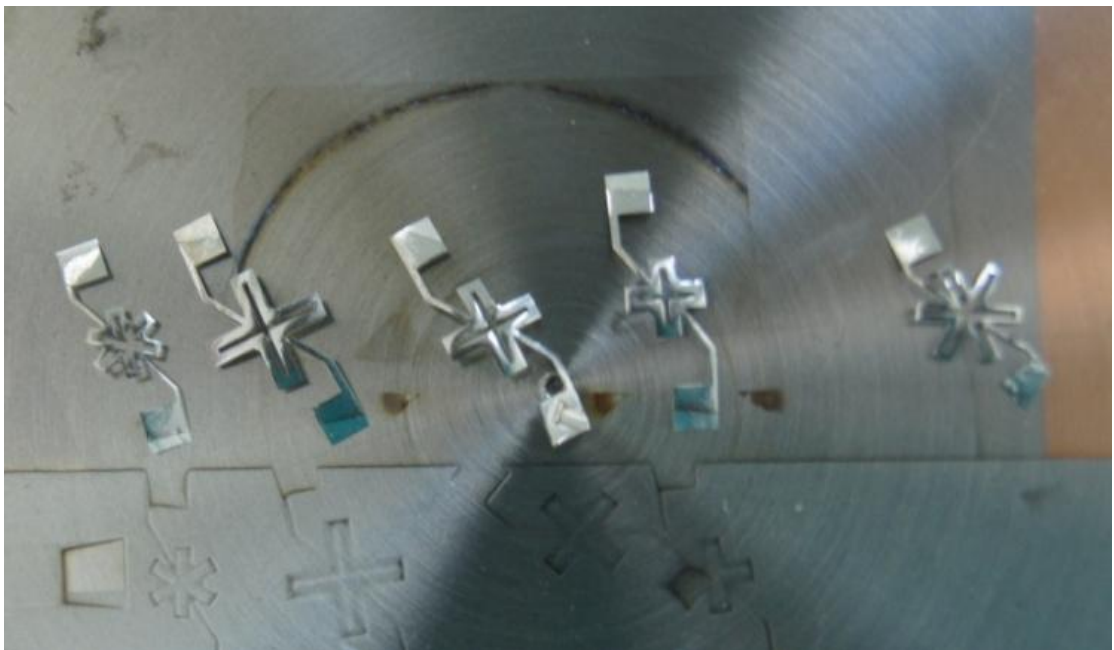
เมื่อได้รูปร่างโฟโตริซิสแล้วนำชิ้นงานไปแช่ในสารละลาย Al etch A เพื่อกัดให้ได้โครงสร้างของอลูมิเนียมพอยล์และเมื่ออลูมิเนียมพอยล์ถูกกัดจนทะลุ อลูมิเนียมพอยล์จะหลุดออกมาเป็นชิ้นๆ ซึ่งมีลักษณะเป็นโครงสร้างของไมโครแอกซัวเอเตอร์ ดังภาพที่ 3.23

3.5.5 การสร้างผิว NiTi บนอลูมิเนียมพอยล์

หลังจากอลูมิเนียมหลุดออกมา แล้วจะนำชิ้นงานเข้าเครื่องสปัตเตอร์ริงเพื่อสร้างฟิล์มบางของ NiTi โดยปรับสภาวะในเครื่องสปัตเตอร์ริงให้มีความดัน 10^{-5} มิลลิบาร์ (base pressure) แล้วจึงปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าไปในเครื่องจนมีความดัน 3×10^{-3} มิลลิบาร์ จากนั้นเริ่มขั้นตอนการทำความสะอาดชิ้นงานด้วย RF clean ที่กำลัง 75 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที และทำความสะอาด NiTi target ด้วย DC magnetron sputtering ด้วยกระแสไฟฟ้า 0.2 แอมแปร์ เป็นเวลา 5 นาที จึงเปิดชัตเตอร์เพื่อเริ่มสร้างผิว NiTi ลงบนชิ้นงานอลูมิเนียมพอยล์โดยจะใช้เวลาในการสร้างฟิล์มบาง NiTi 5 ชั่วโมง และได้ชิ้นงานดังภาพที่ 3.24 ซึ่งแสดงภาพโครงสร้างอลูมิเนียมในเครื่องสปัตเตอร์ริง โดยในระหว่างการทำงานจะใช้แผ่นกระจกทับชิ้นงานไว้



ภาพที่ 3.23 ชิ้นงานหลังจากขั้นตอนการสร้างรูปร่างอลูมิเนียม



ภาพที่ 3.24 ชิ้นงานหลังการสปัตเตอร์ NiTi บนโครงสร้างอลูมิเนียม

3.5.6 การอบชิ้นงาน crystallization

เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการสร้างผิว NiTi ไปเข้าเตาอบที่มีลักษณะเป็นหลอดควอร์ซ ปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าไปในหลอดควอร์ซจนมีความดันเป็น 6 torr โดยใช้อุณหภูมิในการอบชิ้นงาน 500°C เป็นเวลา 30 นาที เมื่อนำชิ้นงานออกมาจากเตาพบว่าเมื่อออกไซด์เกิดบนผิวของ NiTi ขึ้นโดยชิ้นงานมีลักษณะเป็นสีรุ้ง เมื่อศึกษาเพิ่มเติมพบว่าการอบชิ้นงานในงานวิจัยต่างๆจะอบที่สุญญากาศต่ำมากในระดับ 10^{-7} torr เพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์ แต่เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านอุปกรณ์ทำให้ไม่สามารถอบชิ้นงานหรือ crystallization ชิ้นงานได้สำเร็จ อย่างไรก็ตามในเบื้องต้นจะนำชิ้นงานหลังจากการสร้างผิว NiTi นี้ไปทดลองการตอบสนองและระยะกระดกของไมโครแอคชูเอเตอร์ ซึ่งลักษณะการทำงานของไมโครแอคชูเอเตอร์จะเป็นแบบ thermal actuation เท่านั้น ซึ่งจะมีแรงกระทำและระยะกระดกต่ำกว่าหลักการโลหะผสมจำรูป

3.6 สรุปผลการศึกษา

จากกระบวนการสร้างในบทนี้ได้พบปัญหาขึ้นระหว่างกระบวนการจึงต้องมีการปรับเปลี่ยนขั้นตอนการสร้างให้เหมาะสมโดยขั้นตอนการสร้างแบบที่หนึ่งเริ่มจากการกัดซิลิกอนไดออกไซด์เพื่อเป็นฐานไมโครแอคชูเอเตอร์แล้วจึงสร้างผิวโพลีอิมิดและ NiTi ทับลงไป จากนั้นสร้างรูปแบบของไมโครแอคชูเอเตอร์ด้วยการกัด NiTi และโพลีอิมิดให้มีลักษณะเป็นขดลวดคล้ายนิ้วมือมนุษย์แล้วจึงเคลือบด้วยฟไตรซิลอีกครั้งเพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์จากการ crystallization และขั้นตอนสุดท้ายคือการกัดซิลิกอนไดออกไซด์ออกทั้งหมดเพื่อให้ไมโครแอคชูเอเตอร์หลุดจากฐาน แต่ได้พบปัญหาในการกัดซิลิกอนไดออกไซด์ซึ่งมีการกัดในส่วนที่ไม่ต้องการ ซึ่งพบว่ามีสาเหตุจากการยึดติดระหว่าง SU-8 และซิลิกอนไดออกไซด์ไม่ดีซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้ 2 วิธีคือ เปลี่ยนจาก SU-8 เป็นฟไตรซิลที่มีการยึดเกาะที่ดีกว่าหรือเปลี่ยนซิลิกอนไดออกไซด์เป็นวัสดุอื่นที่มีอัตราการกัดที่เร็วขึ้นทำให้ใช้เวลาในการแซ่ชิ้นงานในน้ำยาน้อยลงและลดการเกิด undercut อีกทั้งยังมีปัญหาในการสั่งซื้อโพลีอิมิดซึ่งทำให้ต้องเลือกใช้ DLC ทดแทน โดยในกระบวนการสร้างแบบที่สองจะใช้ทองแดงทดแทนการใช้ซิลิกอนไดออกไซด์และใช้ DLC แทนโพลีอิมิด อีกทั้งยังเปลี่ยนไปใช้ฟไตรซิล AZ4620 แทน SU-8 และยังเปลี่ยนจากกระบวนการ etching เพื่อสร้างรูปร่างของไมโครแอคชูเอเตอร์เป็นกระบวนการ lift-off ด้วย

อย่างไรก็ตาม กระบวนการสร้างแบบที่สองยังพบปัญหาที่เกิดจากการสร้างผิว DLC ซึ่งต้องสร้างผิวที่สุญญากาศต่ำในระดับ 10^{-3} มิลลิบาร์ และมีความร้อนสูงจนทำให้ฟไตรซิลเสียหาย นอกจากนี้ยังมีการเกิดออกไซด์บนผิวทองแดงในกระบวนการ crystallization ทำให้การกัด

ทองแดงเป็นไปได้อย่าง สำหรับกระบวนการสร้างแบบที่สามจะมีความคล้ายคลึงกับกระบวนการสร้างแบบที่สองโดยจะใช้โครเมียมแทน DLC เพราะสามารถสร้างที่ความดันสูงกว่า 10^{-3} มิลลิบาร์ ซึ่งสามารถลดความร้อนและป้องกันโพโตริสซิสใหม่ได้ อีกทั้งจะแก้ปัญหาการเกิดออกไซด์โดยการเคลือบผิว DLC บนทองแดงอีกครั้งก่อนการ crystallization แต่ก็ยังพบปัญหาจากการกัดทองแดงในขั้นตอนสุดท้าย โดยพบว่าบริเวณที่เป็นรอยต่อระหว่างฐานไมโครแอคชูเอเตอร์กับแขนของไมโครแอคชูเอเตอร์ขาดออกจากกัน

ดังนั้นกระบวนการสร้างแบบที่สี่จึงได้เลือกวิธีการสร้างแบบ bulk โดยเริ่มจากการกัดอลูมิเนียมพอยต์ที่มีความหนา 16 ไมโครเมตร ให้มีรูปร่างเป็นโครงสร้างของไมโครแอคชูเอเตอร์ออกมา ก่อนแล้วนำอลูมิเนียมพอยต์ที่กัดแล้วไปเคลือบฟิล์มบางของ NiTi หนา 5 ไมโครเมตร แล้วนำไป crystallization สำหรับกระบวนการสร้างแบบที่สี่นี้พบว่ามีปัญหาเกิดขึ้นในขั้นตอน crystallization เนื่องจากมีออกไซด์เกิดขึ้น และเนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ทำให้ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถนำชิ้นงานไปอบเพื่อให้เห็นแสดงคุณสมบัติของ shape memory effect ได้

บทที่ 4

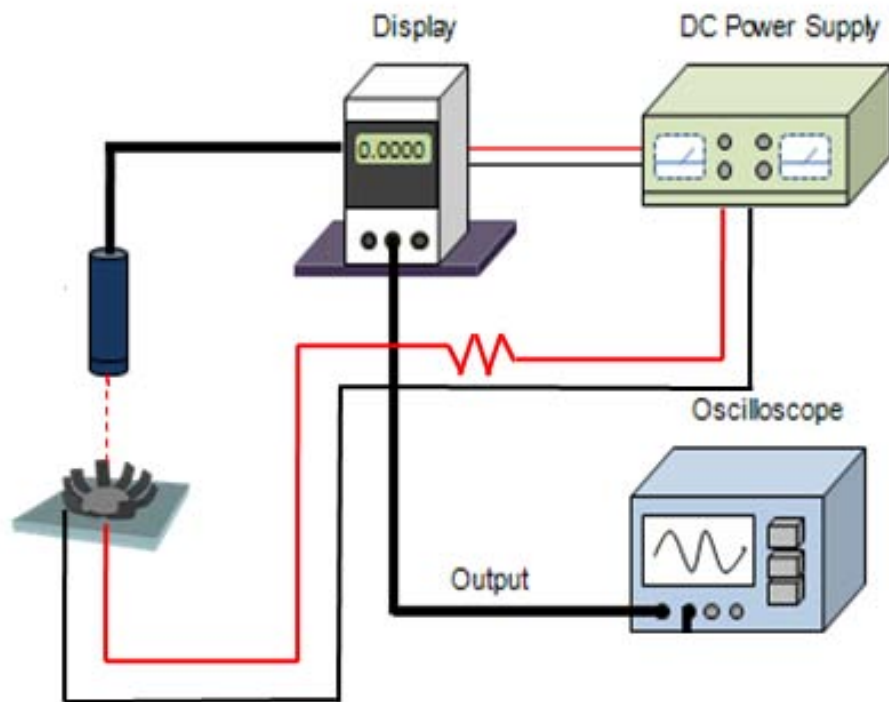
การทดสอบไมโครแอกซ์เวเตอร์

ไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่นำมาทดสอบนี้จะมีขนาดความยาว 1000 และ 2000 ไมโครเมตร กว้าง 500 ไมโครเมตร โดยมีความหนา NiTi และอลูมิเนียม เป็น 5 และ 16 ไมโครเมตร ตามลำดับ นอกจากนี้ไมโครแอกซ์เวเตอร์นี้ยังไม่ได้ผ่านการอบขึ้นงานที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ ดังนั้นไมโครแอกซ์เวเตอร์นี้จะไม่มีความเสถียรที่เป็น shape memory effect และการทดสอบนี้จะเป็นการทดสอบไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่มีการทำงานแบบ thermal effect เท่านั้น

