

การสร้างสวิตช์ความแรงโดยวิธีการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์



นายสุภกิตติ พรหมวิก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2552

FABRICATION OF ACCELERATION SWITCH USING X-RAY LITHOGRAPHY



Suppakit Promwikorn

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2009

การสร้างสวิตช์ความแรงโดยวิธีการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล)

ประธานกรรมการ

(อ. ดร.นิมิต ชมนาวัง)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.ธนัชชัย กุลวรวาณิชพงษ์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปีจันทร์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

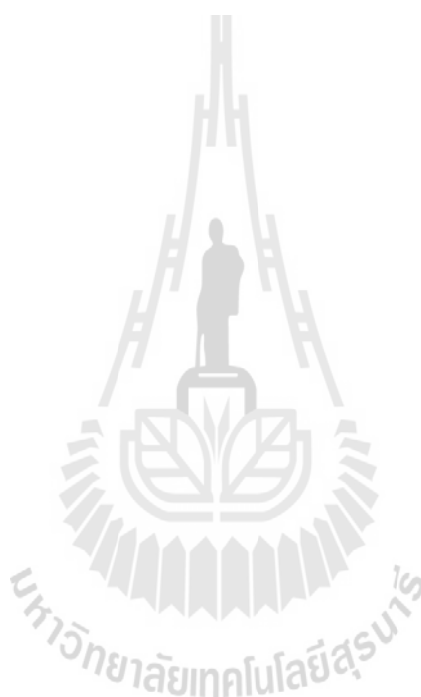
(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ศุภกิตติ์ พรหมวิกร : การสร้างสวิตช์ความเร่งโดยวิธีการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์
(FABRICATION OF ACCELERATION SWITCH USING X-RAY LITHOGRAPHY)
อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร. นิमित ชมนาวัง 117 หน้า.

ตัวตรวจรู้ความเร่งสามารถแบ่งการทำงานได้สองแบบคือ การวัดค่าความเร่งได้อย่างต่อเนื่องและสามารถทำงานเป็นสวิตช์เมื่อความเร่งมีค่าเท่ากับค่าที่ออกแบบไว้ หรือเรียกว่าสวิตช์ความเร่ง กระบวนการสร้างสวิตช์ความเร่งมีหลายวิธี เช่น การสร้างโครงสร้างจุลภาคในเนื้อวัสดุ การสร้างโครงสร้างจุลภาคบนพื้นผิวและการสร้าง โครงสร้างสัณฐานสูง ซึ่งโครงสร้างของสวิตช์ความเร่งประกอบด้วย ก้อนมวล คานสปริงและขั้วไฟฟ้า เมื่อได้รับแรงก้อนมวลเคลื่อนที่ไปสัมผัสกับขั้วไฟฟ้า การใช้รังสีเอ็กซ์เพื่อสร้างโครงสร้างมีข้อดีคือ สามารถสร้างโครงสร้างสัณฐานสูง ขนาดโครงสร้างมีความถูกต้องแม่นยำ งานวิจัยนี้ได้พัฒนากระบวนการสร้าง สวิตช์ความเร่งสองวิธี ได้แก่ วิธีแรกเป็นการชุบนิเกิลผ่านแม่พิมพ์สารไวแสงลงบนวัสดุชั้นชั่วคราว ที่มีขนาดครอบคลุม ก้อนมวลและคานสปริง การฉายรังสีเอ็กซ์ลงบน SU-8 ต้องฉายด้วยพลังงานเหมาะสม เพื่อสร้างแม่พิมพ์แล้วชุบนิเกิลด้วยไฟฟ้าจนเต็มแม่พิมพ์แล้วกัดวัสดุชั้นชั่วคราวออก ทำให้ก้อนมวลและคานแขวนลอยอยู่ในอากาศ เมื่อสร้างสวิตช์ความเร่งเสร็จแล้วได้ขนาดของก้อนมวลความกว้าง 3003 μm ยาว 2997 μm คานสปริงกว้าง 36 μm ยาว 804 μm ก้อนมวลสูง 384 μm ระยะห่างระหว่างก้อนมวลกับขั้วไฟฟ้า 51 μm เมื่อคำนวณค่าความเร่งจุดทำงานจากขนาดที่วัดจริงได้ 9.6 g เมื่อนำมาทดสอบด้วยชุดวัดความเร่ง สวิตช์ทำงานที่ความเร่ง 9.1 g กระบวนการชุบนิเกิลผ่านแม่พิมพ์สารไวแสงลงบนวัสดุชั้นชั่วคราว เป็นการสร้างโครงสร้างของสวิตช์ความเร่งบนวัสดุชั้นเสียสละ ดังนั้นจึงเป็นกระบวนการต่อเนื่อง ถ้าเกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการสร้างสวิตช์ความเร่ง ต้องเริ่มสร้างวัสดุชั้นชั่วคราวใหม่ทุกครั้ง อีกทั้งในระหว่างกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าและการกัดแม่พิมพ์สารไวแสงด้วยพลาสมา ซึ่งต้องใช้เวลานานทำให้เกิดความร้อนสูง อาจทำฐานรองรับงานแตกร้าวได้ จึงพัฒนามาเป็นการสร้างสวิตช์ความเร่งบนฐานรองชั่วคราวแกรไฟต์ ซึ่งเป็นการสร้างส่วนสวิตช์ความเร่งแยกส่วนกับจุดยึดตรึงแล้วนำทั้งสองส่วนมาเชื่อมต่อกันด้วยกาวเงิน ส่วนสวิตช์ความเร่งสร้างด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ แล้วชุบนิเกิลด้วยไฟฟ้าผ่านแม่พิมพ์สารไวแสง จัดฐานรองชั่วคราวแกรไฟต์ออกจนได้แผ่นแม่พิมพ์สารไวแสงที่ฝังโครงสร้างนิเกิลของสวิตช์ความเร่งไว้ จุดยึดตรึงสร้างด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตลงบนสารไวแสงแบบแห้งบนแผ่นวงจรพิมพ์ แล้วกัดทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์ออกแล้วเชื่อมต่อแผ่นแม่พิมพ์สารไวแสงกับจุดยึดตรึงด้วยกาวเงิน สกัดแม่พิมพ์สารไวแสงด้วย พลาสมาออก แล้วได้สวิตช์ความเร่งมีขนาด ก้อนมวลกว้าง 3016 μm ยาว 3009 μm คานสปริงกว้าง 41 μm ยาว 796 μm ระยะห่างระหว่างก้อนมวลกับขั้วไฟฟ้า 20 μm สูง 368 μm เมื่อนำขนาดโครงสร้างมาคำนวณหาค่า

ความเร่งได้ 5.6 g แล้วนำมาทดสอบจริงได้ค่า 4.4 g ซึ่งกระบวนการนี้ใช้ระยะเวลาการสกัดแม่พิมพ์
สารไวแสงด้วยพลาสติกน้อยกว่ากระบวนการชุบนิเกิลผ่านแม่พิมพ์สารไวแสงลงบนวัสดุชั้น
ชั่วคราว เนื่องจากแผ่นแม่พิมพ์สารไวแสงถูกยกให้ลอย จึงสามารถสกัดสารไวแสงได้ทั้งสองด้าน
พร้อมกัน ทำให้ลดระยะเวลาการสกัดและลดปัญหาการแตกร้าวของฐานรองได้ อีกทั้งกระบวนการ
สร้างยังแบ่งเป็นสองส่วน เมื่อเกิดความผิดพลาดในการสร้างโครงสร้างสวิตช์ความเร่ง ก็สามารถ
สร้างชิ้นใหม่ได้โดยไม่จำเป็นต้องสร้างชุดยึดตรึงใหม่ทุกครั้งทำให้ประหยัดเวลาการสร้างลงได้
และกระบวนการนี้ยังสามารถสร้างสวิตช์ความเร่งที่มีจุดทำงานใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบไว้



SUPPAKIT PROMWIKORN : FABRICATION OF ACCELERATION
SWITCH USING X-RAY LITHOGRAPHY. THESIS ADVISOR :
NIMIT CHOMNAWANG, Ph.D., 117 PP.

MEMS/MICROSWITCH/X-RAY LITHOGRAPHY

Accelerometer has been divided into two types. The first one is the sensor that measures acceleration continuously, and the other is acceleration switch which operates at a specific value. Many techniques were used to fabricate an acceleration switch such as bulk micromachining, surface micromachining on silicon wafer. Generally, an acceleration switch has a proof mass that is suspended by a fixed-end spring. A force at a specific acceleration displaces the proof mass from its original position toward a fixed electrode nearby, resulting in an electrical connection. However, many disadvantages of micromachining techniques make them difficult to apply for low cost device. With the advantages of X-ray irradiation such as high energy and excellent accuracy of pattern transfer, many applications are utilized via X-ray lithography to produce high aspect ratio microstructures. This thesis concentrates on fabrication of threshold switches with specific acceleration based on proof-mass actuation. Two processes to fabricate a suspended proof mass are proposed. Sacrificial releasing is the first process based on nickel electroplating inside an X-ray photoresist mold on top of a copper sacrificial layer. Then, the SU-8 photoresist mold is removed by plasma of O_2/CF_4 resulting in a suspended proof mass and two fixed electrodes on each side. The proof mass of $3003\ \mu m \times 2997\ \mu m$ is suspended by a straight beam with a width of $36\ \mu m$ and a length of $804\ \mu m$. The proof mass and electrode are separated by a distance of $51\ \mu m$ and the thickness

of the structure is 384 μm . From experimental results, this fabricated switch can be activated at 9.6 g while the mathematic models predicts an activation at 9.1 g. Disadvantages of this process include long-time releasing of sacrificial layer, SU-8 photoresist mold and damage of the substrate due to long duration of high temperature plasma etching. To avoid these problems, a novel process is proposed. In this technique, the Ni structures of acceleration switch are fabricated on a sacrificial graphite substrate. After removal of the graphite substrate by mechanical polishing a slab of SU-8 photoresist with embedded Ni structures of acceleration switch is obtained. This slab of SU-8 is bonded using silver glue into a PCB substrate where three anchors made of copper have been pre-fabricated. SU-8 is then removed by plasma etching resulting in an acceleration switch with a suspended proof mass of $3016 \mu\text{m} \times 3009 \mu\text{m}$, a straight beam of 41 μm wide 796 μm long. The gap between the proof mass and electrode is 20 μm and the thickness of acceleration switch is 368 μm . This sensor can operate at acceleration of 4.4 g while the mathematic model predicts a value of 5.6 g. Since the plasma of O_2/CF_4 can etch SU-8 photoresist from both upper and lower sides, removal time of SU-8 slab is about the half of that in previous process. Hence, the substrate is in a lower temperature with a shorter period of time. No damage on the substrate has been observed.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2009

Student's Signature_____

Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ ดำเนินการ สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ และการดำเนินงานวิจัย รวมถึงหน่วยงานต่าง ๆ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย อาทิ

อาจารย์ ดร.นิมิต ชมนาวัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และชี้แนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิทยานิพนธ์ รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดี ในระหว่างการดำเนินการวิจัยให้กับผู้วิจัยเสมอมา

คณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนัก วิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำหรับการ สนับสนุนเครื่องมือวิจัย สถานที่ทำวิจัย และให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัยตลอดระยะเวลาที่ศึกษา

นายพิทยา ดิกล้ำ นายรัช ชูจิต นายรุ่งเรือง พัฒนากุล เพื่อนบัณฑิตศึกษา ที่ช่วยตรวจทานรูปแบบการจัดเล่มวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยสวยงาม

เลขานุการและธุรการประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ช่วยประสานงานด้านเอกสารระหว่างการศึกษา

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น ความห่วงใย ให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาอย่างดียิ่ง

ศุภกิตติ พรหมวิก

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญรูป	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	4
1.3 ขอบตกลงเบื้องต้น	5
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์	5
2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 บทนำ	6
2.2 กระบวนการสร้างโครงสร้างจุลภาค	6
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
3 กระบวนการพื้นฐานทางระบบกลไฟฟ้าจุลภาค	11
3.1 กระบวนการระเหยไอโลหะในสุญญากาศ	11
3.2 กระบวนการสปัตเตอริง	13
3.3 กระบวนการเคลือบชั้นฟิล์มสารไวแสง	16
3.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี	21
3.5 กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า	24
3.5.1 การชุบโลหะเงิน	25

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5.3 การชุบโลหะนิกเกิล	27
3.5.3 การชุบโลหะทองแดง	28
3.6 กระบวนการสกัดเนื้อวัสดุ	28
4 การออกแบบสวิตช์ความเร่ง	32
4.1 การออกแบบสวิตช์ความเร่ง	32
5 กระบวนการสร้างสวิตช์ความเร่ง	38
5.1 การสร้างตัวตรวจรู้ความเร่งโดยการชุบนิกเกิล	
ด้วยไฟฟ้าผ่านแม่พิมพ์แบบเวียนกลับมาใช้ใหม่	39
5.1.1 การวาดลวดลาย	39
5.1.2 การสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์	40
5.1.3 การสร้างโครงสร้างจากแม่พิมพ์สารไวแสงแบบนำกลับมาใช้ใหม่	42
5.1.1 สรุป	48
5.2 การสร้างสวิตช์ความเร่งด้วยการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าบนวัสดุชั้นชั่วคราว	48
5.2.1 การวาดลวดลายจุดภาค	48
5.2.2 การสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์	50
5.2.3 กระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความเร่ง	
ด้วยการชุบโลหะผ่านแม่พิมพ์สารไวแสง	55
5.2.4 สรุป	62
5.3 การสร้างสวิตช์ความเร่งบนฐานรองชั่วคราวเกรดไฟต์	63
5.3.1 กระบวนการสร้างสวิตช์ความเร่ง	64
5.3.2 สรุป	72
6 การทดสอบและผลการทดสอบ	74
6.1 ชุดทดสอบความเร่ง	74
6.2 การวัดผลสวิตช์ความเร่งที่สร้างด้วยกระบวนการชุบนิกเกิล	
ผ่านแม่พิมพ์สารไวแสงลงบนวัสดุชั้นชั่วคราว	82

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.3 การวัดผลสวิตซ์ความแรงที่สร้างด้วยกระบวนการสร้างสวิตซ์ความแรง	
บนฐานรองเกรไฟต์ชั่วคราว	85
6.4 สรุป	88
7 สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	89
7.1 สรุปงานวิจัย	89
7.2 ข้อเสนอแนะ	90
รายงานอ้างอิง	94
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. กระบวนการสร้างสวิตซ์ความแรงบนฐานรองชั่วคราวเกรไฟต์	95
ภาคผนวก ข. โปรแกรมของบอร์ดตัวรับและตัวส่ง	97
ภาคผนวก ค. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	113
ประวัติผู้เขียน	117

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 สัญลักษณ์และขนาดของโครงสร้างสวิตช์ความแรง	36
6.1 ผลการทดสอบความแรงของตัวตรวจรู้ความแรงเชิงพาณิชย์กับความเร็วชุดทดสอบ	80
6.2 ขนาดโครงสร้างสวิตช์ความแรงจากการออกแบบและการสร้างทั้งสอง กระบวนการ ค่าความแรงจุดทำงานจากการคำนวณตามขนาด ของโครงสร้างและการวัดจริง	84



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 หลักการทำงานของสวิตช์แรงเหวี่ยง (Centrifugal switch) (ก) ขณะมอเตอร์เริ่มหมุน (ข) ขณะที่มีมอเตอร์หมุนด้วยความเร็ว 75% ของความเร็วซิงโครนัส.....	2
1.2 โครงสร้างของสวิตช์ความเร่ง.....	4
2.1 โครงสร้างคานาจุลภาคของ Wolf et al. (1972).....	7
3.1 กระบวนการระเหยไอโลหะในสุญญากาศ.....	12
3.2 (ก) เครื่องระเหยไอโลหะในสุญญากาศ (ข) เบ้าหลอมโลหะ.....	12
3.3 กระบวนการสปัตเตอริง.....	14
3.4 เครื่องสปัตเตอริงและลำแสงพลาสมาจากเครื่องสปัตเตอริง.....	15
3.5 ลำแสงพลาสมาจากเครื่องสปัตเตอริง.....	15
3.6 ลักษณะภายในของเครื่องหมุนเคลือบสารไวแสง.....	16
3.7 ลักษณะ การหมุนเคลือบสารไวแสง.....	16
3.8 กระบวนการผลิตสารไวแสงผง.....	18
3.9 แม่พิมพ์โลหะสำหรับสร้างกรอบแม่พิมพ์ PDMS.....	19
3.10 กระบวนการหลอมสารไวแสงผงในห้องสุญญากาศ.....	20
3.11 ห้องสุญญากาศที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของ SU-8 จากการเทหล่อ SU-8.....	21
3.12 เครื่องฉายรังสีอัลตราไวโอเลต Quintel Q4000.....	22
3.13 กระบวนการฉายรังสีลงบนสารไวแสง (ก) สารไวแสงชนิดบวก (ข) สารไวแสงชนิดลบ.....	24
3.14 วงจรของกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	25
3.15 ชุดอุปกรณ์การชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า.....	27
3.16 การสกัดเนื้อวัสดุแบบต่าง ๆ (ก) ก่อนการสกัด (ข) การสกัดแบบ ไอโซทรอปิกใช้วิธี การสกัดแบบเปียก (ค) การสกัดแบบ แอนไอโซทรอปิกใช้วิธีการสกัดแบบแห้ง.....	30
3.17 เครื่องสกัดเนื้อวัสดุด้วยพลาสมา.....	30

3.18 กระบวนการสกัดเนื้อวัสดุด้วยพลาสมา	31
--	----

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 โครงสร้างของสวิตช์ความเร่ง	33
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของก้อนมวลกับความเร่ง จุดทำงานที่ได้จากการคำนวณ เมื่อก้อนมวลมีความกว้าง 3000 μm ยาว 3000 μm คานสปริงมีความกว้าง 30 μm ยาว 800 μm ก้อนมวลสูง 500 μm และระยะห่างระหว่างก้อนมวลกับขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 30 μm	37
5.1 โครงสร้างทดสอบ (ก) วาดด้วยโปรแกรม LASI (ข) फिल्मขาวดำที่เป็นหน้ากากกันรังสีอัลตราไวโอเลต	39
5.2 กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ของโครงสร้างทดสอบ	41
5.3 หน้ากันรังสีเอ็กซ์ของโครงสร้างทดสอบ	42
5.4 ชิ้นงานหลังจากล้างสารไวแสงที่ไม่ได้ถูกฉายรังสีเอ็กซ์แล้ว (ก) ก่อนลอกแม่พิมพ์สารไวแสงออกจากฐาน (ข) หลังจากลอกแผ่นแม่พิมพ์ออกจากฐานแล้ว	43
5.5 ช่องสี่เหลี่ยมภายในแม่พิมพ์ สารไวแสง SU-8 ความหนาประมาณ 500 μm	44
5.6 แม่พิมพ์สารไวแสงที่เชื่อมติดไม่สนิทกับฐานรองชุบโลหะด้วยไฟฟ้า	45
5.7 ชิ้นงานโครงสร้างทดสอบ (ก) ภาพด้านบนของชิ้นงาน (ข) ภาพด้านข้างของชิ้นงาน	46
5.8 แม่พิมพ์สารไวแสงที่ผ่านการใช้งานมาแล้วประมาณ 10 ครั้ง	46
5.9 กระบวนการสร้างโครงสร้างทดสอบด้วยการชุบโลหะผ่านแม่พิมพ์สารไวแสงแบบสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้	47
5.10 ลวดลายการออกแบบ โครงสร้างสวิตช์ความเร่งด้วยโปรแกรม LASI (ก) ก้อนมวลเป็นทรงตัน (ข) ก้อนมวลที่มีรูภายในจำนวน 9 รู	49
5.11 หน้ากากกันรังสีอัลตราไวโอเลต ของวัสดุชิ้นชั่วคราว	49
5.12 หน้ากากกันรังสีอัลตราไวโอเลต ของสวิตช์ความเร่ง (ก) ก้อนมวลเป็นทรงตัน (ข) ก้อนมวลที่มีรูภายในจำนวน 9 รู	50
5.13 หน้ากากกันรังสีเอ็กซ์หลังจากล้างสารไวแสงที่ถูกฉายด้วยแสงออกแล้ว (ก) ก้อนมวลเป็นทรงตัน (ข) ก้อนมวลที่มีรูภายในจำนวน 9 รู	53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.14 หน้ากากกันรังสีเอ็กซ์แบบ โปร่งใส (ก) ก้อนมวลเป็นทรงตัน (ข) ก้อนมวลที่มีรูภายในจำนวน 9 รู.....	53
5.15 กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์.....	54
5.16 วัสดุชั้นชั่วคราวหลังจากเติมทองแดงด้วยไฟฟ้าแล้วที่ใช้หนุนรอง ใต้ก้อนมวลของสวิตซ์ความเร่ง.....	56
5.17 หลุมสารไวแสงหลังจากล้างสารไวแสงที่ถูกฉายด้วยรังสีออกแล้ว.....	58
5.18 โครงสร้างหลังจากขุดลอกในหลุมสารไวแสงจนเต็ม.....	58
5.19 โครงสร้างสวิตซ์ความเร่งหลังจากสกัดแม่พิมพ์สารไวแสงด้วย พลาสติกของออกซิเจนผสม คาร์บอนเตตระฟลูออรีน.....	59
5.20 โครงสร้างตัวตรวจรู้ความเร่งหลังจากกัดวัสดุชั้นชั่วคราวออก เพื่อให้ก้อนมวลแขวนลอยในอากาศ.....	59
5.21 กระบวนการสร้างวัสดุชั้นชั่วคราว เพื่อใช้หนุนก้อนมวล.....	60
5.22 กระบวนการสร้างสวิตซ์ความเร่งโดยการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าบนวัสดุชั้นชั่วคราว.....	61
5.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของก้อนมวลกับความเร่ง เมื่อก้อนมวล มีความกว้าง 3003 μm ยาว 2997 μm คานสปริง มีความกว้าง 36 μm ยาว 804 μm ก้อนมวลสูง 384 μm ระยะห่างระหว่างก้อนมวลกับ ขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 51 μm	63
5.24 แม่พิมพ์สารไวแสงของสวิตซ์ความเร่งบนฐานรองแกรไฟต์.....	64
5.25 โครงสร้างนิกเกิลของสวิตซ์ความเร่งที่ถูกขัดผิวหน้าจนเรียบ เส้นรอบโลหะในรูป ช่วยป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากความเค้นภายในแม่พิมพ์สารไวแสง.....	65
5.26 แผ่นแม่พิมพ์สารไวแสงของสวิตซ์ความเร่งหลังจากขัดฐานรองแกรไฟต์ออกแล้ว.....	66
5.27 โครงสร้างสวิตซ์ความเร่งที่ฝังตัวอยู่ในแผ่นแม่พิมพ์สารไวแสง ซึ่งด้านหน้าและด้านหลังมีลักษณะเหมือนกันทุกประการ.....	66
5.28 กระบวนการสร้างแผ่นแม่พิมพ์สารไวแสง.....	67
5.29 จุดยึดตรึงสามจุดบนแผ่นวงจรพิมพ์ ซึ่งทำหน้าที่หนุน	

ให้ก้อนมวลแขวนลอยอยู่ในอากาศ	68
------------------------------------	----

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.30 การเชื่อมต่อโครงสร้างสวิตช์ความแรงที่ฝังอยู่ในแม่พิมพ์สารไวแสง เข้ากับจุดยึดตรึงบนแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยกาวเงิน	68
5.31 กระบวนการสร้างจุดยึดตรึงและการเชื่อมต่อสวิตช์ความแรงเข้ากับแผ่นวงจรพิมพ์	69
5.32 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (ก) สวิตช์ความแรง ที่พร้อมใช้งาน (ข) ระยะห่างระหว่างก้อนมวลกับขั้วไฟฟ้า	70
5.33 รูปคานที่มีจุดตัดของแกน x และ y อยู่บนบนขา	71
5.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของก้อนมวลกับความแรงจุดทำงานของสวิตช์ ความแรงที่ได้จากการสร้างด้วยวิธีการสร้างสวิตช์ความแรงบนฐานรองชั่วคราว แกรไฟต์แล้วนำไปเชื่อมกับจุดยึดบนฐานรองแผ่นวงจรพิมพ์ เมื่อก้อนมวล มีความกว้าง 3016 μm ยาว 3009 μm คานสปริงกว้าง 41 μm ยาว 796 μm สูง 368 μm ระยะห่างระหว่างก้อนมวลกับขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 20 μm	72
6.1 ภาพด้านบนของแขนหมุนมอเตอร์	75
6.2 วงจรตัวตรวจรู้ความแรงเชิงพาณิชย์ และวงจรสวิตช์ความแรง	75
6.3 ชุดรับส่งข้อมูลของชุดทดสอบความแรง	76
6.4 วงจรขับเคลื่อนชุดทดสอบความแรง	76
6.5 ชุดทดสอบความแรง	77
6.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของชุดทดสอบกับเวลา และความแรงกับเวลา	78
6.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับความแรงเฉลี่ย ของตัวตรวจรู้ความแรงเชิงพาณิชย์	80
6.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของชุดทดสอบกับ ความแรงของตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์และความแรงเข้าสู่ศูนย์กลาง	82
6.9 ทิศทางการเคลื่อนที่ของสวิตช์ความแรง	83
6.10 กราฟจุดทำงานของสวิตช์ความแรงขณะเพิ่มความแรงและลดความแรง	83

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.11 การแสดงผลการทำงานของสวิตช์ความเร่ง เมื่อก้อนมวลมีความกว้าง 3003 μm ยาว 2997 μm คานสปริงมีความกว้าง 36 μm ยาว 804 μm ก้อนมวลสูง 384 μm ระยะห่างระหว่างก้อนมวลกับขั้วไฟฟ้า 51 μm สร้างด้วยกระบวนการชุบโลหะ ด้วยไฟฟ้าบนวัสดุชั้นชั่วคราว	85
6.12 กราฟจุดทำงานของสวิตช์ความเร่งที่สร้างด้วยกระบวนการสร้างสวิตช์ความเร่ง บนฐานรองเกรฟต์ชั่วคราวเมื่อระยะห่างระหว่างก้อนมวลกับขั้วไฟฟ้า เท่ากับ 20 μm ขณะเพิ่มความเร่งและลดความเร่ง	86
6.13 กราฟจุดทำงานของสวิตช์ความเร่งที่สร้างด้วยกระบวนการสร้างสวิตช์ความเร่ง บนฐานรองเกรฟต์ชั่วคราวเมื่อระยะห่างระหว่างก้อนมวลกับขั้วไฟฟ้า เท่ากับ 22 μm ขณะเพิ่มความเร่งและลดความเร่ง	87
6.10 การแสดงผลการทำงานของสวิตช์ความเร่งเมื่อก้อนมวลมีความกว้าง 3016 μm ยาว 3009 μm คานสปริงกว้าง 41 μm ยาว 796 μm สูง 368 μm ระยะห่าง ระหว่างก้อนมวลกับขั้วไฟฟ้า 20 μm สร้างด้วยกระบวนการ สร้างสวิตช์ความเร่งบนฐานรองชั่วคราวเกรฟต์	87
7.1 ลวดลายจุลภาคของสวิตช์ความเร่งและก้อนมวลเพิ่มเติม	90
7.2 กระบวนการสร้างสวิตช์ความเร่งด้วยเทคนิคโดยมีการเพิกก้อนมวลบน สวิตช์ความเร่ง	91
7.3 สวิตช์ความเร่งที่เพิ่มเฉพาะก้อนมวล	92
7.4 กระบวนการสร้างสวิตช์ความเร่งด้วยสารไวแสง SU-8 โดยมีการเพิกก้อนมวลบนสวิตช์ความเร่ง	93

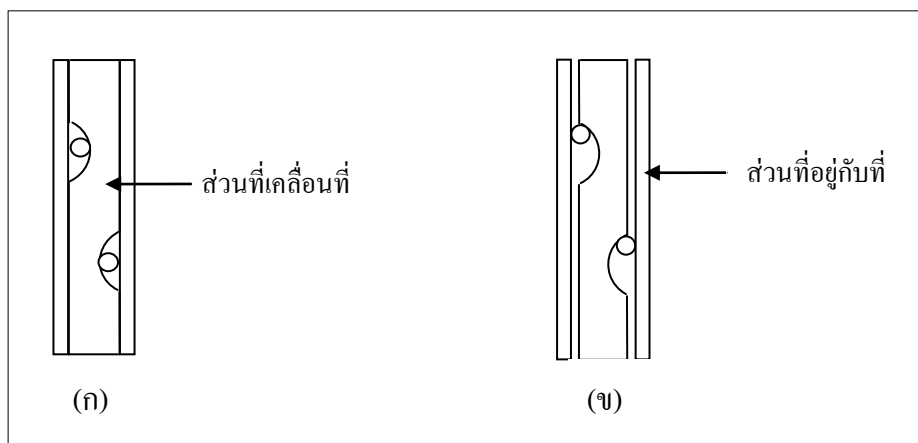
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตัวตรวจรู้ความเร่งเป็นอุปกรณ์วัดความเร่งเนื่องจากแรงที่มากระทำกับวัตถุ แรงที่มากระทำมีสองประเภทคือ แรงคงที่ เช่น แรงโน้มถ่วงของโลกที่มีทิศทางพุ่งลงสู่พื้นโลกตลอดเวลา และแรงพลวัตที่เกิดจากการเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนของวัตถุ ตัวตรวจรู้ความเร่งสามารถแบ่งได้ตามการใช้งานได้สองแบบคือ ตัวตรวจรู้ที่วัดความเร่งได้อย่างต่อเนื่องสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวัดระยะทาง ความเร็วและการสั่นสะเทือนของวัตถุได้ ส่วนอีกแบบคือ ตัวตรวจรู้ที่ทำงานเมื่อความเร่งมีค่าตามที่ออกแบบไว้ เช่นตัวตรวจรู้ความเร่งแบบสวิตช์ ซึ่งจะมีทั้งวัดความเร่งได้เพียงค่าเดียวหรือการวัดได้หลายค่า ซึ่งเกิดจากการสร้างตัวตรวจรู้หลายตัวอยู่ในแบบเดียวกัน โดยนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมของรถยนต์ ในมอเตอร์แบบแยกเฟส หรือแม้แต่สปลิตเฟสมอเตอร์ (Split-phase motor) ซึ่งจะเรียกว่าสวิตช์แรงเหวี่ยง (Centrifugal switch) ทำหน้าที่ปลดขดลวดเริ่มต้นหมุน (Starting winding) ของมอเตอร์ออก เมื่อมอเตอร์มีความเร็วประมาณ 75% ของความเร็วซิงโครนัส สวิตช์แรงเหวี่ยงประกอบด้วย สองส่วนคือ ส่วนที่อยู่กับที่ (Stationary parts) และส่วนเคลื่อนที่ (Movable parts) รูปที่ 1.1 แสดงหลักการทำงานของสวิตช์แรงเหวี่ยง โดยในรูป (ก) แสดงภาพของสวิตช์แรงเหวี่ยง ขณะที่มอเตอร์เริ่มหมุน รูป (ข) ขณะที่มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วประมาณ 75% ของความเร็วซิงโครนัส ส่วนเคลื่อนที่ที่จะถูกผลักด้วยแรงเหวี่ยงจนทำให้เกิดการตัดขดลวดช่วยหมุนออกจากวงจร

ในปัจจุบันมีการพัฒนาตัวตรวจรู้ความเร่งให้มีขนาดเล็กลง แต่ยัง มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และมีราคาถูกลง จึงมีการพัฒนาระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (Micro-Electro-Mechanical System: MEMS) ซึ่งเป็น กระบวนการสร้างชิ้นส่วนจักรกลหรืออุปกรณ์ขนาดเล็กในระดับ ไมโครเมตร โดยที่ยังสามารถคงประสิทธิภาพการทำงานได้เท่าเทียมกับอุปกรณ์ขนาดใหญ่ โดยใช้เทคโนโลยีการสร้างสิ่งประดิษฐ์ขนาดเล็กระดับไมโครเมตร ซึ่งกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์ทางกลขนาดเล็กนี้ เรียกว่า ไมโครแมชชีนนิ่ง (Micromachining) ในระบบกลไฟฟ้าจุลภาคแบ่ง เทคนิคการสร้างสวิตช์ความเร่งได้เป็นสามเทคนิคหลักคือ การสร้างโครงสร้างจุลภาคในเนื้อวัสดุ (Bulk micromachining) การสร้างโครงสร้างจุลภาคบนพื้นผิว (Surface micromachining) และการสร้าง โครงสร้างสัดส่วนสูง (High-Aspect-Ratio)



รูปที่ 1.1 หลักการทำงานของสวิตช์แรงเหวี่ยง (Centrifugal switch) (ก) ขณะมอเตอร์เริ่มหมุน (ข) ขณะที่มอเตอร์หมุนด้วยความเร็ว 75% ของความเร็วซิงโครนัส

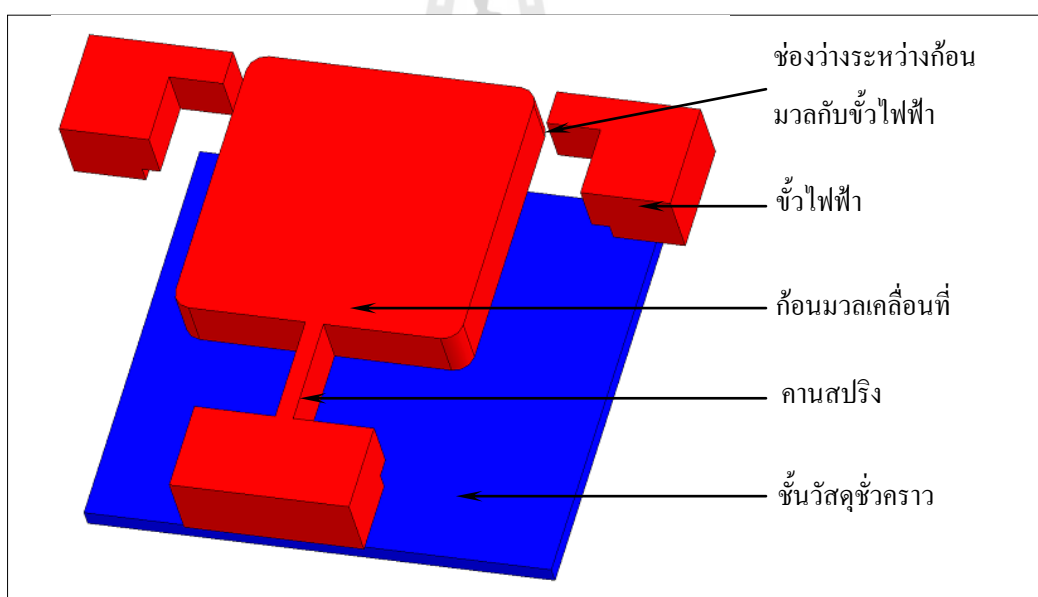
ในระบบกลไฟฟ้าจุลภาคมีการสร้างตัวตรวจรู้ความเร่งโดยแบ่งตามชนิดของการวัดได้หลายประเภท เช่นตัวตรวจรู้ความเร่งแบบ เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) วัดค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าเมื่อความเร่งเปลี่ยนแปลง ตัวตรวจรู้ความเร่งแบบ เพียโซเรซิสทีฟ (Piezoresistive) วัดการเปลี่ยนแปลง ของค่าความต้านทาน ตัวตรวจรู้ความเร่งแบบความจุไฟฟ้า (Capacitive) วัดค่าการเปลี่ยนแปลง ของค่าความจุไฟฟ้า และตัวตรวจรู้ความเร่งแบบสวิตช์ เมื่อค่าความเร่งมีค่าตามที่ออกแบบไว้ ตัวตรวจรู้ซึ่งทำหน้าที่เป็นสวิตช์จะเปลี่ยนสถานะจากเปิดวงจรเป็นปิดวงจร ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มุ่งศึกษาตัวตรวจรู้ความเร่งแบบสวิตช์ หรือสวิตช์ความเร่ง สวิตช์ความเร่ง ได้ถูกสร้างขึ้นครั้งแรกโดย Wolf et al. (1972) ด้วยกระบวนการสร้าง โครงสร้างจุลภาคบนพื้นผิว โครงสร้าง ของสวิตช์ความเร่ง ประกอบด้วยคานยื่นออกมาจากด้านข้างทั้งสองด้านของจุดยึด (Anchor) ทำหน้าที่ตรวจวัดความเร่ง และมีแผ่นขั้วสัมผัสอยู่บนฐาน ชุดตัวตรวจรู้ความเร่งมีทิศการวัดในแนวดิ่ง เมื่อมีความเร่ง เกิดขึ้น คานสปริงจะเคลื่อนที่ไปสัมผัสกับขั้วสัมผัส เกิดการนำกระแสไฟฟ้าขึ้นระหว่างคานสปริงกับขั้วสัมผัส แต่เนื่องจากคานมีน้ำหนักเบา จึงสามารถตรวจจับความเร่งได้ในย่าน 3000-7000 g ซึ่งถือว่าเป็นย่านที่สูงมาก ต่อมามีการพัฒนาเพื่อให้สวิตช์ความเร่งสามารถวัดค่าความเร่งได้ในย่านที่ต่ำลงได้ โดยการเพิ่มก้อนมวลเข้าไปที่ปลายสปริง Selvakumar (1996) ได้สร้างชุด สวิตช์ความเร่งด้วยกระบวนการผลิต โครงสร้างจุลภาคในเนื้อวัสดุซิลิคอน ซึ่งเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน การกัดซิลิคอนให้ได้รูปร่างที่ต้องการสามารถควบคุมได้ด้วยการเจือสารบางชนิดเข้าไปในแผ่นซิลิคอน จากนั้นทำการกัดบริเวณที่ไม่ได้ถูกเจือด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ให้ได้รูปร่างและขนาดตามต้องการ ซึ่งในชุดตัวตรวจรู้ความเร่งประกอบด้วยตัวตรวจรู้ 7 ตัว แต่ละตัววัดค่าความเร่งได้แตกต่างกันขึ้นอยู่กับขนาดของคานและก้อนมวล ต่ำสุดสามารถวัดได้ 1.5 g สูงสุดวัด

ได้ถึง 1000 g ซึ่งย่านการวัดอยู่ในช่วงกว้าง ต่อมา Noetzel (1996) ได้สร้างตัวตรวจรู้ความเร่งแบบ สวิตช์ด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต (UV lithography) โดยใช้สารไวแสง ชนิดบวก AZ 4562 ความหนา 30 μm จากนั้นทำการเติมโลหะทองด้วยไฟฟ้าผ่านแม่พิมพ์ที่ถูกสร้าง โดยโครงสร้างที่มีขนาดเล็กที่สุดมีความกว้าง 5 μm ดังนั้นจึงมีอัตราส่วนระหว่างความสูงกับความ กว้างที่น้อยที่สุดหรือค่าสัดส่วน (Aspect Ratio) เท่ากับ 6 ตัวตรวจรู้ความเร่งนี้ถูกออกแบบให้มีขั้ว สัมผัสอยู่ด้านข้างของก้อนมวลทั้งสองด้าน เพื่อสามารถตรวจรู้ความเร่งได้สองทิศทาง ถึงแม้ว่า กระบวนการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตจะสามารถสร้างโครงสร้างที่มีความสูงได้มาก แต่ก็ยังถูก จำกัดความสูงไม่เกิน 200-300 μm

ต่อมา McNamara (2003) ได้สร้างชุดสวิตช์ความเร่ง ซึ่งประกอบด้วยสวิตช์ความเร่ง 19 ตัว แต่สามารถตรวจวัดค่าความเร่งได้ 15 ค่า ในช่วงความเร่ง 10-150 g ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของก้อนมวล (Proof mass) และคานสปริง (Cantilever spring) ชุดสวิตช์ความเร่งถูกสร้างด้วยกระบวนการ LIGA ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างโครงสร้างจุลภาคสัดส่วนสูง (High-Aspect Ratio) โดยคำว่า LIGA มาจาก ภาษาเยอรมัน ประกอบด้วยกระบวนการหลักสามกระบวนการคือ กระบวนการลิโธกราฟี LI = Lithographie กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า G = Galvanoformung และกระบวนการสร้างชิ้นงาน ด้วยแม่พิมพ์ A = Abformung การสร้างโครงสร้างจุลภาค ขั้นแรก ต้องสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ ด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต แล้วจึงฉายรังสีเอ็กซ์ผ่านหน้ากาก กันรังสีลง บนสารไวแสงพอลิเมทิลเมตาครีเลต (Polymethylmetacrylate: PMMA) ซึ่งเป็นสารไวแสงชนิด บวกความหนา 300 μm จากนั้นล้างสารไวแสงส่วนที่ถูกฉายด้วยแสงออก จะได้หลุมสารไวแสง เป็นลวดลายตามที่ต้องการแล้ว แล้วทำการชุบโลหะนิกเกิลด้วยไฟฟ้าลงในหลุมจนเต็ม จากนั้นทำ การล้างสารไวแสง PMMA ออกแล้วเคลือบทองลงบนนิกเกิล เพื่อให้หน้าสัมผัสนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น

ในงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาและ สร้างสวิตช์ความเร่งในช่วงความเร่ง 1-5 g ซึ่งในช่วงความเร่งนี้ สามารถนำมาใช้ในงานด้านอุตสาหกรรม เช่น การตรวจจับความเร่งของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ขณะตกสู่พื้นซึ่งมีค่าความเร่ง 1 g การนำมาใช้ในด้านสุขภาพ เช่น การตรวจจับการหกล้มของผู้ป่วยหรือ ผู้สูงอายุ โดยนำไปติดกับตัวของของผู้สูงอายุ เมื่อผู้สูงอายุหกล้มสวิตช์ความเร่งที่มีความเร่งจุด ทำงาน 1 g ส่งค่าผ่านระบบไร้สายไปยังผู้ดูแลได้ทันเวลา ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ได้รับความนิยมมากขึ้น ดังนั้นจึงมีการพัฒนาสวิตช์ความเร่งให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นและมีขนาดเล็กลง เพื่อให้สะดวกใน การติดตั้งลงในอุปกรณ์ชนิดต่าง ๆ ในปัจจุบันเทคนิคการสร้างของสวิตช์มีสามเทคนิคหลักคือการ สร้างโครงสร้างจุลภาคในเนื้อวัสดุ การสร้างโครงสร้างจุลภาคบนพื้นผิวและการสร้างโครงสร้าง สัดส่วนสูง ซึ่งสองเทคนิคแรกเป็นการสร้างสวิตช์ความเร่งที่มีลักษณะเป็นสองมิติ ทำให้มีข้อจำกัด ในการออกแบบและสร้างสวิตช์ความเร่งให้สามารถตรวจจับค่าความเร่งค่าทำได้ ยากมาก ดังนั้นใน

งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการสร้างสวิตช์ความแรงด้วยเทคนิคการสร้างโครงสร้างสัณฐานสูง ซึ่งสามารถสร้างสวิตช์ความแรงมีลักษณะเป็นสามมิติได้ ทำให้สามารถสร้างสวิตช์ความแรงที่มีความแรงจุดทำงานต่ำได้ โดยใช้วิธีลิโทกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ รูปที่ 1.2 เป็นโครงสร้างของสวิตช์ ความแรง ประกอบด้วย ก้อนมวลสำหรับเคลื่อนที่ (Proof Mass) คานสปริง (Cantilever Spring) ปลายด้านหนึ่งยึดเข้ากับก้อนมวลส่วนปลายอีกด้านถูก เชื่อมต่อ กับจุดยึด ตรึง (Anchor) ซึ่งติดอยู่กับฐาน ขั้วไฟฟ้า (Electrode) ขนาบด้านข้างทั้งสองด้านและถูกออกแบบให้มีขนาดใหญ่ เพื่อให้สามารถเชื่อมต่อสาย ฟ้าออกสู่ภายนอกได้ง่ายขึ้น การยกก้อนมวลให้แขวนลอยอยู่ในอากาศสามารถทำได้ โดยการสร้างก้อนมวลและสปริงโลหะนิเกิลความหนา $500\text{ }\mu\text{m}$ ทับลงบนชั้นวัสดุชั่วคราว ซึ่งเป็น โลหะทองแดงความหนา $25\text{ }\mu\text{m}$ ในภายหลังเมื่อโลหะทองแดงถูกกัดทิ้งไปทำให้ได้ก้อนมวลและ สปริงโลหะนิเกิลที่แขวนลอยในอากาศตามที่ต้องการ พร้อมให้ต่อสายไฟเพื่อทำการทดสอบและ การใช้งานต่อไป



รูปที่ 1.2 โครงสร้างของสวิตช์ความแรง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. พัฒนาระบวนการสร้างแม่พิมพ์ (Stencil) โดยใช้สารไวแสง SU-8 ชนิดผง
2. พัฒนาระบวนการสร้างโครงสร้างทดสอบด้วยการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าผ่านแม่พิมพ์
3. สร้างสวิตช์ความแรงด้วยกระบวนการที่พัฒนาขึ้น
4. แสดงการทดสอบการทำงานของสวิตช์ความแรง

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. สร้างแม่พิมพ์ด้วยรังสีเอ็กซ์หรือรังสีอัลตราไวโอเลต
2. สร้างตัวตรวจรู้ความเร่งแบบสวิตช์ด้วยแม่พิมพ์
3. สร้างสวิตช์ความเร่งที่สามารถวัดค่าได้ไม่เกิน 30 g โดยสามารถทำหน้าที่เป็นสวิตช์
4. แสดงการทดสอบการทำงานด้วยเสียงหรือหลอด LED

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สร้างโครงสร้างทดสอบด้วยการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าผ่านแม่พิมพ์ได้
2. สร้างและทดสอบสวิตช์ความเร่งโดยใช้แม่พิมพ์ ที่วัดค่าได้ไม่เกิน 30 g

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สร้างองค์ความรู้ในการสร้างชิ้นงานด้วยกระบวนการลิโกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์
2. สามารถสร้างสวิตช์ความเร่งด้วยกระบวนการลิโกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 7 บท ได้แก่ บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความสำคัญของ ปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง บทที่ 3 กล่าวถึง กระบวนการที่ใช้ในการสร้างสวิตช์ความเร่ง เช่น กระบวนการลิโกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต และรังสีเอ็กซ์ การเคลือบและการกัดสารไวแสงด้วยพลาสติก บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบและการ กำหนดขนาดโครงสร้างของสวิตช์ความเร่ง บทที่ 5 กล่าวถึงกระบวนการสร้าง สวิตช์ความเร่ง ซึ่งมี กระบวนการต่าง ๆ เช่น การวาดลวดลายจุดภาค การสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ การเตรียมฐานรอง วัสดุชั้นชั่วคราว การเตรียมสารไวแสงหนา การฉายรังสีเอ็กซ์ การชุบโลหะด้วยไฟฟ้าและการ สกัด สารไวแสงทิ้ง บทที่ 6 กล่าวถึงการสร้างชุดทดสอบ สวิตช์ความเร่ง การเขียนโปรแกรม ควบคุมชุด ทดสอบและผลการทดลอง บทที่ 7 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในบทที่ 2 จะกล่าวถึงปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและสร้างสวิตซ์ความร่ง ในระบบกลไฟฟ้าจุลภาคสามารถแบ่งเทคนิคการสร้างสวิตซ์ความร่งได้สามเทคนิคหลักคือการสร้างโครงสร้างจุลภาคในเนื้อวัสดุ (Bulk micromachining) เป็นการกัดผิวของฐานรองให้เป็นโครงสร้างของสวิตซ์ความร่ง ซึ่งมีวัสดุบางชนิดที่สามารถนำมาใช้ได้เช่น ซิลิคอน (Si) กระเจก (Glass) ซิลิคอนคาไบด์ (SiC) เป็นต้น การกัดมีสองแบบคือ การกัดแบบเปียกและแบบแห้ง ซึ่งการเลือกใช้ก็จะขึ้นกับโครงสร้างของชิ้นงานที่ต้องการกัด เทคนิคที่สองคือการสร้างโครงสร้างจุลภาคบนพื้นผิว (Surface micromachining) กระบวนการนี้โครงสร้างจะถูกจัดวางจากผิวของฐานขึ้นไปโดยการเคลือบโลหะลงบนฐาน จากนั้นกัดโลหะส่วนที่ไม่ต้องการออกจนได้เป็นโครงสร้าง และเทคนิคสุดท้ายคือการสร้างโครงสร้างลัดส่วนสูง (High-Aspect Ratio) สร้างด้วยกระบวนการ LIGA กระบวนการนี้ประกอบด้วยสามกระบวนการย่อยคือ กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสี เอ็กซ์ (Lithographie) กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Galvanofomung) และกระบวนการสร้างชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์ (Abformung)