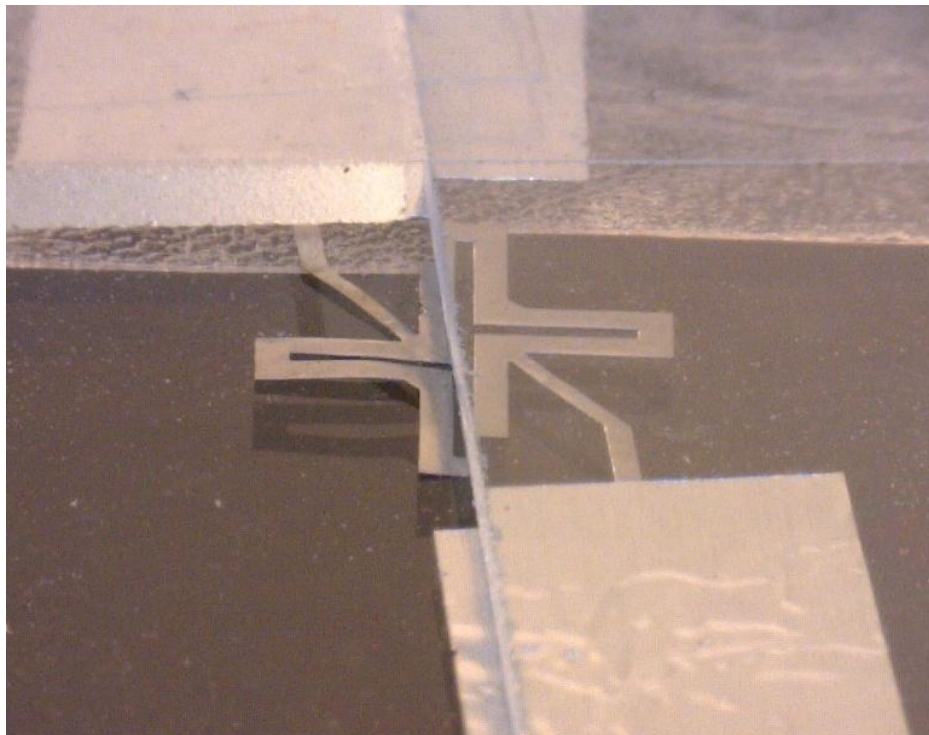
4.1 การทดสอบการตอบสนองของไมโครแอกซ์เวเตอร์

ขั้นตอนการทดสอบการตอบสนองของไมโครแอกซ์เวเตอร์เป็นการทดสอบระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 1.25 – 2.50 แอมแปร์ และมีระยะเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้า 10 วินาทีเท่ากัน โดยวัดระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ด้วยเลเซอร์ดิสเพลสเมนต์มิเตอร์ อุปกรณ์การทดลองจะถูกติดตั้งไว้ดังภาพที่ 4.1 ซึ่งประกอบด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงยี่ห้อ MCP รุ่น M10-TP3005H ออสซิลโลสโคปยี่ห้อ Agilent Technologies รุ่น DSO3062A และเลเซอร์ดิสเพลสเมนต์เซนเซอร์และมิเตอร์ยี่ห้อ Keyence รุ่น LK-G37 มีความละเอียดในการวัด 0.01 ไมโครเมตร โดยสายไฟขั้วบวกที่ต่อออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกต้องกับตัวต้านทาน 8 โอห์ม 30 วัตต์สองตัวต่อขนานกันมีค่าความต้านทานรวม 4 โอห์ม เพื่อเป็นการเพิ่มความต้านทานในระบบซึ่งจะช่วยให้กระแสที่ไหลในวงจรลดต่ำลงและพลังงานความร้อนจะสูญเสียที่ตัวต้านทานแทน จากนั้นสายไฟจากตัวต้านทานจะต่อเข้ากับสายไฟด้านหนึ่งของไมโครแอกซ์เวเตอร์ ส่วนสายไฟขั้วลบจะต่อจากอีกด้านหนึ่งของไมโครแอกซ์เวเตอร์เข้าสู่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจนครบวงจร ในขณะที่เลเซอร์เซนเซอร์จะถูกติดตั้งไว้ด้านบนของไมโครแอกซ์เวเตอร์และต่อเข้ากับตัวเลเซอร์มิเตอร์ ซึ่งสามารถอ่านระยะกระดกได้จากหน้าจอของมิเตอร์เองบันทึกข้อมูลในออสซิลโลสโคปได้

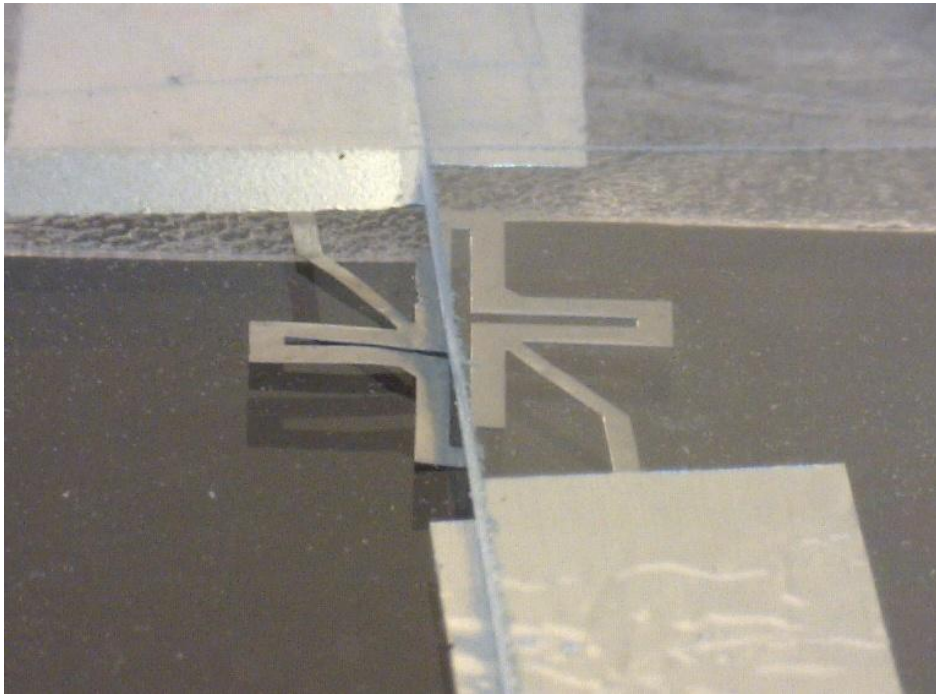
ในการทดลองจะปรับกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นกรณีละ 0.25 แอมแปร์ รวมทั้งหมด 6 กรณี เก็บค่าระยะกระดกในออสซิลโลสโคปและดึงข้อมูลมาวิเคราะห์ผ่านแพลตฟอร์ม Excel เพื่อพล็อตกราฟของระยะกระดกสำหรับไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่มีขนาดและกระแสไฟฟ้าต่างกัน โดยภาพที่ 4.2(ก)-(ข) แสดงการกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่มีความยาว 2000 ไมโครเมตร กว้าง 500 ไมโครเมตร โดยมีการให้กระแสไฟฟ้าต่างกัน



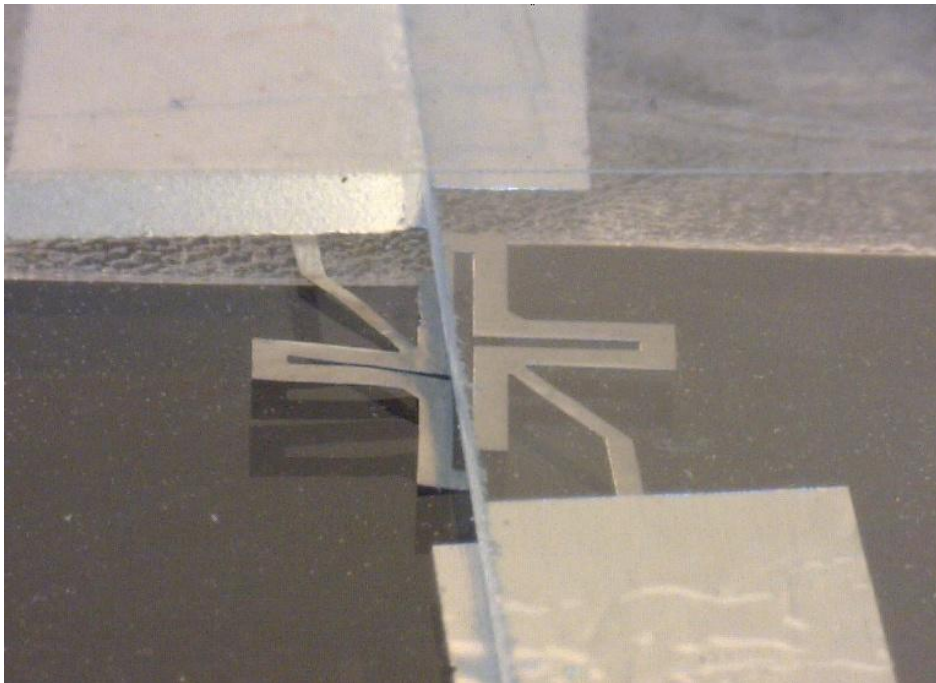
ภาพที่ 4.1 อุปกรณ์การทดลองวัดสมรรถนะไมโครแอคชูเอเตอร์



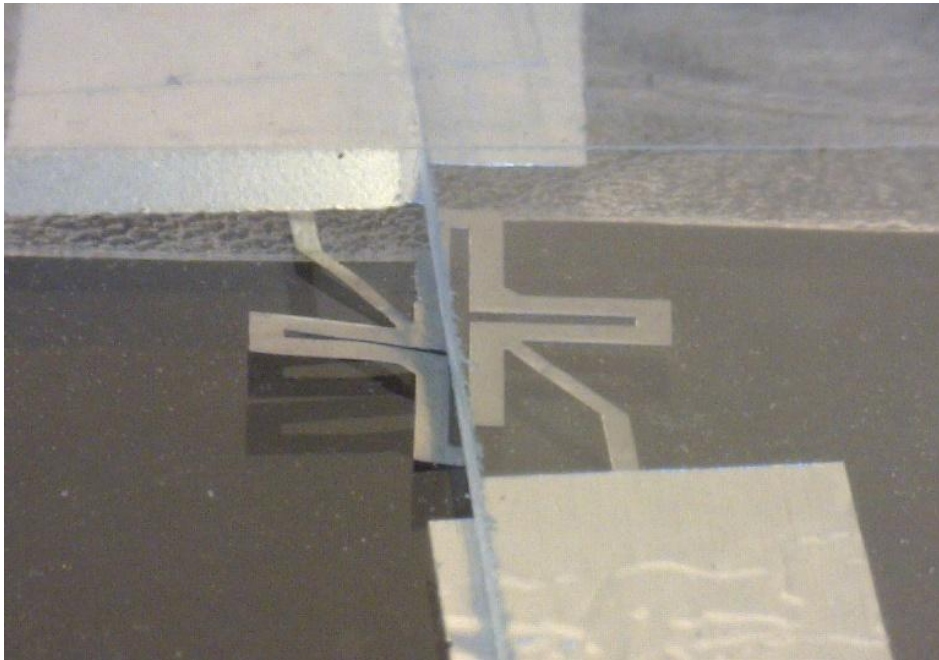
(ก) ไม่มีการให้กระแสไฟฟ้า



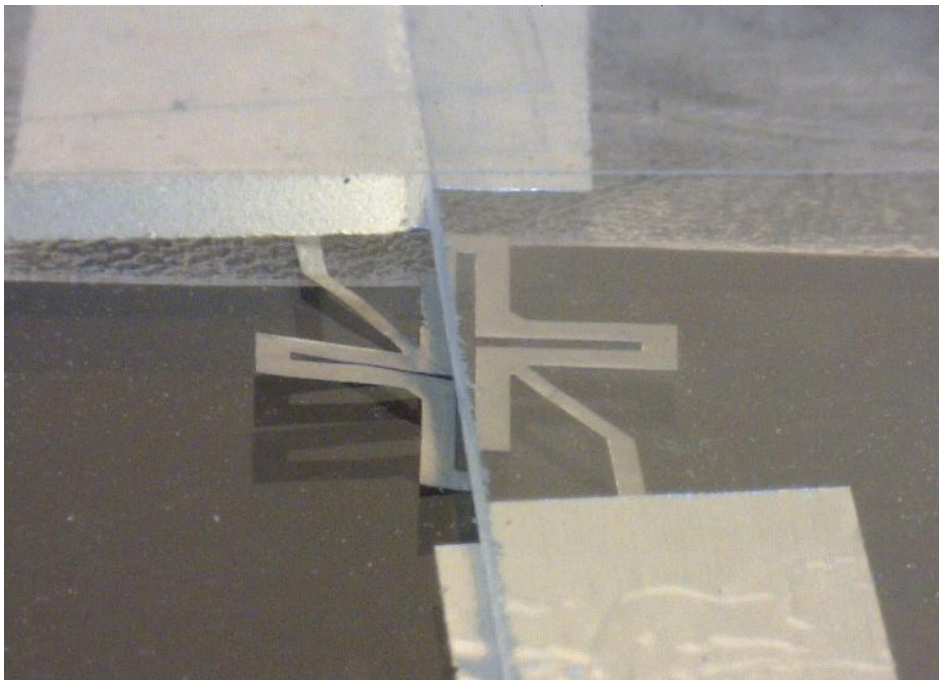
(a) 1.25 A



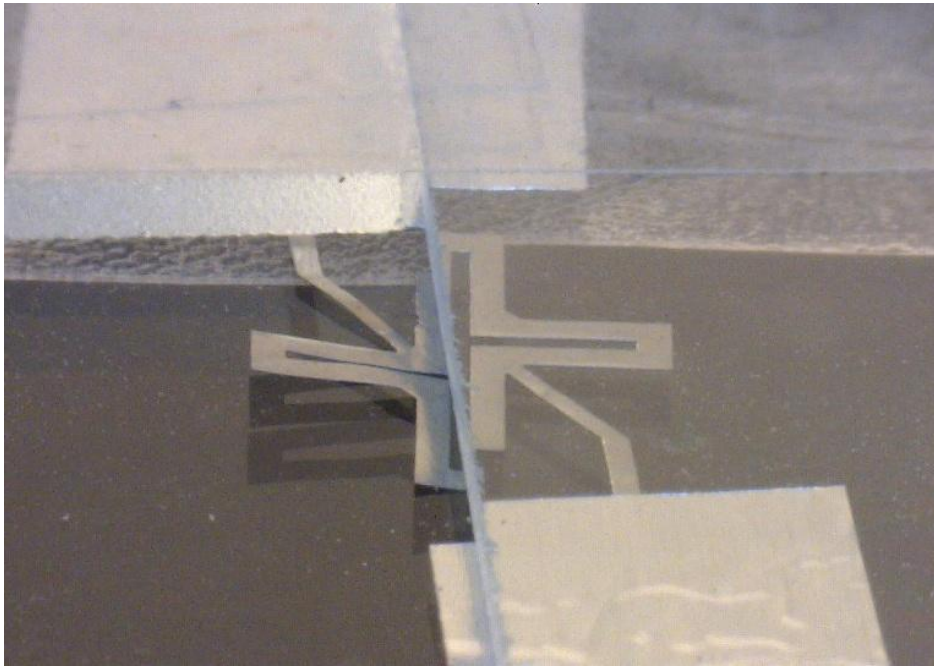
(b) 1.50 A



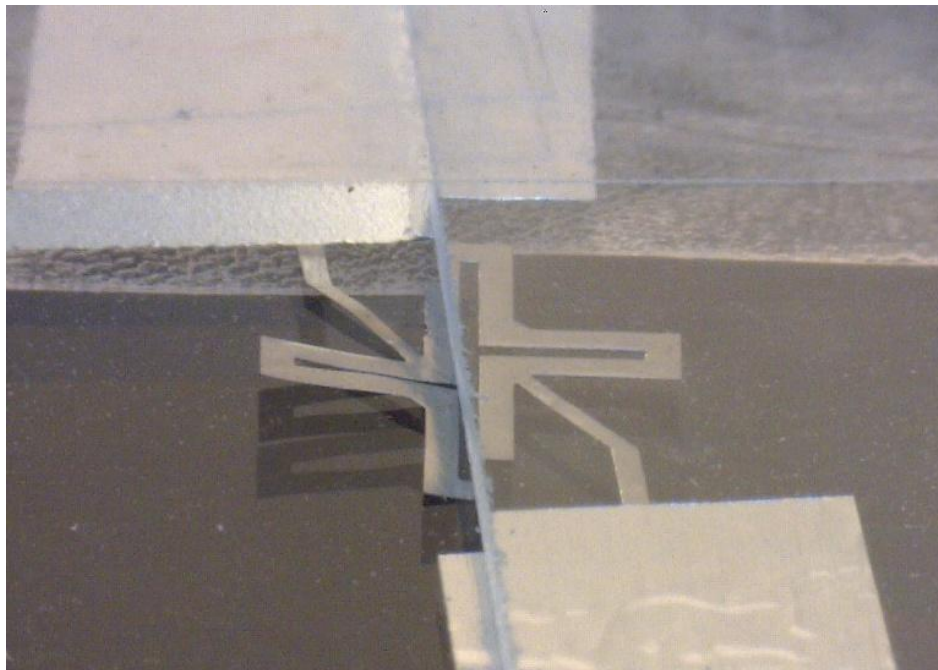
(a) 1.75 A



(b) 2.00 A



(ฉ) 2.25 A

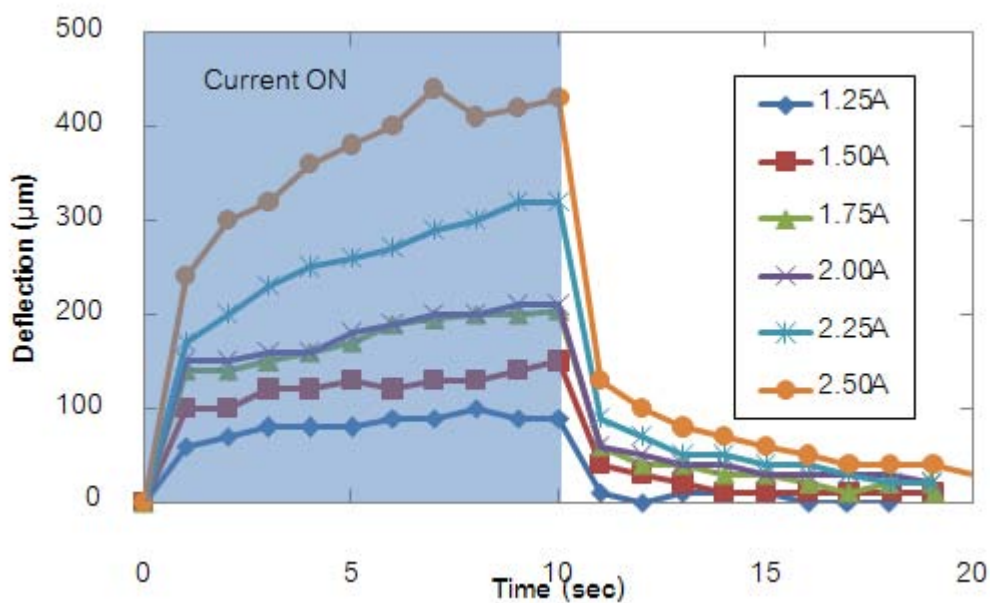


(ช) 2.50 A

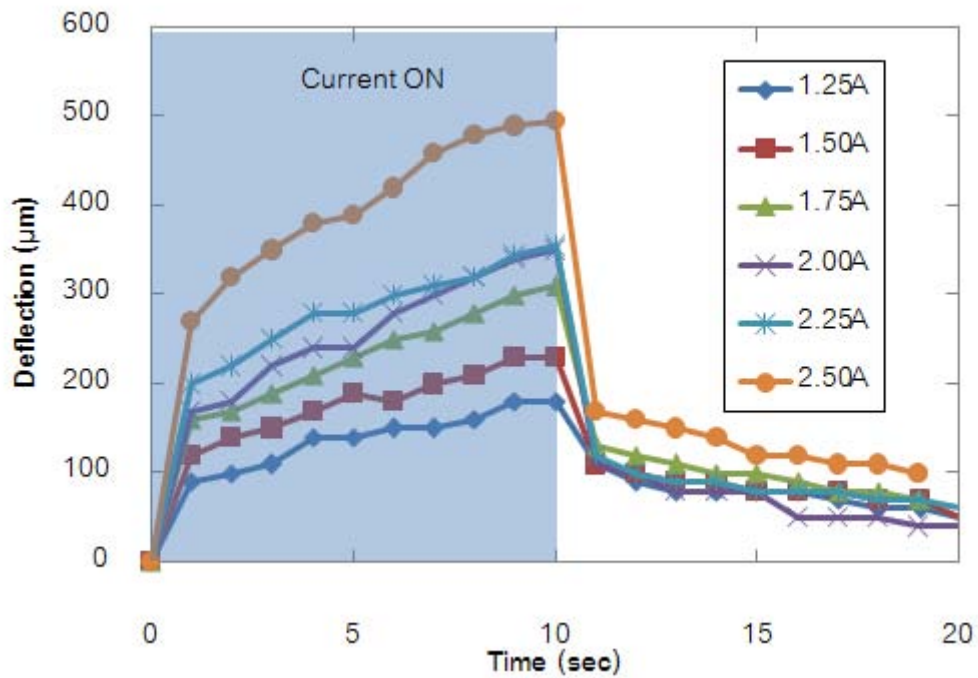
ภาพที่ 4.2 ภาพถ่ายการกระดกของไมโครแอดซ์อิเล็กโทรดขนาด $2000 \times 500 \mu\text{m}^2$ เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าต่าง ๆ กัน

ผลการทดลองได้แสดงให้เห็นดังภาพที่ 4.3 และภาพที่ 4.4 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างระยะกระดกเมื่อมีการให้กระแสไฟฟ้าต่างๆกัน พบว่าไมโครแอกชูเอเตอร์จะมีการตอบสนองที่รวดเร็วและมีระยะกระดกเพิ่มขึ้นมากในช่วงเวลา 1 วินาทีแรกที่ให้กระแสไฟฟ้า แต่เมื่อเวลาผ่านไปการเปลี่ยนแปลงนั้นจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ เช่นเดียวกันกับหลังการหยุดให้กระแสไฟฟ้า ซึ่งพบว่าระยะกระดกจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาที่ให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปอันเป็นผลมาจากความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามที่กระแสไฟฟ้าขนาดต่ำระยะกระดกจะมีแนวโน้มที่ไม่เพิ่มขึ้นเหมือนกับที่กระแสไฟฟ้าขนาดสูง อาจเกิดจากการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่สถานะคงตัว ทำให้อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงรวมทั้งระยะกระดกก็ไม่เปลี่ยนแปลงด้วย ในทางตรงกันข้ามเมื่อหยุดป้อนกระแสไฟฟ้า ระยะกระดกจะค่อยๆ ลดลงเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิลดลงๆ ลดต่ำลง และทำให้ระยะกระดกลดลง