2.2 กระบวนการสร้างโครงสร้างจุลภาค

1. การสร้างโครงสร้างจุลภาคในเนื้อวัสดุ (Bulk micromachining) เป็นกระบวนการสร้างที่ใช้การกัดเนื้อวัสดุส่วนที่ไม่ต้องการออกให้เกิดโครงสร้างขึ้น วัสดุที่นิยมใช้คือ ซิลิคอนและกระเจก วิธีการกัดมีสองวิธีคือการกัดแบบเปียก และแบบแห้ง การกัดแบบเปียกเป็นการกัด โดยใช้สารเคมี เพื่อให้สารเคมีทำปฏิกิริยากับ เนื้อวัสดุ สารเคมีที่นิยมใช้คือโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ H_2N_4 การเลือกใช้สารเคมีที่เหมาะสมจะทำให้สามารถควบคุมปริมาณและทิศทางการกัดได้ การกัดแบบแห้งเป็นการกัดโดยการทำปฏิกิริยาดว้ไอออนของแก๊ส (Reactive Ions Etching) วัสดุที่ใช้นิยมในกระบวนการนี้คือซิลิคอน พอลิซิลิคอน ซิลิคอนออกไซด์ และซิลิคอนไนเตรด เป็นต้น

2. การสร้างโครงสร้างจุลภาคบนพื้นผิว (Surface micromachining) เป็น กระบวนการสร้างโครงสร้างจากผิวของฐานรอง โดยการเคลือบชั้นโลหะลงบนผิวหลายชั้นให้เป็นโครงสร้าง

ตามทีออกแบบ จากนั้นทำการกัดชั้นโลหะที่ไม่ต้องการออก เพื่อให้เหลือเฉพาะโครงสร้างที่ต้องการเท่านั้น ซึ่งชั้นโลหะที่ถูกเคลือบแล้วกัดออก ในภายหลังจะถูกเรียกว่า ชั้นวัสดุชั่วคราว กระบวนการนี้สามารถสร้างโครงสร้างที่มีความสูงน้อยมาก จึงเป็นโครงสร้างสองมิติเท่านั้น

3. การสร้างโครงสร้างสัดส่วนสูง (High-Aspect Ratio) เป็นการสร้างโครงสร้างจากผิวของวัสดุเช่นกัน แต่โครงสร้างที่ได้มีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างมาก ดังนั้นโครงสร้างจึงมีลักษณะเป็นสามมิติ การสร้างโครงสร้างสัดส่วนสูงใช้กระบวนการ LIGA เป็นกระบวนการหลักสำหรับการสร้าง โครงสร้าง กระบวนการ LIGA ประกอบด้วย สามกระบวนการคือ กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสี กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าและกระบวนการสร้างชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สวิตซ์ความแรงถูกสร้างขึ้นครั้งแรกโดย Wolf et al. (1972) โดยมีลักษณะเป็นคานขนาดเล็ก สวิตซ์ความแรงมีโครงสร้างประกอบด้วยจุดยึด (Anchor) ขนาดใหญ่ทำหน้าที่ยึดคานติดกับฐานรองคาน (Cantilever) เป็นส่วนรับรู้ความแรง ถูกสร้างด้วยการชุบทองด้วยไฟฟ้ามีความหนา $2\text{ }\mu\text{m}$ และมีระยะห่างจากแผ่นสัมผัส $3\text{ }\mu\text{m}$ แผ่นสัมผัส (Contact pad) เป็นโลหะทองมีความหนา $300\text{ }\text{\AA}$ บนฐานซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 2.1 การสร้างสวิตซ์ความแรงจะสร้างด้วยกระบวนการสร้างโครงสร้างจุลภาคบนพื้นผิว (Surface micromachining) บนฐานซิลิคอนหนา $254\text{ }\mu\text{m}$ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 mm โดยทำการเคลือบไทเทเนียมด้วยวิธี การระเหยไอในสุญญากาศ จนได้ความหนา $500\text{ }\text{\AA}$ แล้วเคลือบโลหะทองลงบนไทเทเนียมความหนา $3000\text{ }\text{\AA}$ จากนั้นใช้สารไวแสงเปิดช่องระหว่างจุดยึด ตรึงและแผ่นสัมผัส เพื่อจะได้กัดชั้นทองคำออกแล้วทำการชุบโลหะนิกเกิลด้วยไฟฟ้าขึ้นมาแทนที่ ต่อมาทำการเปิดช่องบริเวณแผ่นสัมผัสแล้วชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า เพื่อใช้เป็นระยะห่างของคานกับแผ่นสัมผัส จากนั้นทำการชุบโลหะทองด้วยไฟฟ้าลงบนโลหะนิกเกิลทุกส่วน เพื่อสร้างเป็นคาน แล้วกัดโลหะนิกเกิลบริเวณระหว่างจุดยึดกับขั้วไฟฟ้าและบริเวณขั้วไฟฟ้ากับคานออก ขั้นตอนสุดท้ายกัดโลหะไทเทเนียมบริเวณจุดยึดตรึงกับแผ่นสัมผัสออก จะได้ชิ้นงานที่เสร็จสมบูรณ์



รูปที่ 2.1 โครงสร้างคานจุลภาคของ Wolf et al. (1972)

ต่อมา Selvakumar (1996) ได้สร้างชุดสวิตช์ความแรงขึ้น โดยชุดสวิตช์ความแรงนี้ประกอบ ด้วยตัวสวิตช์ความแรงจำนวน 9 ตัว แต่สามารถวัดค่าความแรงได้ 7 ค่าคือ 1.5 g 2 g 5 g 10 g 50 g 100 g และ 1000 g ซึ่งสวิตช์ความแรง 100 g มี 3 ตัว สวิตช์ความแรงแต่ละตัวมีโครงสร้างประกอบ ด้วยจุดยึดตรึง คานสปริง ก้อนมวล และขั้วสัมผัส ขนาดของก้อนมวล และคานสปริงจะมีผลต่อค่า ความแรง โดยขนาดก้อนมวลและคานสปริงมีผลแปรผกผันกับค่าความแรง แต่ค่าความหนาของคาน สปริงคงที่ $0.75\text{ }\mu\text{m}$ และก้อนมวลหนา $15\text{ }\mu\text{m}$ ยกเว้นสวิตช์ความแรงความแรง 1000 g ก้อนมวลจะมี ความหนา $2.5\text{ }\mu\text{m}$ ในสวิตช์ความแรงนี้ถูกสร้างด้วยกระบวนการสร้างโครงสร้างจุลภาคในเนื้อวัสดุ (Bulk micromachining) กระบวนการนี้มักใช้ซิลิคอนเป็นวัสดุในการสร้างสวิตช์ความแรง การสร้าง สวิตช์ความแรงนี้มี 6 ขั้นตอน โดย 4 ขั้นตอนสร้างบนแผ่นซิลิคอน และอีก 2 ขั้นตอนสร้างบนแผ่น กระຈก ขั้นแรกจะสร้างจุดยึดของสวิตช์ความแรงให้มีความสูง $1.5\text{ }\mu\text{m}$ เพื่อใช้เป็นช่องว่าง (Air gap) โดยการเจือสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ลงบนบริเวณที่ต้องการ จากนั้นทำการกัดซิลิคอนบริเวณ ที่ไม่ได้ถูกเจือด้วยสารออก แล้วสร้างก้อนมวลและจุดยึดด้วยการเจือโบรอนให้มีความลึก $15\text{ }\mu\text{m}$ และมีขนาดตามที่ออกแบบไว้ในแต่ละค่าความแรง ขั้นตอนต่อมาสร้างคานโดยการสร้างออกไซด์ ขึ้นที่เนื้อซิลิคอน ในบริเวณที่ต้องการให้มีความหนา $0.75\text{ }\mu\text{m}$ เชื่อมต่อระหว่างจุดยึดและก้อนมวล ด้วยกระบวนการ ปลูกชั้นวัสดุด้วยไอเคมีความดันต่ำ (Low Pressure Chemical Vapor Deposition: LPCVD) จากนั้นเคลือบด้วยโลหะโครเมียมหนา $300\text{ }\text{\AA}$ และทอง $4000\text{ }\text{\AA}$ ลงบนบริเวณจุดสัมผัส ของก้อนมวล ขั้นตอนต่อมานำแผ่นกระຈกที่ใช้เป็นฐานของสวิตช์ความแรงมาเคลือบด้วยโลหะ โครเมียมหนา $200\text{ }\text{\AA}$ และทอง $1000\text{ }\text{\AA}$ ลงบนบริเวณที่ใช้เป็นขั้วสัมผัส จากนั้นทำการเชื่อมแผ่น ซิลิคอนกับแผ่นโลหะเข้าด้วยกัน โดยหันจุดยึด ตรึงที่สร้าง ขึ้นจากขั้นตอนแรกเข้าหาแผ่นกระຈก และจัดหน้าสัมผัสทั้ง สองแผ่นให้ตรงกัน เมื่อทำการเชื่อม ต่อเสร็จแล้วทำการกัดซิลิคอนส่วนที่ ไม่ได้ถูกเจือด้วยสารเคมีออก จะได้โครงสร้างสวิตช์ความแรงตามที่ออกแบบไว้เมื่อทดสอบ การ ทำงานได้ผลเป็นไปตามที่ ออกแบบ อีกทั้งยังทดสอบการ เชื่อมยึดติดกัน (Stiction) ของหน้าสัมผัส ขณะทีหน้าสัมผัสทั้ง สองสัมผัส กัน ทำให้สวิตช์ความแรงทำงาน ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ต่อมา Noetzel (1996) ได้สร้างสวิตช์ความแรง ขึ้นมาโดยใช้ กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสี อัลตราไวโอเลตโดยใช้สารไวแสงชนิดบวก AZ 4562 ส่วนโครงสร้างสวิตช์ความแรงเป็นโลหะ ทองคำมีความสูง $30\text{ }\mu\text{m}$ ส่วนที่มีขนาดเล็กที่สุดของโครงสร้างมีความกว้าง $5\text{ }\mu\text{m}$ ดังนั้นจึงมี อัตราส่วนระหว่างความสูงกับความกว้างที่น้อยที่สุด (Aspect Ratio) เท่ากับ 6 สวิตช์ความแรงนี้ถูก ออกแบบไว้ในสองลักษณะคือ การให้ก้อนมวล (Proof mass) อยู่ส่วนปลายของคานและการสร้าง ให้ก้อนมวลอยู่ตรงกลางของคาน ส่วนขั้วสัมผัสจะอยู่ด้านข้างทั้ง สองด้านในส่วนปลายของคานซึ่ง ทั้งสองแบบจะมีระยะห่างระหว่างขั้วสัมผัสเท่ากัน เพื่อสามารถตรวจรู้ความแรงได้ ทั้งสองทิศทาง การสร้างสวิตช์ความแรงเริ่มจากเคลือบโลหะโครเมียมความหนา 15 nm และทองหนา 80 nm ลงบน

ฐานรองของชิ้นงาน จากนั้นหมุนเคลือบสารไวแสงชนิดบวก AZ4562 ลงไปให้มีความหนา $30\text{ }\mu\text{m}$ แล้วนำไปอบในระยะเวลาที่เหมาะสม เพื่อให้สารละลายในสารไวแสง ระเหยออกมา ถ้าใช้เวลาในการอบน้อยเกินไป ทำให้สารไวแสงไม่แข็งตัวและหลุดร่อนง่าย แต่ถ้าใช้เวลาอบนานเกินไปทำให้สารไวแสงแข็งเกินไปล้างออกยาก จากนั้นทำการฉายรังสีผ่านหน้ากากกันรังสี อัลตราไวโอเลตลงบนสารไวแสงด้วยพลังงาน 12 W/cm^2 จากนั้นล้างสารไวแสงที่ถูกฉายด้วยรังสีออก ซึ่งจะได้หลุมสารไวแสงขึ้นมา ขั้นตอนต่อมาคือการชุบโลหะทองด้วยไฟฟ้า ซึ่งการชุบโลหะจะใช้การชุบแบบพัลส์ (Pulse) ด้วยความถี่ 1500 Hz ความหนาแน่นกระแส 2 mA/cm^2 ที่อุณหภูมิ 50°C ได้อัตราการเกิดโลหะ $6\text{ }\mu\text{m}$ ต่อชั่วโมง จนได้ความหนา $30\text{ }\mu\text{m}$ จากนั้นล้างสารไวแสงที่เหลือออก แล้วทำการฉีกโลหะออก เพื่อให้ก้อนมวลแขวนลอยอยู่กลางอากาศได้ เมื่อสร้างสวิตช์ความเร่งเสร็จแล้วจึงทำการทดสอบสวิตช์ความเร่งทั้งสองแบบด้วยการสั่น ผลการทดสอบพบว่าสวิตช์ความเร่งแบบที่ 1 มีความถี่รีโซแนนซ์ต่ำ แต่มีความไวสูงกว่าสวิตช์ความเร่งแบบที่ 2 ทำให้สวิตช์ความเร่งแบบที่ 1 มีระยะเวลาการสวิตช์น้อยกว่าแบบที่ 2 และทำให้สวิตช์ความเร่งแบบที่ 1 ไม่เหมาะสมในการใช้งานที่ต้องการระยะเวลาให้สวิตช์ทำงานนาน ๆ ถึงแม้ว่ากระบวนการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต จะสามารถสร้างโครงสร้างที่มีความสูงได้มาก แต่ก็ความสูงถูกจำกัดไม่เกิน $200\text{ }\mu\text{m}$ ถึง $300\text{ }\mu\text{m}$

ต่อมา Shamus (2004) สร้างชุดสวิตช์ความเร่งที่ประกอบด้วยสวิตช์ความเร่ง จำนวน 19 ตัว แต่สามารถวัดได้แตกต่างกัน 15 ค่า ย่านการทำงานอยู่ในช่วง $10\text{--}150\text{ g}$ โดยเพิ่ม ค่าครึ่งละ 10 g สวิตช์ความเร่งถูกสร้างด้วยกระบวนการ LIGA ซึ่งสามารถสร้างโครงสร้างสูง ถึง $300\text{ }\mu\text{m}$ และมีหน้าสัมผัสเป็นทอง โครงสร้างของสวิตช์ความเร่งประกอบด้วยจุดยึด ตรึง (Anchor) ก้อนมวล (Proof mass) ขั้วไฟฟ้า บวก (V+ electrode) ขั้วไฟฟ้า ลบ (V- electrode) คานสปริง (Cantilever spring) ขั้วไฟฟ้าทดสอบ (Test electrode) และตัวกันกระแทก (Bumper) ซึ่งในการออกแบบให้สวิตช์ความเร่งแต่ละตัววัดความเร่งได้แตกต่างกันนั้น สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่าขนาดของคานสปริงและก้อนมวล ซึ่งในกรณีนี้ใช้ก้อนมวล สองขนาดตามย่านความเร่ง คือ ความเร่งย่าน $10\text{--}40\text{ g}$ ใช้ก้อนมวลมีความกว้าง $120\text{ }\mu\text{m}$ ความยาว $800\text{ }\mu\text{m}$ ส่วนความเร่งย่าน $50\text{--}150\text{ g}$ ใช้ก้อนมวลขนาดความกว้าง $60\text{ }\mu\text{m}$ ความยาว $600\text{ }\mu\text{m}$ สวิตช์ความเร่งทุกตัวมีความสูงเท่ากันที่ $300\text{ }\mu\text{m}$ ส่วนขนาดของคานสปริงจะมีความกว้าง $10\text{ }\mu\text{m}$ ทุกค่าความเร่ง แต่จะมีความยาวแตกต่างกันซึ่งยิ่งความเร่งมีค่ามาก พบว่าคานสปริงจะมีความยาวลดลง การสร้างสวิตช์ความเร่งด้วยกระบวนการ LIGA เริ่มจากการเลือกวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้ามาใช้เป็นฐานของโครงสร้างเช่น ซิลิ คอนออกไซด์หรือกระจก จากนั้นเคลือบไทเทเนียมหนา $200\text{ }\text{\AA}$ ทองแดงหนา $4.5\text{ }\mu\text{m}$ และไทเทเนียมหนา $200\text{ }\text{\AA}$ จากนั้นนำแผ่นสารไวแสง PMMA มาเชื่อมกับผิวโลหะไทเทเนียม จากนั้นฉายด้วยรังสีเอ็กซ์จากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอนผ่านหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ ล้างสารไวแสง ที่ถูกฉายด้วยรังสีออก จากนั้นกัดโลหะไทเทเนียมที่เคลือบอยู่ออก แล้วขึ้นรูปโครงสร้างด้วยการชุบโลหะนิกเกิลด้วย

ไฟฟ้าลงบนทองแดงจนเต็มแม่พิมพ์ PMMA เมื่อได้โครงสร้างสวิตช์ความถี่แล้ว แต่โครงสร้างยังไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ เนื่องจากยังติดอยู่บนฐาน ต่อมาจึงทำให้ก้อนมวลเป็นอิสระจากฐานและสามารถเคลื่อนที่ได้ ขั้นแรกนำชิ้นงานที่ชุปนิกเกิลจนเต็มแล้วมาหมุนเคลือบสารไวแสง แล้วฉายด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตลงบริเวณก้อนมวล ล้างสารไวแสงออก จะได้หลุมเฉพาะบริเวณก้อนมวล กัดโลหะไทเทเนียมและทองแดงได้ก้อนมวลและคานสปริงออกจนหมด เมื่อถึงขั้นตอนนี้ก้อนมวลสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระแล้ว จากนั้นล้างสารไวแสงแล้วกัดไทเทเนียมและทองแดงที่เหลือออกจนหมด จากนั้นเคลือบทองลงบนผิวหน้าสัมผัส เพื่อให้ผิวสัมผัสสามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น จากนั้นนำมาทดสอบบนจานหมุนทรงกลมโดยมีหลอด LED เป็นอุปกรณ์แสดงสถานะของสวิตช์ ซึ่งการทดสอบจะทดสอบการเคลื่อนที่ทั้งสองทิศทางแบ่งเป็นทิศด้านบวกและด้านลบ การทดสอบในทิศด้านบวกก้อนมวลเคลื่อนที่ไปสัมผัสขั้วบวก ค่าที่ได้มีความแม่นยำ 80% ของค่าตามทฤษฎี การทดสอบในการเคลื่อนที่ด้านลบก้อนมวลไปสัมผัสขั้วลบ ค่าที่ได้จากการทดสอบมีความแม่นยำเพิ่มขึ้นเป็น 90% ของค่าตามทฤษฎี การวัดสวิตช์ความถี่สามารถวัดในโหมดค่าความถี่ประจุได้ โดยการวัดค่าความถี่ประจุระหว่างขั้วไฟฟ้าทดสอบกับก้อนมวล ผลการทดสอบที่ความถี่ 50 g ได้ค่าความไว 670 aF/g ซึ่งตามทฤษฎีมีค่า 780 aF/g



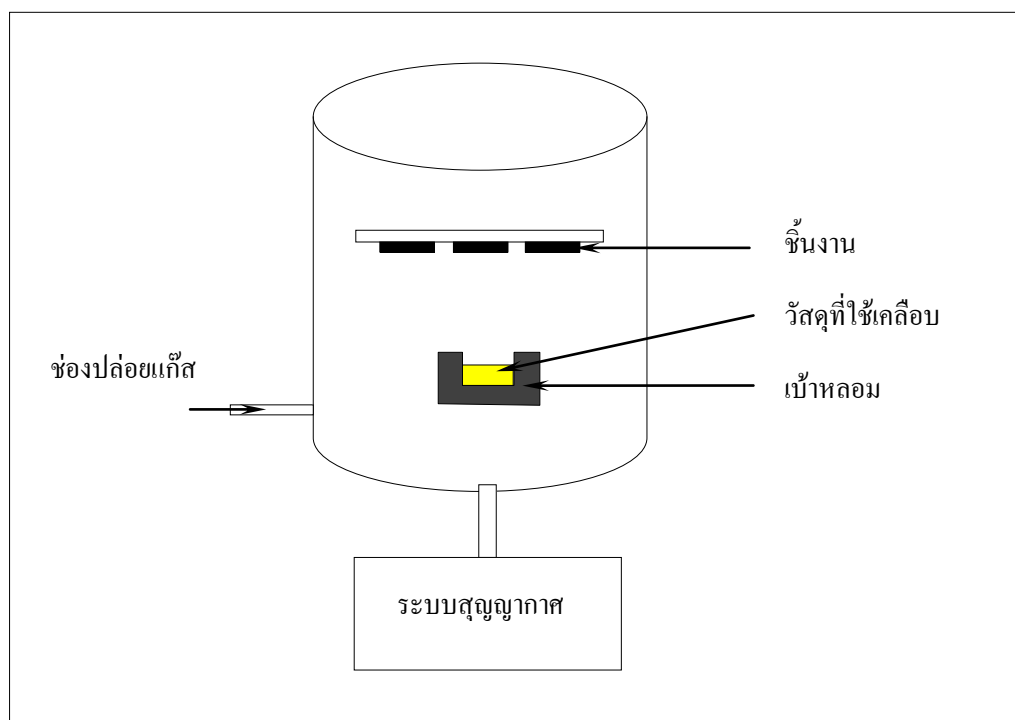
บทที่ 3

กระบวนการพื้นฐานทางระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

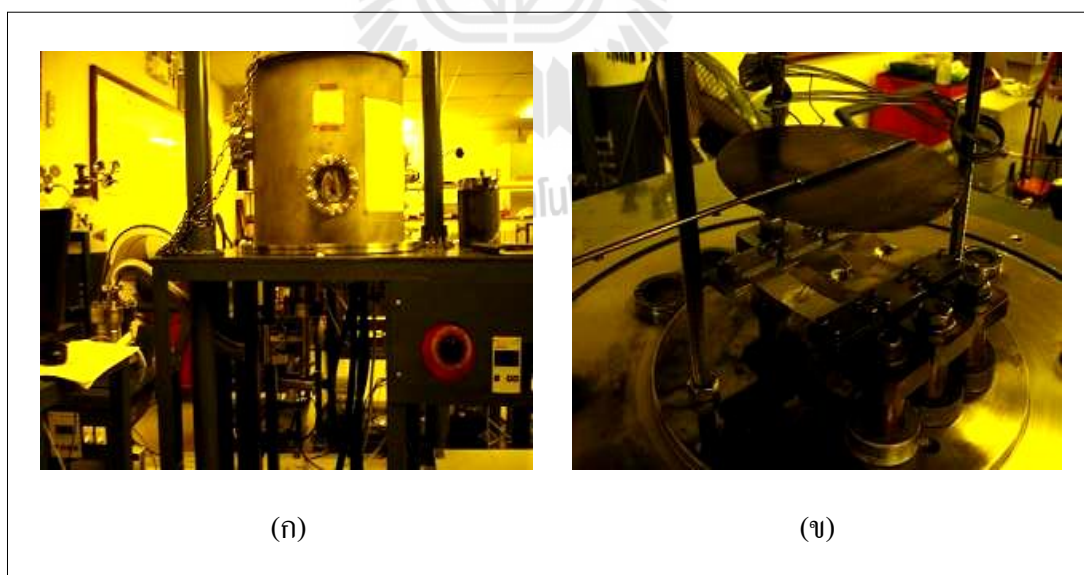
ในบทนี้นำเสนอกระบวนการพื้นฐานต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างโครงสร้างจุลภาค ซึ่งแต่ละกระบวนการมีความสำคัญต่อการสร้างโครงสร้างจุลภาค กระบวนการที่จะกล่าวถึงในบทนี้ ได้แก่ กระบวนการระเหย ไอโลหะในสุญญากาศ (Evaporation) กระบวนการสปัตเตอริง (Sputtering) กระบวนการเคลือบ ชั้นฟิล์ม สารไวแสง (Coating-photoresist) กระบวนการ โฟโตลิโธกราฟี (Photolithography) กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating) และกระบวนการสกัดเนื้อวัสดุ ประกอบด้วย การสกัดเนื้อวัสดุ ด้วยสารเคมี (Wet-etching) และการ สกัดเนื้อวัสดุ ด้วยพลาสมา (Plasma-etching) ซึ่งแต่ละกระบวนการมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 กระบวนการระเหยไอโลหะในสุญญากาศ (Evaporation)

เป็นกระบวนการเคลือบฟิล์มบางลงบนชิ้นงาน สามารถเคลือบฟิล์มได้หนาตั้งแต่อังสโตมจนไมโครเมตร ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณโลหะที่ใช้เคลือบ การเคลือบโลหะด้วยวิธีนี้จะต้องทำในห้องความดันต่ำ เพื่อให้การเคลือบมีประสิทธิภาพสูง ซึ่งความดันที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 10^{-4} - 10^{-5} ทอร์ ส่วนวัสดุที่ใช้เคลือบ (Source) ถูกนำมาวางไว้บนเบ้าหลอม (Boat) ที่เป็นโลหะทังสเตน (Tungsten) เนื่องจากทังสเตนมีจุดหลอมเหลวสูงมาก โลหะที่นิยมนำมาเคลือบ ได้แก่ นิกเกิล ทอง เงิน ทองแดง ไทเทเนียมและอลูมิเนียม เมื่อนำวัสดุมาใส่ในเบ้าหลอมแล้วให้ความร้อนที่เบ้าหลอมจนวัสดุในเบ้าหลอมเกิดการหลอมเหลวและระเหยกลายเป็นไอ ลอยขึ้นไปสัมผัสกับชิ้นงานที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ไอระเหยจึงกลับเป็นของแข็งเคลือบอยู่บนชิ้นงาน การเคลือบสามารถ ทำได้หลายชั้นโดยใช้วัสดุต่างชนิดกันขึ้นอยู่กับการใช้งาน การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีนี้ยังมีข้อจำกัดอยู่ โดยที่วัสดุที่ใช้เคลือบจะต้องเป็นโลหะเท่านั้น หากโลหะที่ใช้เคลือบมีจุดหลอมเหลวสูง เกินไป เช่น กราไฟต์ โครเมียม เมื่อได้รับความร้อน ไม่มากพอ โลหะจะไม่หลอมละลาย และการเคลือบ โลหะด้วยกระบวนการนี้สามารถเคลือบผิวชิ้นงานได้ก็ต่อเมื่อผิวชิ้นงานอยู่ในระนาบเดียวกับเบ้าหลอมโลหะเท่านั้น วิธีการนี้จึงไม่ค่อยได้รับความนิยมมากนัก



รูปที่ 3.1 กระบวนการระเหยไอโลหะในสุญญากาศ



รูปที่ 3.2 (ก) เครื่องระเหยไอโลหะในสุญญากาศ (ข) เบ้าหลอมโลหะ

กระบวนการระเหย ไอโลหะในสุญญากาศในภาชนะนี้ใช้โลหะเพียงสองชนิดคือ ไทเทเนียม และทองแดง ซึ่งจะทำให้การเคลือบ โลหะสามชั้นคือ ไทเทเนียม ทองแดงและไทเทเนียม โดยเคลือบไทเทเนียมความหนา 300 Å ใช้ลวดไทเทเนียมบริสุทธิ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm ยาว 1 mm จำนวน สองเส้น แล้วเคลือบทองแดงความหนา 1000 Å ใช้ลวดทองแดงบริสุทธิ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm ยาว 1 cm จำนวน 5 เส้น โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ทำความสะอาดลวดทองแดงด้วยการจุ่มใน H_2SO_4 10% เป็นเวลา 5 วินาที ล้างด้วยน้ำดีไอเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน แล้วทำความสะอาด เส้นลวดไทเทเนียมด้วยซูปเปอร์โซนิคในอะซิโตนเป็นเวลา 5 นาที ตามด้วยซูปเปอร์โซนิคในน้ำดีไอ เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำมาจุ่มใน H_2SO_4 10% เป็นเวลา 2 วินาที ด้วยน้ำดีไอเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน

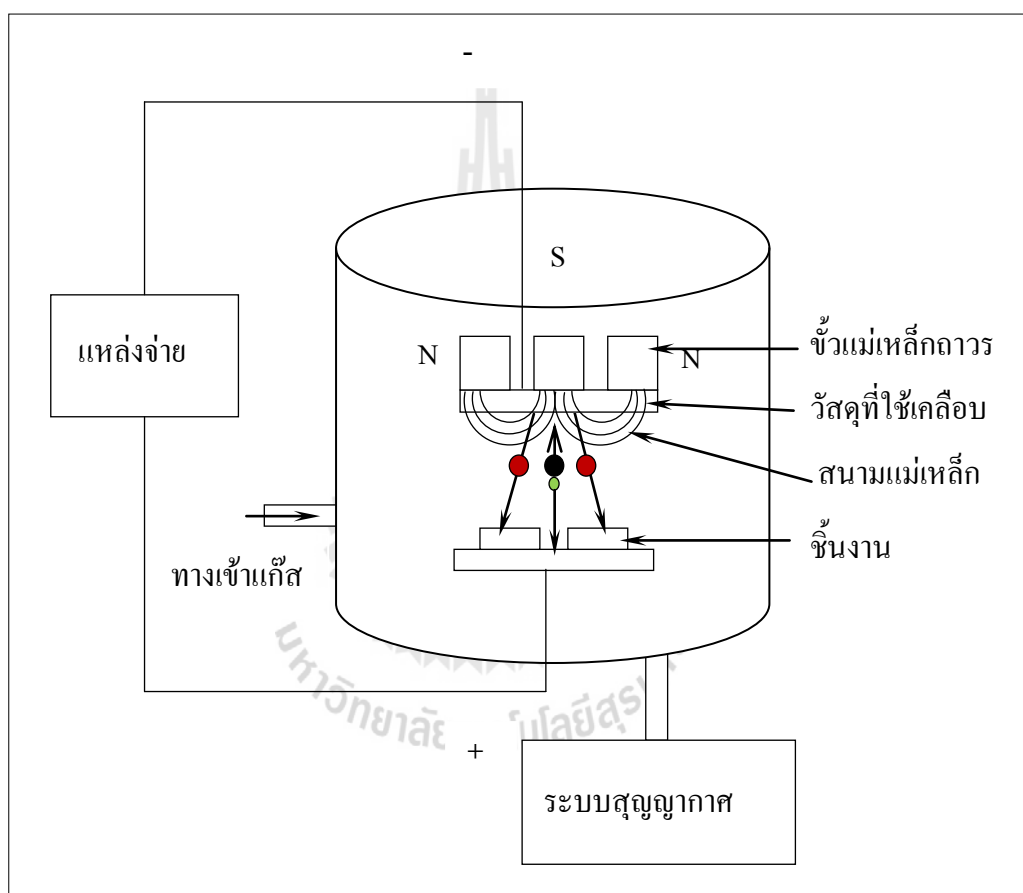
2. นำไทเทเนียมที่ทำความสะอาดแล้วใส่ในเบ้าหลอมตัวที่ หนึ่ง (Boat 1) และเบ้าหลอมตัวที่สอง (Boat 2) จำนวน 2 เส้น นำลวดทองแดงใส่ในเบ้าหลอมตัวที่ สาม (Boat 3) จำนวน 5 เส้น นำชิ้นงานวางลงบนฐานรองเคลือบ แล้วนำไปวางไว้บนเบ้าหลอม ซึ่งอยู่สูงจากเบ้าหลอม 30 cm

3. ทำความสะอาดเครื่องโดยการเช็ดด้วยเมทิลแอลกอฮอล์ปิดฝา ห้องสุญญากาศ เปิดปั๊ม และเทอร์โบปั๊ม เมื่อได้ความดัน 2×10^{-6} ทอร์ ทำการต่อสายไฟไปยังเบ้าหลอมตัวที่ หนึ่งแล้วค่อยๆ ปรับเพิ่มแรงดันจนกว่าไทเทเนียมในเบ้าหลอมตัวที่หนึ่งเริ่มหลอม จากนั้นเปิดชัตเตอร์แล้ววัดความหนาของไทเทเนียมที่เคลือบจนได้ความหนา 100 Å แล้วปิดเครื่อง จากนั้นต่อสายไฟไปเบ้าหลอมตัวที่สองและสาม แล้วเคลือบทองแดงให้ได้ความหนา 2000 Å และไทเทเนียมเคลือบความหนา 100 Å ปิดเครื่องนำชิ้นงานไปใช้ในกระบวนการต่อไป

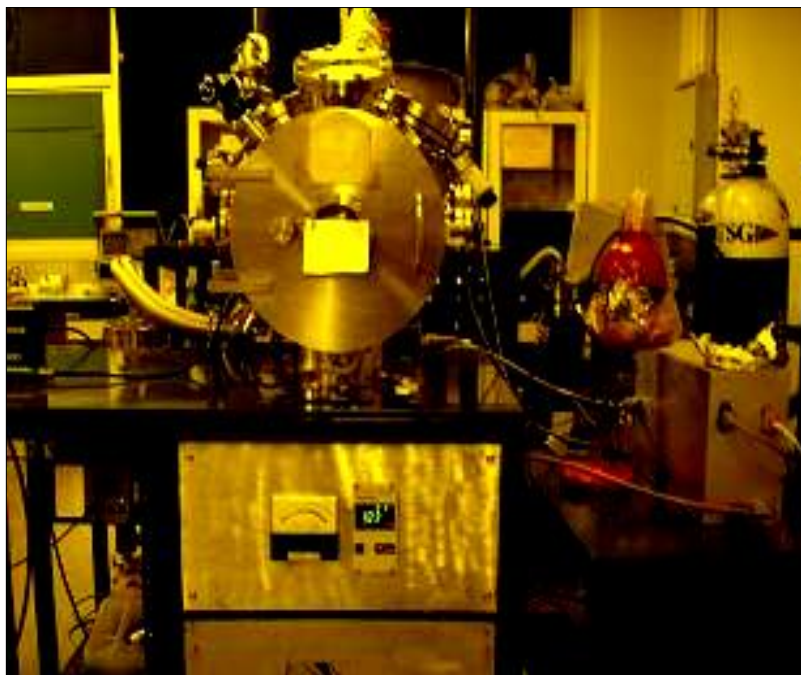
3.2 กระบวนการสปัตเตอริง (Sputtering)

เป็นการเคลือบฟิล์มบางวิธีหนึ่งที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สามารถแก้ปัญหาสำคัญบางประการ ที่กระบวนการระเหย ไอโลหะในสุญญากาศไม่สามารถทำได้ เช่น สามารถเคลือบโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูง สามารถเคลือบสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์บางชนิดได้ และชนิดของสาร ที่สามารถเคลือบได้ มีมากกว่าการระเหย ไอโลหะในสุญญากาศ การสปัตเตอริงสามารถแบ่งชนิดของแหล่งจ่ายได้ สองชนิด คือแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ใช้สำหรับการเคลือบโลหะลงบนชิ้นงาน และแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งสามารถเคลือบได้ทั้งโลหะและฉนวน ซึ่งความถี่ที่นิยมใช้มีค่า 13.56 MHz กระบวนการสปัตเตอริงจะต้องดำเนินการในห้องควบคุมความดัน ความดันที่เหมาะสมสำหรับการสปัตเตอริงจะอยู่ในช่วง 10^{-6} - 10^{-8} ทอร์ จากนั้นปล่อยแก๊สเฉื่อยเข้าไปในระบบให้ความดันเพิ่มขึ้นมาอยู่ในระดับ 10^{-3} ทอร์ ซึ่งแก๊สเฉื่อยที่นิยมใช้กันมากคืออาร์กอน จากรูปที่ 3.3 เป็นระบบของการสปัตเตอริง ขั้วลบของแหล่งจ่ายต่อเข้ากับวัสดุที่

ใช้เคลือบ (Target) และมีแม่เหล็กถาวรติดอยู่ด้วยเพื่อเพิ่มความเร็วให้กับไอออนบวก ขั้วบวกของแหล่งจ่ายต่อเข้ากับชิ้นงาน เมื่อเปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้าโมเลกุลของแก๊สเฉื่อยจะถูกแยกเป็นไอออนบวก ซึ่งจะถูกร่งให้พุ่งเข้าชนโลหะที่ต้องการเคลือบ ทำให้อะตอมของโลหะหลุดออกมาทุกทิศทาง และเคลือบติดกับผิวชิ้นงาน เนื่องจากอะตอมหลุดกระจายออกมาทั่วทุกทิศทาง การเคลือบฟิล์มบางวิธีนี้สามารถเคลือบผิวชิ้นงานได้ทั่วทุกด้าน อุปกรณ์ของเครื่องสปัตเตอริงแสดงดังรูปที่ 3.4 และลำแสงพลาสมาจากเครื่องสปัตเตอริงขณะเคลือบจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.3 กระบวนการสปัตเตอริง



รูปที่ 3.4 เครื่องสเปคเตอรืง



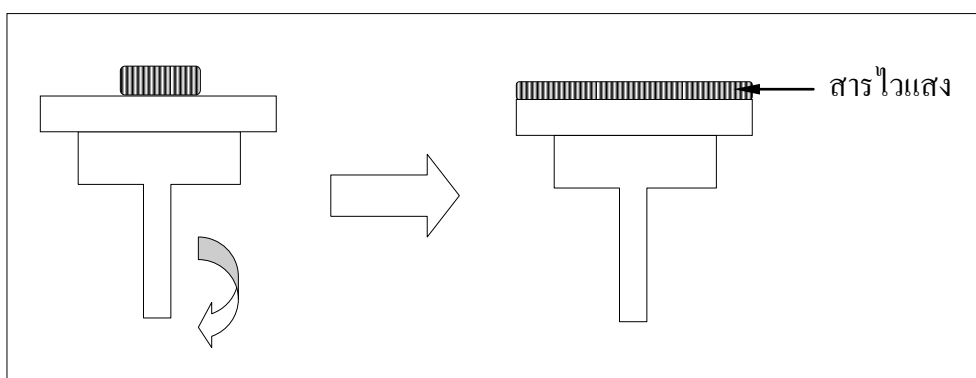
รูปที่ 3.5 ลำแสงพลาสมาจากเครื่องสเปคเตอรืง

3.3 กระบวนการเคลือบชั้นฟิล์มสารไวแสง (Coating-photosensitive)

การเคลือบสารไวแสงประกอบด้วย การหมุนเคลือบสารไวแสงและการเคลือบ สารไวแสง ด้วยการหลอมสารไวแสงชนิดผง ซึ่งการหมุนเคลือบสารไวแสง เป็นการเคลือบด้วยเครื่องหมุนเคลือบดังรูปที่ 3.6 สารไวแสงที่นำมาเคลือบต้อง เป็นของเหลวที่มีส่วนประกอบของตัวทำละลาย เช่น สารไวแสง SU-8 และ AZ การหมุนเคลือบสารไวแสงสามารถสร้างความหนาตั้งแต่ 1-300 μm พบว่าปัจจัยที่มีผลกับความหนาคือความเร็วของการหมุนเคลือบและความหนืดของสารไวแสง



รูปที่ 3.6 ลักษณะภายในของเครื่องหมุนเคลือบสารไวแสง



รูปที่ 3.7 การหมุนเคลือบสารไวแสง

จากรูปที่ 3.7 เป็นการหมุนเคลือบสารไวแสง โดยเริ่มจากการ หยอดสารไวแสงลงบนชิ้นงาน ในปริมาณที่เหมาะสมแล้วหมุนด้วยความเร็วสูง สารไวแสงจะกระจายตัวจนเต็มชิ้นงาน ซึ่งถ้า หยดสารไวแสงน้อยเกินไปจะเคลือบสารไวแสงไม่ทั่วบริเวณที่ต้องการ แต่ถ้า หยดสารไวแสงมากเกินไปจะทำให้สิ้นเปลืองสารไวแสง ซึ่งสารไวแสงแต่ละชนิดมีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นการ หมุนเคลือบแต่ละครั้งจะต้อง ใช้ปริมาณให้เหมาะสม เมื่อทำการหมุนเคลือบเสร็จแล้วสารไวแสงยังไม่สามารถนำมาฉายรังสีได้ จะต้องนำไปอบให้ปริมาณสารละลายในสารไวแสงลดลง จนสารไวแสงแห้งจึงจะพร้อมนำไปฉายรังสีต่อไป

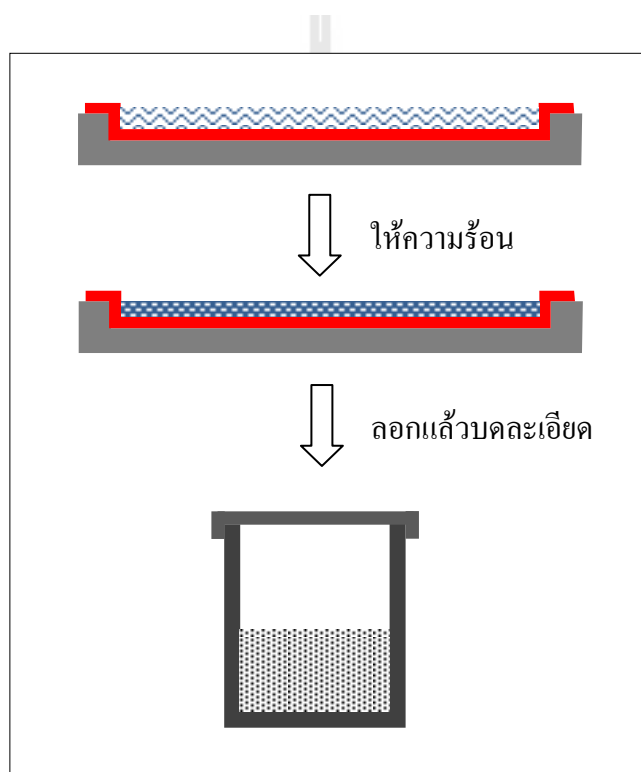
เนื่องจากวิธีหมุนเคลือบ สารไวแสงเหมาะสำหรับการเคลือบสารไวแสงความหนาไม่เกิน 300 μm แต่ถ้าต้องการ หมุนเคลือบสารไวแสง ให้ได้ความหนาเกิน 300 μm สามารถใช้สารไวแสง SU-8 เบอร์ 2100 ซึ่งเป็นเบอร์ที่มีความหนืดสูงประกอบด้วย เนื้อสารไวแสงถึง 75% และตัวทำละลายอีก 25% ซึ่งถ้าหยดสารไวแสงลงบนชิ้นงานน้อยเกินไปสารไวแสงจะกระจายตัวไม่ทั่ว แต่ถ้า หยดสารไวแสงมากเกินไปสารไวแสงส่วนที่เกินจะทำให้สิ้นเปลือง ดังนั้นจึง ใช้วิธีการเคลือบสารไวแสงวิธีใหม่ใหม่สำหรับเคลือบสารไวแสงให้มีความหนาเกิน 300 μm ขึ้นไป นั่นคือการหลอ่สารไวแสงชนิดผง (SU-8 powder) ซึ่งสามารถคำนวณความหนาของสารไวแสงที่ต้องการเคลือบได้ จากน้ำหนักของสารไวแสงที่ใช้ วิธีการนี้สามารถกำหนดรูปร่าง พื้นที่และขนาดของการเคลือบได้ โดยการใช้แม่แบบสำหรับการหลอ่สารไวแสงตามความต้องการ สำหรับการเตรียมสารไวแสงชนิดผงมีขั้นตอนต่อไปนี้จะนำสารไวแสง SU-8 เบอร์ 2100 มาอบบนแผ่นความร้อน (Hot plate) เพื่อให้ตัวทำละลายระเหยออกจนเหลือเพียง 7% โดยน้ำหนัก ซึ่งทำให้สารไวแสงสามารถอยู่ในรูปของแข็งได้ จากนั้นนำสารไวแสงมาบดให้ กลายเป็นเกล็ด แล้วเก็บในภาชนะมืดและมีความดันต่ำ การเตรียม SU-8 ผงมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. คัดเทพอลิอิมได์ (Polyimide: PI) ลงบนถาดอลูมิเนียมขนาดพื้นที่ 400 cm^2 ทำความสะอาดผิวของเทพอลิอิมได์การเช็ดด้วยสำลีจุ่ม IPA จนทั่วแล้วฉีดล้างด้วย IPA อีกครั้ง ฉีดล้างด้วยอะซิโตน จากนั้นนำชิ้นงานมาจุ่มล้างด้วยน้ำดีไอ เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน อบในเตาอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 60 นาที

2. เมื่อทำความสะอาดถาดอลูมิเนียมเสร็จแล้ว นำถาดอลูมิเนียมไปวางบนตาชั่ง แล้วเทสารไวแสง SU-8 เบอร์ 2100 ลงบนถาดอลูมิเนียม ทำให้สารไวแสงกระจายตัวเต็มถาดอลูมิเนียม ด้วยการหมุนด้วยเครื่องหมุนเคลือบ ซึ่งต้องหมุนด้วยความเร็วต่ำ เพื่อไม่ให้สารไวแสงกระเด็นออกนอกถาด เมื่อสารไวแสงกระจายตัวแล้ว นำถาดอลูมิเนียมไปชั่งน้ำหนัก (W_{initial}) นำถาดอลูมิเนียมไปอบบนแผ่นความร้อนที่อุณหภูมิ 105°C เพื่อให้ตัวทำละลายระเหยออกไป ในระหว่างอบนำถาดอลูมิเนียมมาชั่งอีกครั้ง (W_{final}) สำหรับสารไวแสง SU-8 เบอร์ 2100 สามารถหาค่าเปอร์เซ็นต์ของตัวทำละลายที่เหลือได้จากสมการ 3-1 (Charles et al., 2005)

$$\text{Solvent content} = \left(1 - 0.75 \frac{W_{\text{initial}}}{W_{\text{final}}} \right) \times 100\% \quad (3.1)$$

3. เมื่ออบจนตัวทำละลายเหลือ 7% แล้วปิดแผ่นความร้อน ปล่อยให้อุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง สารไวแสง SU-8 จะอยู่ในรูปของแข็ง จากนั้นแกะสารไวแสงที่แข็งตัวแล้วออกโดยการลอกแผ่น PI ออกจากถาดอลูมิเนียม แล้วนำสารไวแสงไปบดให้ละเอียด แล้วนำไปเก็บไว้ในโถสุญญากาศเพื่อใช้ในกระบวนการต่อไป รูปที่ 3.8 เป็นกระบวนการทำสารไวแสงแบบผง



รูปที่ 3.8 กระบวนการผลิตสารไวแสงผง

เมื่อเตรียมสารไวแสงแบบผงเสร็จแล้ว การหล่อเคลือบสารไวแสงผงลงบนฐานรองต้องใช้กรอบโพลีไดเมทิลไซโลเซน (Polydimethylsiloxane: PDMS) เป็นแม่พิมพ์ในการหล่อสาร PDMS ประกอบด้วยสองส่วนคือ เนื้อซิลิโคนกับสารช่วยในการแข็งตัว จากข้อมูลของสาร PDMS ต้องใช้ส่วนผสมเนื้อซิลิโคนกับสารช่วยแข็งตัวในอัตราส่วน 10 ต่อ 1 การสร้างแม่พิมพ์ PDMS สร้างโดยการเท PDMS ลงไปในแม่พิมพ์ที่ได้จากการกลึงแผ่นอลูมิเนียมให้เป็นหลุมรูปสี่เหลี่ยมมีความกว้าง 2.5 cm ยาว 2.5 cm ขอบกว้าง 0.5 cm ดังรูปที่ 3.9 ส่วนการลอก PDMS ออกจากแม่พิมพ์ทำได้ยาก

และเกิดความเสียหายได้ง่าย เนื่องจากเนื้อ PDMS จะติดกับผิวของแม่พิมพ์ จึงได้ใช้สเปรย์ถอดแบบ มาฉีดลงบนแม่พิมพ์ก่อน แล้วเทสาร PDMS ลงในแม่พิมพ์ เพื่อให้การถอดแบบสามารถทำได้ง่าย และไม่เกิดความเสียหายขึ้น การสร้างแม่พิมพ์ PDMS มีขั้นตอนดังนี้

1. ชั่งเนื้อซิลิโคน (Silicone) น้ำหนัก 3 กรัม สารช่วยแข็งตัว 0.3 กรัม เทลงในบีกเกอร์ แล้วกวนเนื้อสารให้กลายเป็นเนื้อเดียวกัน
2. นำบีกเกอร์ไปดูอากาศออกด้วยเครื่องปั๊มสุญญากาศ เป็นเวลา 30 นาที
3. ฉีดสเปรย์ถอดแบบ ลงในแม่พิมพ์รูปสี่เหลี่ยมให้ทั่วแล้วเทสาร PDMS ลงในแม่พิมพ์ เกลี่ยให้ทั่ว
4. นำแม่พิมพ์ไปวางบนแผ่นความร้อนที่ตั้งอุณหภูมิไว้ แล้วที่ 95°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปิดแผ่นความร้อนแล้วปล่อยให้อุณหภูมิลงจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วลอก PDMS ออกจากแม่พิมพ์



รูปที่ 3.9 แม่พิมพ์โลหะสำหรับสร้างกรอบแม่พิมพ์ PDMS

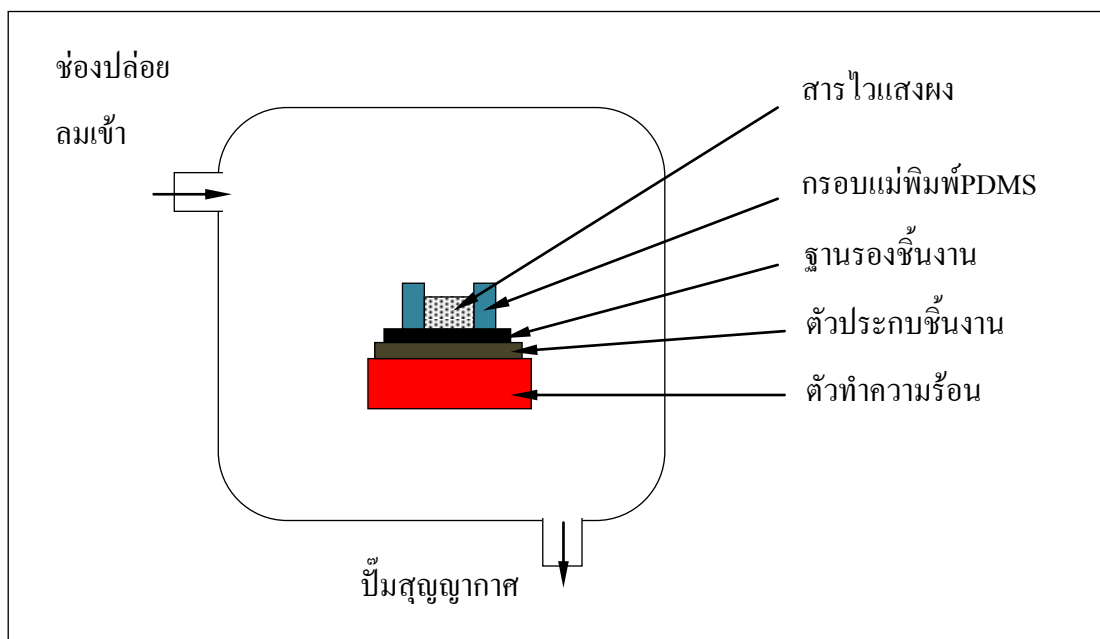
ขั้นตอนต่อมาจะทำการเคลือบสารไวแสง ด้วยวิธีการหลอมสารไวแสงแบบผงจะทำในห้องสุญญากาศ ดังรูปที่ 3.10 ให้ได้ความหนา $600\text{ }\mu\text{m}$ โดยเริ่มจาก การนำแม่พิมพ์พอลิเมอร์มาประกบลงบนชิ้นงาน แล้วใส่ชุดตัวประกบชิ้นงานล็อคให้แน่น จากนั้นนำชุดประกบไปชั่งน้ำหนัก โดยการวางไว้บนเครื่องชั่งแล้วตั้งค่าชุดตัวประกบให้เป็น ศูนย์ ทำการเทสารไวแสง แบบผงลงในแม่พิมพ์พอลิเมอร์ให้ได้หนัก 568 มิลลิกรัม ซึ่งการคำนวณหาน้ำหนักสามารถหาได้จาก

ความสัมพันธ์ $M = F \times D \times A \times T$

โดยที่ M คือ มวลของผง SU-8 2100 (กรัม)

D คือ ความหนาแน่นของ SU-8 2100

A คือ พื้นที่ของเบ้าหลอม เท่ากับ 6.25 cm^2
 T คือ ความหนาของสารไวแสงที่ต้องการ $600 \text{ }\mu\text{m}$
 F คือ ค่า Factor โดยที่ค่า Factor สามารถหาได้จากการทดลอง ตอนแรกจะเริ่มจาก $F = 1$ ถ้ายังไม่ได้ความหนาที่ต้องการก็ทำการเพิ่มค่า Factor ขึ้นจนกว่าจะได้ความหนาที่ต้องการ ซึ่งจากการทดลอง จะได้ค่า $F = 1.225$



รูปที่ 3.10 กระบวนการหลอมสารไวแสงผงในห้องสุญญากาศ

จากนั้น ใช้เข็มเกลี่ยกระจายสารไวแสงให้ทั่วบริเวณ นำชุดประกบเข้า ไปในห้องสุญญากาศ แสดงดังรูปที่ 3.11 แล้ว ดูดอากาศออก เปิดตัวทำความร้อนให้มีอุณหภูมิคงที่ 95°C ซึ่งขณะที่สารไวแสงผงกำลังหลอมเหลว จะเกิดฟองอากาศในเนื้อสารไวแสง เมื่อฟองอากาศเหล่านั้นถูกดูดออกมาจากเนื้อสารไวแสงจนหมด จึงปิดตัวทำความร้อนแล้วปล่อยแก๊สเข้าไปให้ความดันอยู่ในระดับความดันบรรยากาศ นำชุดตัวประกบออกมาวางบนแผ่นความร้อนที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 30 นาที ปล่อยให้อุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิห้อง นำชิ้นงานออกจากตัวประกบ แล้วนำไปขัดให้เรียบจนได้ความหนา $500 \text{ }\mu\text{m}$ จะได้ชิ้นงานพร้อมใช้ต่อไป



รูปที่ 3.11 ห้องสุญญากาศที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของ SU-8 จากการเทหล่อผง SU-8

3.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography)

เป็นกระบวนการถ่าย ทอดลวดลาย จุลภาคจากหน้ากากกันรังสีลงบน ชิ้นงาน ด้วยการฉาย รังสีผ่านหน้ากากกันรังสีลงบนสารไวแสงที่เคลือบไว้ รังสีที่ใช้ในกระบวนการ โฟโตลิโธกราฟีมี สองชนิดคือ รังสีอัลตราไวโอเล็ตและรังสีเอ็กซ์ รังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นแสงที่มีความยาวคลื่น ประมาณ 365 nm ซึ่งความยาวคลื่นสั้นกว่าแสงขาวแต่ยาวกว่ารังสีเอ็กซ์ ในห้องปฏิบัติการใช้เครื่อง Quintel Q4000 แสดงดังรูปที่ 3.1 2 เป็นเครื่อง ฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต สารไวแสงที่ นำมาใช้ใน กระบวนการ โฟโตลิโธกราฟีมีสองชนิด คือสารไวแสงชนิดบวกและสารไวแสงชนิดลบ สำหรับ สารไวแสงชนิดบวก ส่วนที่ถูกฉายด้วยรังสีจะถูกล้างออกหลังจากอบแล้วด้วยน้ำยา AZ Developer ส่วนที่ไม่ได้ถูกฉายด้วยรังสีจะ ยังคงอยู่บนฐานรอง เพื่อใช้ในกระบวนการต่อไป สารไวแสงชนิด บวกที่นิยมใช้คือสารไวแสง AZ เบอร์ 1512 และ 4620 ในกรณีของสารไวแสงชนิดลบ ส่วนที่ไม่ได้ ถูกฉายด้วยรังสี จะถูกล้างออกหลังจากอบแล้วด้วยสารเคมี ส่วนที่ถูกฉายด้วยรังสีจะแข็งตัวกลาย เป็นโครงสร้างเพื่อใช้ในกระบวนการต่อไป สารไวแสงชนิด ลบที่นิยมใช้คือสารไวแสง SU-8 รูปที่ 3.13 แสดงกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีของสารไวแสงชนิดบวก และสารไวแสงชนิดลบ การฉาย รังสีจะต้องฉายด้วยพลังงานที่เหมาะสมกับความหนาของสารไวแสง สำหรับสารไวแสงชนิดบวก ถ้าได้รับพลังงานมากเกินไป ขนาดโครงสร้างส่วนที่ถูกฉายด้วยรังสีจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนที่ไม่ได้ ถูกฉายด้วยรังสีจะมีขนาดเล็กลง แต่ถ้าได้รับพลังงานน้อยเกินไป ส่วนที่ถูกฉายด้วยแสงจะมีขนาด เล็กลง และ ส่วนที่ไม่ได้ถูกฉายด้วยรังสีจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นต้องฉายรังสี ด้วยพลังงาน ที่ เหมาะสมกับความหนาของสารไวแสง ขนาด ของ โครงสร้างจึงมีความถูกต้องตามที่ออกแบบ ไว้

เครื่อง Quintel Q4000 ใช้แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเลตที่มีอายุการใช้งานจำกัด เมื่อมีอายุการใช้งานมากขึ้นพลังงานของแสงจะลดลง ดังนั้นก่อนทำการฉายแสงจะต้องวัดพลังงานของเครื่องก่อนทุกครั้ง เพื่อนำไปคำนวณหาระยะเวลาของการฉายแสง จากพลังงานรวมที่สารไวแสงจะได้รับ ขั้นตอนการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตมีดังนี้

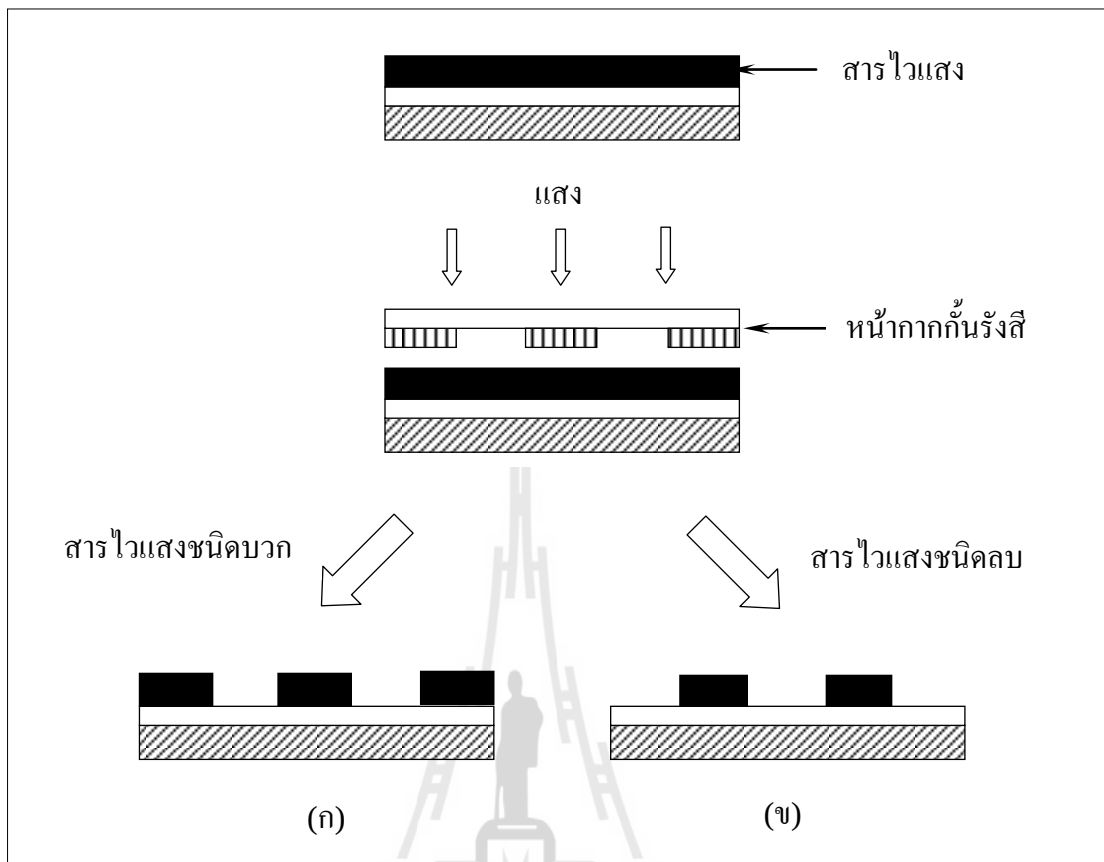


รูปที่ 3.12 เครื่องฉายรังสีอัลตราไวโอเลต Quintel Q4000

1. เปิดปัดลมเพื่อป้อนเข้าเครื่อง Quintel Q4000 ซึ่งเครื่อง Quintel Q4000 มีช่องสำหรับต่อลมสองช่องคือ ช่องลมสำหรับ ดันชิ้นงานขึ้น ไปประกบกับ หน้ากากกันรังสี ใช้ความดัน 75 psi และช่องลมสำหรับหล่อเย็นหลอดรังสีอัลตราไวโอเลต ใช้ความดัน 45 psi จากนั้นเปิดพัดลมเพื่อช่วยให้การหล่อเย็นหลอดรังสีมีประสิทธิภาพดีขึ้น
2. เปิดเครื่องฉายรังสี แล้ววัดความเข้มแสง หลอดรังสีได้ความ เข้มแสง 22.65 mW/cm^2 ซึ่งจากการทดสอบฉายรังสีที่สารไวแสงความหนา $35 \mu\text{m}$ ใช้พลังงานในช่วง $2.35\text{-}2.40 \text{ J/cm}^2$ ดังนั้นจึงตั้งเวลาในการฉายไว้ที่ 90 วินาที เพื่อให้ได้พลังงานตามที่ต้องการ
3. ติดหน้ากากกันรังสีอัลตราไวโอเลตเข้ากับกระจกขนาด กว้าง 5 นิ้ว ยาว 5 นิ้ว โดยหันด้านที่มีหมึกดำออกด้านนอก นำหน้ากากกันรังสีมาวางบนฐานรองหน้ากากกันรังสี แล้วยึดกระจกให้ติดกับฐานรองหน้ากาก วางชิ้นงานบนฐานรองชิ้นงานให้ตรงกับหน้ากากกันรังสี แล้วดันให้ชิ้นงานประกบเข้ากับหน้ากากกันรังสี ทำการฉายรังสีให้ได้ตามที่ตั้งค่าไว้

4. หลังจากฉายแสงเสร็จนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 60 นาที ปล่อยให้ อุณหภูมิค่อย ๆ ลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง นำชิ้นงานไปล้างสารไวแสงส่วนที่ถูกฉายด้วยแสงออกใน ขั้นตอนต่อไป

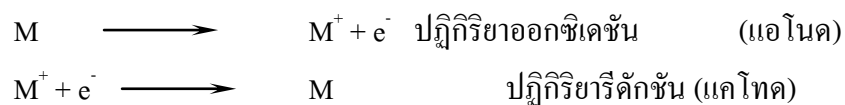
เนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเลตมีพลังงานไม่สูงมาก จึงเหมาะสำหรับสร้างหน้ากากกันรังสี เอ็กซ์หรือชิ้นงานที่มีโครงสร้างความสูงไม่เกิน $200\text{ }\mu\text{m}$ ดังนั้นถ้าต้องการสร้างชิ้นงานที่มีโครงสร้าง สูงเกิน $200\text{ }\mu\text{m}$ จะต้องฉายด้วยรังสีเอ็กซ์ ซึ่งรังสีเอ็กซ์ที่ใช้มีแหล่งกำเนิดมาจากแสงซินโครตรอน ณ สถานีทดลอง ที่ 6 (Beam line 6) ของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ซึ่งแสง ซินโครตรอนที่ออกมาจากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน เป็นแสงที่มีช่วงความถี่กว้าง จึงใช้ หน้าต่างตัวกรองเบริลเลียม (Beryllium window) กั้นในช่องทางเดินแสงให้เหลือเฉพาะแสงใน ย่านที่ต้องการเท่านั้น ลักษณะของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบบนฉากหลังเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความ กว้าง 7.43 mm ยาว 88.31 mm เนื่องจากชิ้นงานที่มาฉายมีขนาดใหญ่กว่าความกว้างของรังสีเอ็กซ์ ดังนั้นจึงทำการติดตั้งเครื่อง สแกนให้ชิ้นงานเคลื่อนที่ในทิศขึ้น-ลง เพื่อให้รังสีเอ็กซ์มาตกกระทบ ชิ้นงานให้ได้พลังงานเท่ากันทั่วทั้งชิ้น ก่อนทำการฉายรังสีจะต้องเตรียมชิ้นงานที่จะนำมาฉายรังสี โดยเริ่มจากการนำหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ที่สร้างเสร็จแล้วมาประกบกับบนสารไวแสงที่เคลือบกับ ก้อนมวลชิ้นชั่วคราว โดยหันด้านที่มีโลหะเงินเข้าหาผิวสารไวแสงแล้วใช้เทปพอลิไธม์ติดยึด หน้ากากกันรังสีเอ็กซ์กับชิ้นงาน เนื่องจากเทปพอลิไธม์เป็นเทปทนความร้อนสูงได้ เมื่อทำการ ฉายรังสีเอ็กซ์เป็นเวลานาน เมื่อทำการขึ้นหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์เรียบร้อยแล้ว นำชิ้นงานเข้าไปยัง เครื่องขับเคลื่อนชิ้นงาน ภายในห้องสุญญากาศแล้วทำการดูดอากาศออก รอจนกว่าความดันในห้อง ฉายรังสีมีความดันต่ำกว่า 1×10^{-3} ทอร์ แล้วเปิดโปรแกรมควบคุมเครื่องฉายแสง พร้อมทั้งตั้งค่า พารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วย ชนิดสารไวแสง ความหนาสารไวแสง ชนิดวัสดุที่นำมาสร้าง หน้ากากกันรังสี ความหนาของวัสดุกันรังสี และปริมาณพลังงานที่ต้องการฉาย ซึ่งตัวแปรเหล่านี้มี ผลต่อปริมาณการฉายรังสี หลังจากตั้งค่าพารามิเตอร์เรียบร้อยแล้ว จึงเริ่มทำการฉายรังสีให้ได้ พลังงานตามที่ตั้งไว้ เมื่อฉายรังสีเสร็จแล้ว นำชิ้นงานไปอบหลังการฉายรังสีในเตาอบที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 90 นาที แล้วปล่อยให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง จากนั้นนำชิ้นงานไปล้างสารไวแสงที่ ไม่ได้ถูกฉายด้วยรังสีออกด้วยน้ำยา SU-8 Developer โดยคว่ำชิ้นงานลงในน้ำยา SU-8 Developer แช่ไว้เป็นเวลา 60 นาที แล้วนำ ขึ้นมาตรวจดูว่าสารไวแสง ถูกล้างออกหมดหรือไม่ โดยขีด ล้างด้วย ไอโซโพรพิล แอลกอฮอล์ แล้วดูว่ามีคราบสีขาว กิดขึ้นหรือไม่ ถ้ามีแสดงว่ายังล้างสารไวแสงออก ไม่หมด ถ้าล้างสารไวแสงหมดแล้ว นำมาแปะแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน เพื่อนำชิ้นงานไปทำการชุบ โลหะด้วยไฟฟ้าในขั้นตอนต่อไป

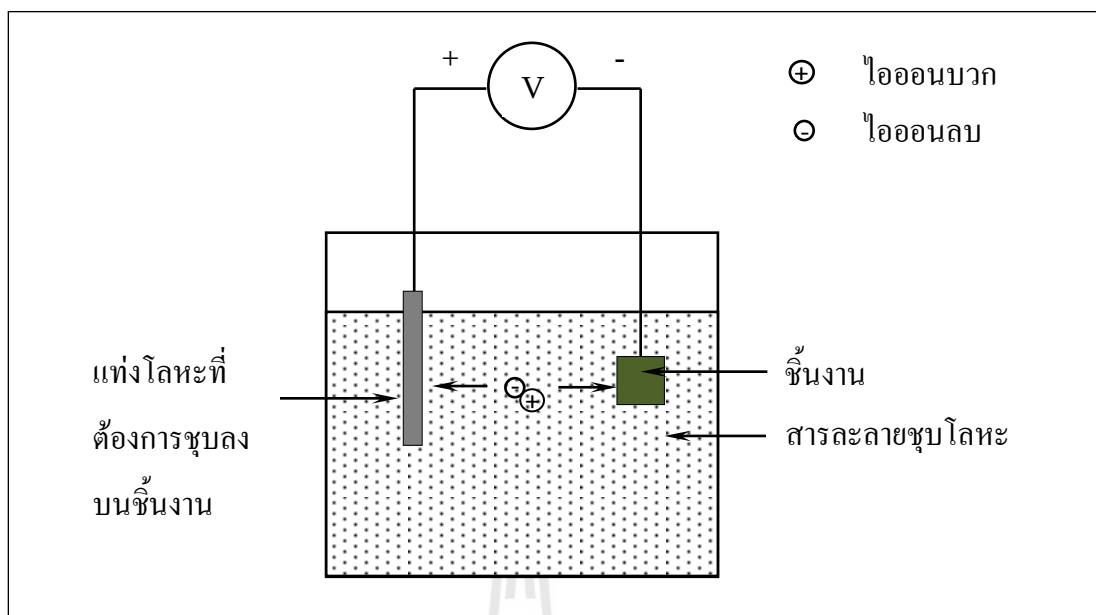


รูปที่ 3.13 กระบวนการฉายรังสีลงบนสายใยแสง (ก) สายใยแสงชนิดบวก (ข) สายใยแสงชนิดลบ

3.5 กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating)

เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งใช้กระแสไฟฟ้าทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี แล้วนำไอออนของโลหะที่ต้องการชุบในสารละลายไปเคลือบลงบนชิ้นงาน โลหะที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการชุบด้วยไฟฟ้าได้แก่ ทอง ทองแดง นิกเกิล และเงิน จากรูปที่ 3.14 เป็นวงจรของกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ขั้วแอโนดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) อะตอมจะแตกตัวเป็นไอออนบวกกับไอออนลบ ซึ่งไอออนบวกจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแคโทด ซึ่งต่อเข้ากับชิ้นงาน เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction) ไอออนบวกกับอิเล็กตรอนรวมกันเป็นอะตอมของธาตุเกาะที่ผิวชิ้นงาน ดังนั้นผิวของชิ้นงานจะต้องนำไฟฟ้า จึงจะสามารถเกิดปฏิกิริยานี้ได้ แต่ถ้าผิวของชิ้นงานเป็นฉนวน จะต้องทำการเคลือบโลหะลงบนผิวของชิ้นงานก่อน จึงจะนำมาชุบโลหะได้





รูปที่ 3.14 วงจรของกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

โลหะที่ใช้ชุบในงานวิจัยนี้ มีสามชนิดคือ เงิน นิกเกิล และทองแดง แต่ละชนิดมีขั้นตอนการชุบแตกต่างกันดังนี้

3.5.1 การชุบโลหะเงิน

ใช้สำหรับการสร้างหน้ากั้นรังสีเอ็กซ์ โดยกระบวนการชุบจะทำใน สารละลาย สำหรับชุบโลหะเงิน ซึ่งมีขั้นตอนการผสมสารละลายสำหรับชุบโลหะเงินดังนี้

1. เตรียมน้ำดีไอ ปริมาตร 3000 mL ลงในภาชนะซึ่งทำการกวน สารละลาย ใน ภาชนะตลอดเวลา และภาชนะดังกล่าวต้องมีปริมาตรอย่างน้อยประมาณ 6000 mL จากนั้นเติม Potassium cyanide น้ำหนัก 833 กรัม ลงไปโดยค่อยๆ เติมลงไปทีละน้อย ในขณะที่ทำการกวน สารละลายในภาชนะตลอดเวลา และควรตั้งภาชนะผสมสารไว้ในตู้ดูดอากาศ และสวมผ้าปิดจมูก พร้อมทั้งใส่ถุงมือยางด้วย เพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นได้ เนื่องจากส่วนผสมต่าง ๆ อาจเป็น พิษต่อผิวหนังและระบบทางเดินหายใจ

2. กวนสารละลายต่อเนื่องประมาณ 10 นาที เพื่อให้มันใจ ได้ว่า Potassium cyanide ที่เติมลงไปละลายผสมกับน้ำจนเข้ากันโดยเห็นเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว จึงทำการเติมโดยการ เทสาร Potassium carbonate น้ำหนัก 75 กรัม ลงไปทีละน้อย และรอประมาณ 5 นาที จนสารละลาย เข้ากันจนหมด

3. เติม Silver cyanide 80% น้ำหนัก 225 กรัม ลงไปที่ละน้อย โดยการใช้ช้อนตัก สารขนาดเล็กเติมลงไปที่ละช้อน แล้วรอให้ละลายเข้ากันก่อน จึงเติมช้อนต่อไปเรื่อย ๆ จนครบตาม น้ำหนักที่ต้องการ

4. กวนสารทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที จากนั้นจึงเติมน้ำดีไอเพิ่มลงไปในภาชนะ จนกระทั่งปริมาตรทั้งหมดได้ 5000 mL

5. เติมผงคาร์บอน (Granular carbon) น้ำหนัก 10 กรัม ลงไปแล้วทำการกวนสาร ต่อเป็นเวลาประมาณ 30 นาที หลังจากนั้นจึงหยุดการกวนสาร นำสารละลายที่ได้ลงจากเครื่องกวนสาร ปิดฝาให้สนิทแล้วปล่อยให้สารทำปฏิกิริยากันเป็นเวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมง

6. เมื่อครบเวลาที่กำหนด ใ้ นำสารละลายมากรองด้วยกระดาษกรอง เป็น จำนวน 3-5 ครั้ง เพื่อกรองเอาผงคาร์บอนและฝุ่นละอองที่อาจมีในสารละลายออกมาให้หมด

7. ทำความสะอาดสารละลายขึ้น ตอนสุดท้าย ด้วยการกรองด้วยไฟฟ้าโดยนำ สารละลายที่ทำการผสมเสร็จแล้วมาทำการชุบด้วยไฟฟ้า ปรับให้แรงดันคงที่ที่ 1.5 โวลต์ โดยใช้ โลหะ Platinized titanium เป็นขั้วบวก (Anode) และใช้ Stainless steel เป็นขั้วลบ (Cathode) ใช้เวลา ทั้งสิ้น 15 นาที เพื่อให้สารละลายสะอาดและพร้อมใช้งาน

8. เติมสาร Silver Glo 3K Make up ปริมาตร 30 mL และสาร Silver Glo 3K TY ปริมาตร 6.5 mL เพื่อให้ผิวของโลหะเงินหลังจากการชุบด้วยไฟฟ้าออกมาเรียบเนียนและเงางาม

เมื่อเตรียมสารละลายเงินเสร็จแล้ว จึงต้องจรมตามรูปที่ 3.14 โดยใช้แผ่นโลหะ Platinized titanium เป็นขั้วแอโนด สามารถ ทำความสะอาด ด้วยการชุบเปอร์โซนิค ในน้ำดีไอเป็นเวลา 10 นาที และชิ้นงานที่ต้องการชุบเป็นขั้วแคโทด ซึ่งระหว่างทำการชุบโลหะจะต้องกวน สารละลายสำหรับชุบตลอดเวลา เพื่อให้สารละลายเกิดการหมุนเวียน แล้วตั้งค่ากระแสให้มีค่าต่ำ ที่สุดแล้วค่อย ๆ ปรับเพิ่มค่ากระแสอย่างช้า ๆ จนได้กระแสไฟฟ้าในอัตรา 20 mA/cm^2 จากอัตรา กระแสนี้จะเกิดโลหะเงินความหนา $5 \mu\text{m}$ ต่อเวลา 7 นาที 30 วินาที ซึ่งอัตราการเกิดเงินในขั้นตอน การชุบด้วยไฟฟ้าสามารถเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะและคุณสมบัติของชิ้นงานที่นำมาชุบ คุณภาพ ของสารละลายที่ใช้ในการชุบ รวมถึงอุณหภูมิของสารละลายก็มีผลต่ออัตราการเกิดเงินด้วยเช่นกัน ในระหว่างการชุบเงินจะต้องระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศขึ้นในลวดลายที่ทำการชุบ ซึ่งถ้าเกิด ฟองอากาศขึ้นจะทำให้โลหะ เงินไม่สามารถก่อตัวขึ้นในบริเวณนั้นได้ ทำให้ลวดลาย ที่ได้ไม่ สมบูรณ์ จนเกิดความเสียหายได้ เมื่อทำการเติมโลหะเงินจนเต็มแล้วล้างด้วยน้ำดีไอ จากนั้นเป่าแห้ง ด้วยแก๊สไนโตรเจน

3.5.2 การ ชุบโลหะนิกเกิล

การชุบโลหะนิกเกิลจะใช้สำหรับสร้างโครงสร้างของตัวตรวจรู้ สารละลายสำหรับชุบนิกเกิลสามารถผสมเองในห้องปฏิบัติการ หรือซื้อสารละลายสำเร็จรูปมาใช้ ซึ่งแต่ละแบบจะมีสูตรในการผสมที่แตกต่างกัน รูปที่ 3.15 เป็นชุดอุปกรณ์ชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า สำหรับสารละลายที่สามารถผสมเองได้ในห้องปฏิบัติการมีขั้นตอนการผสมดังนี้

1. เตรียมน้ำดีไอปริมาตร 2500 mL ลงในภาชนะ ซึ่งทำการกวน สารละลาย ในภาชนะตลอดเวลา และภาชนะดังกล่าวต้องมีปริมาตรอย่างน้อยประมาณ 5000 mL จากนั้นเติม LBN-99 Carrier ปริมาตร 300 mL จากนั้นเติม Spectra LBN-99 Brightener ปริมาตร 10 mL แล้วทำการกวนสารละลายเรื่อย ๆ
2. ให้ความร้อนจนสารละลายมีอุณหภูมิ 55 °C จากนั้นทำการกรองสารละลายด้วยกระดาษกรอง
3. ทำความสะอาดสารละลายด้วยการกรองด้วยไฟฟ้าโดยนำสารละลายที่ทำการผสมเสร็จแล้วมาทำการชุบด้วยไฟฟ้า ด้วยความหนาแน่นกระแส 50 mA/cm² โดยใช้โลหะ Stainless steel เป็นขั้วบวก (Anode) และใช้ชิ้นงานทดสอบเป็นขั้วลบ (Cathode) เป็นเวลา 60 นาที เพื่อให้สารละลายสะอาดและพร้อมใช้งาน



รูปที่ 3.15 ชุดอุปกรณ์การชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า

3.5.3 การชุบโลหะทองแดง

การชุบโลหะทองแดงจะใช้สำหรับสร้างก้อนมวลขึ้นชั่วคราว เนื่องจากโลหะทองแดงสามารถ สกัดออกง่าย และ รวดเร็ว จึงนำมาใช้สร้างก้อนมวลขึ้นชั่วคราว สำหรับสารละลายสำหรับชุบด้วยไฟฟ้าไม่ได้ผสมขึ้นมาเอง โดยซื้อสารละลายสำเร็จรูปมาใช้ จึงไม่มีขั้นตอนการผสมสารละลาย แต่สารละลายที่ซื้อมาประกอบน้ำดีไอปริมาตร 1000 mL Cupric Sulfate ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) น้ำหนัก 250 กรัม กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ปริมาตร 50 mL ก่อนทำการชุบโลหะต้องกรองสารละลายด้วยกระดาษกรองก่อน จากนั้นทำการต่อวงจรตามรูปที่ 3.5 ใช้แท่งทองแดงมาต่อเป็นขั้วแอโนด ก่อนนำแท่งทองแดงมาใช้งานต้องทำความสะอาดด้วยการจุ่มในกรดไฮโดรคลอริก 10% แล้วล้างด้วยน้ำดีไอ ส่วนชิ้นงานที่ต้องการชุบต่อที่ขั้วแคโทด แล้วตั้งอุณหภูมิให้สารละลายมีค่า 50°C จากนั้นปรับแรงดันให้มีค่าต่ำที่สุด แล้วค่อย ๆ ปรับแรงดันขึ้น จนกว่าจะมีค่าความหนาแน่นกระแส 30 mA/cm^2 ซึ่งระหว่างทำการชุบต้องกวนสารละลายตลอดเวลา เมื่อชุบทองแดงเสร็จแล้วล้างชิ้นงานด้วยน้ำดีไอ เป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน

3.6 กระบวนการสกัดเนื้อวัสดุ (Etching)

เป็นกระบวนการสกัดเนื้อวัสดุหรือลอกฟิล์มออก เช่น ออกไซด์หรือฟิล์มบางชนิดอื่น ๆ ออกจากผิวชิ้นงาน โดยใช้วิธีทางเคมีอิเล็กโตรไลติก หรือการยิงด้วยพลาสมา-ไอออน (Plasma-ion bombardment) ซึ่งหลังจากที่ถ่ายทอดลวดลายจากหน้ากากลงสารไวแสงแล้ว จะต้องกัดหรือลอกฟิล์มบางที่อยู่ในหลุมสารไวแสงออก โดยทั่วไปกระบวนการสกัดเนื้อวัสดุจะต้องพิจารณาถึง ปัจจัยต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- การสกัดเนื้อวัสดุนั้นเป็นแบบไอโซทรอปิก (Isotropic ซึ่งเกิดขึ้น เหมือนกันในทุกทิศทาง) หรือ แอนไอโซทรอปิก (Anisotropic ซึ่งเกิดขึ้นในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง)
- การสกัดเนื้อวัสดุเป็นแบบเลือกเฟ้น (Selective) หรือไม่ หมายความว่าสารที่ใช้สกัดเนื้อวัสดุจะทำลายชั้นหน้ากาก และวัสดุอื่น ๆ ด้วยอัตราที่ต่ำกว่าชั้นวัสดุเป้าหมายอย่างน้อยเพียงใด
- อัตราการสกัดเนื้อวัสดุมีความสม่ำเสมอเพียงใดตลอดพื้นที่ผิวหน้าวัสดุ
- หลังจากการสกัดเนื้อวัสดุแล้ว ชั้นที่อยู่ข้างใต้มีความเสียหายเกิดขึ้นหรือไม่

สารเคมีที่ใช้ในการสกัดเนื้อวัสดุคือ สารจำพวกกรดบัพเฟอร์เช่น บัพเฟอร์ไฮโดรฟลูออริก ซึ่งใช้ในการสกัดเนื้อวัสดุ SiO_2 และแก้ว การสกัดด้วยสารเคมีประเภทเหล่านี้เรียกว่าเป็น การสกัดเนื้อวัสดุแบบเปียก (Wet etching) ซึ่งทำให้บริเวณที่ถูกสกัดมีลักษณะไอโซทรอปิกและเกิดเป็นลักษณะการสกัดเนื้อวัสดุได้ผิวสารไวแสง ดังแสดงในรูปที่ 3.16 (ข) ลักษณะผิวหน้าที่สกัดเนื้อวัสดุด้วยน้ำยาเคมีจะขึ้นกับอุณหภูมิและอายุการใช้งานของส่วนผสมน้ำยาสกัดเนื้อวัสดุ ในงานวิจัยนี้ใช้

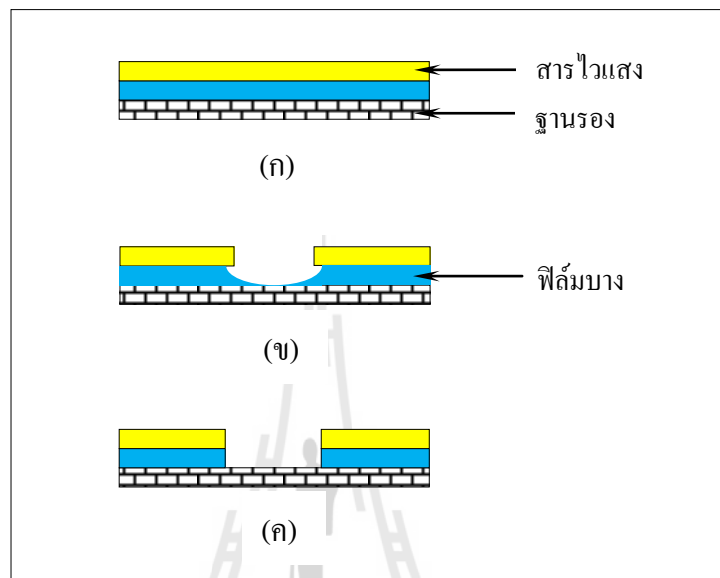
ฟิล์มบางสองชนิดคือ ไทเทเนียมและทองแดง ซึ่งการสกัดไทเทเนียมทำได้โดยการนำชิ้นงานจุ่มแช่ในสารละลายไฮโดรฟลูออริก 10 % จนกว่าไทเทเนียมจะถูกสกัดออกจนหมด จากนั้นล้างด้วยน้ำดีไอโอเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน การสกัดทองแดงทำได้ด้วยการนำชิ้นงานจุ่มแช่ในสารละลายที่มีส่วนผสม $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2$: น้ำดีไอ ในอัตราส่วน 1 : 1 : 20 ต่อปริมาตร สารละลายนี้ไม่สามารถผสมเก็บไว้ได้ หลังจากผสมเสร็จจะต้องใช้ทันที ซึ่งในขณะที่เกิดปฏิกิริยาการสกัดอยู่ สารละลายจะเกิดฟองอากาศขึ้น เมื่อทำการสกัดทองแดงจนหมดล้างชิ้นงานด้วยน้ำดีไอ เป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน

ต่อมามีการพัฒนาการสกัดเนื้อวัสดุโดยใช้ปฏิกิริยาเคมีของโมเลกุลแก๊สที่แตกตัวเป็นไอออนหรือพลาสมาเข้ามาช่วย ซึ่งเรียกว่าการสกัดเนื้อวัสดุแบบแห้ง (Dry etching) กระบวนการดังกล่าวแสดงในรูปที่ 3.18 โดยการใช้แก๊สเช่น O_2 และ CF_4 (การใช้แก๊สแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับความต้องการสกัดเนื้อวัสดุชนิดใด) ป้อนเข้ามาในห้องปฏิกิริยา (Reaction chamber) แล้วลดความดันลงเหลือประมาณ 0.1-0.3 ทอร์ จากนั้นป้อนกำลังอาร์เอฟให้ระหว่างขั้วไฟฟ้าโลหะสองขั้ว ขั้วหนึ่งเป็นแอโนดซึ่งต่อลงดินและอีกขั้วหนึ่งเป็นแคโทดซึ่งชิ้นงานจะวางอยู่บนขั้วนี้ แรงดันอาร์เอฟจะทำให้เกิดการดิซซาร์จที่ค่าความดันแก๊สดำและทำให้แก๊สแตกตัวเป็นพลาสมาประกอบด้วยอิเล็กตรอนที่มีประจุเป็นลบและไอออนบวกของฟลูออโรคาร์บอนหรือคลอโรคาร์บอน ทั้งนี้แล้วแต่กรณี วงจรไฟฟ้าที่ใช้จะถูกรออกแบบเพื่อให้แคโทดมีศักย์เป็นลบ ซึ่งทำให้ไอออนบวกเคลื่อนที่เร่งตรงมายังขั้วแคโทดและวิ่งชนผิวหน้า วัสดุอย่างแรงและหักสักรีไฟตรงโดยเฉลี่ยของแคโทดมีค่าต่ำ ทำให้การสกัดเนื้อวัสดุส่วนใหญ่เป็นแบบไอโซทรอปิก ชนิดของสารเจือที่ใส่สกัดจะทำปฏิกิริยากับชั้นฟิล์มที่ถูกสกัดและทำให้เกิดเป็นสารประกอบซึ่งระเหยเป็นไอออกจากห้องปฏิกิริยาไปพร้อมกับแก๊สพา ในกรณีที่แคโทดมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบมาก การวิ่งชนของไอออนอย่างแรงจะทำให้เกิดความเสียหายบนผิวหน้า วัสดุด้วย ลักษณะนี้ จะเป็นการเพิ่มปฏิกิริยาเคมีในทิศทางที่ไอออนวิ่งชน กับผิวหน้าวัสดุ ยังผลให้การสกัดเนื้อวัสดุมีความเป็นแอนไอโซทรอปิกมากขึ้น ซึ่งเรียกว่าการสกัดเนื้อวัสดุด้วยไอออนปฏิกิริยา (Reactive Ion Etch: RIE)

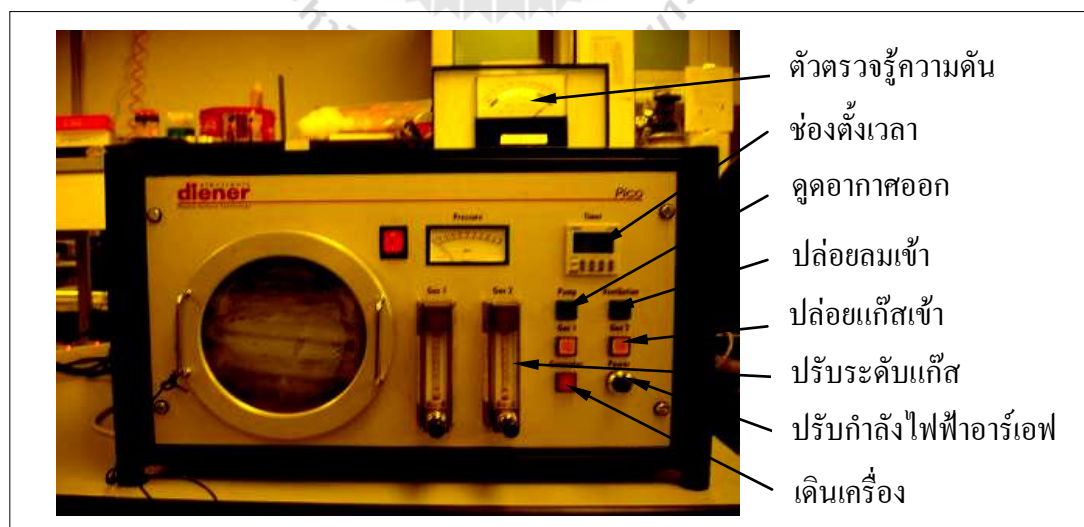
การสกัดเนื้อวัสดุแบบแห้ง ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง ซึ่งภายในห้องปฏิกิริยามีชั้นวางชิ้นงานสองชั้น ชั้นบนเป็นการกักแบบไอโซทรอปิก เหมาะสำหรับงานที่ต้องการกัดในทุกทิศทาง ส่วนชั้นล่างเป็นการกัดแบบ แอนไอโซทรอปิก เหมาะสำหรับงานที่ต้องการกัดชิ้นงานแบบตรง รูปที่ 3.17 เป็นเครื่องสกัดเนื้อวัสดุด้วยพลาสมาที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีขั้นตอนการใช้งานต่อไปนี้

1. กดปุ่มปล่อยลมเข้าให้ความดันภายในเครื่องเท่ากับความดันในห้อง เพื่อเปิดฝาเครื่อง แล้วนำชิ้นงานเข้าไปวางในเครื่อง ปิดฝาคูดอากาศออกจนกว่าความดันจะได้ 200 มิลลิทอร์
2. ปล่อยแก๊ส O_2 และ CF_4 เข้าไปในเครื่องรักษาระดับความดันให้ไม่เกิน 250 มิลลิทอร์ ตั้งเวลาที่ต้องการสกัดเนื้อวัสดุด้วยพลาสมา แล้วปรับระดับกำลังอาร์เอฟให้เหมาะกับการใช้งาน
3. สกัดเนื้อวัสดุด้วยพลาสมารอจนกว่าจะดำเนินการเสร็จสิ้นแล้วปิดเครื่อง

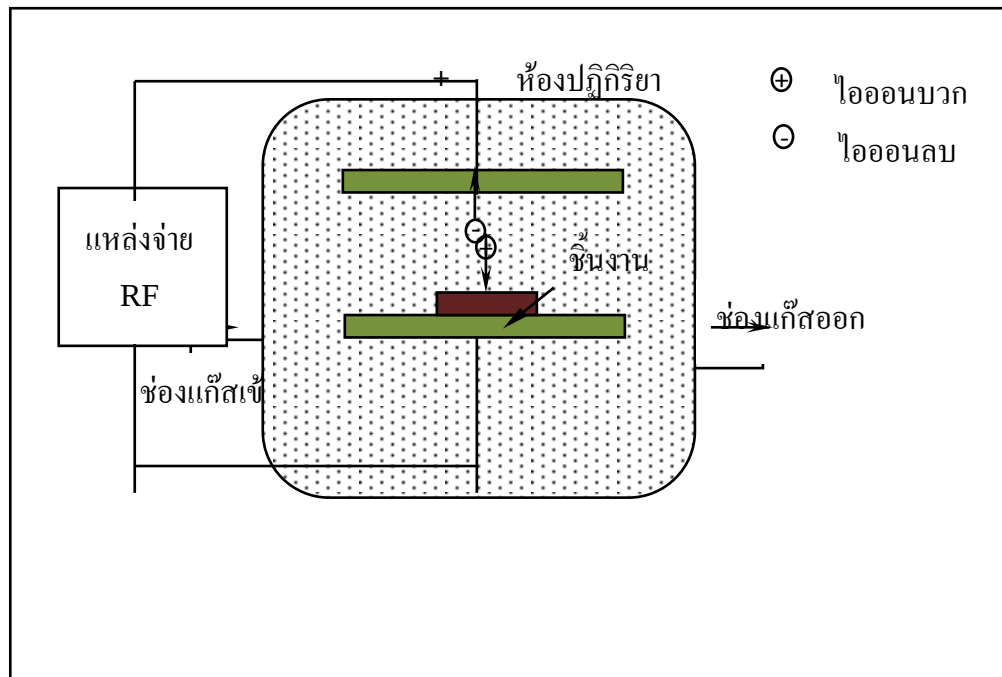
4. ปล่อยลมเข้าเครื่องให้ความดันภายในเครื่องเท่ากับความดันในห้อง เพื่อเปิดฝาเครื่อง แล้วนำชิ้นงานออกมาเป่าด้วยแก๊สไนโตรเจนเบา ๆ จากนั้นปิดฝาเครื่อง เปิดปั๊มดูดอากาศเพื่อให้ฝาเครื่องปิดสนิท จะได้ชิ้นงานพร้อมใช้ในกระบวนการต่อไป



รูปที่ 3.16 การสกัดเนื้อวัสดุแบบต่าง ๆ (ก) ก่อนการสกัด (ข) การสกัดแบบไอโซทรอปิกใช้วิธี การสกัดแบบเปียก (ค) การสกัดแบบแอนไอโซทรอปิกใช้วิธีการสกัดแบบแห้ง



รูปที่ 3.17 เครื่องสกัดเนื้อวัสดุด้วยพลาสมา



บทที่ 4

การออกแบบสวิตช์ความแรง

ในบทนี้จะนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการออกแบบสวิตช์ความแรง อีกทั้งยังมีเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ผลและการทดสอบการ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถหาได้จากการวิเคราะห์ทฤษฎี ซึ่งได้สมการความแรงแล้วนำไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสวิตช์ความแรง เพื่อให้ตัวตรวจรู้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ การออกแบบตัวตรวจรู้ความแรงในงานวิจัยนี้ได้คำนึงถึงขนาดโครงสร้าง กระบวนการสร้าง รวมถึงระยะเวลาในการสร้าง ให้สอดคล้องกับอุปกรณ์ที่มีอยู่ ในห้องปฏิบัติการ สวิตช์ความแรงประกอบด้วยส่วน ที่สำคัญได้แก่ ก้อนมวลคือส่วนที่เคลื่อนที่ได้ คานสปริงจะทำหน้าที่เป็นสปริงด้านการเคลื่อนที่ของก้อนมวล ขั้วไฟฟ้าจะทำหน้าที่นำไฟฟ้าเมื่อน้ำสัมผัสของก้อนมวลสัมผัสกับขั้วไฟฟ้า และจุดยึดจะทำหน้าที่ยึดก้อนมวลให้ติดกับฐาน รูปที่ 4.1 แสดงภาพด้านบนของสวิตช์และส่วนประกอบต่าง ๆ