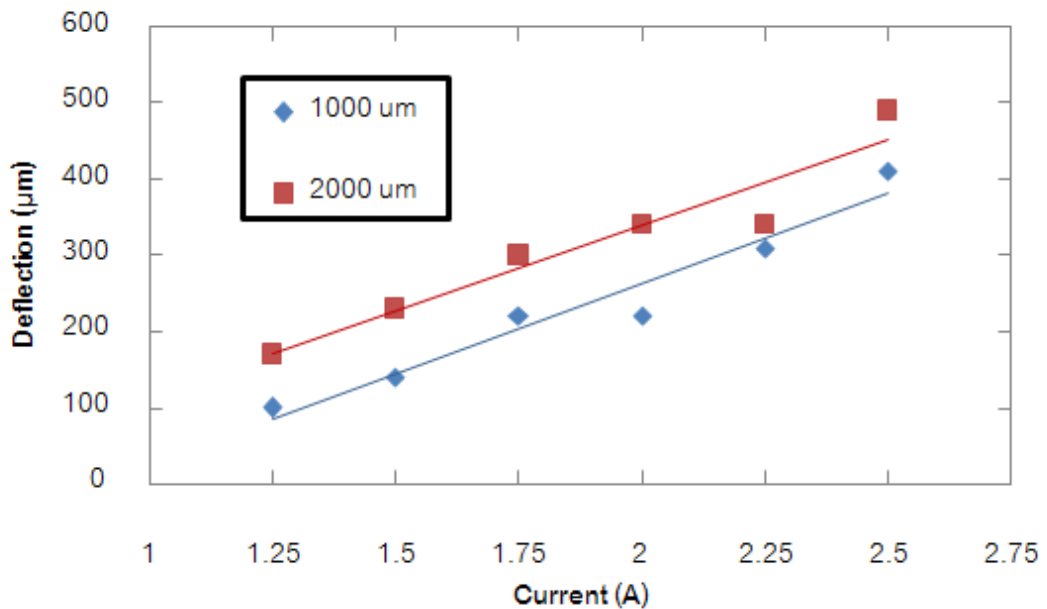
เมื่อเปรียบเทียบระยะกระดกของไมโครแอกชูเอเตอร์ที่ยาว 1000 และ 2000 ไมโครเมตรที่เวลา 10 วินาที พบว่าระยะกระดกของไมโครแอกชูเอเตอร์ที่มียาว 2000 ไมโครเมตรจะสูงกว่าไมโครแอกชูเอเตอร์ที่ยาว 1000 ไมโครเมตรในทุกกรณี และระยะกระดกของไมโครแอกชูเอเตอร์ที่มีความยาว 2000 ไมโครเมตรจะสูงกว่าระยะกระดกของไมโครแอกชูเอเตอร์ที่มีความยาว 1000 ไมโครเมตร เฉลี่ยประมาณ 78 ไมโครเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.3 ผลการทดลองการตอบสนองของไมโครแอกชูเอเตอร์ที่มีความยาว 1000 ไมโครเมตร

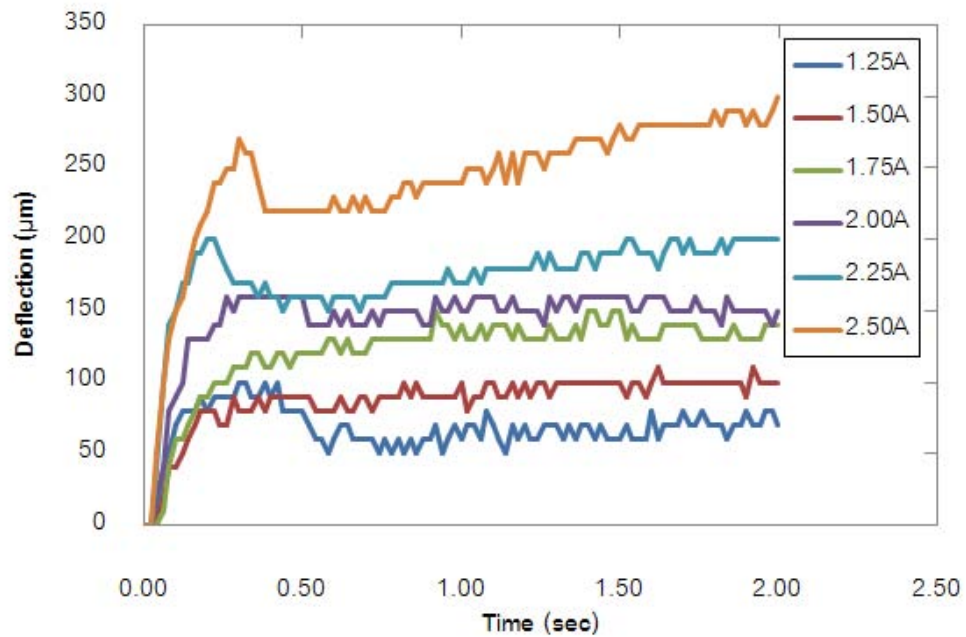


ภาพที่ 4.4 ผลการทดลองการตอบสนองของไมโครแอกชูเอเตอร์ที่มีความยาว 2000 ไมโครเมตร

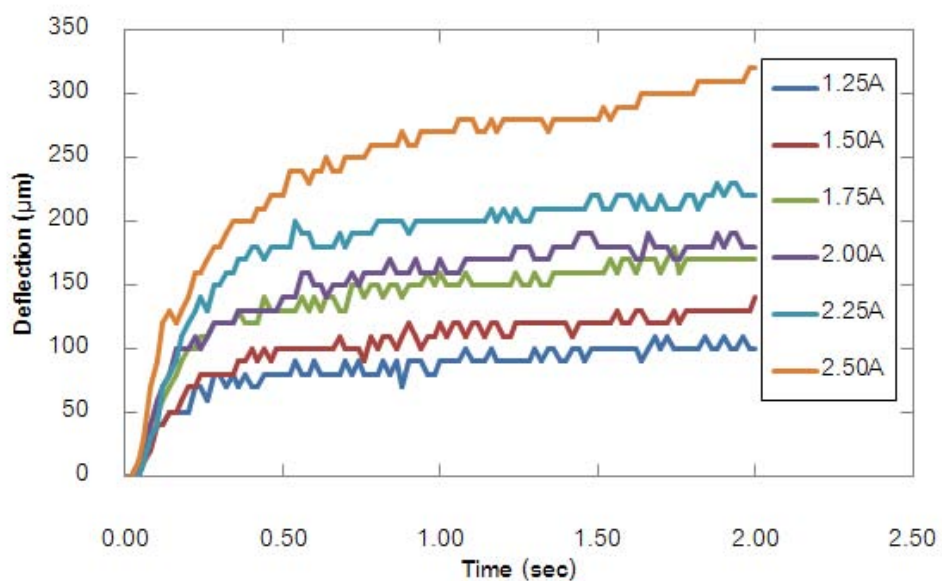


ภาพที่ 4.5 การเปรียบเทียบระยะกระดกของไมโครแอกชูเอเตอร์ขนาด 1000 และ 2000 ไมโครเมตร ที่ 10 วินาที

เมื่อนำระยะกระดกในช่วง 0-2 วินาทีแรกมาพล็อตกราฟเพื่อศึกษาการตอบสนองของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่มีความยาว 1000 และ 2000 ไมโครเมตร ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ พบว่าการตอบสนองของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ 50% ของระยะกระดกสูงสุด มีค่าตั้งแต่ 0.5-7 Hz

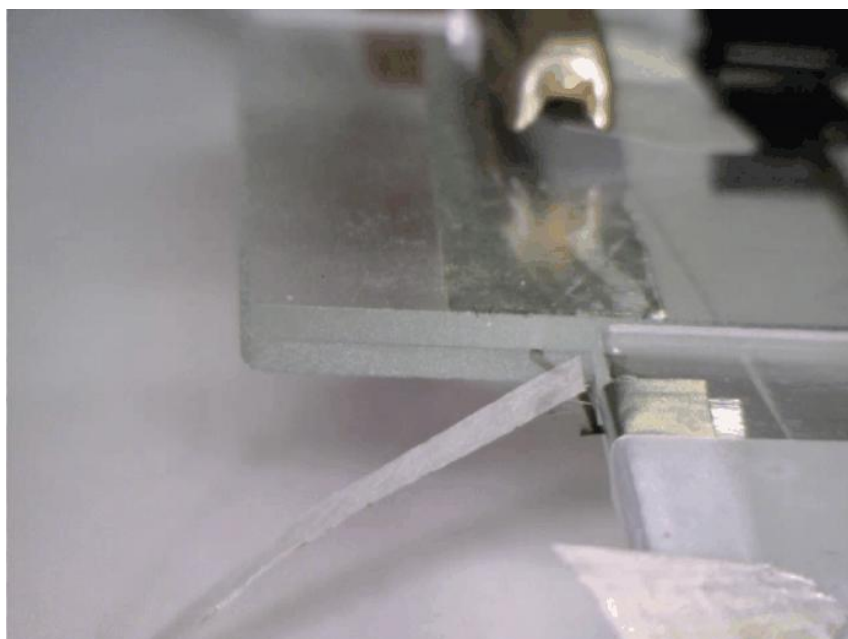


ภาพที่ 4.6 ระยะกระดก 0-2 วินาทีแรกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่มีความยาว 1000 ไมโครเมตร

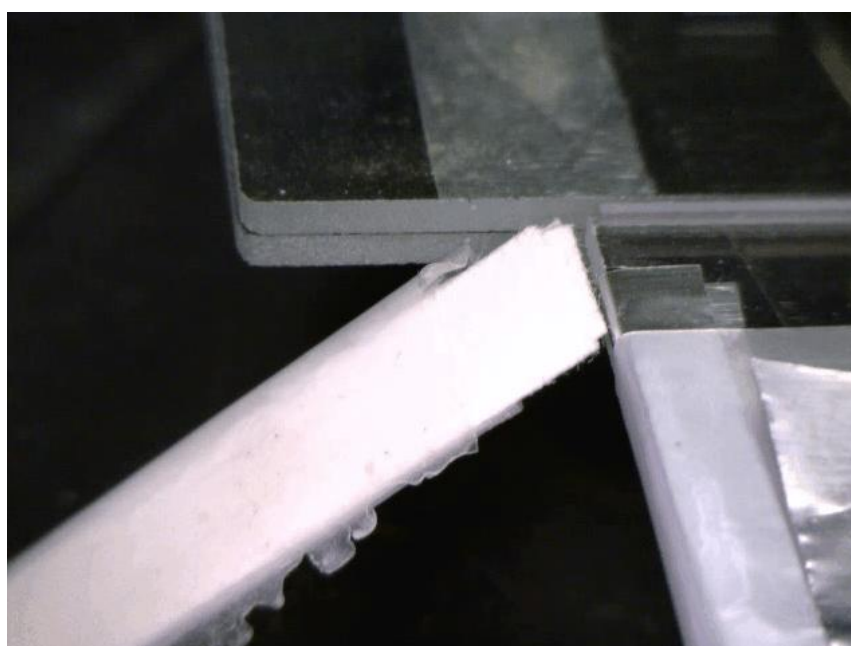


ภาพที่ 4.7 ระยะกระดก 0-2 วินาทีแรกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่มีความยาว 2000 ไมโครเมตร

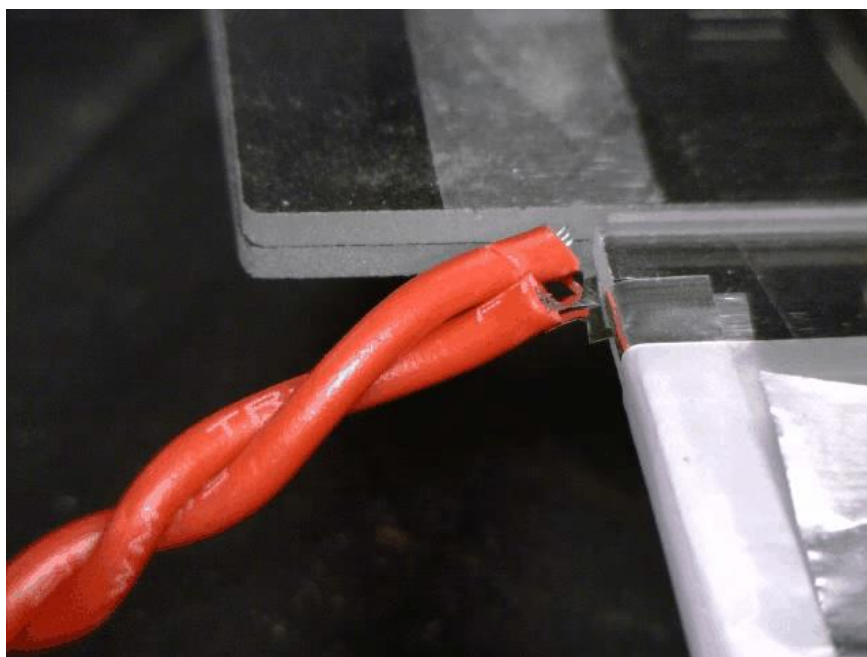
นอกจากนี้ยังได้ทดลองเพิ่มเติมโดยนำไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่มีความยาว 1000 ไมโครเมตร กว้าง 500 ไมโครเมตร เพื่อยกวัตถุที่มีน้ำหนักต่างๆ กัน ดังแสดงในภาพที่ 4.8 (ก)-(ค) โดยพบว่า เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า 2.25A ไมโครแอกซ์เวเตอร์สามารถยกวัตถุที่มีน้ำหนักระหว่าง 12-242 มิลลิกรัมได้



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 4.8 การทดสอบไมโครแอดชัวเอเตอร์โดยการยกวัตถุที่มีน้ำหนักต่างๆ กัน

(ก) กระดาษกรองที่มีน้ำหนัก 12 มิลลิกรัม

(ข) กระดาษที่มีน้ำหนัก 77 มิลลิกรัม

(ค) สายไฟที่มีน้ำหนัก 242 มิลลิกรัม

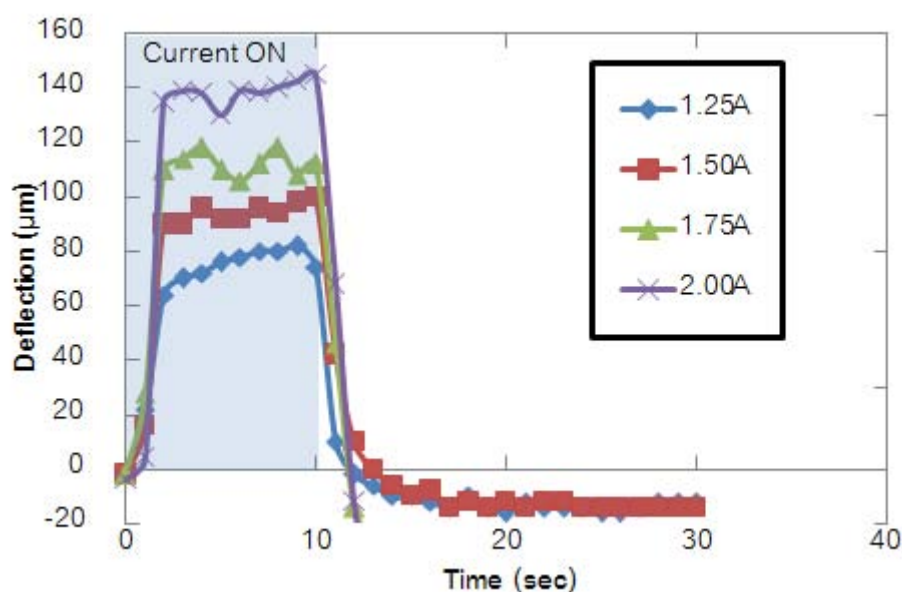
4.2 สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาการตอบสนองของไมโครแอดชัวเอเตอร์ที่มีความยาว 1000 และ 2000 ไมโครเมตร มีความกว้าง 500 ไมโครเมตร และมีความหนาของ NiTi และอลูมิเนียมเป็น 5 และ 16 ไมโครเมตร ตามลำดับ และทดสอบด้วยการจ่ายกระแสไฟฟ้า 1.25-2.50 แอมแปร์ สู่มิโครแอดชัวเอเตอร์ทั้งหมด 6 กรณี พบว่าหลังการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปเพียง 1 วินาที ทั้งไมโครแอดชัวเอเตอร์ที่มีความยาว 1000 และ 2000 ไมโครเมตร ต่างก็มีระยะกระดกที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อเวลาผ่านไประยะกระดกจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ตลอดระยะเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้าสู่มิโครแอดชัวเอเตอร์ และพบว่าเวลา 10 วินาที ซึ่งเป็นวินาทีสุดท้ายในการจ่ายกระแสไฟฟ้าระยะกระดกจะสูงที่สุด หลังจากการหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าพบว่าระยะกระดกลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดจากการถ่ายเทความร้อนของไมโครแอดชัวเอเตอร์สู่สภาวะแวดล้อม ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อนำระยะกระดกเวลา 10 วินาที ของไมโครแอดชัวเอเตอร์ที่มีความยาว 1000 และ 2000 ไมโครเมตร มาเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายพบว่าระยะกระดกของไมโครแอดชัวเอเตอร์ที่มีความยาว 2000 ไมโครเมตร จะ

มากกว่าระยะกระดกของไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่มีความยาว 1000 ไมโครเมตร อยู่ประมาณ 78 ไมโครเมตร ที่ทุกค่ากระแสไฟฟ้า

สำหรับการตอบสนองของแอกซ์เอเตอร์จะมีความเร็วในระดับ 1 วินาที ซึ่งระยะกระดกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงประมาณ 50% ของระยะกระดกที่ 10 วินาที ซึ่งน่าจะเหมาะสมกับงานประกอบ HGA แต่อย่างไรก็ตามระยะกระดกยังไม่เพียงพอโดยในงานวิจัยนี้พบว่าระยะกระดกเท่ากับ 410 ไมโครเมตร เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า 2.50 แอมแปร์ สำหรับแอกซ์เอเตอร์ที่ยาว 1000 ไมโครเมตร และกว้าง 500 ไมโครเมตร และ 490 ไมโครเมตร เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า 2.50 แอมแปร์ สำหรับไมโครแอกซ์เอเตอร์ 2000 ไมโครเมตร และกว้าง 500 ไมโครเมตร

การทดสอบในบทนี้ยังได้ทดสอบระยะกระดกสำหรับไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่มีความยาว 1500 ไมโครเมตร มีความกว้าง 500 ไมโครเมตร และมีความหนาของ NiTi และอลูมิเนียม เป็น 5 และ 16 ไมโครเมตร ตามลำดับ เพิ่มเติมแต่เมื่อทำการทดสอบมีความเสียหายเกิดขึ้น ผลที่ได้จึงไม่สามารถบอกได้ถึงความถูกต้อง แต่ยังสามารถบอกได้ถึงแนวโน้มระยะกระดกของไมโครแอกซ์เอเตอร์ โดยพบว่ามีความถี่เช่นเดียวกับระยะกระดกของไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่มีความยาว 1000 และ 2000 ไมโครเมตร โดยที่หลังการจ่ายกระแสไฟฟ้า 1 วินาที พบว่าระยะกระดกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อเวลาผ่านไปจนถึงวินาทีที่ 10 หลังจากหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้า พบว่าระยะกระดกลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน โดยระยะกระดกแสดงไว้ดังภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.9 ผลการทดลองการตอบสนองของไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่มีความยาว 1500 ไมโครเมตร

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

เนื่องจากในปัจจุบันแนวโน้มขนาดของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะมีขนาดเล็กลง ทำให้ส่วนประกอบต่างๆภายในจึงมีขนาดที่เล็กลงตามไปด้วย ดังนั้นกระบวนการประกอบ Head stack assembly (HSA) ซึ่งต้องมีการหยับบีบ Head gimbal assembly หรือ HGA เข้าประกอบกับ arm coil ด้วยอุปกรณ์หยับบีบแบบหัวจับสูญญากาศอาจจะมีปัญหาเกิดขึ้นได้ ทั้งการหยับบีบไม่ติดเมื่อหัวจับไม่อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม การสูญเสียด้านในในระบบ และเวลาที่ใช้ในการดูด-ปล่อยที่นาน งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำไมโครแอกซ์เอเตอร์มาใช้ในการประกอบ โดยออกแบบให้มีลักษณะที่คล้ายนิ้วมือของมนุษย์เพื่อสอดเข้าไปในรูบอส (Boss hole) และอ้าออกเพื่อจับยึด HGA ไปประกอบ

เมื่อได้ศึกษาหลักการที่จะนำมาใช้ในการสร้างแอกซ์เอเตอร์นี้ พบว่ามีหลักการที่น่าสนใจ เช่น PZN-PT, Conductive polymer, Electrostrictive polymer(p(VDE-TrFE) และโลหะผสมจำรูป เนื่องจากหลักการที่กล่าวมาแล้วข้างต้นสามารถให้ความเค้นและความเครียดที่สูง เพื่อให้แอกซ์เอเตอร์สามารถออกแรงได้มากและมีระยะการเคลื่อนที่อยู่ในระดับที่เหมาะสม ซึ่ง Shape memory alloy โดยวัสดุ Nitinol มีความเหมาะสมกับงานวิจัยนี้ที่สุด เนื่องจากมีความต่างศักย์ทำงานที่ต่ำ อีกทั้งอุณหภูมิการทำงานก็ไม่สูงมากจึงมีความเหมาะสมดังกล่าว หลังจากนั้นจึงนำมาสู่การสร้างไมโครแอกซ์เอเตอร์โดยสร้างให้เป็นวัสดุสองชนิดซ้อนทับกันอาศัยความเค้นภายในที่แตกต่างกันของสองวัสดุเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปเพื่อให้ไมโครแอกซ์เอเตอร์โค้งงอขึ้นได้

จากนั้นจึงทำการคำนวณด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาขนาดของไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่มีผลต่อระยะกระดกในแนวตั้งและระยะกระดกในแนวขวางที่อุณหภูมิ 80°C ของไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ใช้วัสดุ NiTi/Polyimide โดยเปลี่ยนแปลงความยาวของแอกซ์เอเตอร์ 3 ค่า คือ 750, 1000 และ 1500 ไมโครเมตร โดยมีความกว้าง 100, 200 และ 300 ไมโครเมตร และเปลี่ยนแปลงความหนาโพลีอิมิดเป็น 5, 10 และ 20 ไมโครเมตร จากผลการคำนวณพบว่าระยะกระดกในแนวตั้งและระยะกระดกในแนวขวางของไมโครแอกซ์เอเตอร์จะสูงขึ้น ถ้าหากความยาวของไมโครแอกซ์เอเตอร์สูงขึ้น ความกว้างที่สูงขึ้นจะส่งผลต่อระยะกระดกในแนวตั้งให้เพิ่มสูงขึ้นด้วยแต่จะทำให้ระยะกระดกในแนวขวางของไมโครแอกซ์เอเตอร์ลดลงและสามารถเห็นผลที่แตกต่างกันได้ชัดเจนเมื่อไมโครแอกซ์เอเตอร์มีความหนาโพลีอิมิด 5 ไมโครเมตร และระยะกระดกในแนวขวางของไมโครแอกซ์เอเตอร์จะแตกต่างกันน้อยลงเมื่อไมโครแอกซ์เอเตอร์มีความ

หนาโพลีอิมิต 10 และ 20 ไมโครเมตร สำหรับผลจากความหนาโพลีอิมิตนั้นพบว่ายิ่งโพลีอิมิตหนาขึ้นจะทำให้ระยะกระดกในแนวตั้งลดลง จึงส่งผลโดยตรงต่อระยะกระดกในแนวขวางของไมโครแอกซ์เอเตออร์เนื่องจากไมโครแอกซ์เอเตออร์จะงอได้น้อยกว่า

การศึกษาระยะกระดกในแนวตั้งและระยะกระดกในแนวขวางของไมโครแอกซ์เอเตออร์ที่อุณหภูมิ 80°C ที่ใช้วัสดุ NiTi/DLC ด้วยโปรแกรม ANSYS พบว่าแนวโน้มของระยะกระดกในแนวตั้งและระยะกระดกในแนวขวางมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับไมโครแอกซ์เอเตออร์ที่ใช้วัสดุ NiTi/Polyimide ซึ่งพบว่าความยาวเพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะกระดกในแนวตั้งและระยะกระดกในแนวขวางของไมโครแอกซ์เอเตออร์สูงขึ้น ในขณะที่ความกว้างที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะกระดกเพิ่มขึ้นแต่ระยะกระดกในแนวขวางจะลดลง เมื่อพิจารณาผลจากการเพิ่มความหนาของ NiTi นั้นจะพบว่าความหนา NiTi ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะกระดกลดลงทุกกรณี โดยพบว่าไมโครแอกซ์เอเตออร์ที่มีขนาด 750x200x5, 750x300x5, 1000x300x5 และ 1500x300x5 (ยาวxกว้างxความหนาโพลีอิมิต) ไมโครเมตร สามารถสอดเข้าไปในรูบอสของ HGA ได้