4.1 การออกแบบสวิตช์ความแรง

จากรูปที่ 4.1 โครงสร้างของสวิตช์ความแรง เมื่อมีแรง F มากระทำที่จุดศูนย์กลางก้อนมวล ทำให้คานสปริงเกิดการโก่งตัว ซึ่งสามารถหาสมการการโก่งตัวของคานสปริงได้ (Lynn, 1979) โดยใช้วิธีพื้นที่โมเมนต์ดัด (The area moment method) ดังสมการที่ (4.1)

$$y = \frac{Fx^2}{2EI} \left(-\frac{x}{2} + l_b + \frac{l_m}{2} \right) \quad (4.1)$$

โดยที่ y คือ ระยะการเคลื่อนที่ของปลายคาน

F คือ แรงที่มากระทำกับก้อนมวล

E คือ Young's Modulus ของวัสดุ

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของภาพตัดขวางของคานสปริง

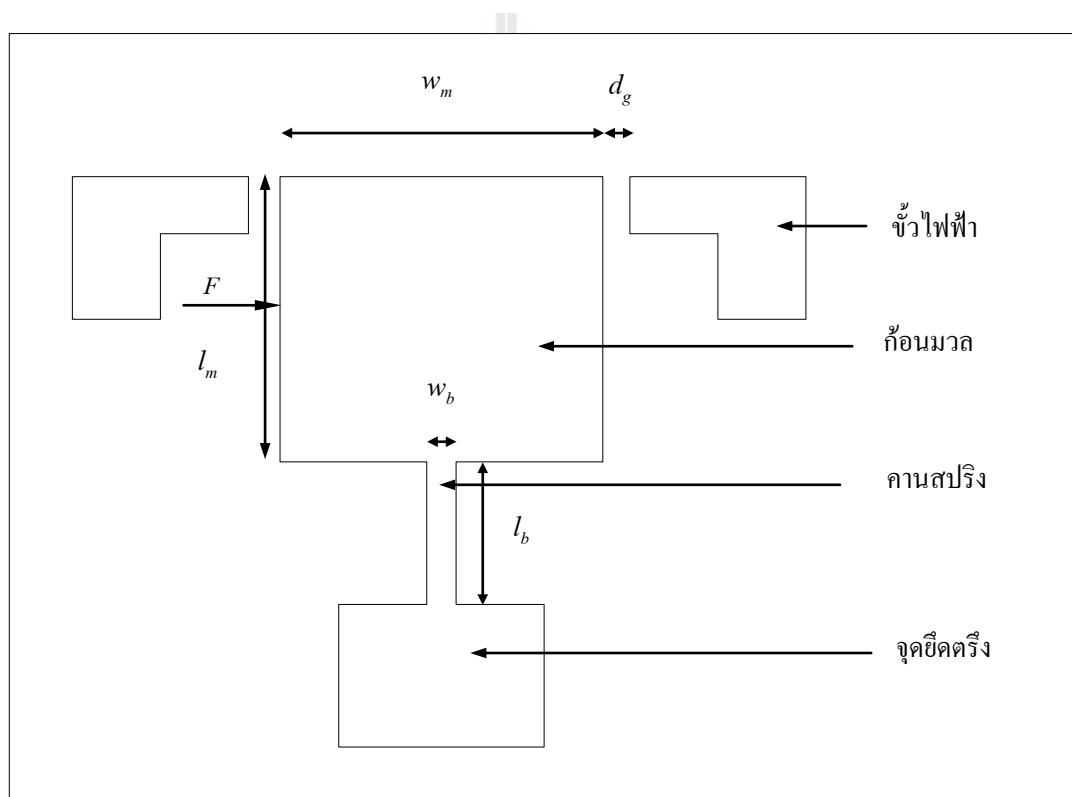
l_b คือ ความยาวของคานสปริง

l_m คือ ความยาวของก้อนมวล

เมื่อหาระยะการเคลื่อนที่ของคานสปริงได้แล้ว จากนั้นสามารถหาระยะการเคลื่อนที่ของ
ก้อนมวล (Lynn, 1979) ได้ดังสมการที่ (4.2)

$$y = \frac{Fl_b^2}{2EI} \left(\frac{2}{3}l_b + \frac{l_m}{2} \right) + \left[\frac{Fl_b^2}{2EI} + \frac{Fl_m l_b}{EI} \right] (x - l_b) \quad (4.2)$$

โดยที่ y คือ ระยะการเคลื่อนที่ของปลายก้อนมวล



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของสวิตช์ความเร่ง

ระยะเคลื่อนที่บริเวณปลายก้อนมวล สามารถหาได้โดยการแทนค่า x ด้วย $l_b + l_m$ ลงใน
สมการที่ (4.2) จะได้

$$y = \frac{Fl_b^2}{2EI} \left(\frac{2}{3}l_b + \frac{l_m}{2} \right) + \left[\frac{Fl_b^2}{2EI} + \frac{Fl_m l_b}{EI} \right] (l_m)$$

$$y = \frac{Fl_b}{12EI} [4l_b^2 + 9l_b l_m + 6l_m^2] \quad (4.3)$$

ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (I) หาได้จากพื้นที่ตัดขวางของคาน ซึ่งเป็นรูปสี่เหลี่ยมมีความกว้าง w_b ความสูง t_b ดังสมการที่ (4.4)

$$I = \frac{w_b^3 t_b}{12} \quad (4.4)$$

จาก กฎข้อที่ 2 ของนิวตัน ซึ่ง เป็นการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างแรง มวลและความเร่ง แรงลัพธ์ที่กระทำต่อวัตถุมีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างความเร่งและมวลของวัตถุนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างแรง มวล และความเร่ง สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$F = ma$$

โดยที่ a เป็นความเร่งของระบบ และ m เป็นมวลของก้อนมวล มีค่าเท่ากับ $\rho l_m w_m t_m$ โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่นของนิเกิล l_m คือ ความยาวของก้อนมวล w_m คือ ความกว้างของก้อนมวลและ t_m คือ ความสูงของก้อนมวล

ทำให้สามารถหาค่าของแรงที่กระทำกับก้อนมวลจากสมการ (4.5)

$$F = \rho l_m w_m t_m a \quad (4.5)$$

เมื่อแทนค่าจากสมการที่ (4.4) และ (4.5) ลงในสมการที่ 4.3 จะได้ระยะการเคลื่อนที่ของก้อนมวล ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความเร่ง ดังสมการ (4.6)

$$y = \frac{\rho l_m w_m l_b a t_m}{E w_b^3 t_b} [4l_b^2 + 9l_b l_m + 6l_m^2] \quad (4.6)$$

จากสมการที่ (4.6) สามารถจัดให้อยู่ในรูปของความเร่ง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะการเคลื่อนที่ของก้อนมวล ดังสมการ (4.7)

$$a = \frac{E w_b^3 y t_b}{\rho l_m w_m l_b t_m} \left[\frac{1}{4l_b^2 + 9l_b l_m + 6l_m^2} \right] \quad (4.7)$$

โดยที่ a คือ ความเร่งของตัวตรวจรู้ความเร่ง (m/s^2)

E คือ Young's Modulus ของวัสดุ

ρ คือ ความหนาแน่นของนิกเกิล

l_m, w_m คือ ความยาวและความกว้างของก้อนมวล

l_b, w_b คือ ความยาวและความกว้างของคานสปริง

y คือ ระยะเคลื่อนที่ของก้อนมวล

t_b คือ ความสูงของคานสปริง

t_m คือ ความสูงของก้อนมวล

จากสมการที่ 4.7 เมื่อความสูงของก้อนมวลและคานสปริงมีค่าเท่ากัน $t_b = t_m$ เมื่อระยะเคลื่อนที่ y เป็นระยะห่างระหว่างก้อนมวลกับขั้วไฟฟ้า d_g จะได้สมการความเร่งจุดทำงานของสวิตช์ ซึ่งเป็นความเร่งขณะที่ก้อนมวลเคลื่อนที่ไปสัมผัสกับขั้วไฟฟ้างี้สมการ (4.8)

$$a = \frac{E w_b^3 d_g}{\rho l_m w_m l_b} \left[\frac{1}{4l_b^2 + 9l_b l_m + 6l_m^2} \right] \quad (4.8)$$

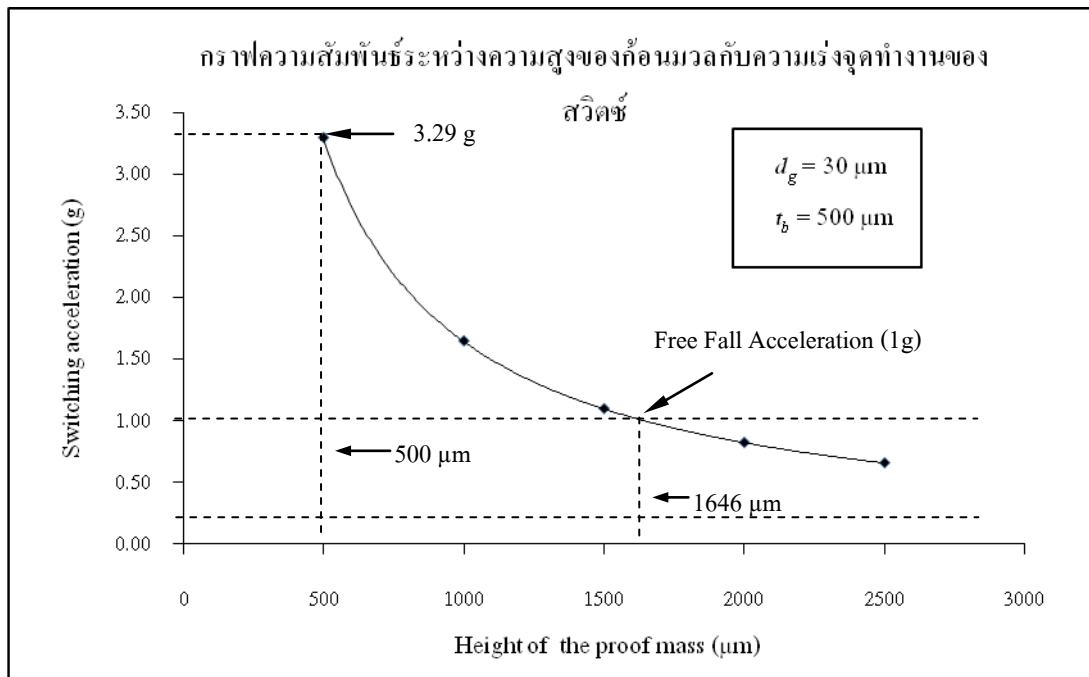
เมื่อได้สมการความเร่งของสวิตช์ความเร่งแล้ว จึงหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากสมการโดยคำนึงถึงเทคโนโลยีการถ่ายทอดผลลวดลายจากแบบในคอมพิวเตอร์ไปยังฟิล์มขาวดำที่ใช้เป็นหน้ากากกันแสงอัลตราไวโอเลตในกระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ ซึ่งเทคโนโลยีการผลิตลวดลายจุดลวดลายดังกล่าวสามารถสร้างลวดลายที่เล็กที่สุดได้เพียง $30 \mu\text{m}$ ดังนั้นจึงกำหนดให้ระยะห่างระหว่างก้อนมวลกับขั้วไฟฟ้า (d_g) คานสปริงมีความกว้าง (w_b) เท่ากับ $30 \mu\text{m}$ ขนาดพื้นที่รวมทั้งหมดของสวิตช์ความเร่งจะอยู่ในพื้นที่ 1 cm^2 ค่าความเร่งจุดทำงานของสวิตช์ที่ต้องการจะอยู่ในช่วง 1 g ถึง 5 g ซึ่งเป็นย่านความเร่งต่ำ เมื่อคำนวณขนาดของส่วนต่าง ๆ ในโครงสร้างจะมีขนาดตามตารางที่ 4.1 ซึ่งจะได้ค่าความเร่งจุดทำงานของสวิตช์เท่ากับ 32.308 m/s^2 หรือ 3.29 g

ตารางที่ 4.1 สัญลักษณ์และขนาดของโครงสร้างสวิตช์ความเร่ง

สัญลักษณ์	ขนาด (เมตร)
l_m	3000 μm
w_m	3000 μm
l_b	800 μm
w_b	30 μm
d_g	30 μm

การคำนวณค่าความเร่งจุดทำงานของสวิตช์ที่กล่าวมาข้างต้นนั้น ใช้ในกรณีที่ก้อนมวลกับคานสปริงมีความหนาเท่ากัน จากสมการที่ 4.7 ถ้าความสูงของก้อนมวล t_m มีค่ามากขึ้นจะทำให้ความเร่งจุดทำงานของสวิตช์มีค่าลดลงได้ ดังนั้นในการออกแบบสวิตช์ความเร่งให้ทำงานที่ความเร่งต่ำ ๆ จึงทำได้โดยการเพิ่มความสูงก้อนมวลมากขึ้น โดยคงค่าความสูงของคานสปริงให้ตามเดิม เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในตารางที่ 4.1 ลงในสมการที่ 4.7 โดยกำหนดความสูงของคานสปริงไว้ที่ 500 μm จะได้สมการความเร่งจุดทำงานของสวิตช์ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความสูงของก้อนมวล ดังสมการที่ 4.9 เมื่อวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของก้อนมวลกับความเร่งจุดทำงานของสวิตช์ ดังรูปที่ 4.2 จะพบว่าสวิตช์จะทำงานที่ความเร่งเท่ากับ 1 g เมื่อออกแบบให้ก้อนมวลมีความสูงอย่างน้อยเท่ากับ 1646 μm

$$a = \frac{1.08 \times 10^6 \times d_g \times t_b}{t_m} \quad (\text{g}) \quad (4.9)$$



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของก้อนมวลกับความเร่งจุดทำงานของสวิทช์
 ที่ได้จากการคำนวณ เมื่อก้อนมวลมีความกว้าง 3000 μm ยาว 3000 μm
 คานสปริงมีความกว้าง 30 μm ยาว 800 μm ก้อนมวลสูง 500 μm
 และระยะห่างระหว่างก้อนมวลกับขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 30 μm

ในงานวิจัยนี้จะใช้ความสูงของก้อนมวลค่าเดียวกันกับความสูงของคานสปริง สำหรับการ
 ใช้ความสูงของก้อนมวลมีค่ามากขึ้น เพื่อให้ความเร่งจุดทำงานของสวิทช์ลดลงนั้นจำได้เสนอแนะ
 ต่อไปในบทที่ 7

บทที่ 5

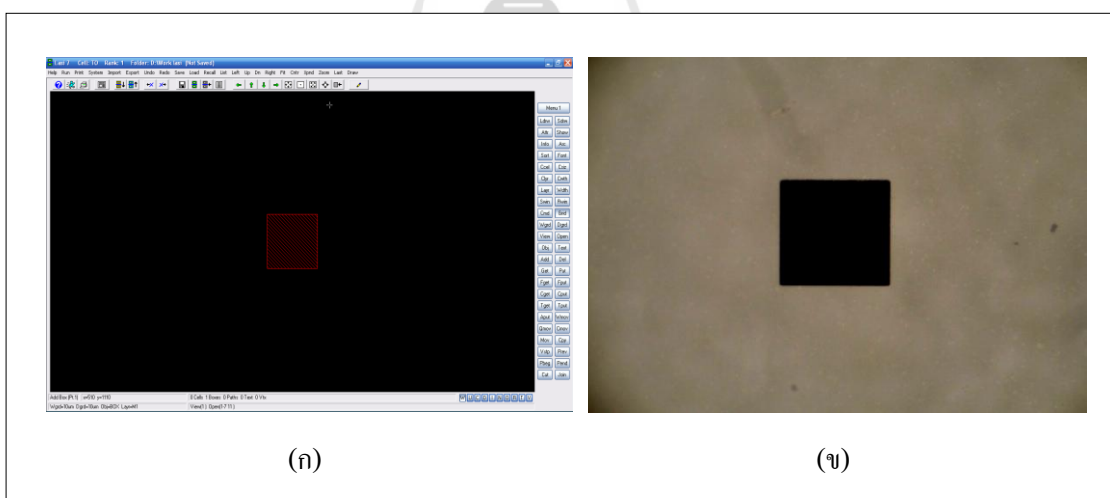
กระบวนการสร้างสวิตช์ความแรง

ในบทนี้นำเสนอขั้นตอนของกระบวนการสร้าง สวิตช์ความแรงซึ่งมีสามวิธีได้แก่ วิธีที่หนึ่ง กระบวนการสร้างสวิตช์ความแรงโดยการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าผ่านแม่พิมพ์แบบเวียนกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งแม่พิมพ์ที่สามารถเวียนกลับมาใช้ใหม่ได้นั้นเป็นแผ่นแม่พิมพ์สารไวแสง ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลายครั้ง การสร้างแม่พิมพ์สารไวแสงสร้างด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ โดยจะสร้างบนฐานรองซึ่งเป็นแผ่นฟิโอกอปเปอร์ลามิเนต จากนั้นลอกแผ่นแม่พิมพ์สารไวแสง ออกจากฐาน แล้วเคลือบสารไวแสง SU-8 เบอร์ 2002 ซึ่งเป็นสารไวแสงที่มีความหนืดน้อยที่สุดที่มี ในห้องปฏิบัติการ เพื่อให้สามารถเคลือบสารไวแสงได้บาง ทำให้มีผลกระทบกับโครงสร้างน้อย ที่สุด แต่เมื่อได้ทำการทดลองสร้างโครงสร้างพื้นฐานรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ทำให้พบปัญหาหลังจากทำ การเคลือบผิวแม่พิมพ์สารไวแสง ผิวของสารไวแสงไม่เรียบ เกิดเป็นรอยโค้งมนเป็นบางช่วง ซึ่งไม่ สามารถควบคุมให้เรียบได้ กระบวนการนี้จึงไม่สามารถทำต่อไปได้ วิธีที่สอง เป็นการชุบโลหะ ผ่านแม่พิมพ์สารไวแสง ซึ่งกระบวนการนี้ไม่สามารถนำแม่พิมพ์กลับมาใช้ใหม่ได้ การสร้างสวิตช์ ความแรงด้วยกระบวนการนี้ต้องสร้างวัสดุชั้นชั่วคราวขึ้นด้วยการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าก่อน แล้วสร้าง โครงสร้างของสวิตช์ความแรงบนวัสดุชั้นชั่วคราวด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ จากนั้นกัดวัสดุชั้นชั่วคราวออก เพื่อให้ก้อนมวลของสวิตช์ความแรงสามารถแขวนลอยอยู่กลาง อากาศได้ ซึ่งกระบวนการนี้ยังมีขั้นตอนการสร้างที่ซับซ้อนและใช้เวลานาน วิธีสุดท้าย เป็นการ สร้างแม่พิมพ์สารไวแสงบนแผ่นแกรไฟต์ แล้วชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าลงในแม่พิมพ์สารไวแสงจนเต็ม แล้วทำการขัดแผ่นแกรไฟต์ออกจนเหลือแผ่นแม่พิมพ์สารไวแสง แล้วสร้างแผ่นนำไฟฟ้าบนแผ่น พิมพ์ลายวงจรให้ตรงกับขั้วไฟฟ้าของสวิตช์ความแรง ซึ่งแผ่นนำไฟฟ้ามีความสูง 25 μm จากนั้นนำ แม่พิมพ์สารไวแสงมาเชื่อมต่อระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 จุดกับแผ่นนำไฟฟ้า ทำให้ก้อนมวลของสวิตช์ ความแรงแขวนลอยอยู่ได้ ซึ่งรายละเอียดการสร้างสวิตช์ความแรงด้วยวิธีต่าง ๆ มีดังต่อไปนี้

5.1 การสร้างสวิตช์ความเร่งโดยการ ชุบนิกเกล็ดด้วยไฟฟ้าผ่านแม่พิมพ์แบบเวียนกลับมาใช้ใหม่

5.1.1 การวาดลวดลายจุลภาค

การวาดลวดลายของโครงสร้างจุลภาคเป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการสร้างสวิตช์ความเร่งด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ โครงสร้างของสวิตช์ความเร่งถูกวาดและออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ชื่อ LASI ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถวาดลวดลาย ที่มีขนาดเล็กได้ถึงระดับไมโครเมตร จากรูปที่ 5.1 (ก) วาดโครงสร้างพื้นฐานรูปสี่เหลี่ยมขนาด กว้าง 500 μm ยาว 500 μm ด้วยโปรแกรม LASI เมื่อวาดเสร็จแล้วจึงทำการแปลงไฟล์ให้อยู่ในรูปแบบโพสคริป (Postscript: ps) โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ LinkCAD จากนั้นทำการถ่ายภาพลวดลายลงบนฟิล์มขาวดำ ใช้เป็นฟิล์มหน้ากากกันรังสีอัลตราไวโอเลตที่บริษัทสวิตแคท จำกัด ดังรูปที่ 5.1 (ข) ฟิล์มหน้ากากกันรังสีอัลตราไวโอเลต ซึ่งประกอบด้วยสองส่วน คือส่วนที่ทึบแสงเพื่อกันไม่ให้รังสีผ่านไปได้ และส่วนที่โปร่งแสงเป็นบริเวณที่แสงสามารถทะลุผ่านไปกระทบกับสารไวแสงที่อยู่ด้านหลังได้



รูปที่ 5.1 โครงสร้างทดสอบ (ก) วาดด้วยโปรแกรม LASI (ข) ฟิล์มขาวดำที่เป็นหน้ากากกันรังสีอัลตราไวโอเลต

5.1.2 การสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์

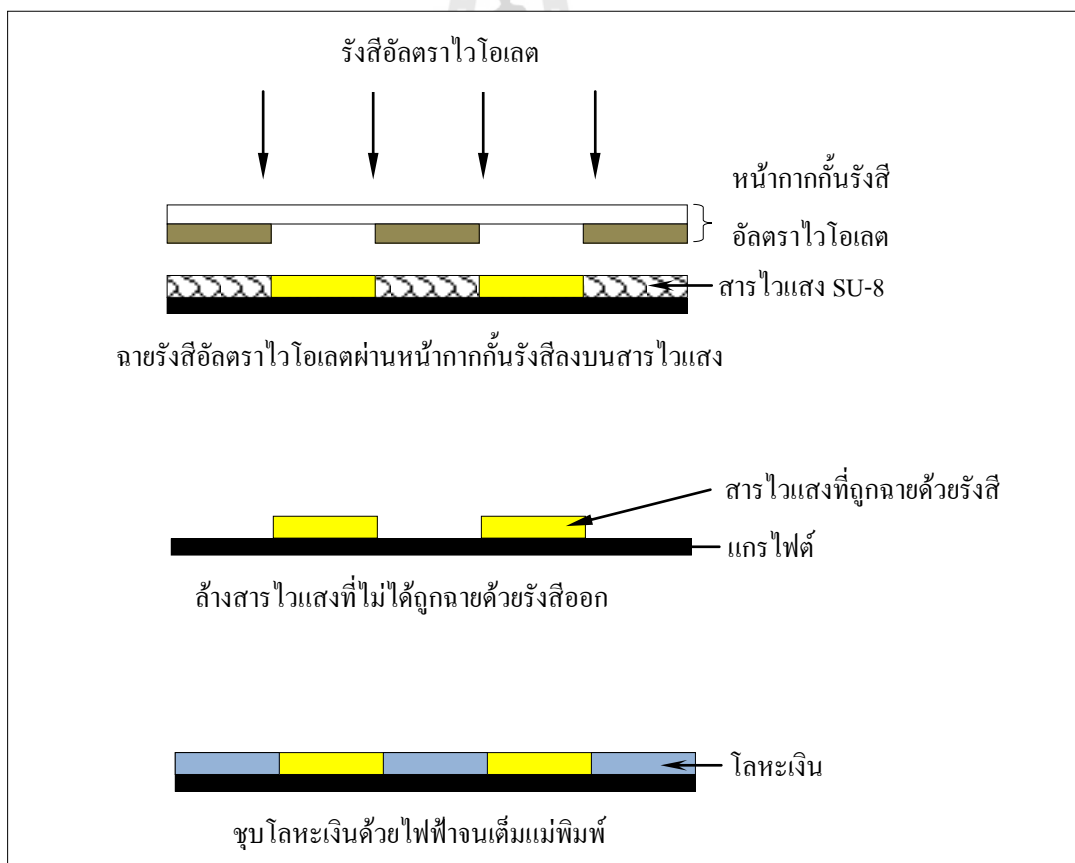
ก การสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์จะมีกระบวนการสร้างที่ซับซ้อนกว่าหน้ากากกันรังสีอัลตราไวโอเลตมาก ซึ่งลวดลายที่นำมาสร้างนั้นมาจากฟิล์มทึบแสงสำหรับกันรังสีไวโอเลต โดยกระบวนการสร้าง หน้ากากกันรังสีเอ็กซ์จะใช้กระบวนการ LIGA ในการสร้าง โดยใช้แผ่นแกรไฟต์ที่มีความหนา 150 μm เป็นฐานรอง เนื่องจากรังสีเอ็กซ์สามารถทะลุผ่านได้ และเป็นที่ยอมรับในปัจจุบันแล้วใช้สารไวแสง SU-8 ในการลอกแบบ ขั้นตอนการสร้างหน้ากากกันรังสีมีดังนี้

1. ทำความสะอาดแผ่นแกรไฟต์ด้วยอะซิโตน จากนั้นล้างด้วยไอโซโพรพิล แอลกอฮอล์ (Isopropyl Alcohol: IPA) จากนั้นล้างด้วยน้ำดีไอ (DI water) เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน (Nitrogen) และอบที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จนแผ่นแกรไฟต์แห้งสนิท
2. เคลือบสารไวแสง SU-8 25 ด้วยการหมุนเคลือบ ที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 วินาที และ 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที จะได้สารไวแสงความหนา 30 μm
3. ทำการอบชิ้นงานก่อนการฉายรังสี (Soft bake) โดยนำชิ้นงานไปวางบนแผ่นทำความร้อน (Hot plate) ที่ทำการปรับตั้งอุณหภูมิ 65°C ไว้แล้วเป็นเวลา 3 นาที แล้วทำการเพิ่มอุณหภูมิอย่างช้า ๆ จนได้อุณหภูมิคงที่ 95°C เป็นเวลา 5 นาที 30 วินาที เพื่อให้สารละลายระเหยออกจากสารไวแสงจนหมด จากนั้นปล่อยให้อุณหภูมิค่อย ๆ เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง
4. ทำการฉายรังสีโดย นำหน้ากากกันรังสีอัลตราไวโอเลตมาซ้อนกับแผ่นแกรไฟต์ที่เคลือบสารไวแสงแล้ว โดยหันด้านที่มี ลวดลายจุลภาค เข้าหาสารไวแสง จากนั้นนำไปฉายแสงด้วยเครื่องฉายรังสีอัลตราไวโอเลตเป็นเวลา 1 นาที 45 วินาที
5. ทำการอบหลังฉายแสง (Post-Exposure Bake: PEB) โดยวางชิ้นงานบน แผ่นทำความร้อนที่ทำการปรับตั้งอุณหภูมิ 65°C ไว้แล้วเป็นเวลา 1 นาที แล้วทำการเพิ่มอุณหภูมิอย่างช้า ๆ จนได้อุณหภูมิคงที่ 95°C เป็นเวลา 2 นาที 30 วินาที เพื่อให้สารไวแสงที่ถูกฉายด้วยแสงเกิดการแข็งตัว แล้วถ้าเพิ่มหรือลดอุณหภูมิเร็วเกินไปจะทำให้สารไวแสงเกิดการแตก ร้าว (Crack) ทำให้ชิ้นงานเสียหายได้
6. ทำการล้างสารไวแสงบริเวณที่ไม่ได้ถูกฉายด้วยแสงออกด้วย SU-8 developer โดยเท SU-8 developer ลงในถาดแก้ว จากนั้นใช้ปากคีบ คีบชิ้นงานที่ถูกฉายแสงแล้วจุ่มใน SU-8 developer จนน้ำยาท่วมชิ้นงานหมดแล้วแกว่งชิ้นงานในน้ำยาเป็นเวลา 1 นาที 30 วินาที ซึ่งจากการทดลองเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับสารไวแสงหนา 20 μm จะใช้เวลาล้าง 1 นาที 30 วินาที
7. หลังจากล้างสารไวแสงแล้ว นำชิ้นงานมาล้างด้วยไอโซโพรพิล แอลกอฮอล์ โดยนำไอโซโพรพิล แอลกอฮอล์ มาใส่ไว้ในกระบอกฉีดน้ำ จากนั้นฉีดลงบนชิ้นงานให้ทั่ว แล้วสังเกตดูว่าบริเวณที่ไม่ได้ถูกฉายด้วยแสงถูก ล้างออกหมดหรือไม่ ถ้ายัง ล้างสารไวแสงออกไม่หมด จะเกิดคราบขาวขึ้นบนผิวในบริเวณที่ยังล้าง ออกไม่หมด ซึ่งคราบสีขาวนั้นเกิดจากไอโซโพรพิล

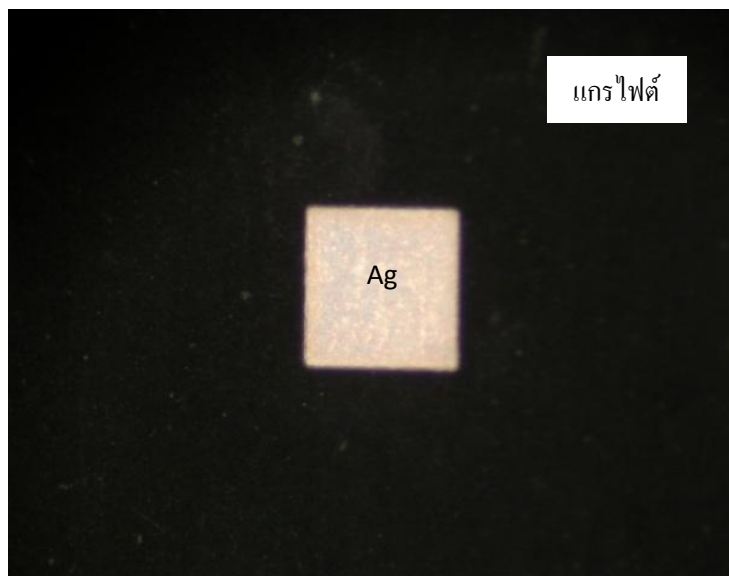
แอลกอฮอล์ ทำปฏิกิริยากับสารไวแสงที่ไม่ได้ถูกฉายด้วยแสง เมื่อ ล้างสารไวแสงออก หยอดแล้วเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน

8. ทำความสะอาดผิวของแกรไฟต์ บริเวณ ที่ล้าง สารไวแสงออกไปแล้วด้วย พลาสมาของออกซิเจน ที่ความดัน 350 มิลลิทอร์ กำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ เป็นเวลา 15 นาที หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการนี้แล้ว จะได้ชิ้นงานที่มีหลุดลอกจากการฉายรังสีตามฟิล์มขาวดำ

9. เนื่องจากแผ่นแกรไฟต์สามารถนำไฟฟ้าได้ จึงต้องทำการปิดพอลิโิไมด์เทปในส่วนที่ไม่ได้การชุบเงิน ด้วยไฟฟ้า จะเปิดผิวแกรไฟต์เฉพาะส่วนที่ต้องการชุบโลหะเงินด้วยไฟฟ้าเท่านั้น จากนั้นต่อสายไฟฟ้าเพื่อใช้ในการต่อวงจรสำหรับชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ซึ่งขั้นตอนการชุบและการเตรียมสารละลายสำหรับชุบได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 เมื่อทำการชุบเงินจนเต็มหลุมสารไวแสงได้ชิ้นงานดังรูปที่ 5.3 ส่วนในรูปที่ 5.2 เป็นขั้นตอนการสร้างหน้ากากกันรังสีของโครงสร้างทดสอบ



รูปที่ 5.2 กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ของโครงสร้างทดสอบ



รูปที่ 5.3 หน้ากั้นรังสีเอ็กซ์ของโครงสร้างทดสอบ

5.1.3 การสร้างโครงสร้างจากแม่พิมพ์สารไวแสงแบบนำกลับมาใช้ใหม่ (SU-8 Stencil)

การสร้างแม่พิมพ์สารไวแสงจะใช้สารไวแสง SU-8 แล้วนำมาเคลือบด้วยกระบวนการหลอมสารไวแสงชนิดผงบนแผ่นฟิโอกอปเปอร์ลามิเนต (PI Copper Laminate) ซึ่งผิวเป็นโลหะทองแดง จากนั้นนำมาฉายด้วยรังสีเอ็กซ์ แล้วลอกแผ่นแม่พิมพ์สารไวแสงออกจากฐานรอง แล้วทำการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าผ่านแม่พิมพ์ขึ้นมาเป็นโครงสร้าง ซึ่งขั้นตอนการสร้างโครงสร้างมีดังต่อไปนี้

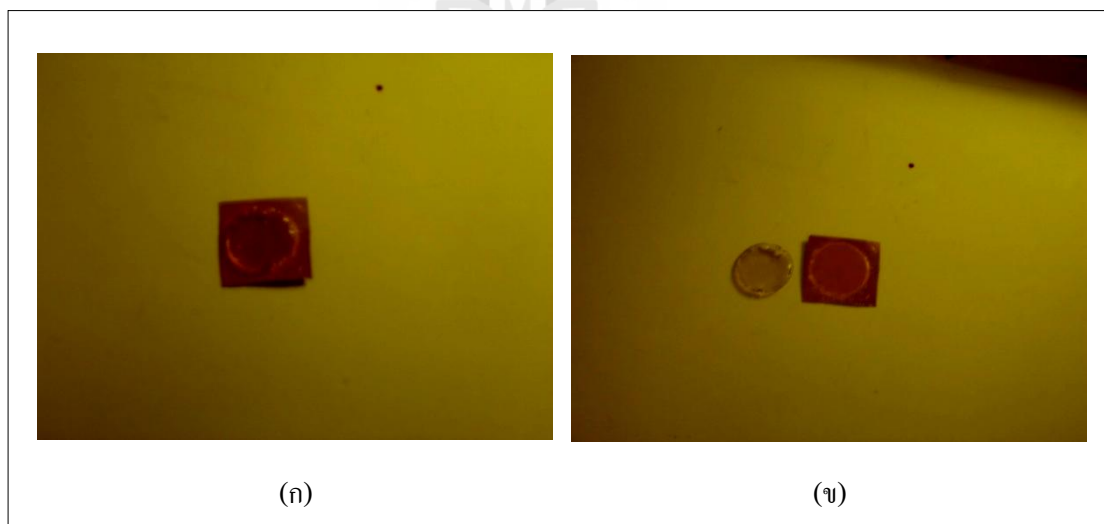
1. ทำความสะอาดแผ่นฟิโอกอปเปอร์ลามิเนตขนาดความกว้าง 2.5 cm ความยาว 2.5 cm ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 10% แล้วล้างด้วยน้ำดีไอ จากนั้นเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน ต่อมาเคลือบสารไวแสงด้วยการหลอมสารไวแสงชนิดผง ลงบนแผ่นฟิโอกอปเปอร์ลามิเนตให้ มีความหนาประมาณ 600 μm
2. ทำการฉายรังสีเอ็กซ์ผ่านหน้ากั้นรังสีลงบนสารไวแสงที่เตรียมไว้ด้วยพลังงาน 6500 mJ/cm^2 นำชิ้นงานมาอบหลังฉายรังสีในเตาอบที่อุณหภูมิ 65 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที แล้วค่อย ๆ เพิ่มอุณหภูมิจนถึง 95 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 120 นาที แล้วค่อย ๆ ลดอุณหภูมิลงจนถึงอุณหภูมิห้อง
3. ล้างสารไวแสงที่ไม่ได้ถูกฉายด้วยรังสีทิ้งไป ด้วยการจุ่มแช่ในสาร SU-8 developer เป็นเวลา 120 นาที ในระหว่างการล้างต้องกวาด SU-8 developer อยู่ตลอดเวลา เมื่อล้างสารไวแสงออกหมดแล้ว ฉีดล้างด้วย IPA เป่าแห้งด้วยแก๊สออกซิเจน

4. ทำการอบหลังจากล้างสารไวแสงแล้ว (Hard bake) โดยการอบในเตาอบที่ 150°C เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งจะต้องค่อย ๆ เพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 1°C ต่อนาที แล้วปิดเตาอบ เพื่อให้ อุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง ถ้าเพิ่มหรือลดอุณหภูมิเร็วเกินไปจะทำให้ชิ้นงานเกิดการ แตกร้าวได้

5. ลอกแผ่นสารไวแสงที่มีหลุมจากการฉายรังสีเอ็กซ์ (SU-8 stencil) ออกจาก ฐานพีไอคอปเปอร์ลามิเนต แผ่นสารไวแสงจะถูกแกะออก อย่างง่ายดาย เนื่องจากสารไวแสงยึดติด กับผิวทองแดงได้ไม่ดีอยู่แล้วดังรูปที่ 5.4 (ก) ชิ้นงานหลังจากทำการฉายรังสีเอ็กซ์แล้ว รูปที่ 5.4 (ข) ชิ้นงานหลังจากแกะแผ่นแม่พิมพ์ออกจากฐานแล้ว และมีโครงสร้างเป็นรูปสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 5.5

6. ทำความสะอาดกระจกสไลด์ขนาด ความกว้าง 1 นิ้ว ยาว 1.5 นิ้ว มีความหนา 1.5 mm ด้วยการฉีดล้างไอโซโพรพิล แอลกอฮอล์ ตามด้วยฉีดล้างอะซิโตนให้ทั่วแผ่น จากนั้นล้าง ด้วยน้ำดีไอ นำไปล้างด้วยซูปเปอร์โซนิคในน้ำดีไอ เป็นเวลา 10 นาที เป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน จากนั้นอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 30 นาที

7. เคลือบโลหะจำนวนสามชั้นคือ โทเทเนียมหนา $100\text{ \AA}$ ทองแดงหนา $2000\text{ \AA}$ และโทเทเนียม $100\text{ \AA}$



รูปที่ 5.4 ชิ้นงานหลังจากล้างสารไวแสงที่ไม่ได้ถูกฉายรังสีเอ็กซ์แล้ว (ก) ก่อนลอกแม่พิมพ์ สารไวแสงออกจากฐาน (ข) หลังจากลอกแผ่นแม่พิมพ์ออกจากฐานแล้ว



รูปที่ 5.5 ช่องสี่เหลี่ยมภายในแม่พิมพ์สารไวแสง SU-8 ความหนาประมาณ 500 μm

8. ต่อมานำแม่พิมพ์จากสารไวแสงมาจุ่มเคลือบผิวของแม่พิมพ์ด้านบน -ล่าง และผนังภายในช่องด้วยสารไวแสง SU-8 2002 จนทั่ว โดยที่ขณะทำการจุ่มนั้นจะทำการดูดอากาศด้วยเครื่องปั๊มสุญญากาศเป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้สารไวแสงสามารถเข้าไปยังช่องสี่เหลี่ยมที่เกิดจากการฉายรังสีเอ็กซ์

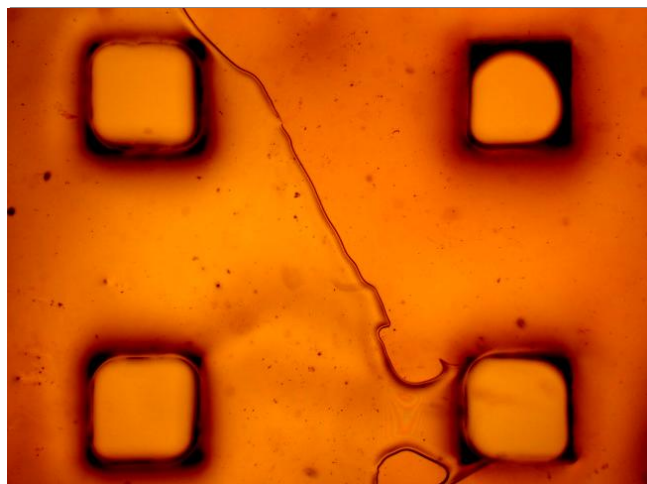
9. เนื่องจากมีแรงดึงดูดมากสารไวแสงที่อุดตันอยู่ภายในช่องสี่เหลี่ยม จึงไม่สามารถไหลออกมาได้ จึงใช้สายยางจากเครื่องปั๊มดูดอากาศมาประกบดูดสารไวแสงที่ติดอยู่ภายในช่อง ออกทำให้เกิดเป็นช่องสี่เหลี่ยมที่มีสารไวแสงเคลือบผนังภายใน

10. นำแม่พิมพ์มาวางบนเส้นลวดทองแดงขนาดเล็กสองเส้นที่ขนานกัน โดยหันด้านที่ถูกสายยางประกบขณะดูดอากาศเข้าหาเส้นลวด แล้วปล่อยทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องให้สารไวแสงเริ่มแข็งตัวเป็นเวลา 30 นาที เส้นลวดทั้งสองเส้นจะทำหน้าที่เป็นฐานรองขณะที่สารไวแสง SU-8 2002 ยังไม่แห้ง

11. เมื่อสารไวแสง SU-8 2002 ที่เคลือบแม่พิมพ์สารไวแสงแห้งแล้ว นำด้านที่หันขึ้นด้านบนมาวางประกบบนฐานกระจกที่เคลือบด้วยไทเทเนียม /ทองแดง /ไทเทเนียมไว้แล้ว จากนั้นนำชิ้นงานไปวางบนแผ่นทำความร้อนแล้วใช้ค้อนน้ำหนักวางบนลวดสองเส้น เป็นการกดทับให้แม่พิมพ์กับฐานกระจกติดกันดีขึ้น แล้วเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องเป็น 95°C วางไว้เป็นเวลา 60 นาที แล้วปิดแผ่นความร้อนเพื่อให้อุณหภูมิ ลดลงจนถึงอุณหภูมิห้องจากรูปที่ 5.6 จะเห็นว่าแผ่นแม่พิมพ์กับฐานเกิดการเชื่อมกันไม่ แนบสนิท ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างแผ่นแม่พิมพ์กับฐาน การเชื่อมกันสนิทจะเกิดที่ประมาณ 50% ของพื้นที่ทั้งหมด

12. นำค้อนน้ำหนักและเส้นลวดทองแดงออก ใช้เทปโพลีไธม์ปิดขอบด้านข้างทั้ง 4 ด้านไว้ เพื่อป้องกันนิกเกิลถูกเคลือบขึ้นมา

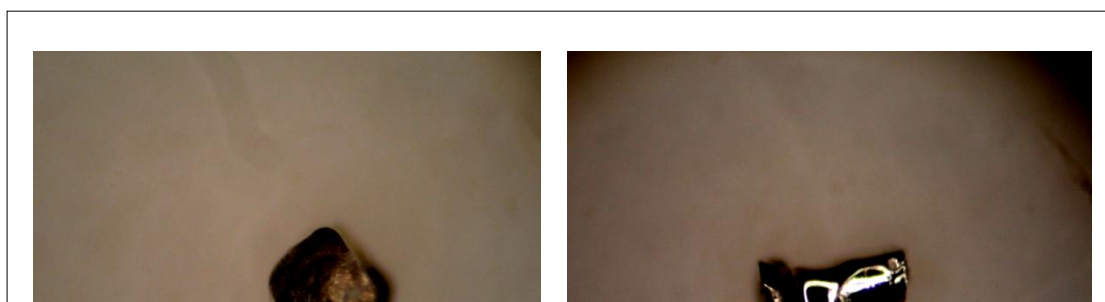
13. ทำความสะอาดพื้นผิวทองแดงที่จะทำการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า ด้วยการจุ่มในสารละลายสำหรับชุบทองแดงด้วยไฟฟ้าแช่ไว้เป็นเวลา 10 วินาที จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า มีอัตราความหนาแน่นกระแส 10 mA/cm^2 เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จนนิกเกิลเต็มแม่พิมพ์สารไวแสง



รูปที่ 5.6 แม่พิมพ์สารไวแสงที่เชื่อมติดไม่สนิทกับฐานรองชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

14. นำชิ้นงานมาล้างสารไวแสง SU-8 2002 ที่เคลือบผิวแม่พิมพ์ออก ด้วยการจุ่มแช่ในสารละลาย SU-8 developer เพื่อให้แม่พิมพ์สารไวแสงหลุดออกจากก้อนนิกเกิล ได้แท่งนิกเกิลสี่เหลี่ยมที่เป็นโครงสร้างทดสอบดังรูปที่ 5.7 (ก) ภาพด้านบนของชิ้นงาน โครงสร้างทดสอบที่สร้างจากแม่พิมพ์สารไวแสง รูปที่ 5.7 (ข) ภาพด้านข้างของชิ้นงาน โครงสร้างทดสอบที่สร้างจากแม่พิมพ์สารไวแสง

หลังจากทำการทดสอบสร้างชิ้นงานด้วยกระบวนการนี้ จำนวน 10 ครั้ง แม่พิมพ์สารไวแสงจะเป็นดังรูปที่ 5.8 กระบวนการสร้างโครงสร้างพื้นฐานด้วยการชุบโลหะผ่านแม่พิมพ์สารไวแสงแบบสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้แสดงดังรูปที่ 5.9



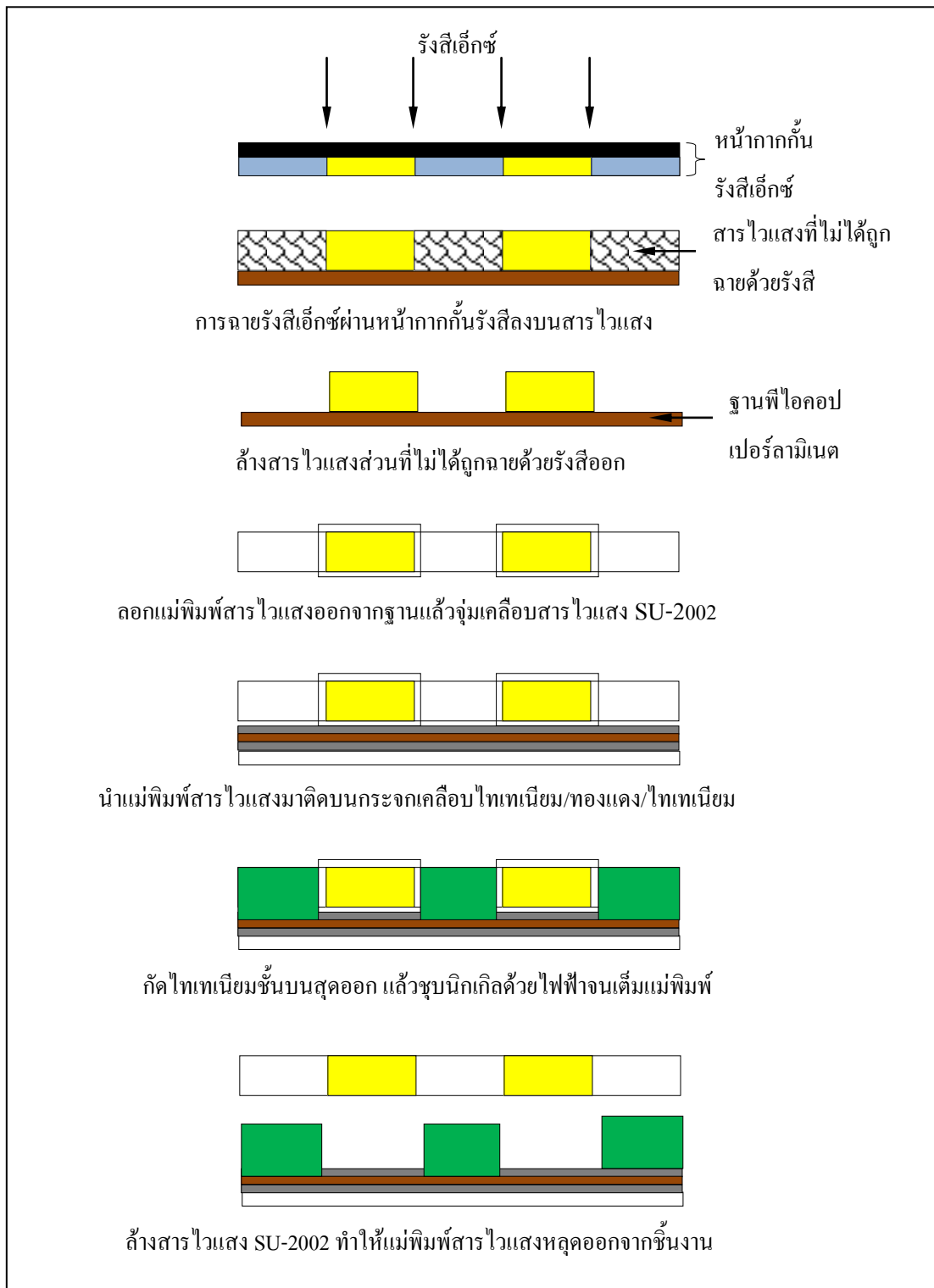
(ก)

(ข)

รูปที่ 5.7 ชิ้นงานโครงสร้างทดสอบ (ก) ภาพด้านบนของชิ้นงาน (ข) ภาพด้านข้างของชิ้นงาน



รูปที่ 5.8 แม่พิมพ์สารไวแสงที่ผ่านการใช้งานมาแล้วประมาณ 10 ครั้ง



รูปที่ 5.9 กระบวนการสร้างโครงสร้างทดสอบด้วยการชุบโลหะผ่านแม่พิมพ์สารไวแสง
แบบสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

5.1.4 สรุป

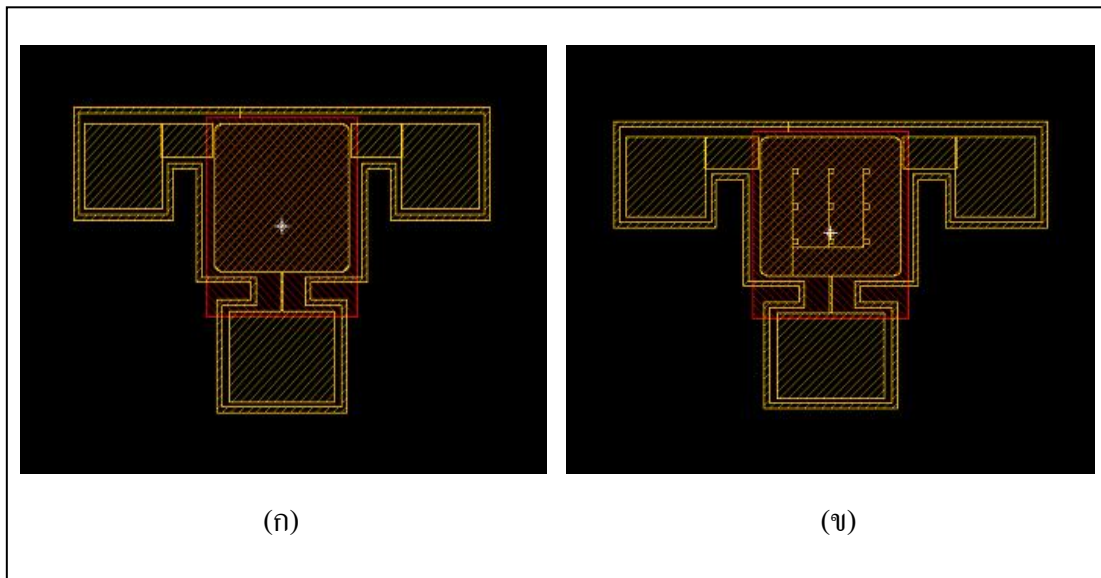
กระบวนการสร้างโครงสร้างทดสอบด้วยการชุบนิเกิลด้วยไฟฟ้าผ่านแม่พิมพ์สารไวแสงแบบเวียนกลับมาใช้ใหม่ ขั้นตอนการเคลือบผิวของแม่พิมพ์ด้วยสารไวแสง ผิดด้านข้างของแม่พิมพ์ไม่เรียบ ทำให้เมื่อชุบนิเกิลขึ้นมาจะได้โครงสร้างไม่เรียงดังรูปที่ 5.7 และขนาดของโครงสร้างเกิดความผิดพลาดไปมาก ดังนั้นกระบวนการนี้จึงไม่สามารถพัฒนาเพื่อสร้างเป็นสวิตซ์ความเร่งต่อไปได้ จึงได้พัฒนาการสร้างสวิตซ์ความเร่งด้วยกระบวนการใหม่ในหัวข้อต่อไป

5.2 การสร้างสวิตซ์ความเร่งโดยการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าบนวัสดุชั้นชั่วคราว

การสร้างสวิตซ์ความเร่ง ด้วยวิธีนี้ได้เลือกใช้แผ่นกระจกสไลด์เป็นฐานรองสวิตซ์ความเร่ง แล้วสร้างวัสดุชั้นชั่วคราวขึ้นโดยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต แล้วชุบทองแดงด้วยไฟฟ้าจนเต็มแม่พิมพ์ จากนั้นจึงสร้างสวิตซ์ความเร่งขึ้นบนวัสดุชั้นชั่วคราว แล้วกัดวัสดุชั้นชั่วคราวนั้นออก ทำให้ก้อนมวลของสวิตซ์ความเร่งสามารถแขวนลอยอยู่กลางอากาศได้ ขั้นตอนการสร้างสวิตซ์ความเร่งมีดังต่อไปนี้

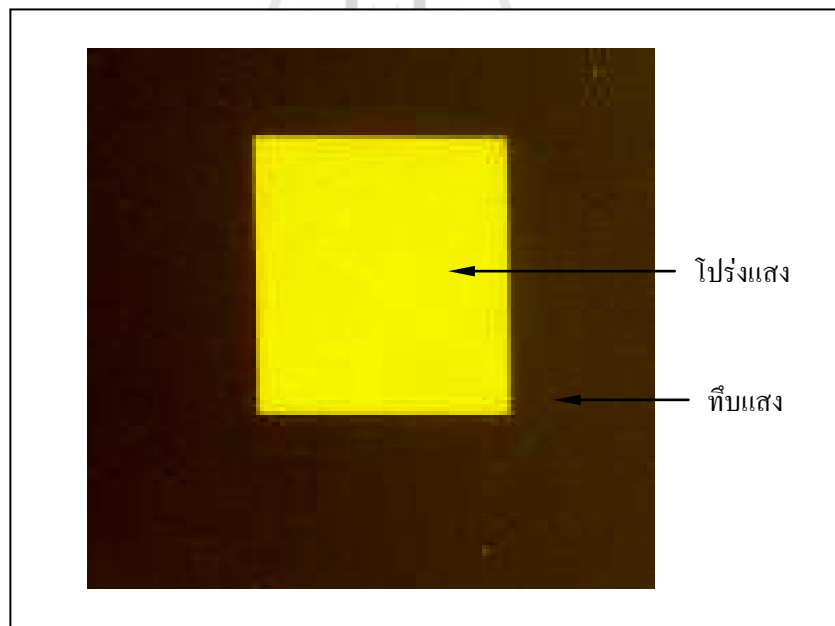
5.2.1 การวาดลวดลายจุลภาค

สวิตซ์ความเร่งได้ถูกออกแบบให้มีโครงสร้างประกอบด้วยก้อนมวล (Proof mass) คานสปริง (Cantilever spring) ขั้วไฟฟ้า (Electrode) และจุดยึดตรึง (Anchor) โดยก้อนมวลจะถูกออกแบบไว้ในสองรูปแบบ คือเป็นก้อนมวลที่เป็นทรงตัน และก้อนมวลที่มีช่องภายในก้อนมวล เพื่อลดระยะเวลาในการกัดวัสดุชั้นชั่วคราวที่อยู่ด้านล่าง รูปที่ 5. 10 เป็นโครงสร้างสวิตซ์ความเร่งที่วาดด้วยโปรแกรม LASI รูปที่ 5.10 (ก) สวิตซ์ความเร่งมีก้อนมวลเป็นทรงตัน และรูปที่ 5. 10 (ข) เป็นโครงสร้างที่มีรูภายในก้อนมวล เพื่อลดระยะเวลาในการกัดวัสดุชั้นชั่วคราว จากรูปที่ 4.1 โครงสร้างสวิตซ์ความเร่งมีขนาดดังต่อไปนี้ ก้อนมวลมีความกว้าง 3000 μm ความยาว 3000 μm คานสปริงมีความกว้าง 30 μm ความยาว 800 μm ช่องว่างระหว่างก้อนมวลกับขั้วไฟฟ้า (Activation gap) มีขนาด 30 μm ยาว 800 μm จุดยึดตรึงมีความกว้าง 2000 μm ความยาว 2000 μm รูภายในก้อนมวลในรูปที่ 5.10 (ข) มีความกว้าง 100 μm ความยาว 100 μm จำนวน 9 ช่อง หลังจากวาดลวดลายเสร็จแล้ว จึงนำไปสร้างฟิล์มขาวดำด้วยเครื่องผลิตฟิล์มความละเอียด 3600 จุดต่อนิ้ว โดยใช้เป็นหน้ากากกันรังสีอัลตราไวโอเลตดังรูปที่ 5.12 และวัสดุชั้นชั่วคราวดังรูปที่ 5.11 เมื่อได้หน้ากากกันรังสีอัลตราไวโอเลตแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะสร้างหน้ากากกันรังสีอีกครั้ง

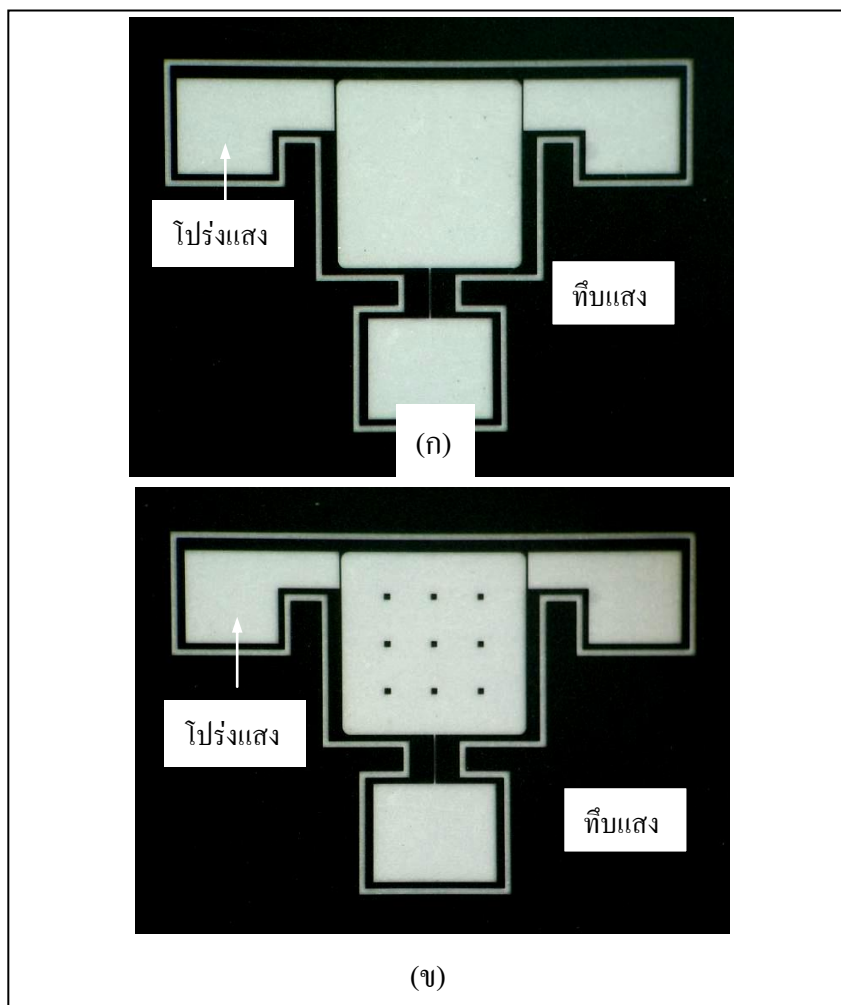


รูปที่ 5.10 ลวดลายการออกแบบโครงสร้างสวิตซ์ความเร่งด้วยโปรแกรม LASI

(ก) ก้อนมวลเป็นทรงตัน (ข) ก้อนมวลที่มีรูภายในจำนวน 9 รู



รูปที่ 5.11 หน้ากากกันรังสีอัลตราไวโอเลตของวัสดุชั้นชั่วคราว



รูปที่ 5.12 หน้ากากกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตของสวิตช์ความเร่ง (ก) ก่อนมวลเป็นทรงตัน
(ข) ก่อนมวลที่ที่มีรูภายในจำนวน 9 รู

5.2.2 การสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์

กระบวนการนี้จะสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ โดยใช้แผ่นโพลิเอทิลีน (Mylar) ความหนา 100 μm เป็นฐานรอง เนื่องจากแผ่นโพลิเอทิลีนมีความยืดหยุ่นและสามารถโค้งงอได้ง่าย ไม่ต่างกับแผ่นแกรไฟต์ และมีราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับแผ่นแกรไฟต์ สำหรับการสร้างชิ้นงานหลายชิ้น การจัดวางตำแหน่งก็เป็นเรื่องสำคัญ แต่ทำได้ยากถ้าใช้แผ่นแกรไฟต์เป็นหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ เนื่องจากแผ่นแกรไฟต์เป็นแผ่นดำทึบแสง แต่แผ่นโพลิเอทิลีนมีความใสทำให้สามารถจัดวางตำแหน่งใน

การฉายแสงได้ง่ายและแม่นยำ แต่แผ่นใสก็ยังเป็นวัสดุที่มีความอ่อนตัว ดังนั้นจึงทำการจึงยิดแผ่นใสเข้ากับวงแหวนทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ด้วย SU-8 เบอร์ 2050 ให้ติ่งเพื่อให้หน้ากากกันรังสีเอ็กซ์มีความแข็งแรงมากขึ้น แล้วทำการเคลือบโลหะลงบนผิวของแผ่นใสเพื่อให้แผ่นใสสามารถนำไฟฟ้าได้ โดยทำการเคลือบโลหะ จำนวนสามชั้นแรกเป็นไทเทเนียมเพราะมีการยึดเกาะที่ดีมาก แต่ไม่สามารถทำการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าได้ จึงต้องเคลือบชั้นที่สองเพื่อใช้เป็นฐานรองสำหรับการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า แต่ทองแดงสามารถเกิดออกไซด์ที่ผิวได้ง่าย จึงต้องเคลือบไทเทเนียมลงไปอีกชั้น เพื่อเพิ่มการยึดเกาะของสารไวแสงกับฐานรองและยังช่วยป้องกันผิวของทองแดงไม่ให้เกิดออกไซด์ได้อีกด้วย การสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ทำความสะอาดผิววงแหวนทองแดงด้วยการจุ่มลงในสารละลาย H_2SO_4 10% เป็นเวลา 10 วินาที แล้วล้างด้วยน้ำดีไอ เป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน อบในเตาอบที่อุณหภูมิ $120^{\circ}C$ เป็นเวลา 30 นาที แล้วปล่อยให้เย็นถึงอุณหภูมิห้อง

2. นำแผ่นใสเกรดถ่ายเอกสารขนาด A4 จำนวนสองแผ่นวางประกบหน้าเข้าหากันเพื่อป้องกันสิ่งสกปรกและรอยขีดข่วน นำวงแหวนทองแดงที่ทำความสะอาดแล้วทาด้วยสารไวแสง SU-8 2050 ให้ทั่วด้านหนึ่ง แล้วประกบติดกับแผ่นใสกดให้แนบสนิทกัน ทำการติ่งวงแหวนจนเต็มแผ่นใสที่เตรียมไว้ แล้วอบในเตาอบที่อุณหภูมิ $65^{\circ}C$ เป็นเวลา 30 นาที แล้วเพิ่มเป็น $95^{\circ}C$ อบเป็นเวลา 180 นาที จากนั้นปล่อยให้อุณหภูมิค่อย ๆ ลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง

3. นำแผ่นใสที่ยึดกับวงแหวนทองแดงแล้วไปฉายรังสีอัลตราไวโอเลตเป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้สารไวแสงที่ทาเคลือบไว้แข็งตัวแล้วอบในเตาอบที่อุณหภูมิ $95^{\circ}C$ เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นปล่อยให้อุณหภูมิค่อย ๆ ลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง

4. นำแผ่นใสมาตัดสี่เหลี่ยมแต่ละวงแยกออกจากกัน แล้วทำความสะอาดผิวของแผ่นใสด้านที่ไม่ได้ถูกยิดด้วยวงแหวนทองแดงโดยการเช็ดด้วยสำลีที่จุ่มด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์จนทั่ว แล้วฉีกล้างด้วยไอโซโพรพิล แอลกอฮอล์อีกรอบ จากนั้นฉีกล้างด้วยอะซิโตน แล้วจุ่มล้างด้วยน้ำดีไอสองครั้งเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน แล้วอบในเตาอบที่อุณหภูมิ $90^{\circ}C$ เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นปล่อยให้อุณหภูมิค่อย ๆ ลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง

5. ทำการเคลือบไทเทเนียม /ทองแดง/ไทเทเนียม ด้วยเครื่องระเหยไอโลหะในสุญญากาศ โดยที่ไทเทเนียมมีความหนา $300 \text{ \AA}$ และทองแดงมีความหนา $2000 \text{ \AA}$

6. นำชิ้นงานไปหมุนเคลือบสารไวแสง AZ เบอร์ 4620 ด้วยเครื่องหมุนเคลือบยี่ห้อ Laurell รุ่น WS-400 B-6NPP/LIT ด้วยความเร็ว 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 วินาทีและความเร็ว 600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที เมื่อเคลือบเสร็จแล้วนำชิ้นงานมาตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นหมุนเคลือบสารไวแสงอีกรอบด้วยความเร็วเท่าเดิมอีกครั้ง ซึ่งจะได้สารไวแสงหนา $35 \mu m$

7. นำสารไวแสงไปอบในเตาอบโดยตั้งค่าให้เพิ่มอุณหภูมิ 2°C ต่อนาที แล้วหยุดที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 60 นาที ปล่อยให้อุณหภูมิค่อยๆ ลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง

8. นำชิ้นงานไปฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตด้วยเครื่อง Quintel Q4000 นำหน้ากากกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตประกบเข้ากับชิ้นงาน โดยหันด้านที่มีหมึกดำแนบเข้ากับผิวของสารไวแสง จากนั้นเปิดเครื่องฉายรังสีเพื่อวัดพลังงานของหลอดรังสีได้ความเข้มแสง 22.65 mW/cm² ซึ่งจากการทดสอบฉายรังสีที่สารไวแสงความหนา 35 μm ใช้พลังงานในช่วง 2.35-2.40 J/cm² ดังนั้นจึงตั้งเวลาในการฉายไว้ที่ 90 วินาที เพื่อให้ได้พลังงานตามที่ต้องการ หลังจากฉายแสงเสร็จนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 60 นาที ปล่อยให้อุณหภูมิค่อยๆ ลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง

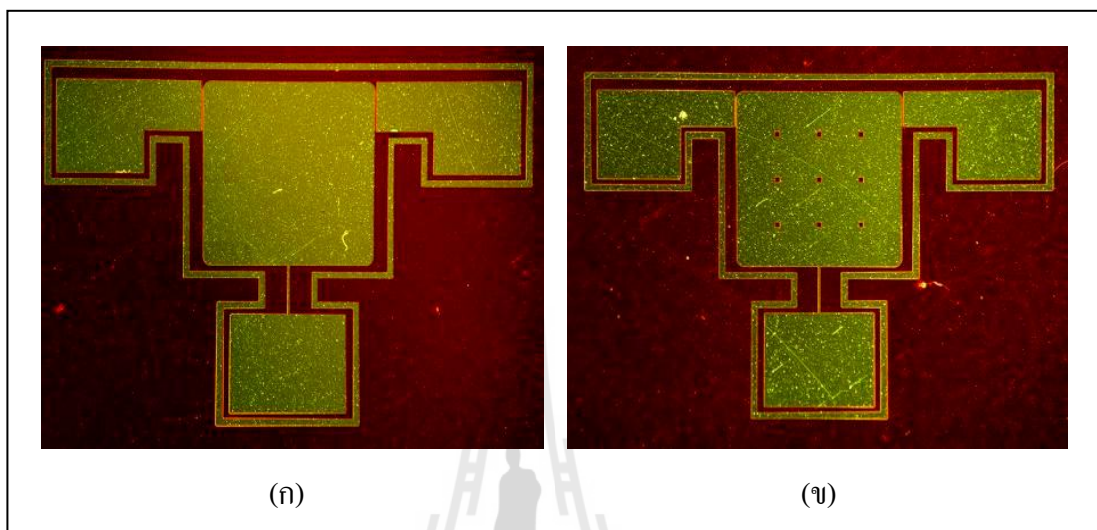
9. ล้างสารไวแสง AZ เบอร์ 4620 ที่ไม่ได้ถูกฉายด้วยรังสีออกด้วย สารละลาย AZ developer โดยเทสารละลาย AZ developer ลงในบีกเกอร์ให้สูงพอท่วมชิ้นงาน นำหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์จุ่มแช่ลงในสารละลาย ทำการจับเวลาแล้วนำชิ้นงานออกมาดูเป็นระยะ จนกว่าจะล้างสารไวแสงออกหมด ซึ่งความหนาของสารไวแสงมีผลกับเวลาในการล้างสารไวแสงด้วย ถ้าชิ้นงานในสารละลายนานเกินไป สารไวแสงส่วนที่ไม่ได้ถูกฉายด้วยแสง จะถูกล้างออกไปด้วย ดังนั้นจึงต้องทำการจับเวลาแล้วนำชิ้นงานออกมาดูเป็นระยะ เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการล้างสารไวแสงความหนา 35 μm ออกจนหมด ซึ่งจากการทดลองใช้เวลา 90 วินาที จากนั้นล้างน้ำดีโอเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน ทำให้ได้ลวดลายจากการฉายรังสีดังรูปที่ 5.2 หน้ากากกันรังสีเอ็กซ์หลังจากล้างสารไวแสงที่ถูกฉายด้วยแสงออกแล้ว

10. ทำความสะอาดผิวของชิ้นงานส่วนที่ล้างสารไวแสงออกไปแล้วด้วยวิธีพลาสมาของออกซิเจน ที่ความดัน 350 มิลลิทอร์ กำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที

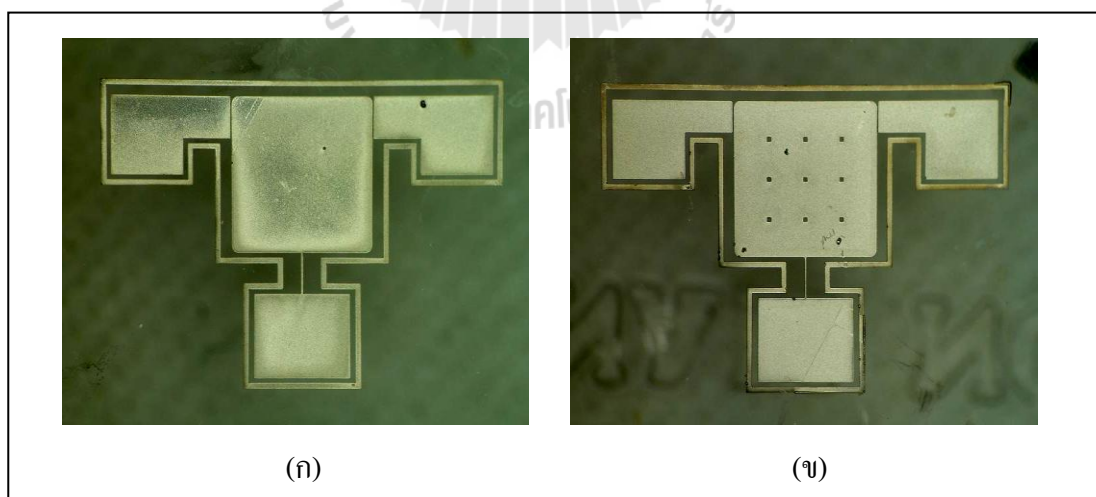
11. ทำการเติมโลหะเงินลงในหลุมสารไวแสง ด้วยกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยใช้ความหนาแน่นกระแส 20 mA/cm² ด้วยความหนาแน่นกระแสนี้ ทำให้เกิดโลหะเงินความหนา 5 μm ต่อเวลา 7 นาที 30 วินาที ซึ่งอัตราการชุบเงินสามารถเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะและคุณสมบัติของชิ้นงานที่นำมาชุบ รวมถึงอุณหภูมิของสารละลายก็มีผลต่ออัตราการเกิดเงินด้วยเช่นกัน และในระหว่างการชุบเงินต้องระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศขึ้นในลวดลายที่ทำการชุบ ซึ่งถ้าเกิดฟองอากาศขึ้นเงินจะไม่สามารถก่อตัวขึ้นในบริเวณนั้นได้ ทำให้ได้ลวดลายจุลภาคที่ไม่สมบูรณ์

12. เมื่อชุบโลหะเงิน จนเต็มแม่พิมพ์แล้ว จึง ล้างแม่พิมพ์สารไวแสง AZ โดยการฉีดล้างด้วยอะซิโตน จากนั้นนำมากัดขั้ว ผิวโลหะที่เคลือบบนผิวฐานรองออก เพื่อให้หน้ากากกันรังสีเอ็กซ์โปร่งใส การกัดโลหะไทเทเนียมจะนำหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์แช่ลงในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) 5% จนกว่าไทเทเนียมจะถูกกัดออกจนหมด แล้วล้างด้วยน้ำดีโอ จากนั้นกัดชั้นทองแดงออกด้วยการจุ่มแช่ลงในสารละลาย H₂SO₄ : H₂O₂ อัตราส่วน 10 : 1 จนกว่าชั้นทองแดงจะถูกกัดจนหมดล้างด้วยน้ำดีโอ แล้วกัดชั้นโลหะไทเทเนียมชั้นสุดท้ายออกด้วยสารละลายกรด

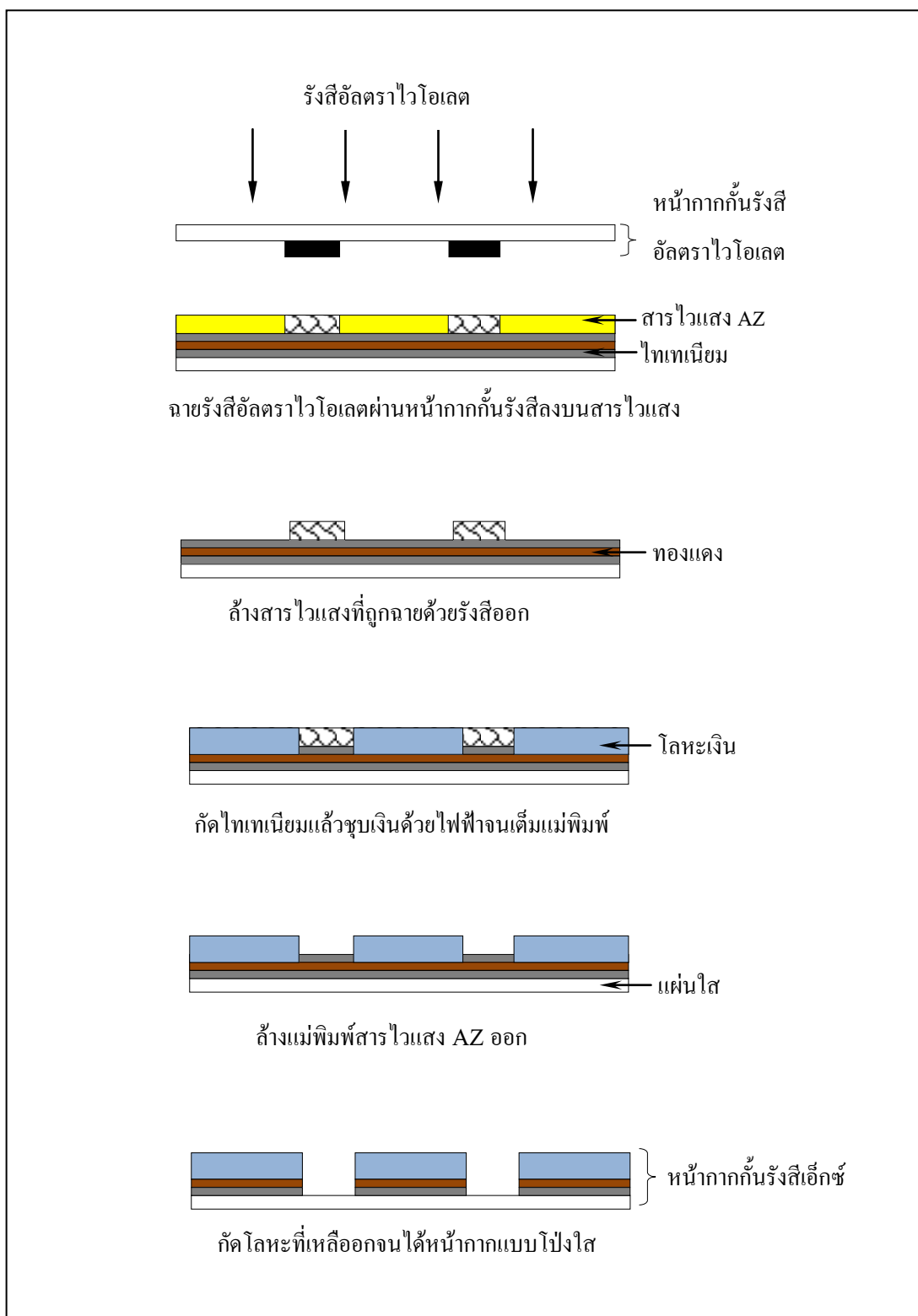
ไฮโดรฟลูออริก 5% เมื่อกัดโลหะที่ถูกเคลือบออกจนหมด ล้างด้วยน้ำดีไอเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน จะได้หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ดังรูปที่ 5.14 หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์แบบโปร่งใสพร้อมสำหรับนำมาใช้ในกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ต่อไป



รูปที่ 5.13 หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์หลังจากล้างสารไวแสงที่ถูกฉายด้วยแสงออกแล้ว
(ก) ก่อนมวลเป็นทรงตัน (ข) ก่อนมวลที่มีรูภายในจำนวน 9 รู



รูปที่ 5.14 หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์แบบโปร่งใส (ก) ก่อนมวลเป็นทรงตัน
(ข) ก่อนมวลที่มีรูภายในจำนวน 9 รู



รูปที่

5.15 กระบวนการสร้างหน้ากากันรังสีเอ็กซ์

5.2.3 กระบวนการสร้างสวิตช์ความแรงด้วยการชุบโลหะผ่านแม่พิมพ์สารไวแสง

การสร้างชิ้นงานในรูปแบบนี้จะใช้กระจกสไลด์เป็นฐานรอง แต่กระจกสไลด์ไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ จึงต้องเคลือบโลหะลงบนผิวของกระจกสไลด์ โดยเคลือบไทเทเนียม ทองแดง และไทเทเนียมตามลำดับ ลงบนผิวกระจกด้วยเครื่องระเหยไอโลหะในสุญญากาศ จากนั้นสร้างวัสดุชั้นชั่วคราวความหนา $25\text{ }\mu\text{m}$ ด้วยการชุบทองแดงด้วยไฟฟ้าลงบนฐานรอง แล้วจึงสร้างโครงสร้างของสวิตช์ความแรงทับวัสดุชั้นชั่วคราว เมื่อกัดวัสดุชั้นชั่วคราวออกจะได้ก้อนมวลของสวิตช์ความแรงที่สามารถแขวนลอยอยู่กลางอากาศ ซึ่งการสร้างสวิตช์ความแรงมีขั้นตอนต่อไปนี้

1. ทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ขนาดความกว้าง 2.54 นิ้ว ยาว 7.62 cm โดยการฉีดล้างด้วยไอโซโพรพิล แอลกอฮอล์ให้ทั่วทั้งแผ่น เช็ดด้วยสำลีจุ่มไอโซโพรพิล แอลกอฮอล์ ฉีดล้างด้วยอะซิโตน แล้วล้างด้วยน้ำดีไอสองครั้ง เป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน

2. นำแผ่นกระจกมาเคลือบโลหะไทเทเนียม /ทองแดง/ไทเทเนียม โดยที่เคลือบไทเทเนียมหนา $300\text{ }\text{\AA}$ ทองแดงหนา $2000\text{ }\text{\AA}$ หลังจากเคลือบเสร็จแล้ว นำมาตัดให้ได้ขนาด ความกว้าง 1 นิ้ว ยาว 1 นิ้ว ซึ่งจะนำไปใช้เป็นฐานรองจุดยึดตรึงสำหรับสร้างสวิตช์ความแรงต่อไป

3. เมื่อเตรียมฐานรองเสร็จแล้ว ต่อไปจึงสร้างก้อนมวลชั่วคราวบนกระจกใสที่เตรียมไว้ เพื่อยกให้ก้อนมวลแขวนลอยอยู่กลางอากาศ โดยหมุนเคลือบสารไวแสง AZ เบอร์ 4620 ด้วยความเร็ว 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 วินาที และ 1000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที จะได้สารไวแสงความหนา $25\text{ }\mu\text{m}$ เมื่อหมุนเคลือบเสร็จแล้วนำไปอบในเตาอบเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 2°C ต่อนาที แล้วคงค่าอุณหภูมิไว้ที่ 90°C เป็นเวลา 60 นาที ปล่องยให้อุณหภูมิค่อย ๆ ลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง

4. จากนั้นฉายรังสีอัลตราไวโอเลต โดยนำหน้ากากกันรังสีอัลตราไวโอเลตประกบเข้ากับชิ้นงานที่ต้องการฉายรังสี ให้ด้านที่มีหมึกดำหันเข้าหาผิวของสารไวแสง เปิดเครื่องฉายรังสีแล้ววัดความเข้มแสงได้ 21.15 mW/cm^2 ซึ่งจากการทดสอบฉายรังสีที่สารไวแสงความหนา $25\text{ }\mu\text{m}$ จะใช้พลังงานในช่วง $2.35\text{--}2.40\text{ J/cm}^2$

5. เมื่อฉายรังสีเสร็จแล้ว นำชิ้นงานไปอบในเตาอบโดยปรับเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 2°C ต่อนาที และคงค่าอุณหภูมิไว้ที่ 90°C เป็นเวลา 60 นาที แล้วปล่อยให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง

6. ล้างสารไวแสงที่ถูกฉายด้วยรังสีออกด้วยสารละลาย AZ Developer โดยเทสารละลายลงในบีกเกอร์ขนาด 400 มิลลิลิตร ให้ได้ปริมาณ 200 มิลลิลิตร แล้วนำชิ้นงานลงไปจุ่มแช่ในสารละลาย รอจนกว่าสารไวแสงจะถูกล้างออกจนหมดแล้วล้างสารละลาย AZ Developer ด้วยน้ำดีไอ เป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน

7. ทำความสะอาดผิวชิ้นงานก่อนชุบทองแดงด้วยไฟฟ้า พลาสมาของออกซิเจน ที่ความดัน 350 มิลลิทอร์ กำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำชิ้นงานมาจุ่มไทเทเนียม ที่เคลือบบนพื้นฐานรองออก ด้วยการจุ่มชิ้นงานลงในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 5% แช่ไว้ จนกว่าไทเทเนียมจะถูกกัดออกจนหมด แล้วล้างด้วยน้ำดีไอ

8. เมื่อเตรียมชิ้นงานเรียบร้อยแล้วจึงทำการชุบทองแดงด้วยไฟฟ้า โดยปรับ ค่ากระแสให้ต่ำที่สุดก่อน แล้วค่อยๆปรับกระแสเพิ่มขึ้นจนได้ความหนาแน่นกระแสที่ 10 mA/cm^2 ใช้เวลาในการชุบ 60 นาที ซึ่งในระหว่างการชุบต้องกวนสารละลายตลอดเวลา เพื่อให้สารละลาย เกิดการหมุนเวียนอย่างทั่วถึง

9. เมื่อชุบโลหะจนเต็มแม่พิมพ์สรไวะแสงแล้วนำไปขัดด้วยกระดาษทรายน้ำ เบอร์ 1200 ให้เรียบแล้วล้างสารไวะแสง AZ 4620 ออกด้วยการจิดล้างด้วยอะซิโตน ตามด้วยน้ำดีไอ เป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน จากนั้น ทำความสะอาดผิวของชิ้นงานด้วยพลาสมาของออกซิเจนที่ ความดัน 350 มิลลิทอร์ กำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที จะได้วัสดุชิ้นชั่วคราวดังรูปที่ 5.16 ซึ่งชิ้นงานที่ได้จะนำไปใช้ในกระบวนการเคลือบสารไวะแสงต่อไป



รูปที่ 5.16 วัสดุชิ้นชั่วคราวหลังจากเดิมทองแดงด้วยไฟฟ้าแล้วที่ใช้หนุรอง
ได้ก่อนมวลของสวิตซ์ความเร่ง

10. นำกรอบพอลิเมอร์ PDMS มาประกบบนฐานรองกระจก แล้วขันตัวประกบ ชิ้นงานให้แน่น นำชิ้นงานเข้าไปในเครื่องซัง ตั้งค่าน้ำหนักให้เป็นศูนย์แล้วเทสารไวะแสงชนิดผงลงในกรอบพอลิเมอร์ PDMS จนได้น้ำหนักสารไวะแสง 568 มิลลิกรัม ใช้เข็มเกลี่ยกระจายสารไวะแสง

ให้ทั่วบริเวณ นำชุดตัวประกอบเข้าไปในเครื่องสุญญากาศแล้วให้ความร้อนเพื่อให้ผง SU-8 เกิดการหลอมเป็นชั้นสารไวแสงที่มีความหนาประมาณ 600 μm

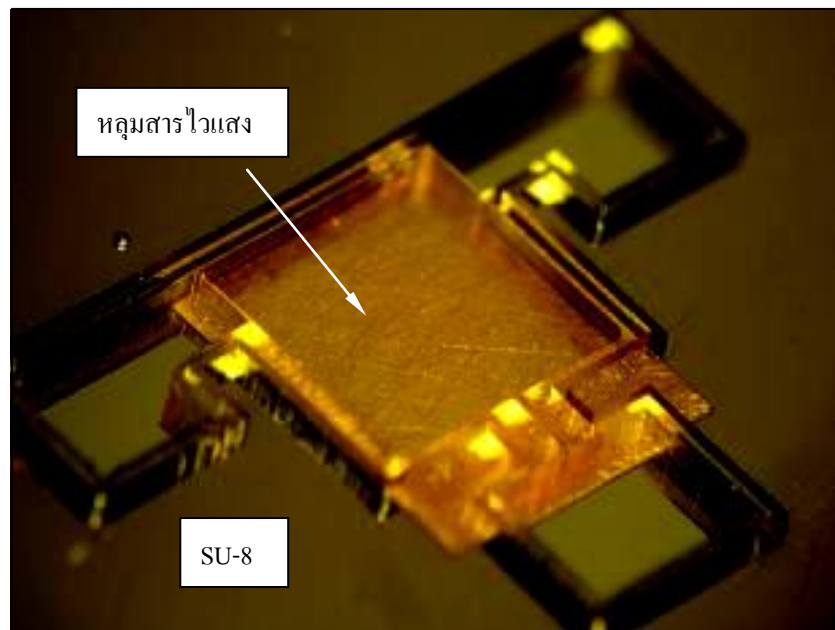
11. เมื่อหลอมสารไวแสงเสร็จแล้ว นำชิ้นงานไปฉายรังสีเอ็กซ์ผ่านหน้ากากกันรังสีที่เตรียมไว้ ณ ระบบลำเลียงแสงซินโครตรอน BL-6 สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) โดยใช้พลังงาน 9500 mJ/cm^2

12. เมื่อฉายรังสีเสร็จแล้วนำชิ้นงานไปอบหลังการฉายรังสีในเตาอบที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 90 นาที แล้วปล่อยให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง จากนั้นนำชิ้นงานไปล้างสารไวแสงที่ไม่ได้ถูกฉายด้วยรังสีออกด้วยน้ำยา SU-8 Developer โดยคว่ำชิ้นงานแช่ไว้เป็นเวลา 60 นาที แล้วนำขึ้นมาตรวจสอบว่า สารไวแสงละลายออกหมดหรือไม่ โดยฉีดด้วยไอโซโพรพิล แอลกอฮอล์ แล้วดูว่ามีคราบสีขาวเกินขึ้นหรือไม่ ถ้ามีแสดงว่ายังล้างสารไวแสงออกไม่หมด ถ้าล้างสารไวแสงหมดแล้วนำมาเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน จะได้หลุมสารไวแสงของโครงสร้างสวิตช์ความแรงดังรูปที่ 5.17

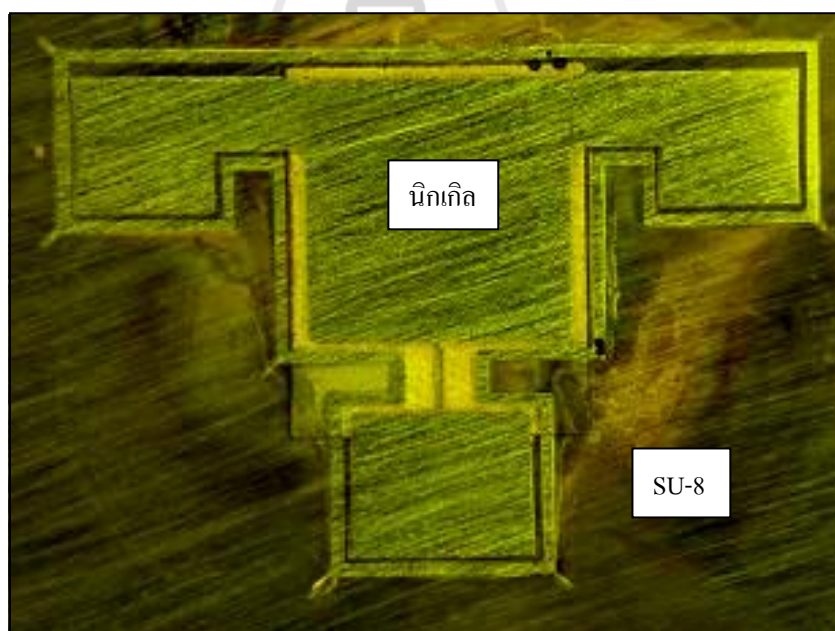
13. ทำความสะอาดพื้นผิวภายในหลุมสารไวแสง ด้วยพลาสมาของออกซิเจนที่ความดัน 350 มิลลิทอร์ กำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที ทำการชุบโลหะนิกเกิลด้วยไฟฟ้า โดยตั้งค่ากระแสไว้ที่ค่าต่ำสุดก่อนแล้วค่อย ๆ ปรับเพิ่มจนความหนาแน่นกระแสมีค่า 10 mA/cm^2 ระหว่างทำการชุบโลหะต้องกวนสารละลายตลอดเวลา เพื่อให้สารละลายเกิดการหมุนเวียนกันอย่างต่อเนื่อง

14. เมื่อชุบนิกเกิลจนเต็มแม่พิมพ์แล้ว จะมีบางส่วนที่ล้นแม่พิมพ์ออกมา เนื่องจากในพื้นที่มีขนาดเล็กจะมีอัตราการเกิดของโลหะนิกเกิลมากกว่าพื้นที่ซึ่งมีขนาดใหญ่ จึงต้องทำการชุบนิกเกิลให้ล้น แล้วนำมาขัดด้วยกระดาษทรายน้ำให้เรียบเท่ากันจะได้ชิ้นงานดังรูปที่ 5.18

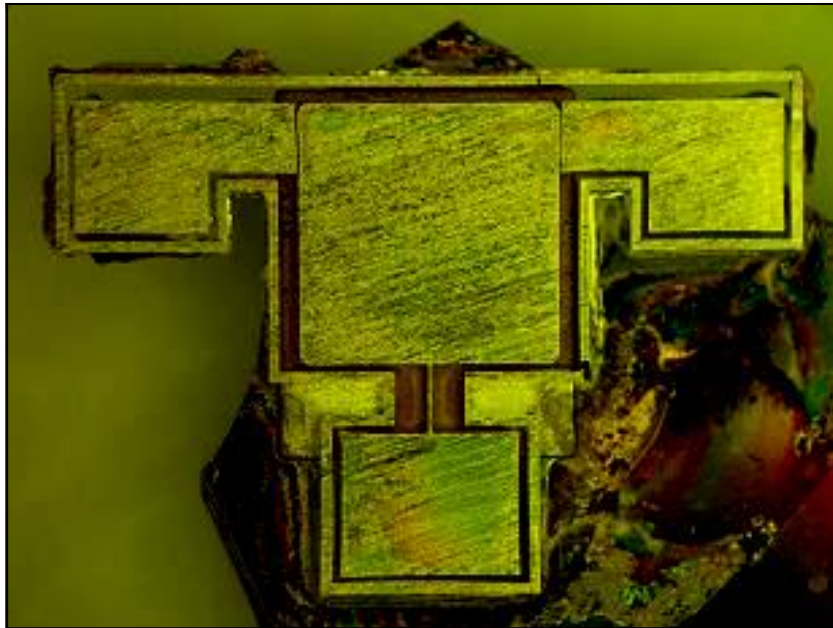
15. เมื่อขัดจนเรียบแล้วทำการกัดแม่พิมพ์สารไวแสงออกด้วยการพลาสมาของออกซิเจนและการบอเนตอะลูมิเนียมในอัตราส่วนปริมาตร 9:1 ที่ความดัน 300 มิลลิทอร์ กำลังไฟฟ้า 200 วัตต์เป็นเวลา 120 ชั่วโมง เมื่อแม่พิมพ์สารไวแสงถูกกัดออกจนหมดแล้ว จะได้โครงสร้างสวิตช์ความแรงดังรูปที่ 5.19



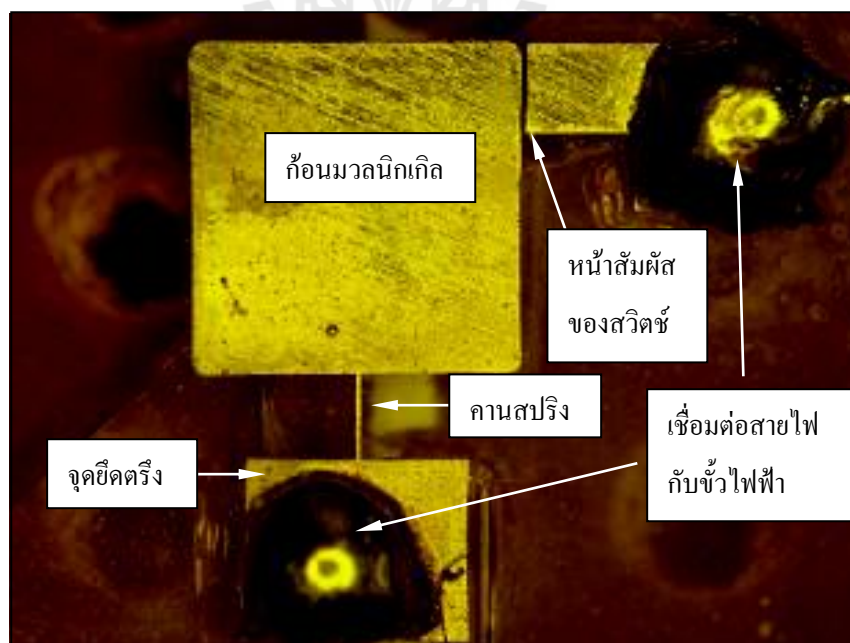
รูปที่ 5.17 หลอดสารไวแสงหลังจากล้างสารไวแสงที่ไม่ถูกฉายด้วยรังสีออกแล้ว