จากนั้นได้ศึกษาแรงกระทำระหว่างไมโครแอกซ์เอเตออร์ที่มีความยาว 1000 ไมโครเมตร กว้าง 100 ไมโครเมตร กับผิวของ HGA ที่ใช้วัสดุ 1 ไมโครเมตร NiTi/5 ไมโครเมตร Polyimide, 3 ไมโครเมตร NiTi/1 ไมโครเมตร DLC และ 1 ไมโครเมตร NiTi/5 ไมโครเมตร Cr ซึ่งพบว่าได้แรงกระทำเป็น 1.6, 3.7 และ 12.6 มิลลินิวตัน ตามลำดับ โดยที่ HGA จะมีมวลประมาณ 40 มิลลิกรัม และไมโครแอกซ์เอเตออร์ควรจะออกแรงได้อย่างน้อย 0.4 มิลลินิวตัน เพื่อที่จะยก HGA นี้ แต่จากการคำนวณแรงกระทำของทั้ง 3 กรณี พบว่าไมโครแอกซ์เอเตออร์ออกแรงได้มากกว่า 0.4 มิลลินิวตัน ดังนั้นไมโครแอกซ์เอเตออร์น่าจะสามารถออกแรงได้เพียงพอที่จะยก HGA ที่มีมวล 40 มิลลิกรัมหรือหนักกว่าได้

ดังนั้นสรุปได้ว่าการใช้ไมโครแอกซ์เอเตออร์น่าจะเหมาะสมกับงานประกอบนี้ เพราะการศึกษาดูด้วยโปรแกรม ANSYS ทำให้ทราบว่าไมโครแอกซ์เอเตออร์ขนาดดังกล่าวข้างต้นสามารถสอดเข้าไปในรูบอสเพื่อจับยึด HGA ที่บริเวณนี้ได้ อีกทั้งผลจากการคำนวณแรงกระทำระหว่างไมโครแอกซ์เอเตออร์และ HGA ทำให้ทราบว่าไมโครแอกซ์เอเตออร์สามารถออกแรงกระทำได้เพียงพอในการยก HGA ที่มีมวล 40 มิลลิกรัมได้

ในส่วนขั้นตอนการสร้างได้ทำการศึกษาวัดหลายชนิดรวมทั้งวิธีการสร้างหลายแบบซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ ขั้นตอนการสร้างแบบที่หนึ่งเริ่มจากการกัดซิลิกอนไดออกไซด์เพื่อเป็นฐานไมโครแอกซ์เอเตออร์ ขั้นตอนต่อไปคือการสร้างผิวโพลีอิมิตและ NiTi จากนั้นสร้างรูปแบบของไมโคร

แอคซ์แอเตอร์ด้วยการกัด NiTi และโพลีอิมิดให้มีลักษณะเป็นโครงสร้างของไมโครแอคซ์แอเตอร์ แล้วจึงเคลือบด้วยโฟโตริสอีกครั้งเพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์ จากนั้นจึงเป็นกระบวนการ crystallization และขั้นตอนสุดท้ายคือการกัดซิลิกอนไดออกไซด์ออกทั้งหมดเพื่อให้ไมโครแอคซ์แอเตอร์หลุดจากฐาน แต่ได้พบปัญหาในการกัดซิลิกอนไดออกไซด์โดยมีการกัดในส่วนที่ไม่ต้องการเกิดขึ้น ซึ่งมีสาเหตุจากการยึดติดระหว่าง SU-8 และซิลิกอนไดออกไซด์ไม่ดี กระบวนการสร้างแบบที่สองจึงจะใช้ทองแดงทดแทนการใช้ซิลิกอนไดออกไซด์และใช้ DLC แทนโพลีอิมิดที่เกิดปัญหาจากการติดตอสั่งซื้อ อีกทั้งยังเปลี่ยนไปใช้โฟโตริส AZ4620 แทน SU-8 เนื่องจากสามารถสร้างรูปร่างได้ง่ายกว่าและยังเปลี่ยนจากกระบวนการ etching เพื่อสร้างรูปร่างของไมโครแอคซ์แอเตอร์เป็นกระบวนการ lift-off เพื่อให้ง่ายต่อการสร้างอีกด้วย อย่างไรก็ตามกระบวนการสร้างแบบที่สองยังพบปัญหาโฟโตริสไหม้ นอกจากนี้ยังมีการเกิดออกไซด์บนผิวทองแดงในกระบวนการ crystallization

สำหรับกระบวนการสร้างแบบที่สามจะมีความคล้ายคลึงกับกระบวนการสร้างแบบที่สอง โดยจะใช้โครเมียมแทน DLC ซึ่งสามารถลดความร้อนและป้องกันโฟโตริสไหม้ได้ อีกทั้งจะแก้ปัญหการเกิดออกไซด์โดยการเคลือบผิว DLC บนทองแดงก่อนการ crystallization อย่างไรก็ตามเมื่อสร้างไปจนถึงขั้นตอนของการกัดทองแดงออกยังมีปัญหาบริเวณที่เป็นรอยต่อระหว่างฐานไมโครแอคซ์แอเตอร์กับแขนของไมโครแอคซ์แอเตอร์ขาดออกจากกัน

ดังนั้นกระบวนการสร้างแบบที่สี่จึงได้เลือกวิธีการสร้างแบบ bulk ทำให้มีการสร้างที่ไม่ซับซ้อนและลดปัญหาที่เกิดขึ้นได้ โดยเริ่มจากการกัดอลูมิเนียมฟอยล์ที่มีความหนา 16 ไมโครเมตร ให้มีรูปร่างเป็นโครงสร้างของไมโครแอคซ์แอเตอร์หลุดออกมาก่อนแล้วนำอลูมิเนียมฟอยล์ที่กัดแล้วไปสร้างผิว NiTi หนา 5 ไมโครเมตร แล้วนำไป crystallization ซึ่งมีออกไซด์เกิดขึ้น สำหรับกระบวนการสร้างแบบที่สี่นี้พบว่ามีปัญหาเกิดขึ้นในขั้นตอน crystallization เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ทำให้ไม่สามารถนำชิ้นงานไปอบเพื่อให้เห็นคุณสมบัติของ shape memory effect ต่อได้ในการศึกษา

เมื่อได้ชิ้นงานแล้วจะนำชิ้นงานไปทดสอบซึ่งศึกษาการตอบสนองของไมโครแอคซ์แอเตอร์ที่มีความยาว 1000 และ 2000 ไมโครเมตร มีความกว้าง 500 ไมโครเมตร และมีความหนาของ NiTi และอลูมิเนียมเป็น 5 และ 16 ไมโครเมตร ตามลำดับ ด้วยการจ่ายกระแสไฟฟ้า 1.25-2.50 แอมแปร์ สู่มิโครแอคซ์แอเตอร์ ทั้งหมด 6 กรณี พบว่าหลังการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปเพียง 1 วินาที ทั้งไมโครแอคซ์แอเตอร์ที่มีความยาว 1000 และ 2000 ไมโครเมตร ต่างก็มีระยะกระดกที่เพิ่มขึ้นอย่าง

รวดเร็ว และเมื่อเวลาผ่านไประยะกระดกจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ตลอดระยะเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้าสู่มอเตอร์แอคซิวเอเตอร์ และพบว่าเวลา 10 วินาที ซึ่งเป็นเวลาสุดท้ายในการจ่ายกระแสไฟฟ้าพบว่าระยะกระดกจะสูงที่สุดโดยเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า 2.50A สำหรับมอเตอร์แอคซิวเอเตอร์ที่มีความยาว 1000 ไมโครเมตรจะมีระยะกระดก 410 ไมโครเมตร และมอเตอร์แอคซิวเอเตอร์ที่มีความยาว 2000 ไมโครเมตรจะมีระยะกระดก 490 ไมโครเมตร หลังจากการหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าพบว่าระยะกระดกตกลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดจากการถ่ายเทความร้อนของมอเตอร์แอคซิวเอเตอร์สู่สิ่งแวดล้อม เมื่อนำระยะกระดกที่เวลา 10 วินาทีของมอเตอร์แอคซิวเอเตอร์ที่มีความยาว 1000 และ 2000 ไมโครเมตรมาเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายพบว่าระยะกระดกของมอเตอร์แอคซิวเอเตอร์ที่มีความยาว 2000 ไมโครเมตร จะมากกว่าระยะกระดกของมอเตอร์แอคซิวเอเตอร์ที่มีความยาว 1000 ไมโครเมตร อยู่ประมาณ 78 ไมโครเมตรที่ทุกๆค่ากระแสไฟฟ้า

เมื่อนำระยะกระดกของมอเตอร์แอคซิวเอเตอร์มาพล็อตกราฟเพื่อศึกษาการตอบสนองของมอเตอร์แอคซิวเอเตอร์ที่มีความยาว 1000 และ 2000 ไมโครเมตร พบว่าที่ 50% ของระยะกระดกสูงสุด มอเตอร์แอคซิวเอเตอร์จะมีการตอบสนองตั้งแต่ 0.5-7 Hz นอกจากนั้นยังได้นำมอเตอร์แอคซิวเอเตอร์ที่มีความยาว 1000 ไมโครเมตร มาทดสอบเพิ่มเติมโดยการยกวัตถุที่มีน้ำหนักต่างๆ กัน พบว่ามอเตอร์แอคซิวเอเตอร์สามารถยกวัตถุที่มีน้ำหนักตั้งแต่ 12-242 มิลลิกรัมได้

สำหรับมอเตอร์แอคซิวเอเตอร์ที่ไม่ได้ผ่านขั้นตอนของการ crystallization เหมือนกับการศึกษานี้จะทำให้ลักษณะการทำงานของมอเตอร์แอคซิวเอเตอร์เป็นแบบ thermal actuation ซึ่งระยะกระดกจะต่ำกว่ามอเตอร์แอคซิวเอเตอร์ที่ผ่านขั้นตอนการ crystallization มาแล้ว ด้วยเหตุนี้จึงได้ใช้โปรแกรม ANSYS ศึกษาการตอบสนองของมอเตอร์แอคซิวเอเตอร์ที่ใช้วัสดุ NiTi/Al ที่มีความยาว 2000 ไมโครเมตร กว้าง 500 ไมโครเมตร และเปรียบเทียบกับระหว่างมอเตอร์แอคซิวเอเตอร์ที่ผ่านและไม่ผ่านการ crystallization พบว่าที่อุณหภูมิ 80°C มอเตอร์แอคซิวเอเตอร์ที่ไม่ผ่านขั้นตอน crystallization จะมีระยะกระดก 54 ไมโครเมตร ในขณะที่มอเตอร์แอคซิวเอเตอร์ที่ผ่านขั้นตอน crystallization จะมีระยะกระดก 640 ไมโครเมตร ซึ่งผลการศึกษานี้ทำให้คาดคะเนว่า ถ้าหากมอเตอร์แอคซิวเอเตอร์ที่สร้างขึ้นมาและผ่านการ crystallization จะให้ระยะกระดกได้มากกว่าที่ได้ผลจากการทดลองประมาณ 7 เท่า สำหรับรายละเอียดการศึกษาในส่วนนี้แสดงไว้ใน ภาคผนวก ง

รายการอ้างอิง

- [1] Brushan B., Gupta B.K., Azarian M.H., Nanoindentation, Microscratch, friction, and wear studies of coating for contact recording applications. Wear 181-183 (March 1995): 743-758.
- [2] Aoki K., Aruga K., Numerical ball swaging analysis of head arm for hard disk drives. Microsyst Technol 13 (November 2006): 943-949.
- [3] Baughman R.H., Conducting polymers artificial muscles. Synthetic metal 78 (April 1996): 339-353.
- [4] Madden Peter G.A., Madden John D.W., Anquetil P.A., Vandesteeg N.A., and Hunter I.W., The relation of conducting polymer actuator material properties to performance. IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING 29, 3 (July 2004): 696-705.
- [5] Park S.E., Shrout T.R., Ultrahigh strain and piezoelectric behavior in relaxor based ferroelectric single crystals. J. Appl. Phys. 82 (May 1997).
- [6] Cheng Z.Y., Bharti V., Xu T.B., Xu H., Mai T., Zhang Q.M., Electrostrictive poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) copolymers. Sensors and actuators A 90 (January 2001): 138-147.
- [7] Pelrine R., Kornbluh R., Joseph J., Heydt R., Pei Q., Chiba S., High-field deformation of elastomeric dielectrics for actuators. Material science and engineering C 11 (November 2000): 89-100.
- [8] Pelrine, R. and Kornbluh R., 1999, SRI International.
- [9] Fu Y.Q., Du H.J., Huang W.M., Sam Z., Hu M., TiNi-based thin films in MEMS applications : a review. Sens. Actuators A 112 (February 2004): 395-408.
- [10] Ma IC. C., Wang R., Sun Q. P, Zohar Y. and Wong M., Frequency response of TiNi shape memory alloy thin film micro-actuators, The Thirteenth Annual International Conference on MEMS 2000: 370-374. Miyazaki, 2000
- [11] Otsuka K., Wayman C. M., Shape Memory Materials. Cambridge University Press, Cambridge, 1998.