รูปที่ 5.18 โครงสร้างหลังจากชุบนิกเกิลลงในหลอดสารไวแสงจนเต็ม

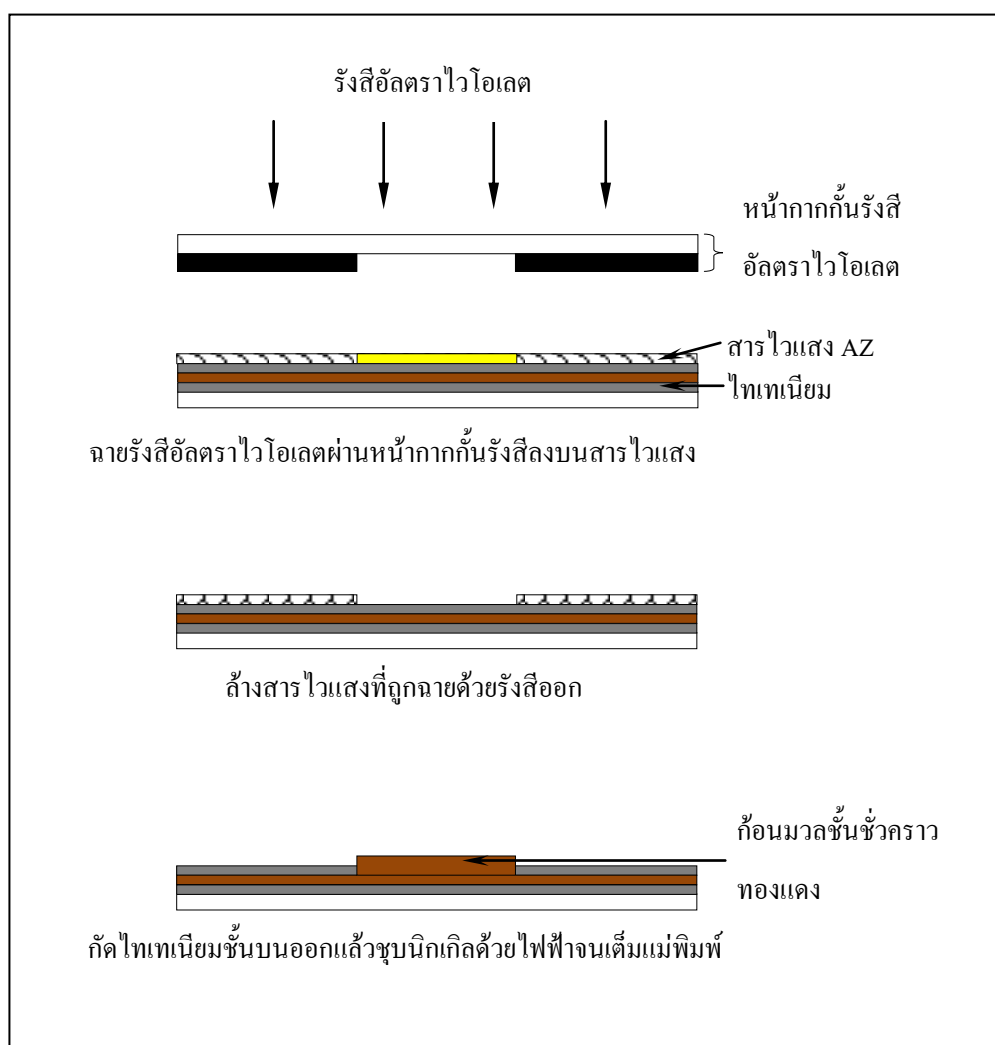


รูปที่ 5.19 โครงสร้างสวิตช์ความแรงหลังจากสกัดแม่พิมพ์สารไวแสงด้วยพลาสติกของออกซิเจนผสมคาร์บอนเตตระฟลูออรีน

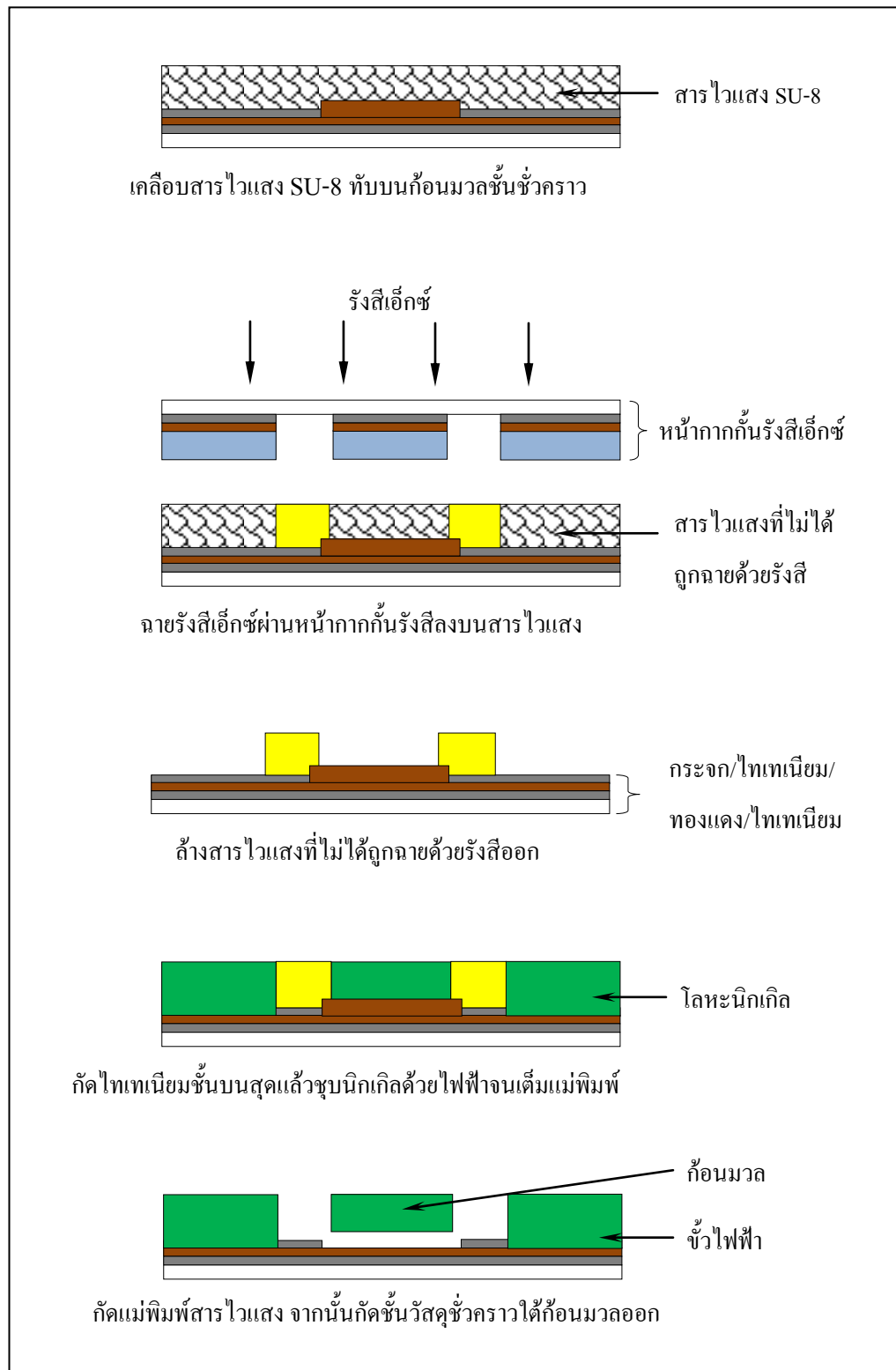


รูปที่ 5.20 โครงสร้างสวิตช์ความแรงหลังจากกัดวัสดุขึ้นชั่วคราวออกเพื่อให้ก้อนมวลแขวนลอยในอากาศ

16. ทำการกัดวัสดุชั้นชั่วคราวได้ก่อนมวลออก โดยการจุ่มแช่ชิ้นงานในสารละลาย $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2$ อัตราส่วน 10 : 1 โดยปริมาตร จนวัสดุชั้นชั่วคราวจะถูกกัดออกจนหมด สำหรับโครงสร้างก่อนมวลต้นจะใช้เวลาการกัดประมาณ 7.5 ชั่วโมง ส่วนโครงสร้างก่อนมวลที่มีรูภายในใช้เวลากัดประมาณ 5 ชั่วโมง ซึ่งการเจาะรูภายในทำให้ร่นระยะเวลาในการกัดให้น้อยลงได้ จากนั้นล้างด้วยน้ำดีไอเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน จะได้โครงสร้างสวิตซ์ความเร่งดังรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.21 กระบวนการสร้างวัสดุชั้นชั่วคราว เพื่อใช้หุ้มก่อนมวล



รูปที่ 5.22 กระบวนการสร้างสวิตช์ความเร่งโดยการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าบนวัสดุชั้นชั่วคราว

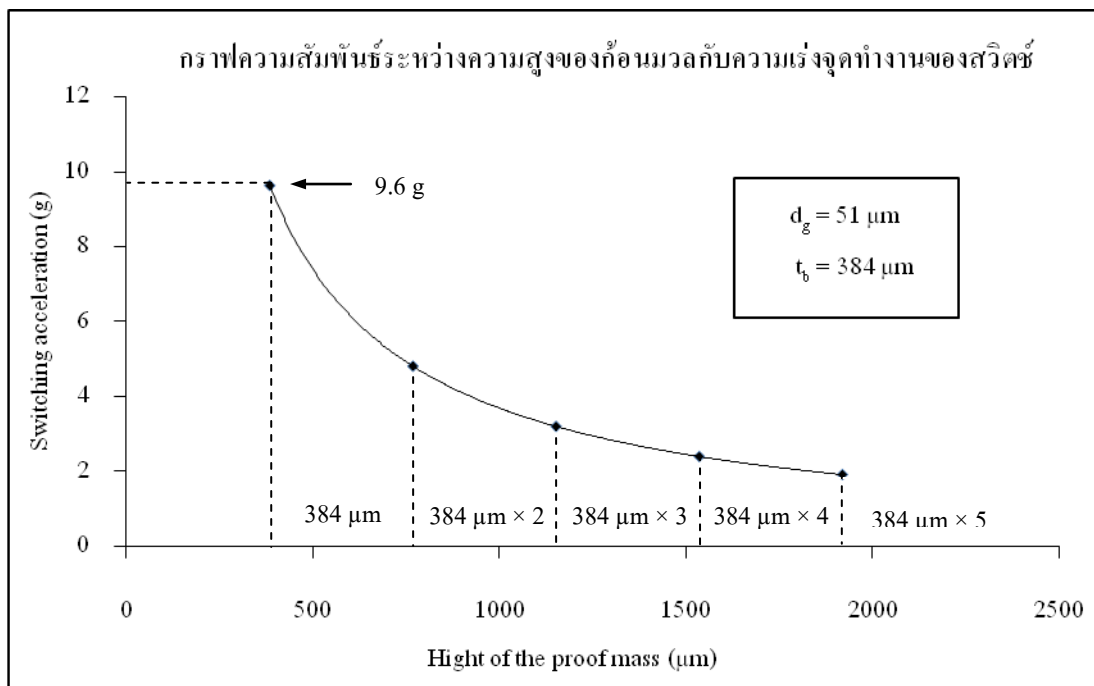
หลังจากสร้างโครงสร้างสวิตช์ความเร่งเสร็จแล้ว ได้นำตัวสวิตช์ความเร่งไปวัดขนาดส่วนต่าง ๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์วัดขนาด MICROSCOPE TOOL MAKER ของบริษัท Mitutoyo โดยใช้เลนส์วัตถุกำลังขยาย 20 เท่า ได้ขนาดบริเวณต่าง ๆ ดังนี้ ก้อนมวลมีความกว้าง 3003 μm ยาว 2997 μm คานสปริงกว้าง 36 μm ยาว 804 μm ระยะห่างระหว่างก้อนมวลกับขั้วไฟฟ้า 51 μm สำหรับความสูงของโครงสร้างได้ทำการวัดด้วยไมโครมิเตอร์รุ่น IP 65 ของบริษัท Mitutoyo ได้ความสูง 384 μm ค่าความเร่งจุดทำงานของสวิตช์ของก้อนมวลที่มีความสูงต่าง ๆ สามารถหาได้จากสมการที่ 4.7 เมื่อแทนค่าขนาดโครงสร้างสวิตช์ความเร่งที่วัดได้จริง ลงในสมการที่ 4.7 โดยใช้ความสูงของคานสปริงเท่ากับ 384 μm จะได้สมการความเร่งจุดทำงานของสวิตช์ที่เป็นฟังก์ชันของความสูงของก้อนมวล ดังสมการที่ 5.1

$$a = \frac{1.85 \times 10^6 \times d_g \times t_b}{t_m} \quad (\text{g}) \quad (5.1)$$

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของก้อนมวล และค่าความเร่งจุดทำงานของสวิตช์ตามสมการที่ 5.1 แสดงในรูปที่ 5.23 โดยกำหนดให้คานสปริงมีความสูงเท่ากับ 384 μm ระยะห่างระหว่างก้อนมวลกับขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 51 μm ที่ความสูงก้อนมวลเท่ากับคานสปริงได้ค่าความเร่งจุดทำงานของสวิตช์ 9.6 g และเมื่อเพิ่มความสูงก้อนมวลขึ้นตามจำนวนเท่าของความสูงของสวิตช์ความเร่งแล้วได้กราฟเป็นลักษณะกราฟที่มีลักษณะดูเข้าหาค่าความเร่งจุดทำงานของสวิตช์ประมาณ 2 g

5.2.4 สรุป

การสร้างสวิตช์ความเร่งกระบวนการสร้างมีหลายขั้นตอน ซึ่งแต่ละขั้นตอนใช้เวลานาน และเป็นกระบวนการสร้างต่อเนื่องกัน ในระหว่างการสร้างเกิดการเสียหายต่อชิ้นงานบ่อยครั้ง จะต้องเริ่มสร้างใหม่ทั้งหมดใช้เวลานานและค่าใช้จ่ายสูง และระหว่างการกระบวนการสร้างจะพบปัญหา ในกระบวนการชุบนิเกิลด้วยไฟฟ้า ถ้าทำการชุบเป็นเวลานานและให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง ฐานกระจกอาจเกิดการแตกร้าวได้ อีกทั้งกระบวนการสกัดแม่พิมพ์สารไวแสงด้วยการพลาสมาเป็นเวลานาน จะทำให้อุณหภูมิในเครื่องสูงมาก และทำให้ฐานรองกระจกแตกร้าวได้ง่าย ดังนั้นจึงได้พัฒนากระบวนการสร้างสวิตช์ความเร่งแบบใหม่ดังมีรายละเอียดในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 5.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของก้อนมวลกับความเร่งจุดทำงานของสวิตช์
 เมื่อก้อนมวลมีความกว้าง 3003 μm ยาว 2997 μm คานสปริงมีความกว้าง 36 μm
 ยาว 804 μm ก้อนมวลสูง 384 μm ระยะห่างระหว่างก้อนมวลกับขั้วไฟฟ้า
 เท่ากับ 51 μm

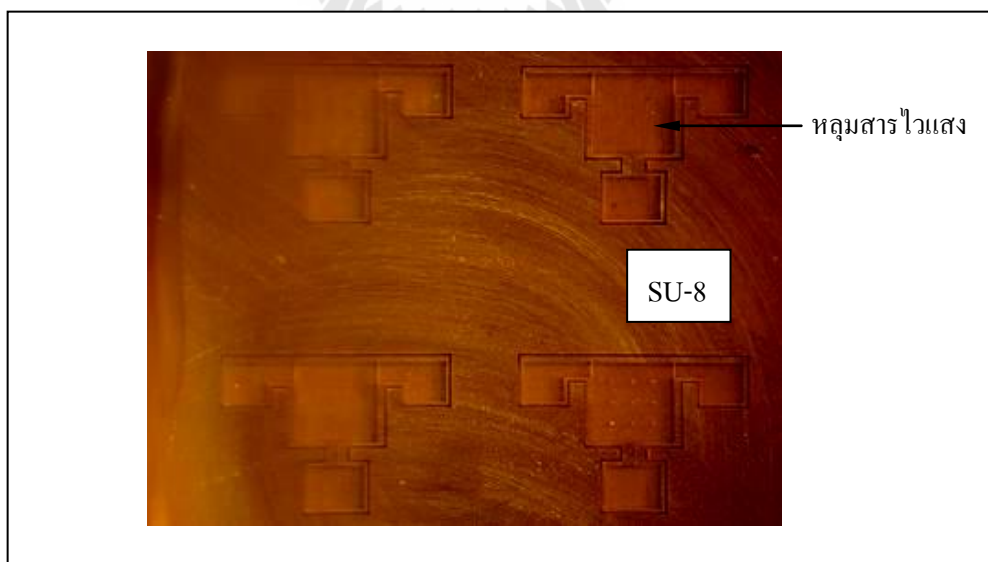
5.3 การสร้างสวิตช์ความเร่งบนฐานรองชั่วคราวแกรไฟต์

กระบวนการนี้แบ่งออกเป็น สอง ส่วนคือ การสร้างฐานรองจุดยึดตรึงและการสร้างโครงสร้างสวิตช์ความเร่ง ฐานรองจุดยึดตรึงถูกสร้างด้วยการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตลงบนสารไวแสงแบบฟิล์มแห้ง (Dry film) บนฐานแผ่นวงจรพิมพ์ แล้วล้างสารไวแสงส่วนที่ไม่ได้ถูกฉายด้วยรังสีออก กัดทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์ออก ได้จุดยึดตรึงทองแดง 3 จุดที่มีความสูงประมาณ 20 μm สำหรับอีกส่วนหนึ่งเป็นการสร้างโครงสร้างของสวิตช์ความเร่งลงฐานรองแกรไฟต์ด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ลงบนสารไวแสง SU-8 โดยใช้หน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ ดังรูปที่ 5.14 จากนั้นชุบนิเกิลด้วยไฟฟ้าลงในแม่พิมพ์สารแสงจนเต็มแล้วขัดฐานรองแกรไฟต์ทิ้งไปจนเหลือแผ่นแม่พิมพ์สารไวแสงที่มีโครงสร้างนิเกิลของสวิตช์ความเร่งฝังอยู่ภายใน เมื่อได้ส่วนประกอบทั้งสองส่วนแล้วจึงเชื่อมต่อแผ่นแม่พิมพ์สารไวแสงกับฐานรองจุดยึดตรึงทองแดงด้วยกาวเงิน ทำให้ก้อนมวลและคานสปริงถูกยกให้ลอยอยู่ในอากาศได้โดยอัตโนมัติ โดยมีฐานรองจุดยึดตรึงเป็นจุดยกก้อนมวลและคานสปริง แล้วจึงสกัดแม่พิมพ์สารไวแสงออกด้วยพลาสมาของ

ออกซิเจน จะได้สวิตช์ความเร่งที่มีก้อนมวลและคานสปริงแขวนลอยอยู่กลางอากาศ ซึ่งการสร้างสวิตช์ความเร่งมีขั้นตอนโดยละเอียดดังต่อไปนี้

5.3.1 กระบวนการสร้างสวิตช์ความเร่ง

1. ตัดแผ่นแกรไฟต์ความหนา 1 mm ให้ได้ขนาดความกว้าง 1.5 นิ้ว ยาว 1.5 นิ้ว นำมาทำความสะอาดด้วยการชุบเปอร์โซนิคในน้ำดีไอครั้งละ 10 นาที แล้วเปลี่ยนน้ำดีไอใหม่ จนกว่าน้ำดีไอจะไม่ขุ่น จากนั้นนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 30 นาที แล้วปล่อยให้เย็นถึงอุณหภูมิห้อง
2. เคลือบสารไวแสง SU-8 โดยการหลอมสารไวแสงชนิดผงให้ ได้ความหนา 600 μm จากนั้นนำไปฉายรังสีเอ็กซ์ผ่านหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ตามรูปที่ 5.14 ลงบนสารไวแสงโดยพลังงานที่ผิวด้านล่างสุดของสารไวแสง 13000 mJ/cm^2 แล้วนำชิ้นงานไปอบในเตาอบ แล้วค่อย ๆ เพิ่มอุณหภูมิจนถึง 95°C เป็นเวลา 120 นาที แล้วปล่อยให้อุณหภูมิค่อย ๆ ลดจนถึงอุณหภูมิห้อง
3. นำชิ้นงานไปล้างสารไวแสงที่ไม่ได้ถูกฉายด้วยรังสีออกด้วยน้ำยา SU-8 Developer โดยคว่ำชิ้นงานลงแช่ไว้เป็นเวลา 60 นาที แล้วนำขึ้นมาตรวจดูว่า สารไวแสงหลุดออกหมดหรือไม่ โดยฉีดด้วยไอโซโพรพิล แอลกอฮอล์ แล้วดูว่ามีคราบสีขาวเกินขึ้นหรือไม่ ถ้ามีแสดงว่ายังล้างสารไวแสงออกไม่หมด ถ้าล้างสารไวแสงหมดแล้วนำมาเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน จะได้แม่พิมพ์สารไวแสงดังรูปที่ 5.24

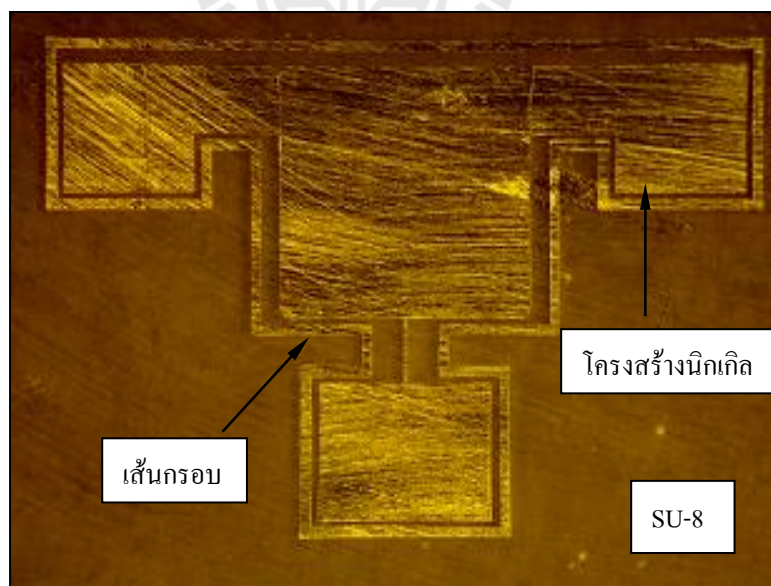


รูปที่ 5.24 แม่พิมพ์สารไวแสงของสวิตช์ความเร่งบนฐานรองแกรไฟต์

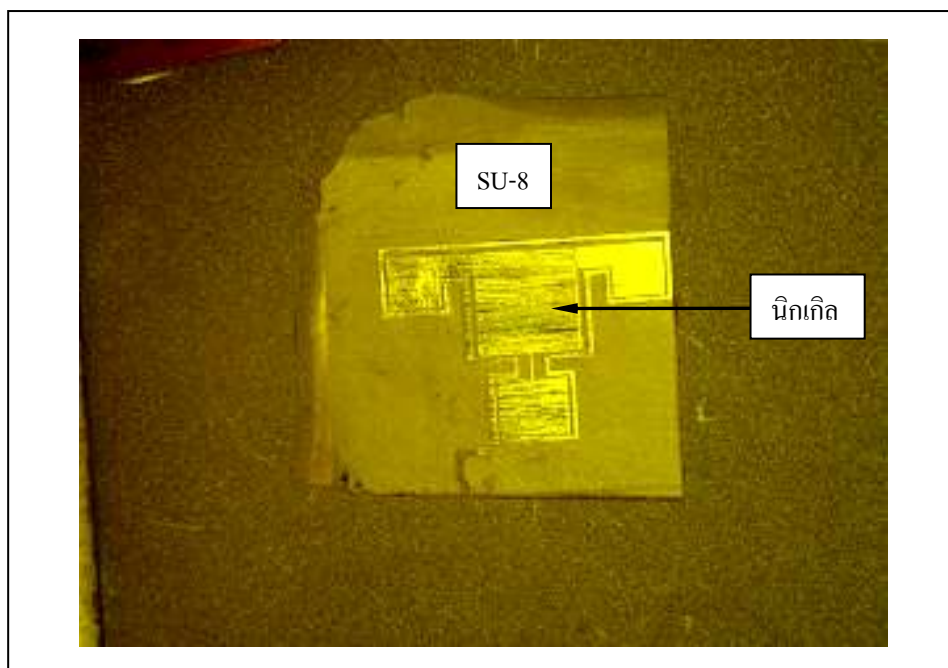
4. ทำความสะอาด พื้นผิวภายใน หลุมแม่พิมพ์ สารไวแสงด้วยพลาสติกของออกซิเจน ที่ความดัน 300 มิลลิทอร์ กำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที แล้วทำการชุบโลหะ นิกเกิลด้วยไฟฟ้าลงในหลุมสารไวแสง โดยตั้งค่ากระแสไว้ที่ค่าต่ำสุดก่อนแล้วค่อย ๆ ปรับเพิ่มจน ความหนาแน่นกระแสมีค่า 10 mA/cm^2

5. เมื่อชุบนิกเกิลจนเต็มแม่พิมพ์สารไวแสง แล้วนำมาขัดผิวสารไวแสง และ นิกเกิลให้เรียบ ได้ดังรูปที่ 5.25 จากนั้นขัดแผ่นแกรไฟต์ ซึ่งเป็นฐานรองแม่พิมพ์สารไวแสงออก จน เหลือเฉพาะแผ่นแม่พิมพ์สารไวแสงที่มีโครงสร้างนิกเกิลของสวิตซ์ความเร่งฝังอยู่ภายใน ดังรูปที่ 5.26 และรูปที่ 5.27 เนื่องจากลดทลายจุลภาคของสวิตซ์ความเร่งมีลักษณะสมมาตรดังนั้นชิ้นงานใน ขณะนี้จึงมีลักษณะเหมือนกันทั้งด้านบนและด้านล่างของแผ่นชิ้นงาน รูปที่ 5.28 สรุปขั้นตอนการ สร้างสวิตซ์ความเร่งที่ฝังตัวอยู่ในแผ่นแม่พิมพ์สารไวแสง

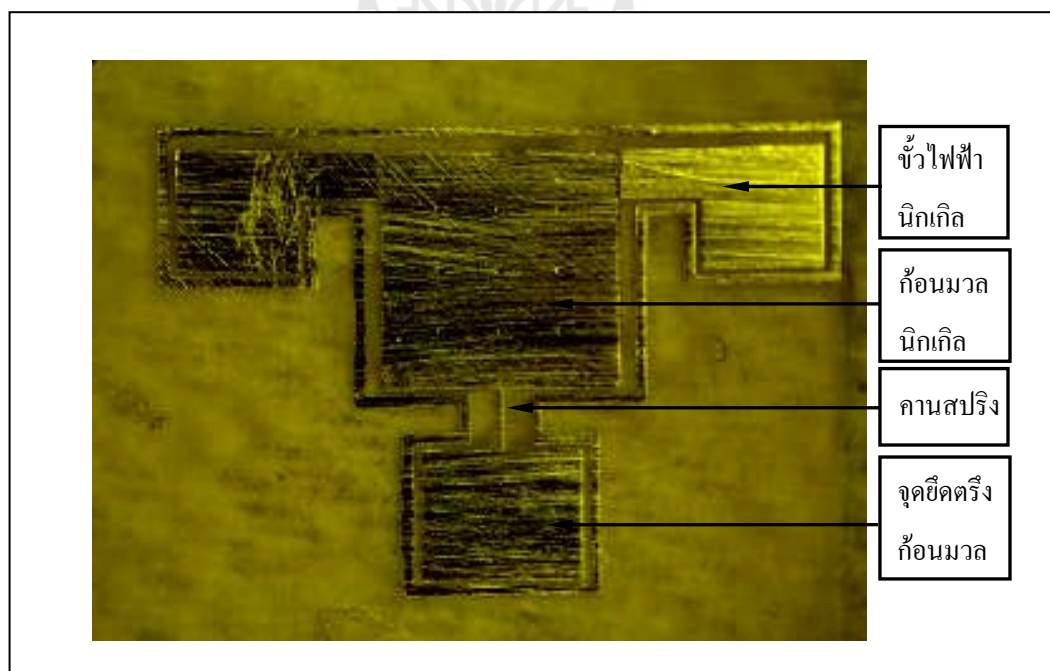
6. สร้างจุดยึดตรึง ด้วยการเคลือบฟิล์มสารไวแสงชนิดแห้ง ซึ่งเป็นสารไวแสง ชนิดลบลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ขนาด ความกว้าง 1 นิ้ว ยาว 1.5 นิ้ว ซึ่งการเคลือบต้องตัดแผ่นฟิล์มให้ มีขนาดใหญ่กว่าแผ่นวงจรพิมพ์เล็กน้อย แล้วลอกพลาสติกที่ติดอยู่บนผิวของฟิล์มออกหนึ่งด้าน แล้วประกบติดลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ จากนั้นนำแผ่นวงจรพิมพ์เข้าเครื่องรีดบัตรด้วยความร้อนทำให้แผ่นฟิล์มไวแสงติดกับผิวทองแดงบนแผ่นพิมพ์ลายวงจร



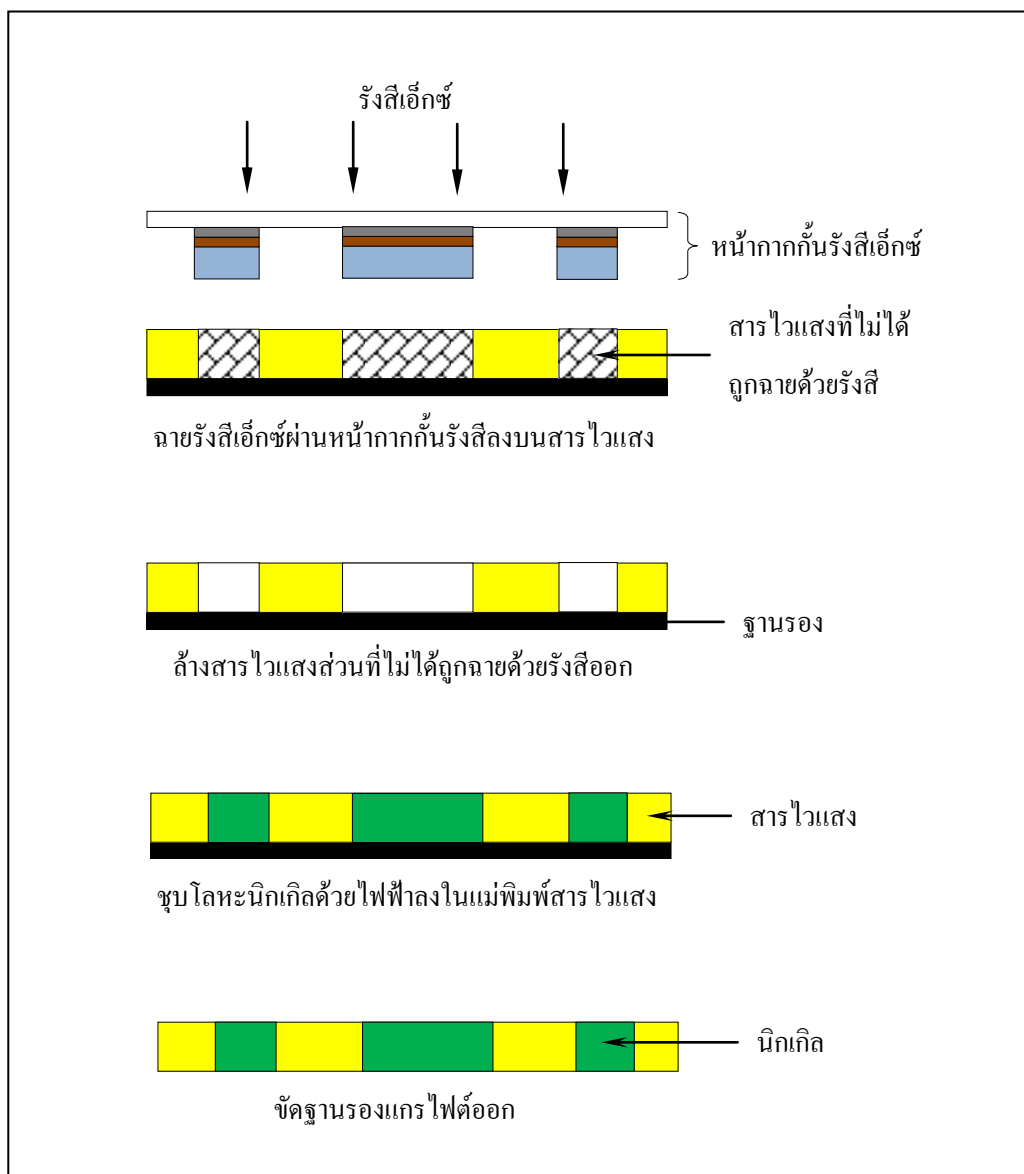
รูปที่ 5.25 โครงสร้างนิกเกิลของสวิตซ์ความเร่งที่ถูกขัดผิวหน้าจนเรียบ เส้นกรอบโลหะในรูปช่วย ป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากความเค้นภายในแม่พิมพ์สารไวแสง



รูปที่ 5.26 แผ่นแม่พิมพ์สารไวแสงของสวิตซ์ความเร่งหลังจากขั้นตอนรองแกรไฟต์ออกแล้ว

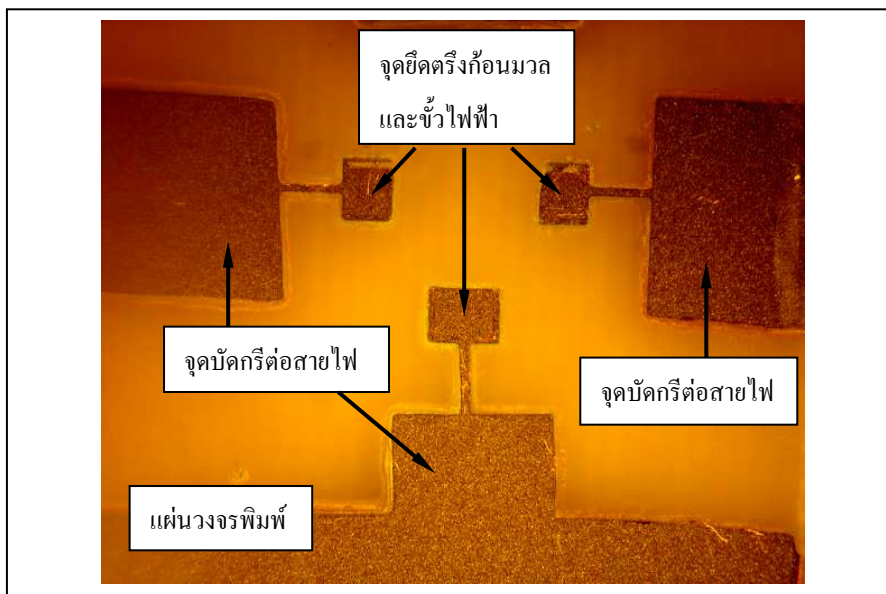


รูปที่ 5.27 โครงสร้างสวิตซ์ความเร่งที่ฝังตัวอยู่ในแผ่นแม่พิมพ์สารไวแสง
ซึ่งด้านหน้าและด้านหลังมีลักษณะเหมือนกันทุกประการ



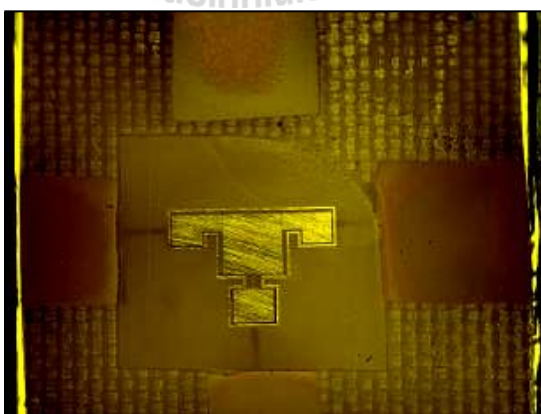
รูปที่ 5.28 กระบวนการสร้างแผ่นแม่พิมพ์สารไวแสง

7. นำแผ่นวงจรพิมพ์ไปฉายรังสีอัลตราไวโอเลตผ่านลวดลายของจุดยึดตรึงบนฟิล์มขาวดำเป็นเวลา 60 วินาที แล้วลอกแผ่นพลาสติกอีกด้าน ก่อนนำแผ่นวงจรพิมพ์ไปล้างฟิล์มบางที่ไม่ได้ถูกฉายด้วยรังสีออกด้วยการแช่ในสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นกัดผิวทองแดงบนแผ่นพิมพ์ออกด้วยน้ำยากัดลายแผ่นปรินต์ ล้างด้วยน้ำดีไอ เป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน ได้จุดยึดตรึงดังรูปที่ 5.29

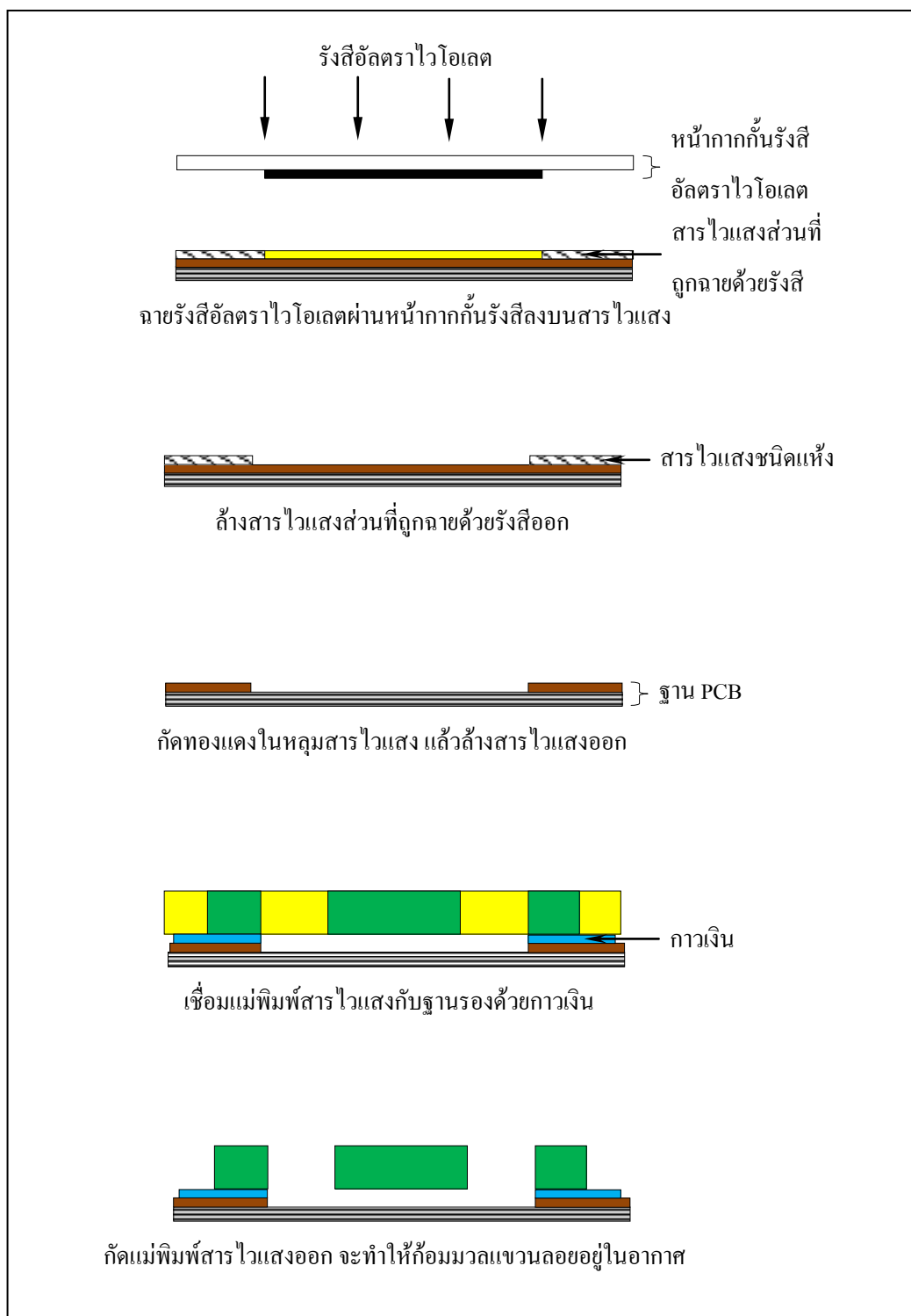


รูปที่ 5.29 จุดยึดตรึงสามจุดบนแผ่นวงจรพิมพ์ ซึ่งทำหน้าที่หนุนให้ก้อนมวลแขวนลอยอยู่ในอากาศ

8. แฉีกาวเงินตรงบริเวณจุดยึดตรึงทั้งสามจุด นำแผ่นแม่พิมพ์สารไวแสงประกบโดยจัดตำแหน่งของจุดยึดตรึงทั้งสองชั้นให้ตรงกันแล้วนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 30 นาที แล้วปล่อยให้อุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง ชิ้นงานที่ประกบเข้าด้วยกันแสดงดังรูปที่ 5.30 รูปที่ 5.31 สรุปกระบวนการสร้างจุดยึดตรึงบนแผ่นวงจรพิมพ์และการเชื่อมต่อสายไฟไปยังสวิตช์ความถี่

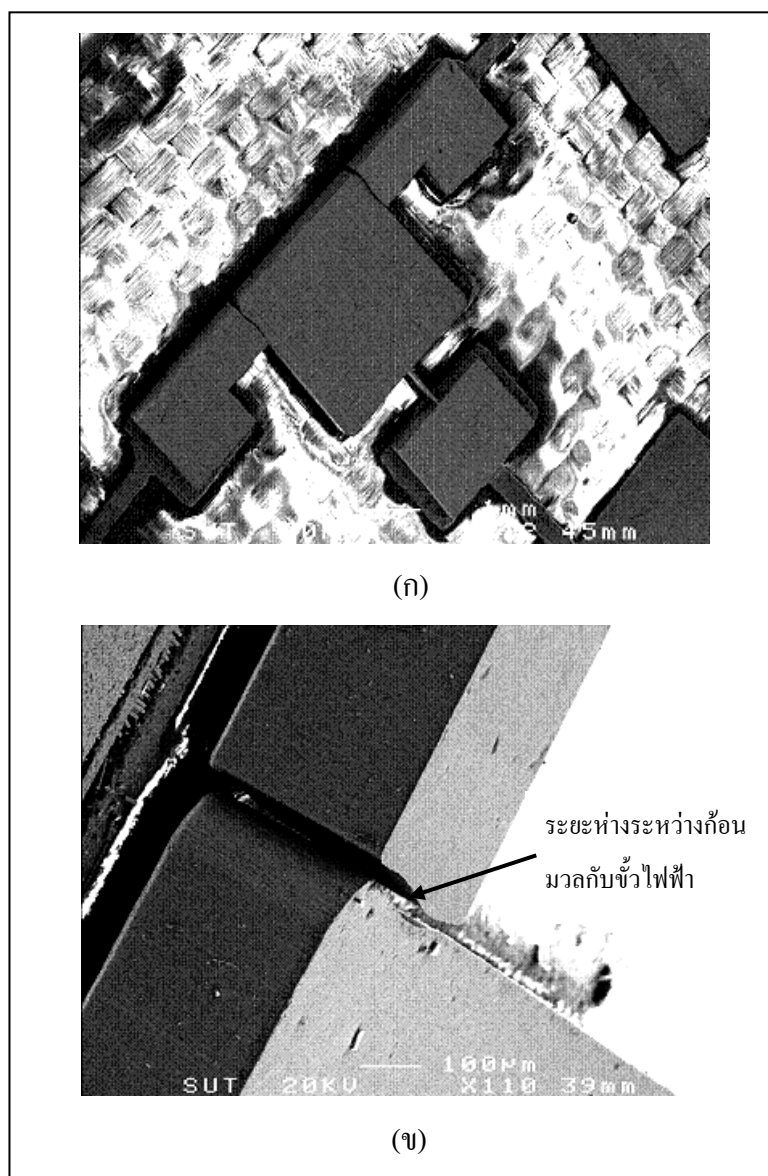


รูปที่ 5.30 การเชื่อมต่อโครงสร้างสวิตช์ความถี่ที่ฝังอยู่ในแม่พิมพ์สารไวแสงเข้ากับจุดยึดตรึงบนแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยกาวเงิน



รูปที่ 5.31 กระบวนการสร้างจุดยึดตรงและการเชื่อมต่อสวิตช์ความถี่เข้ากับแผ่นวงจรพิมพ์

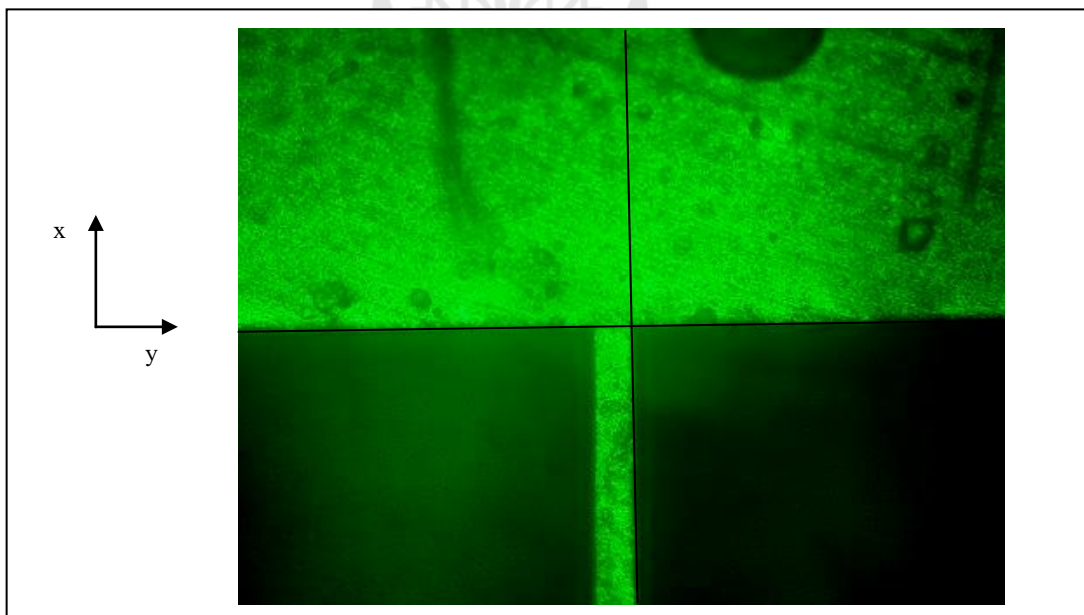
9. นำชิ้นงานมาสกัดแม่พิมพ์สารไวแสงออกด้วยพลาสติกของออกซิเจนผสมกับคาร์บอนเตตระฟลูออรีน ในอัตราส่วนปริมาตร 9 : 1 ที่ความดัน 300 มิลลิทอร์ กาลังไฟฟ้า 200 วัตต์เป็นเวลา 65 ชั่วโมง แม่พิมพ์สารไวแสงถูกกัดออกจนหมด เมื่อบัดกรีสายไฟเชื่อมเข้ากับขั้วทองแดงขนาดใหญ่บนแผ่นวงจรพิมพ์ แล้วจะได้สวิตซ์ความแรงที่พร้อมใช้งานดังแสดงในภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดังรูปที่ 5.32 (ก) และระยะห่างระหว่างก้อนมวลกับขั้วไฟฟ้างดรูปที่ 5.32 (ข)



รูปที่ 5.32 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (ก) สวิตซ์ความแรงที่พร้อมใช้งาน (ข) ระยะห่างระหว่างก้อนมวลกับขั้วไฟฟ้า

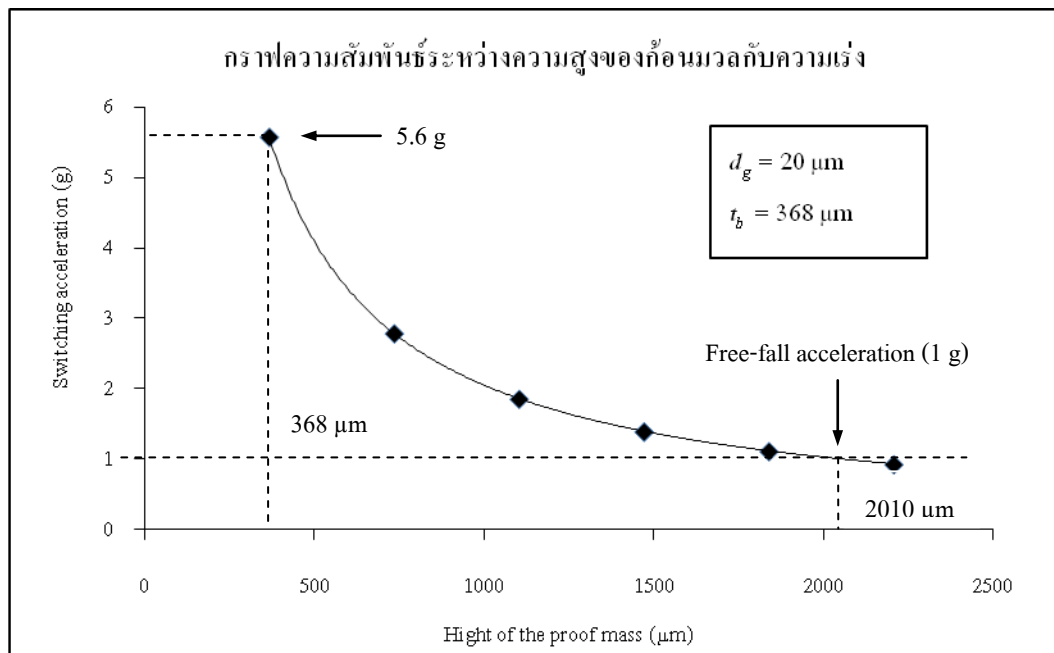
หลังจากสร้างสวิตช์ความแรงเสร็จแล้วนำไปวัดขนาดของโครงสร้างส่วนต่าง ๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์วัดขนาด MICROSCOPE TOOL MAKER ของบริษัท Mitutoyo โดยใช้เลนส์ใกล้วัตถุขนาด 20 เท่า ตัวอย่างการวัดขนาดของคานแสดงดังรูปที่ 5.33 เป็นรูปคานที่มีจุดตัดของแกน x และ y อยู่มุมบนขวา แล้วตั้งค่าแกน x และ y จุดนั้นเป็นศูนย์ แล้วเลื่อนจุดตัดไปมุมล่างซ้ายของคาน จะได้ขนาดความกว้างและความยาวของคาน ทำการวัดขนาด โครงสร้างได้ดังนี้ ก้อนมวลมีความกว้าง 3016 μm ยาว 3009 μm คานสปริงกว้าง 41 μm ยาว 796 μm ระยะห่างระหว่างก้อนมวลกับขั้วไฟฟ้า 20 μm สำหรับความสูงของโครงสร้างสวิตช์ความแรงวัดได้จากไมโครมิเตอร์แบบดิจิตอลรุ่น IP 65 ของบริษัท Mitutoyo ได้ความสูง 368 μm เมื่อแทนค่าขนาดโครงสร้างสวิตช์ความแรงต่าง ๆ ลงในสมการที่ 4.7 จะได้สมการความแรงจุดทำงานของสวิตช์ที่เป็นฟังก์ชันของความสูงก้อนมวลดังสมการที่ 5.2 รูปที่ 5.34 แสดงค่าความแรงจุดทำงานของสวิตช์ เมื่อก้อนมวลมีค่าความสูงต่าง ๆ กัน

$$a = \frac{2.73 \times 10^6 \times d_g \times t_b}{t_m} \text{ (g)} \quad (5.2)$$



รูปที่ 5.33 รูปคานที่มีจุดตัดของแกน x และ y อยู่มุมบนขวา

ในกระบวนการสร้างที่ใช้สร้างก้อนมวลและคานจะมีความหนาแน่นเท่ากัน จากรูปที่ 5.34 เมื่อก้อนมวลความสูง $368\ \mu\text{m}$ เท่ากับคานสปริงจะได้ค่าความเร่งจุดทำงานของสวิตช์เท่ากับ $5.6\ \text{g}$ และเมื่อเพิ่มความสูงก้อนมวลเพิ่มขึ้นตามจำนวนเท่าของความสูงของตัวสวิตช์ ความเร่ง จะได้กราฟเป็นลักษณะกราฟลู่เข้าหาค่าความเร่งจุดทำงานของสวิตช์ประมาณ $1\ \text{g}$

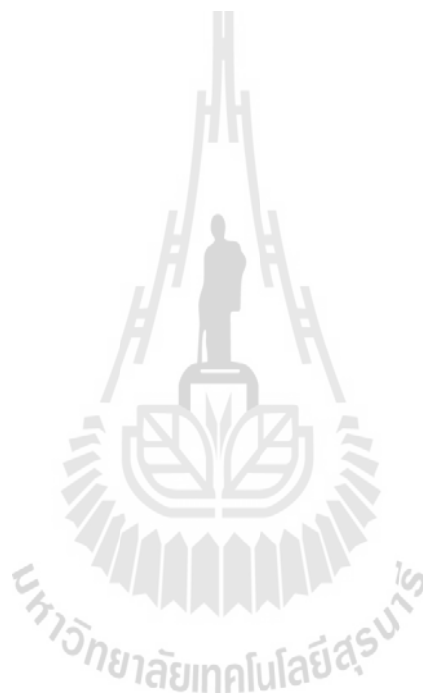


รูปที่ 5.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของก้อนมวลกับความเร่งจุดทำงานของสวิตช์ ความเร่ง ที่ได้จากการสร้างด้วยวิธีการสร้างสวิตช์ความเร่งบนฐานรอง ขั้วคราวแกรไฟต์แล้วนำไปเชื่อมกับจุดยึดบนฐานรองแผ่นวงจรพิมพ์ เมื่อก้อนมวลมีความกว้าง $3016\ \mu\text{m}$ ยาว $3009\ \mu\text{m}$ คานสปริง กว้าง $41\ \mu\text{m}$ ยาว $796\ \mu\text{m}$ สูง $368\ \mu\text{m}$ ระยะห่างระหว่าง ก้อนมวลกับขั้วไฟฟ้าเท่ากับ $20\ \mu\text{m}$

5.3.2 สรุป

กระบวนการสร้างสวิตช์ความเร่งบนฐานรองขั้วคราวแกรไฟต์มีขั้นตอนการสร้างน้อยและไม่ยุ่งยากมากนัก เนื่องจากการสร้างส่วนสวิตช์ความเร่งแยกกันจากจุดยึดตรง ซึ่งถ้าเกิดความผิดพลาดในการสร้างโครงสร้างของชิ้นสวิตช์ความเร่งก็สร้างชิ้นใหม่ได้โดยไม่จำเป็นต้องสร้างจุดยึดตรงทุกครั้งทำให้ประหยัดเวลาการสร้างลงได้ แต่จะพบปัญหาในกระบวนการเชื่อมโครงสร้างสวิตช์ความเร่งกับฐานรองจุดยึดตรง เนื่องจากการเชื่อมต่อด้วยกาวเงินแล้ว นำไปสกัด

แม้พิมพ์สารไวแสงด้วยการพลาสมาเป็นเวลานาน ทำให้กาวเงินถูกกัดเซาะด้วยบางส่วน จึงทำให้ความแข็งแรงของการเชื่อมต่อกันจึงลดลง ทำให้โครงสร้างที่เชื่อมต่ออาจหลุดออกจากกันได้



บทที่ 6

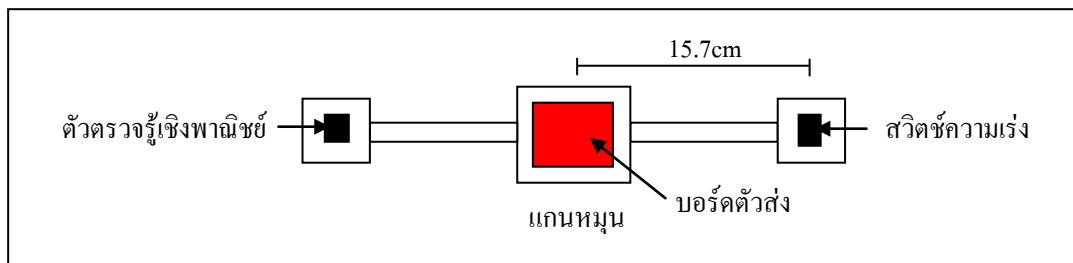
การทดสอบและผลการทดสอบ

เมื่อสร้างสวิตช์ความถี่เสร็จแล้วจึงนำมาทดสอบการทำงาน ซึ่งบทนี้นำเสนอเกี่ยวกับชุดทดสอบความถี่ ผลการทดสอบสวิตช์ความถี่ที่สร้างจากกระบวนการชุนิกเกิดผ่านแม่พิมพ์สารไวแสงลงบนวัสดุชั้นชั่วคราว และสวิตช์ความถี่จากกระบวนการสร้างสวิตช์ความถี่บนฐานรองชั่วคราวเกรดไฟต์ ส่วนการทดสอบสวิตช์ความถี่จะใช้ชุดทดสอบความถี่ ซึ่งใช้หลักการการเคลื่อนที่เป็นวงกลม ทำให้เกิดแรงขึ้นมาสวิตช์หนึ่ง มีทิศพุ่งเข้าหาจุดศูนย์กลางของการหมุน เรียกแรงชนิดนี้ว่า แรงเข้าสู่ศูนย์กลาง แล้วทำให้เกิดความถี่เข้าสู่ศูนย์กลางด้วย ซึ่งชุดทดสอบความถี่เป็นการวัดค่าความถี่เข้าสู่ศูนย์กลาง ชุดขับเคลื่อนชุดทดสอบใช้มอเตอร์ไฟฟ้า แล้วทำการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ด้วยสัญญาณ มอดูเลชันทางความกว้างของพัลส์ (Pulse-width modulation) ที่สร้าง จากบอร์ด ไมโครคอนโทรลเลอร์ ต่อไปจะนำเสนอการทำงานและโปรแกรมควบคุมชุดทดสอบความถี่

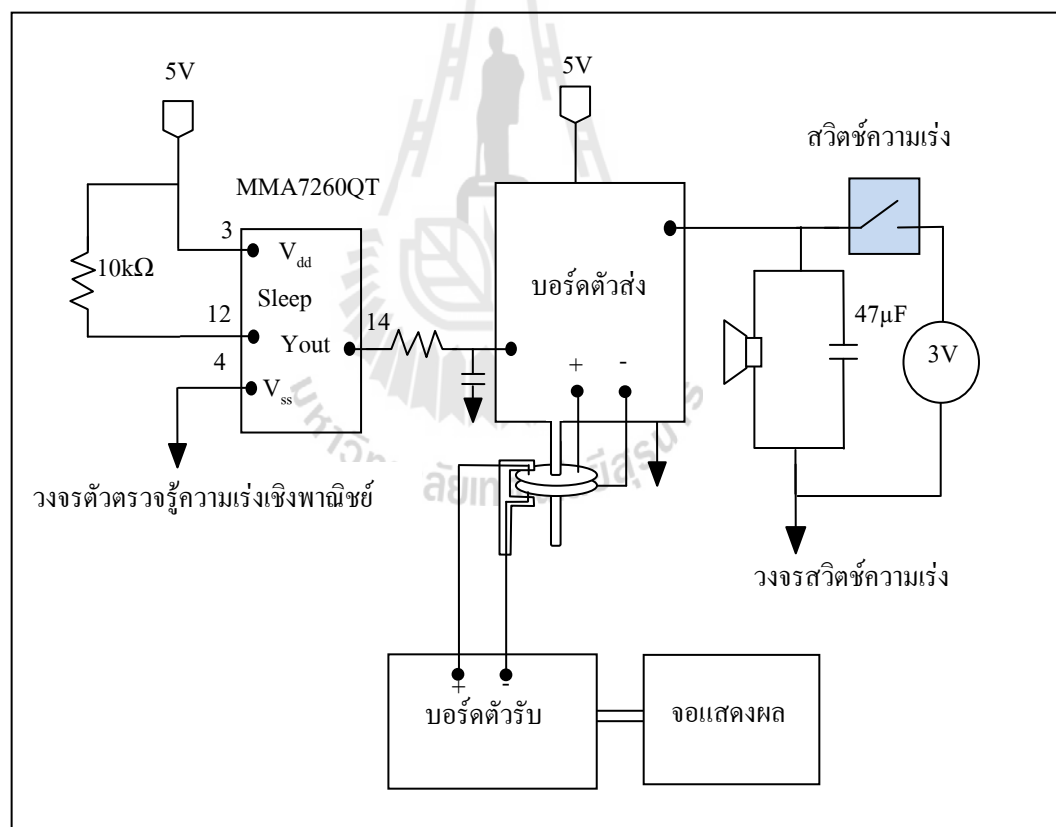
6.1 ชุดทดสอบความถี่

ชุดทดสอบความถี่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเป็นมอเตอร์เกาจากแอร์รถยนต์ ในการขับเคลื่อนให้เกิดการเคลื่อนที่ โดย วางแกนของมอเตอร์ให้ตั้งฉากกับพื้นโลก แกน ด้านหนึ่งต่อกับแขนหมุนที่ทำจากอลูมิเนียม ดังรูปที่ 6.1 บนแขนหมุนประกอบด้วยสวิตช์ความถี่ ตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์และบอร์ดตัวส่งซึ่งใช้บอร์ด ไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-AVR-ST-Atmega128 โดยตำแหน่งสวิตช์ความถี่และตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ห่างจาก แกนมอเตอร์ประมาณ 15.7 เซนติเมตร รูปที่ 6.2 เป็นการต่อวงจรของตัวตรวจรู้ความถี่เชิงพาณิชย์และสวิตช์ความถี่ที่สร้างขึ้นเข้ากับบอร์ดตัวส่ง วงจรตัวตรวจรู้ความถี่ เชิงพาณิชย์ ใช้แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ ต่อเข้าขา V_{dd} กราวด์ต่อเข้าที่ขา V_{ss} ขา sleep ของตัวตรวจรู้สั่งให้ตัวตรวจรู้ทำงานเมื่อป้อนแรงดัน 5 โวลต์ และสั่งให้ตัวตรวจรู้หยุดทำงาน เมื่อป้อนแรงดัน 0 โวลต์ สำหรับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์สามารถวัดความถี่ได้ไม่เกิน 1.5 g โดยสามารถวัดได้สามแกน ซึ่งแกนที่ใช้วัดความถี่เข้าสู่ศูนย์กลางคือแกน y ส่วนวงจรของสวิตช์ความถี่ใช้แรงดันไฟฟ้า 3 โวลต์ โดยใช้สัญญาณเสียงจากลำโพงในการแสดงแสดงผลการทำงาน ของสวิตช์ รวมทั้งยังแสดงผลทางจอคอมพิวเตอร์ การส่งข้อมูลระหว่าง บอร์ดตัวส่งซึ่งถูกติดตั้งอยู่

บนแกนหมุนของมอเตอร์กับบอร์ดตัวรับซึ่งอยู่กับที่ ใช้การส่งผ่าน RS232 โดยต่อสายจากขา TDx ของบอร์ดตัวส่งไปยังขา RDx ของบอร์ดตัวรับแล้วต่อกราวด์เข้าด้วยกัน



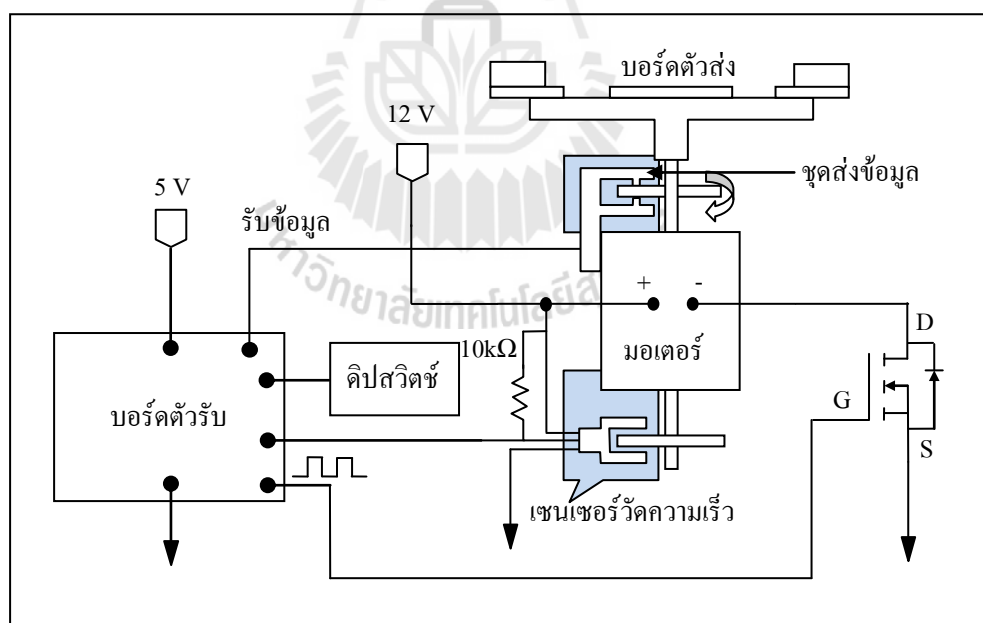
รูปที่ 6.1 ภาพด้านบนของแกนหมุนมอเตอร์



รูปที่ 6.2 วงจรตัวตรวจรู้ความเร่งเชิงพาณิชย์และวงจรสวิตช์ความเร่ง

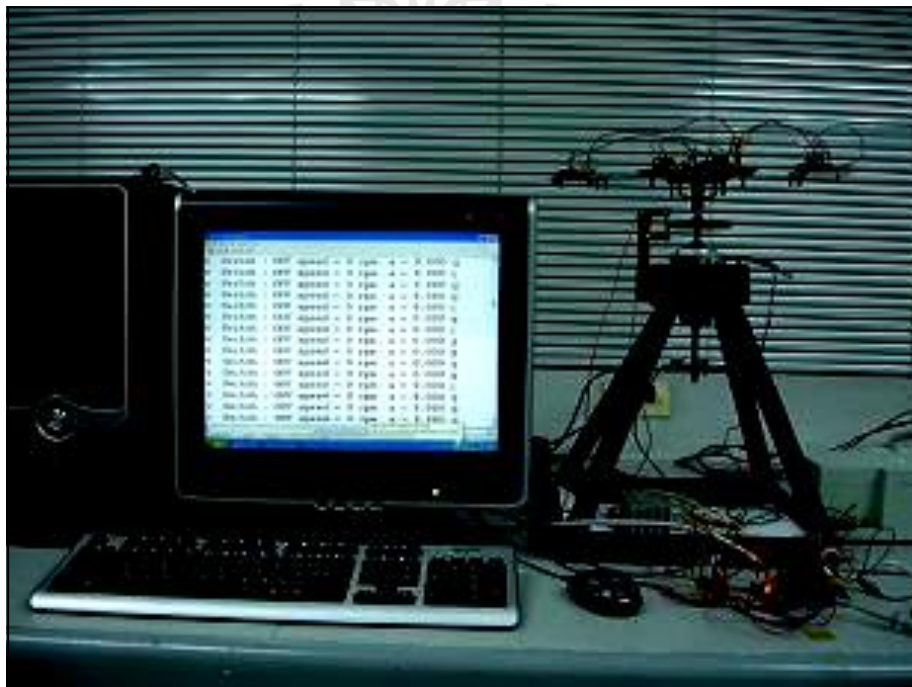


รูปที่ 6.3 ชุดรับส่งข้อมูลของชุดทดสอบความเร่ง



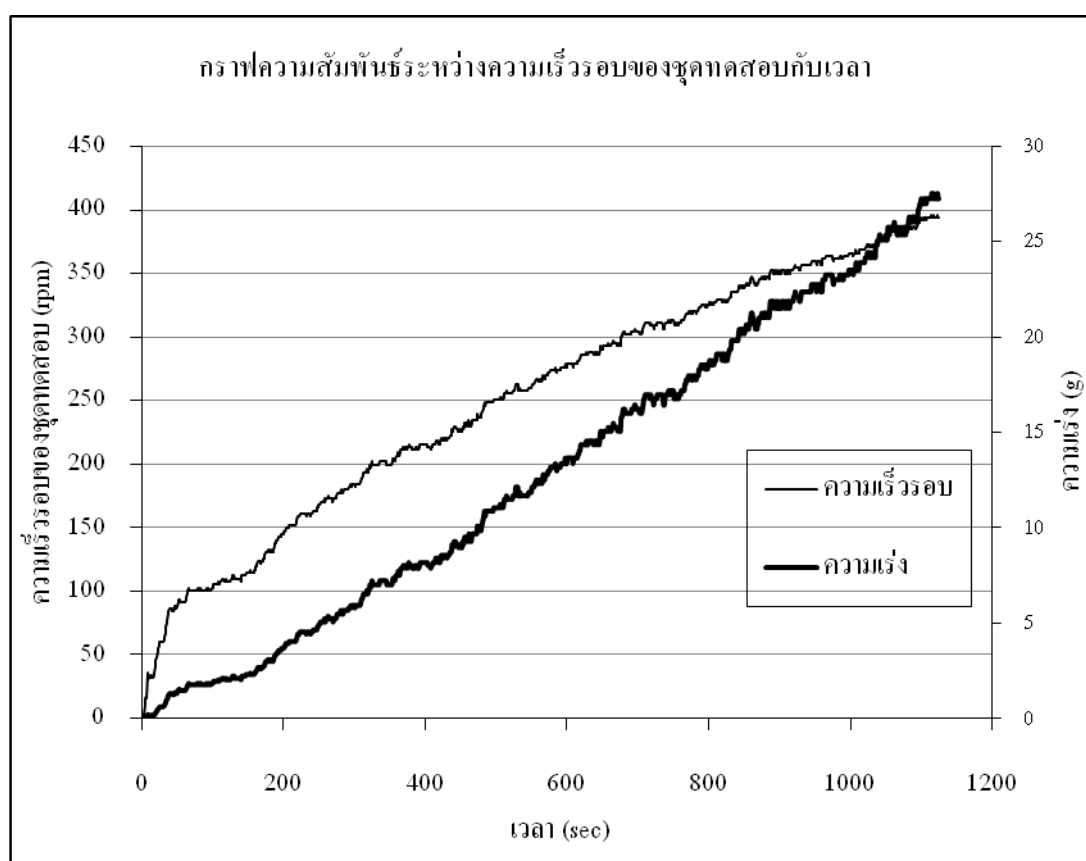
รูปที่ 6.4 วงจรขับเคลื่อนชุดทดสอบความเร่ง

รูปที่ 6.3 เป็นชุดรับส่งข้อมูลประกอบด้วยวงแหวนทองแดงสองวงประกบกันมีฉนวนชั้นตรงกลาง จากนั้นต่อสายสัญญาณจากบอร์ดตัวส่งมายังวงแหวนทองแดงวงบน ต่อสายกราวด์มายังวงแหวนทองแดงวงล่าง จากนั้นตัดแผ่นวงจรพิมพ์ให้เป็นรูปตัวเอฟแล้วต่อสายไฟที่ถูกปกคลุมยางหุ้มสายไฟออก จากนั้นนำมาเชื่อมต่อกับแผ่นวงจรพิมพ์ทั้งแถบบนแล้วแถบล่างแล้วตัดให้สายไฟสัมผัสกับวงแหวนทองแดงทั้งสองวงตลอดเวลา เมื่อมอเตอร์หมุนหน้าสัมผัสทั้งสองสามารถส่งข้อมูลไปยังบอร์ดตัวรับได้ รูปที่ 6.4 เป็นวงจรขับเคลื่อนชุดทดสอบความเร็ว โดยมีบอร์ดตัวรับซึ่งใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ของบริษัท AVR รุ่น ET-base atmega128 ซึ่งมีหน้าที่หลักสามอย่าง คือ การสร้างสัญญาณ มอดูเลชันทางความกว้างของพัลส์ เพื่อใช้ควบคุมความเร็วมอเตอร์ ซึ่งการปรับระดับของสัญญาณ มอดูเลชันทางความกว้างของพัลส์ สามารถปรับได้สองแบบคือ การปรับด้วยมือโดยใช้ดิปสวิตช์ (Dip-switch) ขนาด 8 บิต มีค่าดิจิตอลตั้งแต่ 0-255 และการปรับค่าเพิ่มขึ้นแบบอัตโนมัติโดยตั้งค่าดิจิตอลเริ่มต้นตั้งแต่ 1-159 หน้าที่ต่อมาคือ การรับสัญญาณจากตัวตรวจรู้ความเร็วของมอเตอร์ ของบริษัทโอเมรอน รุ่น EE-SX770A ที่ถูกติดตั้งบริเวณแกนด้านล่างของมอเตอร์ หน้าที่สุดท้ายคือ การรับข้อมูลจากบอร์ดตัวส่งแล้วนำไปแสดงผลบนจอคอมพิวเตอร์ รูปที่ 6.5 เป็นชุดทดสอบความเร็ว



รูปที่ 6.5 ชุดทดสอบความเร็ว

เมื่อติดตั้งชุดทดสอบความเร่งเสร็จแล้วจึงทดสอบการทำงาน โดยใช้การปรับเพิ่มระดับ สัญญาณมอดูเลชันทางความกว้างของพัลส์ แบบอัตโนมัติด้วยค่าดิจิทัลเริ่มตั้งแต่ 1 เพิ่มขึ้นถึง 159 แต่ละค่าใช้เวลา 15 วินาที เพื่อให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วคงที่ก่อนที่จะเพิ่มค่าดิจิทัล ชุดทดสอบความเร่งเริ่มหมุนที่ค่าดิจิทัล 87 แล้วเพิ่มจนถึงค่าดิจิทัล 159 ซึ่งมีค่าความเร็วรอบของชุดทดสอบ 394 รอบต่อนาที หรือมีค่าความเร่ง 27.2 g ค่าจากการทดสอบสามารถวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของชุดทดสอบกับเวลาและความเร่งกับเวลาแสดงดังรูปที่ 6.6 โดยที่กราฟเส้นทึบเป็นความเร็วรอบและเส้นประเป็นความเร่ง

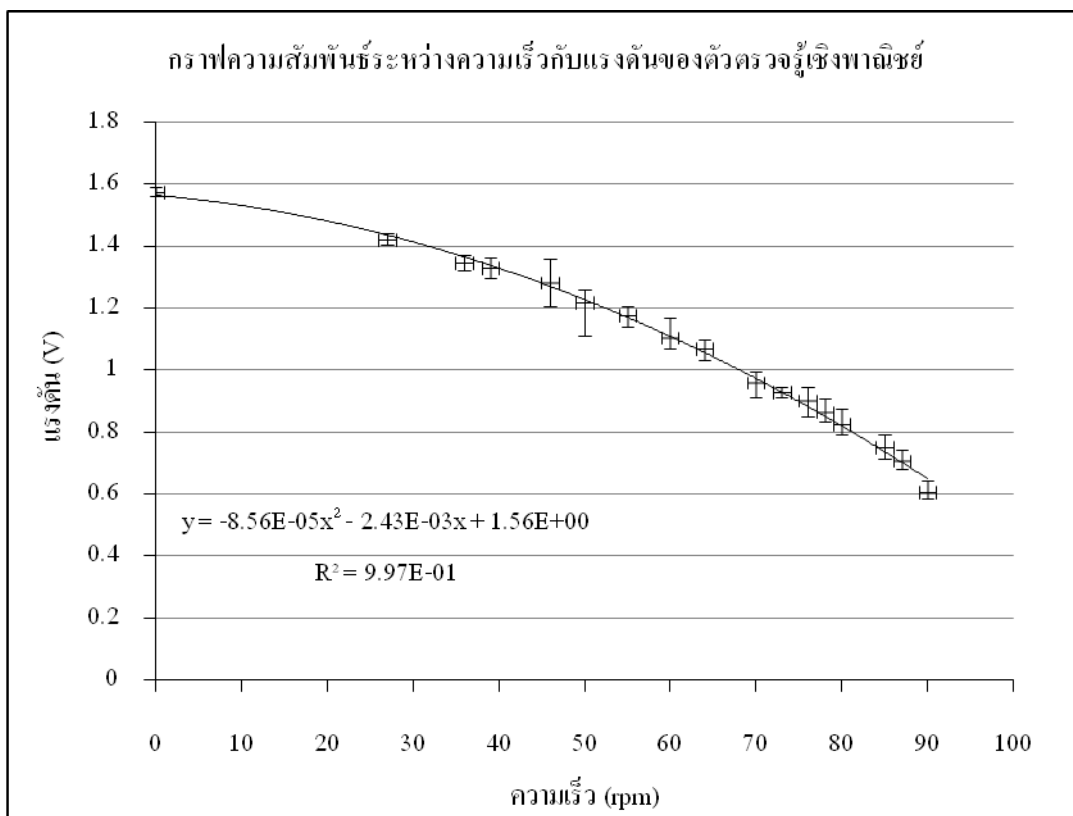


รูปที่ 6.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของชุดทดสอบกับเวลาและความเร่งกับเวลา

การทดสอบตัวตรวจรู้ความเร่งเชิงพาณิชย์ ซึ่งให้เอาต์พุตเป็นค่าแรงดัน (V) โดยเก็บค่าแรงดันจำนวน 15 ค่า แล้วหาค่าเฉลี่ยได้ผลดังตารางที่ 6.1 โดยเทียบกับค่าความเร็วของมอเตอร์จากชุดทดสอบมอเตอร์ (rpm) แล้ววาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับแรงดันเฉลี่ยดังกล่าวเป็นดังรูปที่ 6.7

ตารางที่ 6.1 ผลการทดสอบความเร่งของตัวตรวจรู้ความเร่งเชิงพาณิชย์กับความเร็วชุดทดสอบ

ความเร็ว (rpm)	ค่าแรงดันวัดจากตัวตรวจรู้ความเร่งเชิงพาณิชย์				
	ค่าเฉลี่ย (x)	ค่ามากที่สุด (max)	ค่าน้อยที่สุด (min)	ค่าคลาดเคลื่อนมาก ที่สุด (max-x)	ค่าคลาดเคลื่อนน้อย ที่สุด (x-min)
0	1.572	1.591	1.562	0.019	0.010
27	1.419	1.442	1.401	0.023	0.018
36	1.345	1.372	1.320	0.027	0.025
39	1.328	1.363	1.296	0.035	0.032
46	1.282	1.358	1.206	0.076	0.076
50	1.217	1.257	1.111	0.040	0.106
55	1.175	1.206	1.140	0.031	0.035
60	1.104	1.168	1.069	0.064	0.035
64	1.068	1.097	1.031	0.029	0.037
70	0.958	0.993	0.912	0.035	0.046
73	0.927	0.945	0.910	0.018	0.017
76	0.900	0.945	0.850	0.045	0.050
78	0.864	0.907	0.832	0.043	0.032
80	0.824	0.874	0.793	0.050	0.031
85	0.750	0.793	0.712	0.043	0.038
87	0.707	0.741	0.679	0.034	0.028
90	0.605	0.641	0.584	0.036	0.021



รูปที่ 6.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับแรงดันเฉลี่ยของตัวตรวจรู้ความเร่งเชิงพาณิชย์

จากกราฟรูปที่ 6.7 สามารถหาสมการเส้นแนวโน้มของชุดข้อมูลโดยใช้โปรแกรมเอ็กซ์เซล ได้ดังสมการที่ 6.1 โดยเส้นแนวโน้มมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน 99.7%

$$y = -8.56 \times 10^{-5} x^2 - 2.43 \times 10^{-3} x + 1.56 \quad (6.1)$$

โดยที่ y คือ แรงดันจากตัวตรวจรู้ความเร่งเชิงพาณิชย์
 x คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ (รอบต่อนาที)

จากเอกสารข้อมูลของตัวตรวจรู้ความเร่งเชิงพาณิชย์ สามารถหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับค่าความเร่งได้ดังสมการที่ 6.2

$$y = -0.8a + 1.65 \quad (6.2)$$

โดยที่ y คือ แรงดันจากตัวตรวจรู้ความเร่งเชิงพาณิชย์

A คือ ความเร่งของตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ (g)

จากสมการที่ 6.1 และ 6.2 สามารถหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งของตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์กับความเร็วมอเตอร์ของชุดทดสอบได้ดังสมการที่ 6.3

$$a = 10.7 \times 10^{-5} x^2 - 3.05 \times 10^{-3} x + 0.1125 \quad (6.3)$$

หาค่าความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางของชุดทดสอบ โดยใช้สมการที่ 6.4

$$a = \left(\frac{2\pi n}{T} \right)^2 \times \frac{r}{9.81} \quad (6.4)$$

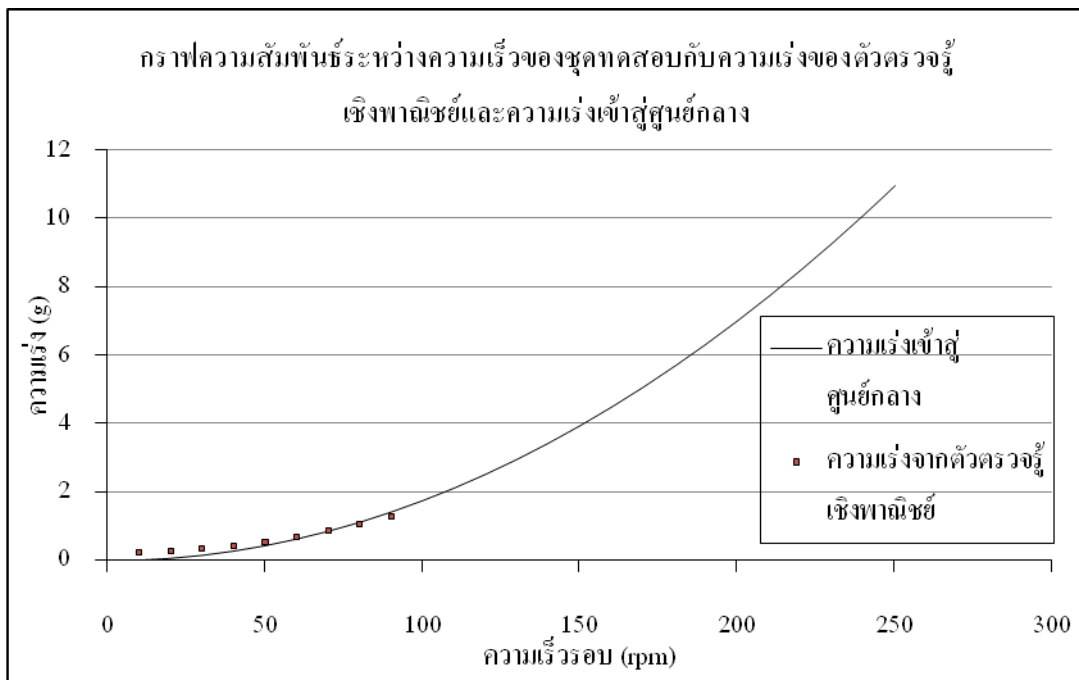
โดยที่ a คือ ค่าความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง (g)

n คือ ความเร็วรอบของชุดทดสอบ (รอบต่อนาที)

T คือ เวลา 60 วินาที

r คือ ระยะห่างจากแกนมอเตอร์ถึงตำแหน่งตัวตรวจรู้มีค่า 0.157 เมตร

เมื่อวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับความเร่งจากตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ในสมการ (6.3) และความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางจากสมการ (6.4) ได้ดังรูปที่ 6.8 ความเร่งที่วัดได้จากตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ในช่วงความเร่งไม่เกิน 1.5 g มีค่าใกล้เคียงกับความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง ดังนั้นจึงใช้สมการ (6.4) ซึ่งเป็นสมการค่าความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง ในการคำนวณหาความเร่งจุดทำงานของสวิตช์ความเร่ง แล้วแสดงผลทางหน้าจอคอมพิวเตอร์

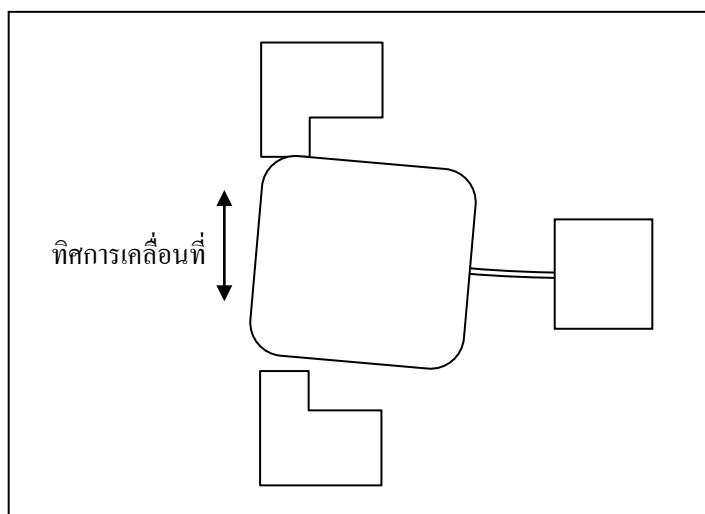


รูปที่ 6.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของชุดทดสอบกับความเร่ง
ของตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์และความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง

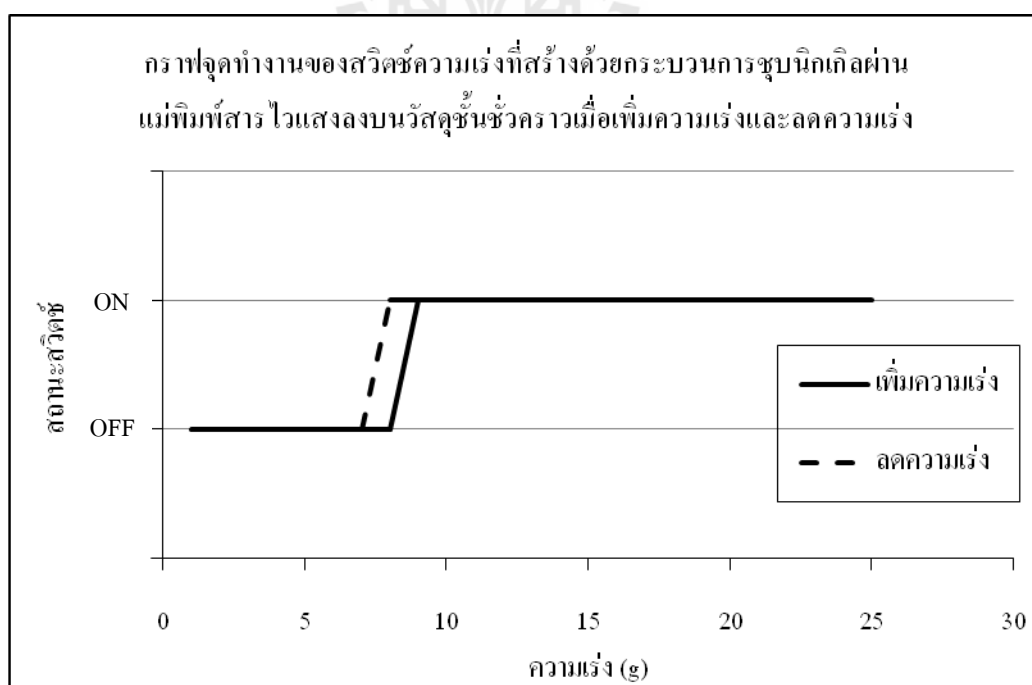
6.2 การวัดผลสวิตช์ความเร่งที่สร้างด้วยกระบวนการชุบนิเกิลผ่านแม่พิมพ์ สารไวแสงลงบนวัสดุชั้นชั่วคราว

การออกแบบขนาดโครงสร้างของสวิตช์ความเร่งมีกอนมวลกว้าง 3000 μm ยาว 3000 μm กอนมีความกว้าง 30 μm ยาว 800 μm ระยะห่างระหว่างกอนมวลกับขั้วไฟฟ้ามีขนาด 30 μm และสูง 500 μm เมื่อทำการสร้างด้วยกระบวนการชุบนิเกิลด้วยไฟฟ้าลงบนชั้นวัสดุชั่วคราว จะได้ขนาดโครงสร้างแสดงดังตารางที่ 6.2 เมื่อนำขนาดโครงสร้างที่วัดได้มาคำนวณหาค่าความเร่งจุดทำงาน โดยใช้สมการที่ 4.7 ได้ค่าความเร่งจุดทำงาน 9.6 g เมื่อนำมาทดสอบการทำงานด้วยชุดทดสอบความเร่ง โดยการวางสวิตช์ความเร่งในแนวนอนดังรูปที่ 6.9 แล้วทำการเพิ่มค่าความเร่งตั้งแต่ 0 g จนถึง 25 g จำนวน 10 ครั้ง ได้ค่าความเร่งจุดทำงานสูงสุดที่ 10.1 g และความเร่งจุดทำงานต่ำสุดที่ 9.1 g เมื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยได้ค่าความเร่งจุดทำงาน 9.5 g จากนั้นทำการทดสอบย้อนกลับโดยการเพิ่ค่าความเร่งจนถึง 25 g แล้วลดค่าความเร่งจนถึง 0 g จำนวน 10 ครั้ง สวิตช์ความเร่งจะเปลี่ยนสถานะจาก “ON” เป็น “OFF” ที่ค่าความเร่งสูงสุด 8.9 g ค่าความเร่งต่ำสุด 8.1 g และค่าความเร่งเฉลี่ย 8.4 g จากการทดสอบพบว่าความเร่งจุดทำงานเมื่อเพิ่มความเร่งมีค่ามากกว่าความเร่งจุดทำงานเมื่อลดความเร่ง เนื่องจากเกิดการแนบติดกัน (Stiction) ของหน้าสัมผัสเป็นผลมาจากแรง

ไฟฟ้าสถิตที่ตกค้างอยู่ในโครงสร้าง รูปที่ 6.10 แสดงกราฟจุดทำงานของสวิตช์ความเร่งเมื่อเพิ่มความเร่งและลดความเร่ง



รูปที่ 6.9 ทิศทางการเคลื่อนที่ของสวิตช์ความเร่ง

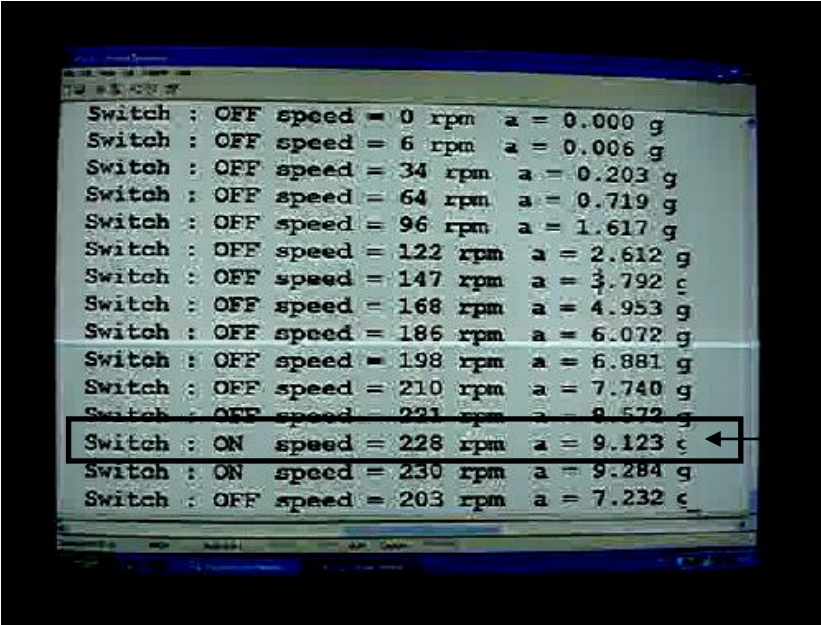


รูปที่ 6.10 กราฟจุดทำงานของสวิตช์ความเร่งขณะเพิ่มความเร่งและลดความเร่ง

ตารางที่ 6.2 ขนาดโครงสร้างสวิตช์ความเร่งจากการออกแบบและการสร้างทั้งสองกระบวนการ
ค่าความเร่งจุดทำงานจากการคำนวณตามขนาดของโครงสร้างและการวัดจริง

ขนาดโครงสร้าง (μm)				
ลักษณะ	การออกแบบ	สวิตช์ความเร่งจาก กระบวนการชุบนิเกิล ผ่านแม่พิมพ์สารไวแสง ลงบนวัสดุชั้นชั่วคราว	สวิตช์ความเร่งจากการสร้างสวิตช์ ความเร่งบนฐานรองชั่วคราวกราฟไฟต์	
			ระยะห่างระหว่าง ก้อนมวลกับ ขั้วไฟฟ้าด้านซ้าย	ระยะห่างระหว่าง ก้อนมวลกับ ขั้วไฟฟ้าด้านขวา
l_m	3000	2997	3009	3009
w_m	3000	3003	3016	3016
l_b	800	804	796	796
w_b	30	36	41	41
d_g	30	51	20	22
T	500	384	368	368
ความเร่งจุด ทำงานจากการ คำนวณ (g)	3.3	9.6	5.6	6.1
ความเร่งจุด ทำงานจากการ วัด (g)	-	9.1	4.5	4.8

รูปที่ 6.1 เป็นรูปการแสดงผลการวัดค่าความเร่งจุดทำงานของสวิตช์ความเร่ง ค่าความเร็ว
มอเตอร์และค่าความเร่ง โดยใช้สมการที่ 6.4 บนหน้าจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งขนาดโครงสร้างที่
คลาดเคลื่อนจากการออกแบบ เกิดจากการสร้างหน้ากากกันรังสีอัลตราไวโอเลตและกระบวนการ
สร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์โดยใช้สารไวแสง AZ ซึ่งการฉายรังสีที่พลังงานแตกต่างกันทำให้ได้
ขนาดโครงสร้างที่แตกต่างกัน



Switch : OFF	speed = 0 rpm	a = 0.000 g
Switch : OFF	speed = 6 rpm	a = 0.006 g
Switch : OFF	speed = 34 rpm	a = 0.203 g
Switch : OFF	speed = 64 rpm	a = 0.719 g
Switch : OFF	speed = 96 rpm	a = 1.617 g
Switch : OFF	speed = 122 rpm	a = 2.612 g
Switch : OFF	speed = 147 rpm	a = 3.792 g
Switch : OFF	speed = 168 rpm	a = 4.953 g
Switch : OFF	speed = 186 rpm	a = 6.072 g
Switch : OFF	speed = 198 rpm	a = 6.881 g
Switch : OFF	speed = 210 rpm	a = 7.740 g
Switch : OFF	speed = 221 rpm	a = 8.572 g
Switch : ON	speed = 228 rpm	a = 9.123 g
Switch : ON	speed = 230 rpm	a = 9.284 g
Switch : OFF	speed = 203 rpm	a = 7.232 g

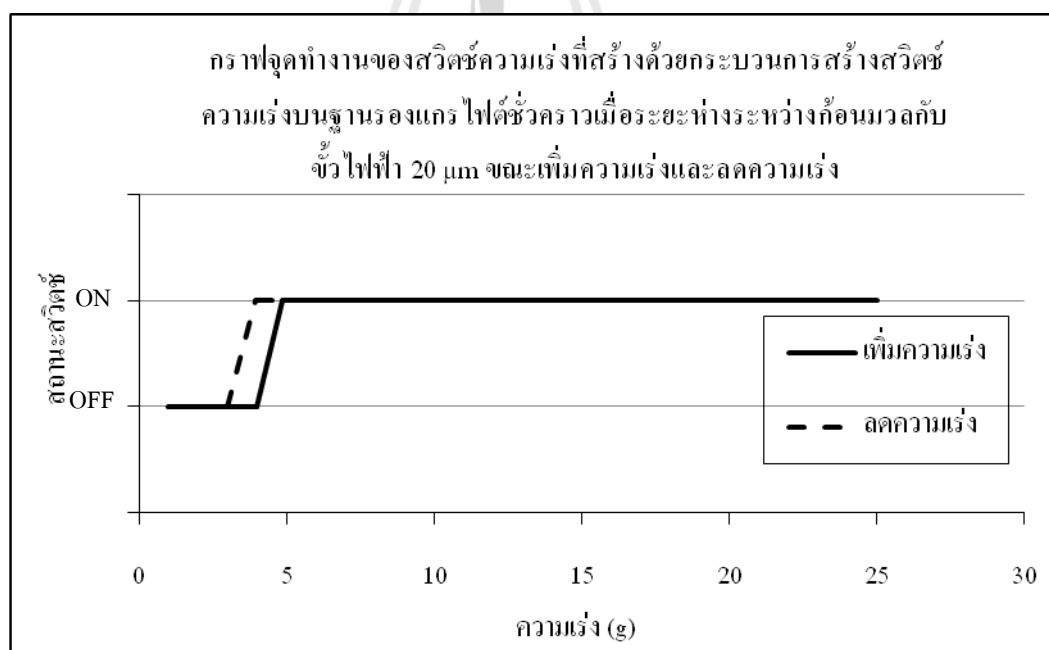
จุดทำงานที่ค่าความเร่ง 9.1g

รูปที่ 6.11 การแสดงผลการทำงานของสวิตช์ความเร่ง เมื่อก่อนมวลมีความกว้าง 3003 μm
 ยาว 2997 μm คานสปริงมีความกว้าง 36 μm ยาว 804 μm ก้อนมวลสูง
 384 μm ระยะห่างระหว่างก้อนมวลกับขั้วไฟฟ้า 51 μm สร้างด้วย
 กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าบนวัสดุชั้นชั่วคราว