- [12] Ryhänen J, Biocompatibility evaluation of nickel-titanium shape memory metal alloy. Ph.D. Thesis, Departments of Surgery, Anatomy and Pathology Oulu University, 1999
- [13] Fu Y.Q., Luo J.K., Ong S.E., Zhang S., Flewitt A.J. and Milne W.I., A shape memory microcage of TiNi/DLC films for biological applications. J. Micromech. Microeng 18 (February 2008): 35025-35033.
- [14] Massalski T.B., Okamoto H., Subramanian P. R., and Kacprzak L., Binary Alloy Phase Diagrams. ASM International, Materials Park, 3(2), 1990.
- [15] Seidemann V., Butfisch S., Buttgenbach S., Fabrication and investigation of in-plane compliant SU8 structures for MEMS and their application to micro valves and micro grippers. Sens. Actuators A 97–98 (November 2001):457–461.
- [16] Lee A.P., Ciarlo D.R., Krulevitch P.A., Lehew S., Trevino J., Northrup M.A., A practical microgripper by fine alignment, eutectic bonding and SMA actuation. Sens. Actuators A 54 (June 1996): 755–759.
- [17] Jansen S., Breidert J., Welp E.G., Positioning actuator based on shape memory wires. Actuator 2004, 9th International Conference on New Actuators 2004
- [18] Park B.H., Shantz M., Prinz F., Scalable rotary actuators with embedded shape memory alloy. Proceedings on SPIE 4327 pp.78-87. Newport beach CA, 2001
- [19] Chernenko V.A., Besseghini S., Ferromagnetic shape memory alloys: Scientific and applied aspects. Sens. Actuators A 142 (April 2008): 542–548.
- [20] Murray S.J., Ferromagnetic shape memory alloys, principles and applications. Proceedings on SMST. Baden-Baden, 2004
- [21] Tellinen J., Suorsa I., Jääskeläinen A., Aaltio I., Ullakko K., Basicproperties of magnetic shape memory actuators. Proceedings on ACTUATOR 2002 8 pp.566. Bremen, 2002
- [22] Chernenko V.A., Kokorin V.V., Ni₂MnGa as a new ferromagnetic ordered shape memory alloy. Proceedings on ICOMAT-92: 1205–1210, 1993.

- [23] Besseghini S., Pasquale M., Passaretti F., Sciacca A., Villa E., NiMnGa polycrystalline magnetically activated shape memory alloy: a calorimetric investigation. Scripta Mater 44 (June 2001): 2681–2687.
- [24] Sozinov A., Likhachev A.A., Lanska N., Ullakko K., Giant magnetic field-induced strain in NiMnGa seven-layered martensitic phase. Appl Phys Lett. 80 (March 2002): 1746–1748.
- [25] Müllner P., Chernenko V.A., Kostorz G., Largemagnetic field-induced deformation and magneto-mechanical fatigue of ferromagnetic Ni-Mn-Gamartensites, Mater. Sci. Eng. A387-389 (2004): 965–968.
- [26] Nespoli A., Besseghini S., Pittaccio S., Villa E., Viscuso S., The high potential of shape memory alloys in developing miniature mechanical devices: A review on shape memory alloy mini-actuators. Sens. Actuators A 158 (March 2010): 149–160.
- [27] Kohl M., Dittmann D., Quandt E., Winzek B., Miyazaki S., Allen D.M., Shape memory microvalves based on thin films or rolled sheets. Mater. Sci. Eng. A273–A275 (December 1999): 784–788.
- [28] Makino E., Mitsuya T., Shibata T., Micromachining of TiNi shape memory thin film for fabrication of micropump. Sens. Actuators A 79 (February 2000): 251–259.
- [29] Makino E., Mitsuya T., Shibata T., Fabrication of TiNi shape memory micropump. Sens. Actuators A 88 (January 2001): 256–262.
- [30] Gill J.J., Chang D.T., Momoda L.A., Carman G.P., Manufacturing of thin film NiTi microwrapper. Sens. Actuators A 93 (September 2001): 148-156.
- [31] Duerig T., Pelton A., Trepanier C., Nitinol. ASM International, 2011
- [32] Williams K. R., Gupta K., and Wasilik M., Etch Rates for Micromachining Processing—Part II, Journal of Microelectromechanical systems 12, 6 (December 2003): 761-778.
- [33] Ishida A, A Novel Method of Etching Copper Oxide Using Acetic Acid, J. Electrochem. Soc. 148, 11 (October 2001): G640-G643.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การสร้างรูปร่างของโฟโตริสซิสชนิด AZ4620

ในขั้นตอนการสร้างรูปร่างของไมโครแอสเซมบลีให้ใช้เทคนิคที่เรียกว่า photolithography ซึ่งเป็นเทคนิคการเปลี่ยนคุณสมบัติของโฟโตริสซิส โดยอาศัยการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตลงบนส่วนที่ต้องการสร้างรูปร่าง ในขณะที่โฟโตริสซิสชนิด AZ4620 นั้นเป็นโฟโตริสซิสแบบบวก ซึ่งเมื่อถูกรังสีอัลตราไวโอเล็ตแล้วสามารถล้างออกได้ด้วยสารละลาย developer

สำหรับขั้นตอนการเคลือบผิวจะเริ่มจากการตั้งโปรแกรมบนเครื่องสปินเนอร์ ซึ่งแสดงไว้ดังภาพที่ ก.1 เพื่อควบคุมความเร็วในการหมุน ความเร่งเชิงมุม และระยะเวลาที่หมุน เมื่อต้องการความหนาของโฟโตริสซิสที่ต่างกันต้องมีการตั้งโปรแกรมบนสปินเนอร์ต่างกันออกไป ซึ่งสำหรับการเคลือบโฟโตริสซิสนี้จะใช้โปรแกรมตามตาราง

ตารางที่ ก.1 โปรแกรมที่กำหนดบนเครื่องสปินเนอร์

รายการ	ค่าพารามิเตอร์
ความเร็วการหมุน	1000 รอบต่อนาที
ความเร่ง	7000 รอบต่อนาที/วินาที
เวลา	30 วินาที

ส่วนประกอบของเครื่องสปินเนอร์

เครื่องสปินเนอร์จะประกอบด้วยหน้าจอแสดงผล ซึ่งจะแสดงโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมเครื่องสปินเนอร์ และ แผงตัวเลขเพื่อใช้ในการโปรแกรมค่า เมื่อเปิดฝาของเครื่องสปินเนอร์จะพบแท่นวางชิ้นงาน ซึ่งจะมีรูไว้ดูดชิ้นงานให้ติดขณะเคลือบโฟโตริสซิส



ภาพที่ ก.1 เครื่องสปินเนอร์

ขั้นตอนการเคลือบโฟโตริส

1. วางชิ้นงานบนแท่นโดยให้อยู่ตำแหน่งใกล้เคียงจุดศูนย์กลางมากที่สุด
2. กดปุ่ม VAC เพื่อดูดชิ้นงานให้ติดกับแท่น
3. เทโฟโตริสลงไปบนชิ้นงานรอจนโฟโตริสกระจายตัวให้พอดี
4. กดปุ่ม I/O เพื่อเริ่มการหมุน เมื่อหมุนครบตามเวลาที่ตั้งไว้ ทิ้งไว้ประมาณ 1-2 นาที เพื่อให้โฟโตริสอยู่ตัวก่อน
5. กดปุ่ม VAC อีกครั้งเพื่อปล่อยชิ้นงานและนำชิ้นงานออกมา
6. ปิดฝาและทำความสะอาดให้เรียบร้อย

หลังจากเคลือบโฟโตริสตามโปรแกรมที่กำหนดไปจะได้รับความหนาของโฟโตริสประมาณ 20 ไมครอนเมตร หลังจากนั้นจะนำชิ้นงานไปเข้าเตาอบดังภาพที่ ก.2 ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นนำชิ้นงานออกจากเตา โดยชิ้นงานจะถูกปิดด้วย mask ที่วาดขึ้นเพื่อให้รังสีอัลตราไวโอเลตกระทบโฟโตริสในส่วนที่ต้องการจะล้างออกด้วย developer เท่านั้น แล้วจึงฉายรังสีอัลตราไวโอเลตบนตู้ฉายรังสีอัลตราไวโอเลตดังภาพที่ ก.3 เป็นเวลา 1 นาที 30 วินาที



ภาพที่ ก.2 เตาอบชิ้นงาน

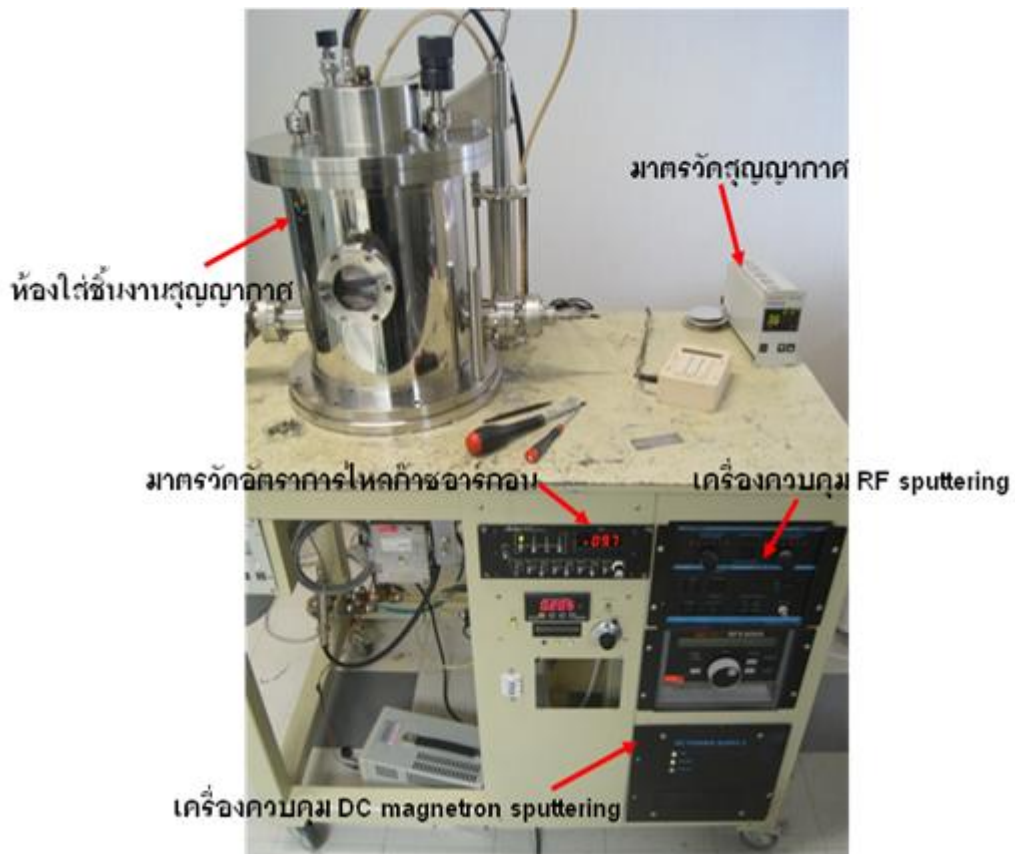


ภาพที่ ก.3 ตู้ฉายรังสีอุลตราไวโอเล็ต

ภาคผนวก ข

การสร้างผิววัสดุด้วยเครื่องสปัตเตอริง

การสร้างผิวของ NiTi จะสร้างด้วยวิธีการสปัตเตอริง ซึ่งเป็นการเร่งประจุของก๊าซอาร์กอนให้ไปชนกับ target ของวัสดุที่ต้องการจะเคลือบ เช่น ต้องการจะเคลือบ NiTi ก็จะทำ target ที่เป็นวัสดุ NiTi ไปติดตั้งในเครื่องสปัตเตอริง แล้วสร้างสภาวะในห้องใส่ชิ้นงานให้เป็นสุญญากาศต่ำในระดับ 1×10^{-5} มิลลิบาร์ จากนั้นเปิดก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศจนมีความดันเป็น 3×10^{-3} มิลลิบาร์ แล้วจึงเร่งประจุของก๊าซอาร์กอนให้ไปชน target เมื่อมีการชนเกิดขึ้นอนุภาคของ NiTi จะกระเด็นลงมาเคลือบบนชิ้นงาน เครื่องสปัตเตอริงแสดงไว้ดังภาพที่ ก.1



ภาพที่ ข.1 เครื่องสปัตเตอริง



ภาพที่ ข.2 แทนวางชิ้นงานในเครื่องสปีดเตอริง



ภาพที่ ข.3 ตำแหน่งวาง target

ส่วนประกอบของเครื่องสเป็คเตอริง

เครื่องสเป็คเตอริงจะประกอบด้วยห้องใส่ชิ้นงานสุญญากาศ เมื่อเปิดฝาขึ้นมาจะพบตำแหน่งวางชิ้นงานและตำแหน่งวาง target ดังภาพที่ ข.2 และภาพที่ ข.3 ตามลำดับ

1. มาตรฐานสุญญากาศเพื่อให้ทราบว่าขณะนี้ภายในห้องสุญญากาศมีความดันเท่าไร
2. มาตรฐานอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน เพื่อให้ทราบว่าขณะนี้มีอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่าใดและเพื่อใช้ในการหมุนปรับอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนให้เหมาะสม
3. เครื่องควบคุม RF sputtering ใช้ควบคุมการสเป็คเตอริงด้วย RF และเพื่อควบคุมการทำ ความสะอาดชิ้นงาน
4. เครื่องควบคุม DC magnetron sputtering ใช้ควบคุมการสเป็คเตอริงด้วย DC magnetron

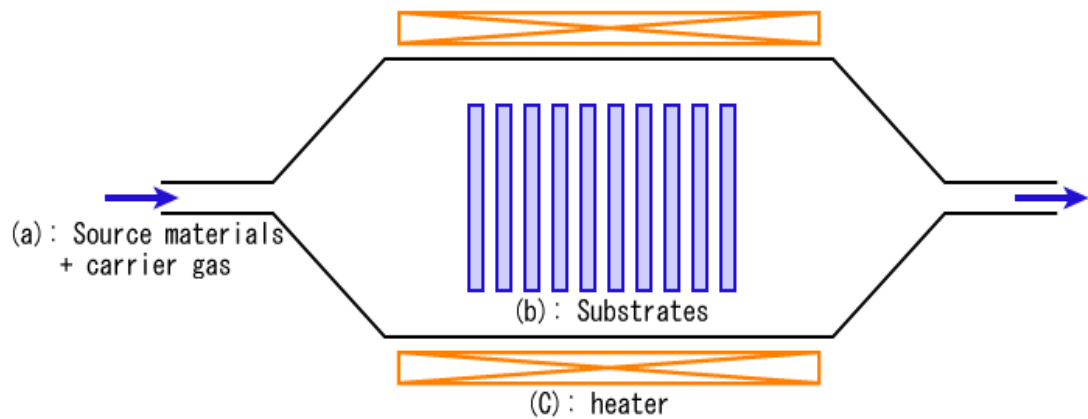
ขั้นตอนการสร้างผิววัสดุด้วยเครื่องสเป็คเตอริง

1. เปิดห้องใส่ชิ้นงาน วางชิ้นงานลงบนตำแหน่งวางชิ้นงานในบริเวณกึ่งกลางแท่นวาง ชิ้นงาน
2. เปลี่ยน target ที่ต้องการจะสเป็คเตอริง ตรวจสอบว่าแนบสนิทกับตัวระบายความร้อน หรือใส่แผ่น อลูมิเนียมเสริมความหนา เพื่อให้ target แนบสนิทกับตัวระบายความร้อน ชั้นน้อตให้แน่น
3. ปิดฝาและเปิดสวิตช์ปั๊มสุญญากาศแล้วรอจนถึงความดันที่เหมาะสม
4. เปิดสวิตช์ควบคุมและปรับอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนจนได้ความดันที่เหมาะสม
5. เปิดสวิตช์เครื่องควบคุม RF sputtering และตั้งเวลาที่ใช้ในการทำ ความสะอาดชิ้นงาน หลังจากนั้นกดสวิตช์เริ่มต้นเพื่อทำความสะอาดชิ้นงาน เมื่อทำความสะอาดเสร็จแล้ว ปิดเครื่อง RF sputtering และ ก๊าซอาร์กอน
6. เปิดสวิตช์เครื่องควบคุม DC magnetron sputtering และก๊าซอาร์กอน แล้วจึงตั้งเวลาที่ จะใช้ในการสร้างผิว หลังจากนั้นกดสวิตช์เริ่มต้น ปรับกระแสให้เหมาะสม เมื่อเสร็จแล้ว ปิดสวิตช์เครื่องควบคุม DC และก๊าซอาร์กอน
7. ปิดการทำงานของเทอร์โบปั๊ม รอจนความเร็วรอบของปั๊มลดลงต่ำกว่า 600 รอบต่อ วินาที จากนั้นปิดการทำงานของปั๊มลูกสูบ
8. เปิดห้องวางชิ้นงานและนำชิ้นงานออกมา

ภาคผนวก ค

การสร้างผิวของซิลิกอนไดออกไซด์บนแผ่นซิลิกอน

การสร้างผิวซิลิกอนไดออกไซด์บนแผ่นซิลิกอนสามารถทำได้หลายวิธี เช่น Chemical vapor deposition (CVD) dry oxidation และ wet oxidation สำหรับ chemical vapor deposition (CVD) เป็นการใช้ความร้อนเพื่อให้ไอเคมีไปเคลือบผิวชิ้นงาน ดังแสดงไว้ในภาพที่ ค.1

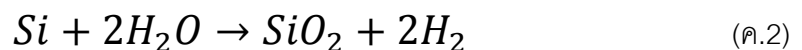


ภาพที่ ค.1 Chemical vapor deposition (CVD) (Wikipedia)

สำหรับ dry oxidation ทำได้โดยการให้ความร้อนแผ่นซิลิกอนที่อุณหภูมิประมาณ 900-1200°C ในเตาอบที่มีออกซิเจนอยู่ภายใน ซึ่งมีสมการทางเคมีดังนี้



โดยที่ wet oxidation จะเป็นการให้ความร้อนเช่นเดียวกับ dry oxidation แต่จะมีไอน้ำอยู่ภายใน ซึ่งจะมีสมการทางเคมีดังนี้



หลังจากกระบวนการนี้จะทำให้ได้ผิวของซิลิกอนไดออกไซด์ซึ่งความหนาจะขึ้นอยู่กับระยะเวลาของกระบวนการ

ภาคผนวก ง

การศึกษาผลของการ crystallization ต่อระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์

การศึกษาผลของการ crystallization ต่อระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์จะใช้โปรแกรม ANSYS ช่วยในการคำนวณ โดยจะสร้างแบบของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่มีความยาว 2000 ไมโครเมตร กว้าง 500 ไมโครเมตร และมีความหนา NiTi และอลูมิเนียมเป็น 5 และ 16 ไมโครเมตร ตามลำดับ สำหรับไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ไม่ผ่านการ crystallization จะกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุดังตารางที่ ง.1 และสภาวะขอบเขตเริ่มต้นดังตารางที่ ง.2

ตารางที่ ง.1 คุณสมบัติของวัสดุที่กำหนดในโปรแกรม ANSYS

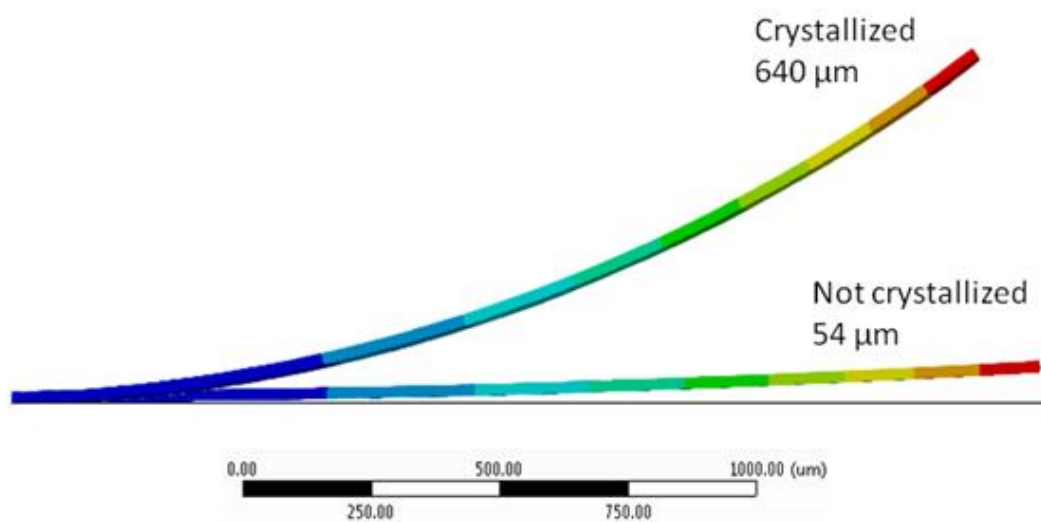
Properties	NiTi (Not crystallized)	NiTi (Crystallized)	Al
Density (g/cc)	6.45	6.45	2.6989
Modulus of elasticity (GPa)	30	75	68
Coefficient of thermal expansion (ppm)	11	-88	24

ตารางที่ ง.2 ค่าขอบเขตเริ่มต้นที่กำหนดในโปรแกรม ANSYS

Parameter	Condition
Environment temperature	25°C - 80°C
Mesh	Auto(Proximity and curvature)
	16,957 elements
Fixed support	One end of the beam
Contact region (NiTi/Polyimide)	Bonded
Large deflection	On

การศึกษาผลของการ crystallization นี้จะกำหนดขอบเขตเริ่มต้นคล้ายกับ ขั้นตอน 2.3 ซึ่ง จะกำหนดปลายด้านหนึ่งของไมโครแอกซ์เวเตอร์ให้เป็น fixed support และกำหนดอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเป็น 25°C แล้วจึงกำหนดอุณหภูมิของไมโครแอกซ์เวเตอร์เป็น 80°C แล้วคำนวณหา ระยะกระดกซึ่งพบว่าสำหรับไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ไม่ผ่านขั้นตอนการ crystallization นั้นจะได้

ระยะกระดกประมาณ 54 ไมโครเมตร ในขณะที่ไมโครแอดซัวเอเตอร์ที่ผ่านขั้นตอนการ crystallization จะได้ระยะกระดกประมาณ 640 ไมโครเมตร ซึ่งผลการเปรียบเทียบแสดงไว้ดังภาพที่ ง.1



ภาพที่ ง.1 เปรียบเทียบระยะกระดกของแอดซัวเอเตอร์ที่ผ่านและไม่ผ่าน crystallization

จากผลการศึกษาพบว่าไมโครแอดซัวเอเตอร์ที่ผ่านขั้นตอน crystallization จะมีระยะกระดกที่สูงกว่าไมโครแอดซัวเอเตอร์ที่ไม่ได้ผ่านขั้นตอน crystallization

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกฤษณ์กร ประไพพิทยาคุณ เกิดเมื่อวันที่ 22 สิงหาคม พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดเชียงราย เป็นบุตรชายคนโตของนายจັกกฤษณ์ ประไพพิทยาคุณ และนางธิชากร ประไพพิทยาคุณ มีประวัติการศึกษาดังนี้

- วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เครื่องกล) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปีการศึกษา 2549

และได้ศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (เครื่องกล) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2551

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

1. Shape Memory Alloy Micro-Actuator for Handling of Head Gimbal Assembly. AIJSTPME 4(4) (October 2011). Accepted
2. Shape Memory Alloy Micro-Actuator for Handling of Head Gimbal Assembly. Proc. of the 10th Global Congress on Manufacturing and Management pp: 233-238 Bangkok 2010.
3. การพัฒนาไมโครแอกชูเอเตอร์ประเภทโลหะผสมจำรูปสำหรับการจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 AMM042, 20-23 ตุลาคม 2553 ณ โรงแรมสุนีย์แกรนด์ จังหวัดอุบลราชธานี