6.3 การวัดผลสวิตช์ความเร่งที่สร้างด้วยกระบวนการสร้างสวิตช์ความเร่งบน ฐานรองแกรไฟต์ชั่วคราว

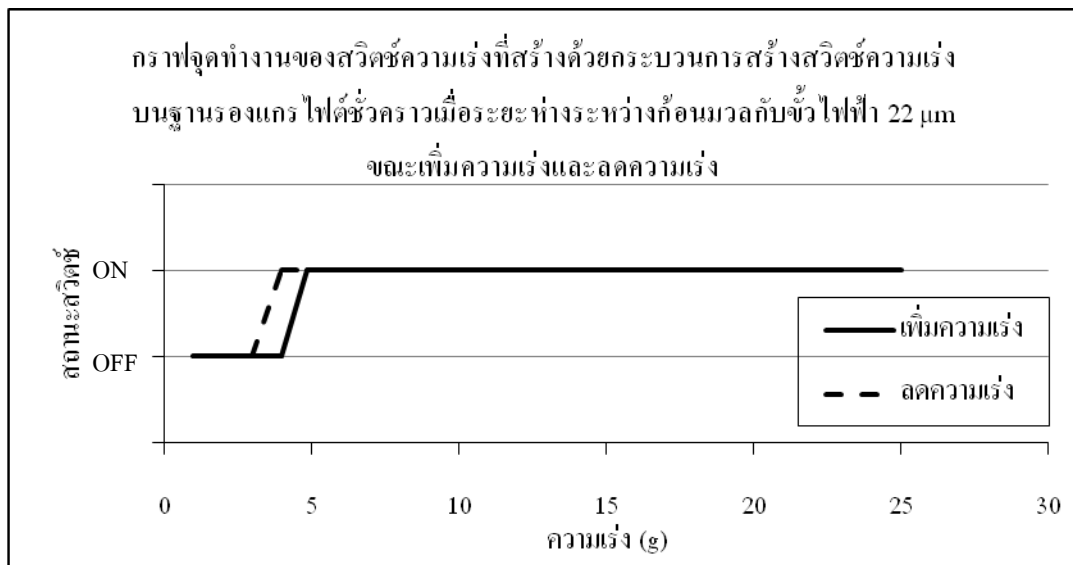
จากขนาดโครงสร้างที่ออกแบบไว้ในบทที่ 4 เมื่อนำมาสร้างด้วยกระบวนการสร้างสวิตช์ความเร่งบนฐานรองแกรไฟต์ชั่วคราว ได้ขนาดโครงสร้างแสดงดังตารางที่ 6.2 เมื่อนำขนาดโครงสร้างที่วัดได้มาคำนวณหาค่าความเร่งจุดทำงานโดยใช้สมการที่ 4.7 โดยระยะห่างระหว่างก้อนมวลด้านซ้ายมีขนาด 20 μm ได้ค่าความเร่งจุดทำงาน 5.6 g นำมาทดสอบการทำงานด้วยชุดทดสอบความเร่ง เมื่อนำมาทดสอบการทำงานด้วยชุดทดสอบความเร่ง โดยการวางสวิตช์ความเร่งในแนวนอนดังรูปที่ 6.9 แล้วทำการเพิ่มค่าความเร่งตั้งแต่ 0 g จนถึง 25 g จำนวน 10 ครั้งได้ค่าความเร่งจุดทำงานสูงสุดที่ 4.7 g และความเร่งจุดทำงานต่ำสุดที่ 4.3 g เมื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยได้ค่าความเร่งจุดทำงาน 4.5 g จากนั้นทำการทดสอบย้อนกลับโดยการเพิ่มค่าความเร่งจนถึง 25 g แล้วลดค่าความเร่งจนถึง 0 g จำนวน 10 ครั้ง สวิตช์ความเร่งจะเปลี่ยนสถานะจาก “ON” เป็น “OFF” ที่ค่าความเร่งสูงสุด 3.7 g ค่าความเร่งต่ำสุด 3.4 g และค่าความเร่งเฉลี่ย 3.6 g และระยะห่างระหว่างก้อน

มวลด้านซ้ายมีขนาด $22\text{ }\mu\text{m}$ ได้ค่าความเร่งจุดทำงาน 6.1 g นำมาทดสอบการทำงานด้วยชุดทดสอบความเร่งจำนวน 10 ครั้ง ได้ค่าความเร่งจุดทำงานสูงสุดที่ 5.0 g และความเร่งจุดทำงานต่ำสุดที่ 4.7 g เมื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยได้ค่าความเร่งจุดทำงาน 4.8 g จากนั้นทำการทดสอบย้อนกลับได้ค่าความเร่งสูงสุด 4.1 g ค่าความเร่งต่ำสุด 3.6 g และค่าความเร่งเฉลี่ย 3.9 g จากการทดสอบพบว่าความเร่งจุดทำงานเมื่อเพิ่มความเร่งมีค่ามากกว่าความเร่งจุดทำงานเมื่อลดความเร่ง เนื่องจากเกิดการแนบติดกัน (Stiction) ของหน้าสัมผัสเป็นผลมาจากแรงไฟฟ้าสถิตที่ตกค้างอยู่ในโครงสร้าง จากนั้นวาดกราฟจุดทำงานของสวิตช์ความเร่งขณะเพิ่มความเร่งและลดความเร่งเมื่อระยะห่างระหว่างก้อนมวลกับขั้วไฟฟ้าด้านซ้ายได้ดังรูปที่ 6.12 และด้านขวาได้ดังรูปที่ 6.13 รูปที่ 6.14 เป็นการแสดงผลการวัดค่าความเร่งจุดทำงานของสวิตช์ความเร่ง ค่าความเร็วมอเตอร์ และค่าความเร่งจากการคำนวณโดยใช้สมการที่ 6.4 บนหน้าจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งขนาดโครงสร้างที่เกิดการคลาดเคลื่อนจากการออกแบบ เกิดจากการสร้างหน้ากากกันรังสีอัลตราไวโอเลตและกระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์โดยใช้สารไวแสง AZ ซึ่งการฉายรังสีลงบนสารไวแสงที่พลังงานแตกต่างกันทำให้ได้ขนาดโครงสร้างที่แตกต่างกัน ดังนั้นขนาดของโครงสร้างจึงเกิดการเปลี่ยนแปลง

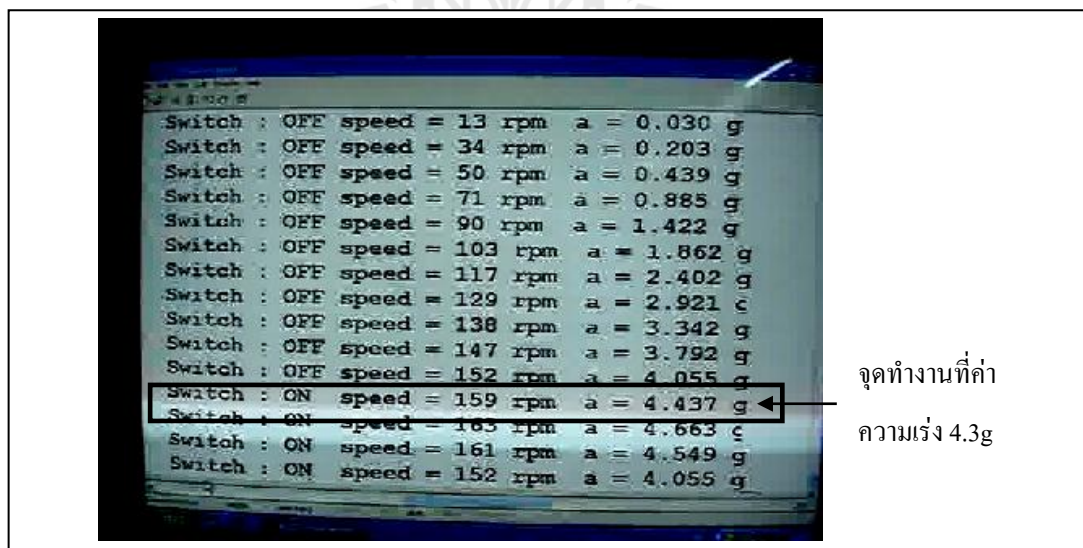


รูปที่ 6.12 กราฟจุดทำงานของสวิตช์ความเร่งที่สร้างด้วยกระบวนการสร้างสวิตช์ความเร่งบนฐานรองแกรไฟต์ชั่วคราวเมื่อระยะห่างระหว่างก้อนมวลกับขั้วไฟฟ้า

เท่ากับ $20\text{ }\mu\text{m}$ ขณะเพิ่มความเร่งและลดความเร่ง



รูปที่ 6.13 กราฟจุดทำงานของสวิตช์ความเร่งที่สร้างด้วยกระบวนการสร้างสวิตช์ความเร่ง
บนฐานรองเกราะไฟด์ชั่วคราวเมื่อระยะห่างระหว่างก้อนมวลกับขั้วไฟฟ้า
เท่ากับ 22 μm ขณะเพิ่มความเร่งและลดความเร่ง



รูปที่ 6.14 การแสดงผลการทำงานของสวิตช์ความเร่งเมื่อก้อนมวลมีความกว้าง 3016 μm
ยาว 3009 μm คานสปริงกว้าง 41 μm ยาว 796 μm สูง 368 μm ระยะห่าง
ระหว่างก้อนมวลกับขั้วไฟฟ้า 20 μm สร้างด้วยกระบวนการ
สร้างสวิตช์ความเร่งบนฐานรองชั่วคราวเกราะไฟด์

6.4 สรุป

ผลจากการวัดค่าความเร่งจุดทำงานของสวิตช์ความเร่งจากกระบวนการชุบนิกเกิลผ่านแม่พิมพ์สารไวแสงลงบนวัสดุชั้นชั่วคราว ได้ค่าความเร่งจุดทำงานจากการทดสอบ 9.5 g แต่เมื่อนำขนาดโครงสร้างมาคำนวณค่าความเร่งจุดทำงานมีค่า 9.6 g ซึ่งเกิดความคลาดเคลื่อน 1% แต่ในระหว่างกระบวนการสร้างยังมีปัญหาหลายประการเช่น การแตกร้าวของฐานรองชิ้นงานที่เป็นกระจก เนื่องกระบวนการสร้างแต่ละกระบวนการใช้เวลานานและเป็นกระบวนการต่อเนื่องและการคำนวณค่าพลังงานที่เหมาะสมจากการฉายรังสีเอ็กซ์ ส่วนผลจากการวัดค่าความเร่งจุดทำงานของสวิตช์ความเร่งจากการสร้างสวิตช์ความเร่งบนฐานรองแกรไฟต์ชั่วคราว เมื่อระยะห่างระหว่างก้อนมวลมีค่า 20 μm ได้ค่าความเร่งจุดทำงาน 4.5 g แต่เมื่อนำขนาดโครงสร้างมาคำนวณค่าความเร่งจุดทำงานมีค่า 5.6 g ซึ่งเกิดความคลาดเคลื่อน 19.6% และระยะห่างระหว่างก้อนมวลมีค่า 22 μm ได้ค่าความเร่งจุดทำงาน 4.8 g แต่เมื่อนำขนาดของโครงสร้างมาคำนวณหาค่าความเร่งจุดทำงานมีค่า 6.1 g ซึ่งเกิดความคลาดเคลื่อน 21.3% ซึ่งกระบวนการสร้างสวิตช์ความเร่งนี้สามารถลดปัญหาการแตกร้าวของฐานรองชิ้นงาน เนื่องใช้เวลาในการสกัดด้วยพลาสมาน้อยลง กระบวนการสร้างแต่ละกระบวนการใช้เวลาน้อย และเป็นกระบวนการสร้างแยกส่วนกันระหว่างส่วนสวิตช์กับจุดยึดตรึงและการฉายรังสีเอ็กซ์สามารถฉายด้วยพลังงานที่สูงกว่าค่าที่เหมาะสมได้เนื่องจากจะการจัดฐานรองแกรไฟต์ออกเมื่อชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าเสร็จแล้ว ส่วนค่าความเร่งที่คลาดเคลื่อนสามารถหาค่าได้จาก การออกแบบขนาดโครงสร้างในครั้งต่อไป

บทที่ 7

สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

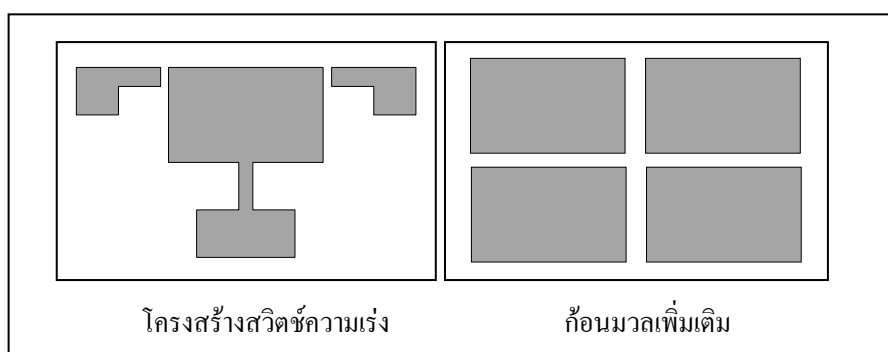
7.1 สรุปงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนากระบวนการสร้าง สวิตซ์ความเร่ง โดยใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ เพื่อเป็นต้นแบบสำหรับการสร้างองค์ความรู้และพัฒนา กระบวนการ สร้างสวิตซ์ความเร่งให้ดียิ่งขึ้น จากการสร้าง สวิตซ์ความเร่ง ที่ผ่านมามี สามวิธี วิธีแรกเป็นกระบวนการสร้างสวิตซ์ความเร่งโดยการ ชุบนิกลึกลับด้วยไฟฟ้าผ่านแม่พิมพ์แบบเวียนกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้แม่พิมพ์เป็นสารไวแสงแล้วเคลือบผิวแม่พิมพ์ด้วยสารไวแสงความหนืดต่ำ จากนั้นชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าผ่านแม่พิมพ์จนเต็ม ล้างสารไวแสงที่เคลือบผิวออกได้โครงสร้างทดสอบนิกลึกลับรูปสี่เหลี่ยม แต่พบว่าหลังจากเคลือบแล้วผิวด้านข้างของแม่พิมพ์ไม่เรียบเสมอกัน ทำให้โครงสร้างมีรูปร่างผิดเพี้ยนไป จึงไม่สามารถนำมาสร้างสวิตซ์ความเร่งได้ ต่อมาเป็นการชุบนิกเกิลผ่านแม่พิมพ์สารไวแสงลงบนวัสดุชั้นชั่วคราว ที่มีขนาดครอบคลุมก่อนมวลและคานโดยใช้กระจกเป็นฐานรองชิ้นงาน แม่พิมพ์สามารถสร้างด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ หลังจากชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าจนเต็มแม่พิมพ์แล้วก็ตัดวัสดุชั้นชั่วคราวออก เพื่อให้ก่อนมวลแขวนลอยอยู่ในอากาศ ทำให้ก่อนมวลและคานแขวนลอยอยู่ในอากาศ เมื่อสร้างสวิตซ์ความเร่งเสร็จแล้ววัดขนาดโครงสร้างมีค่าดังนี้ ก่อนมวลมีความกว้าง 3003 μm ยาว 2997 μm คานสปริงกว้าง 36 μm ยาว 804 μm ก่อนมวลสูง 384 μm ระยะห่างระหว่างก่อนมวลกับขั้วไฟฟ้า 51 μm เมื่อคำนวณ หาค่าความเร่งจุดทำงานจากขนาดที่วัดจริงได้ 9.6 g เมื่อนำมาทดสอบด้วยชุดวัดความเร่ง สวิตซ์ทำงานที่ความเร่ง 9.5 g กระบวนการชุบนิกเกิลผ่านแม่พิมพ์สารไวแสงลงบนวัสดุชั้นชั่วคราว เป็นการสร้างโครงสร้างของสวิตซ์ความเร่งบนวัสดุชั้นเสียสละ ดังนั้นจึงเป็นกระบวนการต่อเนื่อง ถ้าเกิดการผิดพลาดในขั้นตอนการสร้างสวิตซ์ความเร่ง ต้องเริ่มสร้างวัสดุชั้นชั่วคราวใหม่ทุกครั้ง อีกทั้งในระหว่างกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าและการสกัดแม่พิมพ์สารไวแสงด้วยพลาสมา ซึ่งต้องใช้เวลานานทำให้เกิดความร้อนสูง อาจทำฐานรองชิ้นงานแตกร้าวได้ จึงพัฒนามาวิธีสุดท้ายเป็นการสร้างสวิตซ์ความเร่งบนฐานรองชั่วคราวแกรไฟต์ ซึ่งเป็นการสร้างส่วนสวิตซ์ความเร่งแยกส่วนกับจุดยึดตรึง แล้วนำทั้งสองส่วนมาเชื่อมต่อกันด้วยกาวเงิน ส่วนสวิตซ์ความเร่งสร้างด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ลงบนสารไวแสง แล้วชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าผ่านแม่พิมพ์สารไวแสง จัดฐานรองชั่วคราวแกรไฟต์ออกได้แผ่นแม่พิมพ์สารไวแสงที่ฝังโครงสร้างนิกลึกลับของสวิตซ์ความเร่งไว้ สร้างจุดยึดตรึงด้วย

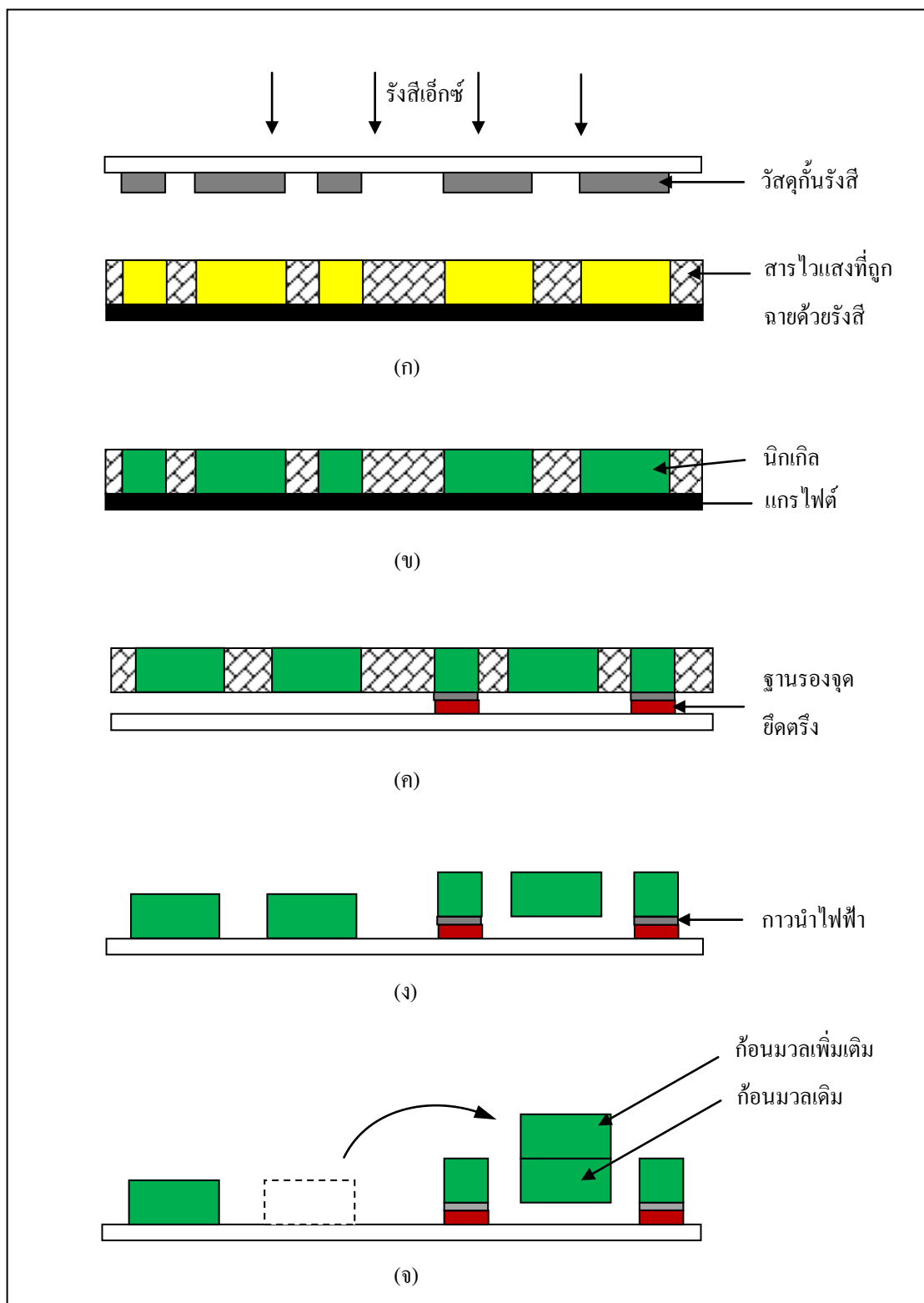
ทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์ออก จากนั้นเชื่อมต่อแผ่นแม่พิมพ์สารไวแสงกับจุดยึดตรึงด้วยกาวเงิน แล้วสกัดแม่พิมพ์สารไวแสงด้วย พลาสมาของออกซิเจนผสมกับคาร์บอนเตตระฟลูออรีน แล้ววัดของขนาดโครงสร้างได้ดังนี้ ก้อนมวลกว้าง 3016 μm ยาว 3009 μm คานกว้าง 41 μm ยาว 796 μm สูง 368 μm ระยะห่างระหว่างก้อนมวลกับขั้วไฟฟ้า 20 μm คำนวณค่าความเร่ง จุดทำงาน ได้ 5.6 g ทดสอบจริงได้ค่าความเร่ง 4.5 g ส่วนระยะห่าง 22 μm คำนวณหาค่าความเร่งได้ 6.1 g แล้วทดสอบจริงได้ 4.8 g ซึ่งกระบวนการนี้ใช้เวลาการสกัดแม่พิมพ์สารไวแสงน้อย เนื่องจากแผ่นแม่พิมพ์สารไวแสงถูกยกให้ลอย จึงสามารถสกัดได้ทั้งสองด้านพร้อมกัน และยังลดปัญหาการแตกร้าวของฐานรองได้อีกทั้งกระบวนการสร้างยังแบ่งเป็นสองส่วน เมื่อเกิด ความ ผิดพลาดในการสร้างโครงสร้างของชิ้นสวิตช์ความเร่ง สามารถสร้างชิ้นใหม่ได้โดยไม่จำเป็นต้องสร้างจุดยึดตรึงทุกครั้ง

7.2 ข้อเสนอแนะ

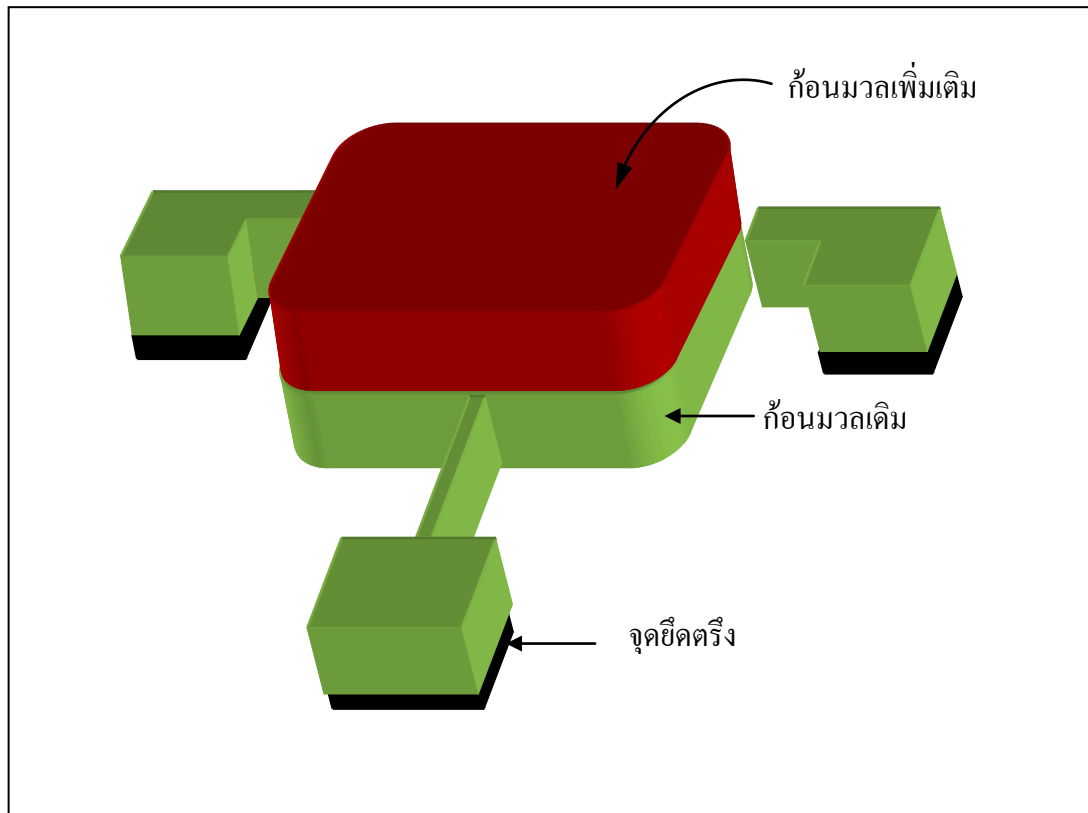
เนื่องจากสวิตช์ความเร่งที่สร้างขึ้นมา ก้อนมวลมีความสูงเท่ากับคานสปริง ทำให้ความสูงของโครงสร้างไม่มีผลต่อค่าความเร่ง แต่ถ้าสามารถเพิ่มความสูงก้อนมวลแล้วคงค่าความสูงของคานไว้ ทำให้ค่าความเร่งมีค่าต่ำลงได้และวิธีที่ง่ายที่สุดคือการสร้างเฉพาะก้อนมวลขึ้นมาพร้อมกับโครงสร้างของสวิตช์ความเร่งดังรูปที่ 7.1 เป็นการออกแบบลดทลายจุลภาคของสวิตช์ความเร่งและก้อนมวลเพิ่มเติมแล้วสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ โดยส่วนที่บดแสงเป็นวัสดุกันรังสีเอ็กซ์ แล้วฉายรังสีเอ็กซ์ลงบนสารไวแสงรังสีดังรูปที่ 7.2 (ก) ล้างสารไวแสงส่วนที่ไม่ได้ถูกฉายด้วยรังสีออกแล้วชุบนิเกิลด้วยไฟฟ้าจนเต็ม ดังรูปที่ 7.2 (ข) ขัดฐานแกรไฟต์ออกได้แผ่นแม่พิมพ์สารไวแสงแล้วสร้างฐานรองจุดยึดตรึงด้วยทองแดง จากนั้นเชื่อมแม่พิมพ์สารไวแสงกับจุดยึดตรึงด้วยกาวนำไฟฟ้างดังรูปที่ 7.2 (ค) แล้วสกัดแม่พิมพ์สารไวแสงออก จะได้โครงสร้างของสวิตช์ความเร่งพร้อมกับก้อนมวลเพิ่มเติมดังรูปที่ 7.2 (ง) เชื่อมก้อนมวลเพิ่มเติมกับก้อนมวลเดิมด้วยกาวนำไฟฟ้า ดังรูปที่ 7.2 (จ)



รูปที่ 7.1 ลวดลายจุลภาคของสวิตช์ความเร่งและก้อนมวลเพิ่มเติม

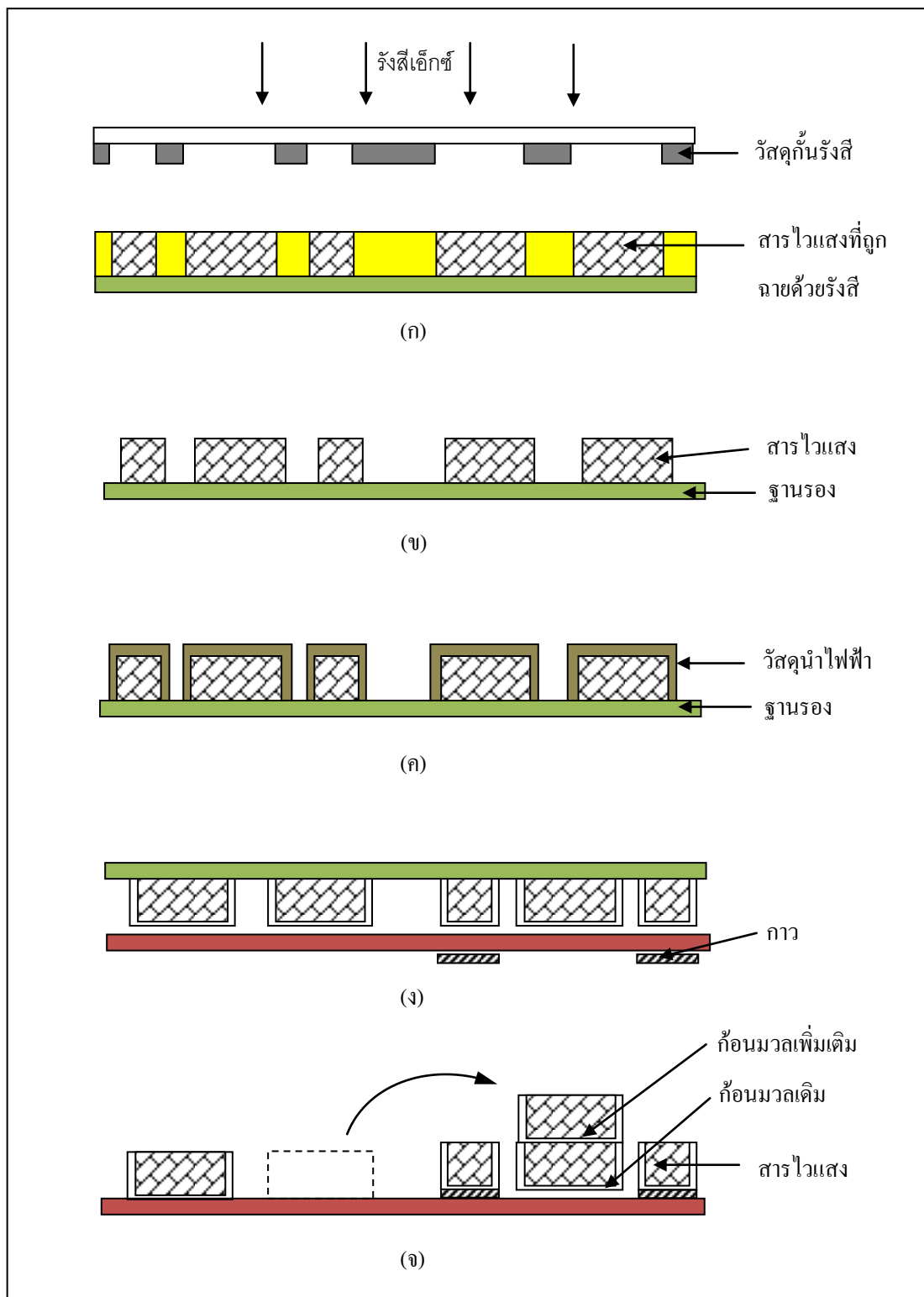


รูปที่ 7.2 กระบวนการสร้างสวิตช์ความแรงด้วยนิกเกิล โดยมีการเพิ่มก้อนมวลบนสวิตช์ความแรง



รูปที่ 7.3 สวิตซ์ความเร่งที่เพิ่มเฉพาะก้อนมวล

รูปที่ 7.3 เป็นโครงสร้างของสวิตซ์ความเร่งที่ต่อก้อนมวลเพิ่มเติมแบบสามมิติ ซึ่งทำให้สวิตซ์ความเร่งสามารถทำงานที่ค่าความเร่งต่ำกว่า $1g$ ได้ แต่มีข้อเสียที่ความสูงของก้อนมวลที่เพิ่มภายหลังมีขนาดเท่ากับโครงสร้างของสวิตซ์ความเร่ง ค่าความเร่งที่ลดลงจึงไม่ละเอียด อีกวิธีหนึ่งคือการฉายรังสีเอ็กซ์ผ่านหน้ากากกั้นรังสีที่มีลวดลายจุดภาคดังรูปที่ 7.1 โดยมีลักษณะวัสดุกันรังสีดังรูปที่ 7.2 (ก) หลังจากล้างสารไวแสงที่ไม่ได้ถูกฉายด้วยรังสีแล้วได้โครงสร้างสวิตซ์ความเร่งเป็นสารไวแสง ดังรูปที่ 7.4 (ข) สเปคโตรริงวัสดุนำไฟฟ้าลงบนโครงสร้างที่เตรียมไว้ ดังรูปที่ 7.4 (ค) แล้วเชื่อมโครงสร้างของสวิตซ์ความเร่งกับฐานรองจุดยึดคตรึงด้วยกาว ดังรูปที่ 7.4 (ง) ทำการกัดฐานของโครงสร้างสวิตซ์ความเร่งออก ได้โครงสร้างของสวิตซ์ความเร่งที่เป็นสารไวแสงแขวนลอยอยู่ในอากาศ แล้วนำก้อนมวลเพิ่มเติมมาต่อกับก้อนมวลของสวิตซ์ความเร่ง ดังรูปที่ 7.4 (จ)



รูปที่ 7.4 กระบวนการสร้างสวิตช์ความเร่งด้วยสารไวแสง SU-8 โดยมีการเพิ่ม
ก้อนมวลบนสวิตช์ความเร่ง

รายการอ้างอิง

- Shamus McNamara and Yogesh B. Gianchandani (1992) **LIGA fabricated 19-element threshold accelerometer array**. Sensors and Actuators A 112. pp.175-183.
- Roylance L.M., and Angell J.B.. (1979). **A batch-fabricated silicon accelerometer**. IEEE Trans. Elec. Dev. ED-26 1911–1917
- Frobenius W.D., Zeitman S.A., White M.H., O’Sullivan D.D., and Hamel R.G., **Microminiature ganged threshold accelerometers compatible with integrated circuit technology**, IEEE Trans. Electron Dev. ED-19 (1) 37–40.
- Selvakumar A., Yazdi N., and Najafi K., **A wide range micromachined threshold accelerometer array and interface circuit**, J. Micromech. Microeng. 11 (2) 118–125.
- Noetzel J., Tonnesen T., Benecke W., Binder J., and Mader G., **Quasianalog accelerometer using microswitch array**, Sensor and actuators A 54. pp.574-578.
- Charles Becnel, Yohannes Destaand, and Kavin Kelly, **Ultra-deep x-ray lithography of densely packed SU-8 feature**, Journal of Microelectronic and microengineering (2005) pp.1242-1246.
- Hyun-Kee Chang, and Yong-Kweon Kim, **UV-LIGA process for high aspect ratio structure using stress barrier and C-shaped etch hole**, Sensors and Actuators (2000) pp. 342-350.
- Maluf N. and Williams, K. (2004). **An Introduction to microelectromechanical systems Engineering** 2nd ed. Norwood, ARTECH HOUSE.
- Guckel H., **High-aspect-ratio micromachining via deep X-ray lithography**, Proc. IEEE 86 (8) (1998) 1586–1593.
- Man P.F., and Mastrangelo C.H., **Surface Micromachined Shock Sensor for Impact Detection**, Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head, 1994, pp. 156–159.
- Loke Y., McKinnon G.H., and Brett M.J., **Fabrication and characterization of silicon micromachined threshold accelerometers**, Sens. Actuators A 29 (1991) 235–240.
- Hibbeler R.C. **Mechanics of materials** 3 th ed. United State of America, Prentice Hall.

ภาคผนวก ก

กระบวนการสร้างสวิตช์ความเร่งบนฐานรองชั่วคราวแกรไฟต์

กระบวนการสร้างสวิตช์ความแรงบนฐานรองชั่วคราวแกรไฟต์

1. เตรียมแผ่นแกรไฟต์ขนาดความกว้าง 1.5 นิ้ว ยาว 1.5 นิ้ว นำมาทำความสะอาดด้วยการชุบเปอร์โซนิคในน้ำดีไอจนกว่าน้ำดีไอไม่ขุ่น แล้วอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 30 นาที แล้วปล่อยให้เย็นถึงอุณหภูมิห้อง
2. เคลือบสารไวแสง SU-8 โดยการหลอมสารไวแสงชนิดผงให้ได้ความหนา 600 μm
3. นำไปฉายรังสีเอ็กซ์ผ่านหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ลงบนสารไวแสงโดยพลังงานที่ผิวล่างสุดของสารไวแสงมีค่า 13000 mJ/cm^2 แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 120 นาที แล้วปล่อยให้อุณหภูมิค่อย ๆ ลดจนถึงอุณหภูมิห้อง
4. นำชิ้นงานไปล้างสารไวแสงที่ไม่ได้ถูกฉายด้วยรังสีออกด้วยน้ำยา SU-8 Developer
5. ทำความสะอาดพื้นผิวภายในหลุมสารไวแสงด้วยพลาสมาของออกซิเจน ที่ความดัน 300 มิลลิทอร์ร์ กำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที แล้วทำการชุบโลหะนิเกิลด้วยไฟฟ้าจนเต็ม
6. เมื่อชุบนิเกิลจนเต็มแม่พิมพ์แล้วขัดผิวสารไวแสงให้เรียบและ ขัดฐานแผ่นแกรไฟต์ออกจนเหลือเฉพาะแผ่นแม่พิมพ์สารไวแสงที่มีโครงสร้างนิเกิลของสวิตช์ความแรงฝังอยู่ภายใน
7. สร้างจุดยึด ตรึง โดยการเคลือบแผ่นฟิล์ม สารไวแสงชนิดแห้ง ลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ขนาดความกว้าง 1 นิ้ว ยาว 1.5 นิ้ว ลอกพลาสติกที่ติดอยู่บนผิวของฟิล์มออกหนึ่งด้าน แล้วประกบติดลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ จากนั้นนำแผ่นวงจรพิมพ์เข้าเครื่องรีดบัตรด้วยความร้อนทำให้แผ่นฟิล์มไวแสงติดกับผิวทองแดงบนแผ่นพิมพ์ลายวงจร
8. ฉายรังสีอัลตราไวโอเลตผ่านลวดลายของจุดยึดตรึงบนฟิล์มขาวดำเป็นเวลา 60 วินาที แล้วล้างฟิล์มบาง ด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตเป็นเวลา 5 นาที กัดผิวทองแดงบนแผ่นพิมพ์ออกด้วยน้ำยากัดลายแผ่นปริน
9. แฉีกาวเงินตรงบริเวณจุดยึดตรึงทั้งสามจุด นำแผ่นแม่พิมพ์สารไวแสงประกบติดโดยจัดตำแหน่งของจุดยึดตรึงทั้งสองขึ้นให้ตรงกัน แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 30 นาที แล้วปล่อยให้อุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง
10. จากนั้นนำชิ้นงานมาสกัดแม่พิมพ์สารไวแสงออกด้วยพลาสมา ของออกซิเจนผสมกับการ์บอเนตอะลูมิเนียมในอัตราส่วนปริมาตร 9 : 1

ภาคผนวก ข

โปรแกรมของบอร์ดตัวรับและตัวส่ง

```

//โปรแกรมของบอร์ดตัวส่ง
#include "SoR_Utils.h"
#include <avr/io.h>
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <util/delay.h>
#include <stdlib.h>
#include <avr/pgmspace.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <inttypes.h>
#include <compat/deprecated.h>
void int_USART1(void);
static int uart1_putchar(char c, FILE *stream);
static FILE uart1_str = FDEV_SETUP_STREAM(uart1_putchar,
NULL, _FDEV_SETUP_WRITE);
#define RX_BUFSIZE 30
#define BAUDRATE 9600 //กำหนดค่าอัตราส่งข้อมูล
#define UBRRVAL ((F_CPU/(BAUDRATE*16UL))-1) //คำนวณค่า UBRR
int main(void)
{
    int_USART1(); // SENT to monitor
    DDRA = (0<<DDA0); // กำหนดขาอินพุต
    cbi(PORTA,0);
    uartInit(); // initialize the UART (serial port)
    rprintfInit(uartSendByte); // initialize rprintf system
    transmit(); //เรียกใช้ฟังก์ชันส่งข้อมูล
return 0; }
//----- USART1-----//
void int_USART1(void)

```

```

{
    UCSR1B = 0x18;
    UCSR1C = 0x06;
    UBRR1H = (unsigned char)(UBRRVAL>>8);
    UBRR1L = (unsigned char)(UBRRVAL&0xFF);
    stdout = &uart1_str; // Set address uart_str to stdout
}

//--- uart putchar1 -----//
static int uart1_putchar(char c, FILE *stream)
{
    if (c == '\a')
    {
        fputs("*ring*\n", stderr);
        return 0;
    }
    if (c == '\n')
        uart1_putchar('\r', stream);
    loop_until_bit_is_set(UCSR1A, UDRE1);
    UDR1 = c;
    return 0;
}

// Send Byte Subroutine
void SendByte(char c) { //Subroutine to send a byte to the UART
// Syntax is SendByte(#); where # is any number
while (!(UCSR0A & (1<<UDRE0))); // Wait until you are able to send a byte
UDR0 = c; // pass the value of the c variable into the UDR , which in turn sends the byte out
        the UART
}

void transmit(void){

```

```

int j,Vs,p,start;
unsigned char r[6];
float v1,v2;
int data;
//การแปลงค่าแอนะล็อกเป็นดิจิทัล
while (1){
    ADMUX = 0x40;
    ADCSRA= 0xC4;
    ADMUX = 0x40;
    ADCSRA= 0xC4;
    p=ADCW;                // ADC -->p
    Vs=1024;                // Vs=1024 ; (ADC = 10 bit)
    v1=p*4.863;
    v2=v1/Vs;
    dtostrf(v2,5,3,r);
    start = 1;
    if ((PINA&(1<<PINA0))==1)
        {      r[5] = '1';      }
    else
        {      r[5] = '0';      }
    SendByte(start);
    for (j=0;j<=5;j++)
    {
        data = r[j];                // put str[] into the variable
        SendByte(data);            // Send data byte
    }
    delay_ms(500);
} //endfor
} //endwhile
}

```

```

// โปรแกรมของบอร์ดตัวรับควบคุมความเร็วชุดทดสอบด้วยดิปสวิทช์
#include "SoR_Utils.h"
#include <avr/io.h>
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <util/delay.h>
#include <stdlib.h>
#include <avr/pgmspace.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <inttypes.h>
#include <compat/deprecated.h>

#define RX_BUFSIZE 30 // Buffer RX
#include "Lib_UART128.c" // Use Module USART ATmega128

char GetByte(void);

/*****ประกาศตัวแปร*****/
unsigned char toggleAM = 0;
unsigned char toggleBM = 0;
unsigned char toggleTOV = 0;
unsigned int Of_T1;
unsigned long int pulse_count=0; // Set Pulse Count
int p, d1, overflow, start_count, duty1, data1, i, start, wait_1sec=0; // wait time for pulse count
unsigned char r[5];
char buf[RX_BUFSIZE];
char buff[6];

/***** Main Functions *****/
int main(void){
    USART_Init(1, 96); // SENT to monitor
    // กำหนดอินพุต
    DDRE = (0<<DDE0);
    cbi(PORTE,0);

```

```

    DDRC = 0x00;
    PORTC = 0xFF;
    DDRD = (0<<DDD4); // (ICP1)
    DDRE = (0<<DDE0);
    DDRE = (1<<DDE3); // กำหนดขาเอาต์พุต (OC3A)
    uartInit(); // initialize the UART (serial port)
    rprintfInit(uartSendByte); // initialize rprintf system
    //Set Register
    // Clear up-counting Set downcounting
    TCCR3A = (1<<COM3A1)|(0<<COM3A0);
    TCCR3A |= (1<<COM3B1)|(0<<COM3B0);
    // Mode 8: PWM,Phase and Frequency Corect (TOP = ICR3A)
    TCCR3B = (1<<WGM33)|(0<<WGM32);
    TCCR3A |= (0<<WGM31)|(0<<WGM30);
    // clk_IO/1 (From prescaler)
    TCCR3B |= (0<<CS32)|(0<<CS31)|(1<<CS30);
    TIMSK = (1<<OCIE3A)|(1<<OCIE3B)|(1<<TOIE3);
    //*****Counter Part*****
    overflow=400;
    start_count=25536;
    TCCR1B = (0<<CS12)|(0<<CS11)|(1<<CS10); // clk_IO/1 (From prescaler) error 0.1%
    TCCR1B |= (1<<ICNC1)|(1<<ICES1);
    TCNT1 = start_count; // Start counter clk_IO/1 (From prescaler)
    TIMSK = (1<<TICIE1); // Input Capture interrupt Enable
    TIMSK |= (1<<TOIE1); // T/C1 Overflow interrupt Enable
    sei(); // Set I-bit global interrupt enable
    //*****End Counter Part*****
    receive();
    return 0;

```

```

}

// The Receive Subroutine
void receive(void)
{
while(1)      {
    b=60;
    while(b<=150){
        delay_ms(40);
        ICR3 = 0x3E80;           // Freq = 500 kHz(TOP = ICR3) = 16000
        p=PINC;
        OCR3A = p*46;
        OCR3B = ICR3;           // Output Compare Register 3 B
        TCNT3 = 0;              // Clear Timer
        sei();                   // Set I-bit global interrupt enable
        start = GetByte();       // รับค่านำร่อง
        if (start == 1)          // เปรียบเทียบค่านำร่อง
        {
            for (i=0;i<=5;i++)
            {
                UDR =0;          //clear UDR
                data1 = GetByte(); // รับข้อมูล
                buff[i] = data1;
            }//end for
        }//endif
    }//endwhile
} //endwhile(1)
} //end sub

// Get Byte Subroutine
char GetByte(void) // Subroutine to get a byte from the UART

```

```

{      //Syntax is var= GetByte(); where var is any variable capable of storing a byte
while((UCSR0A&(1<<RXC0)) == 0); // wait until a byte is received

    return UDR0; // once a byte is received send back to the program the byte
}

/*****Generate PWM Part*****/
/***** Timer/Counter3 Compare Match A Interrupt *****/
ISR (TIMER3_COMPA_vect)
{
    if (toggleAM)
        sbi(PORTA,0);      // Set bit
    else
        cbi(PORTA,0);      // Clear bit
    toggleAM = !toggleAM;
    return;
}

/***** Timer/Counter3 Compare Match B Interrupt */
ISR (TIMER3_COMPB_vect)
{
    if (toggleBM)
        sbi(PORTA,1);      // Set bit
    else
        cbi(PORTA,1);      // Clear bit
    toggleBM = !toggleBM;
    return;
}

/***** Timer/Counter3 Overflow Interrupt */
ISR (TIMER3_OVF_vect)
{
    if (toggleTOV)

```

```

        sbi(PORTA,2);        // Set bit

else

        cbi(PORTA,2);        // Clear bit

toggleTOV = !toggleTOV;

return;

}

/*****End Generate PWM Part*****/

/*****Counter Part*****/

/***** Timer/Counter1 Capture Interrupt *****/

ISR (TIMER1_CAPT_vect)

{

    pulse_count++;

}

/***** Timer/Counter1 Overflow Interrupt *****/

ISR (TIMER1_OVF_vect)

{

    if (wait_1sec>=400)//@128 16MHz clk_IO/1 (From prescaler)

    {

        if (buff[5] == '1')

        {

            printf("\nVoltage = %c%c%c%c%c v  Switch : ON   speed = %lu
rpm",buff[0],buff[1],buff[2],buff[3],buff[4],(pulse_count*60)/26);

            }//endif

        else

        {

            printf("\nVoltage = %c%c%c%c%c v  Switch : OFF   speed = %lu
rpm",buff[0],buff[1],buff[2],buff[3],buff[4],(pulse_count*60)/26);

            }//endelse

```

```
        delay_ms(1);

        pulse_count = 0;  // Clear pulse count

wait_1sec = 0;  // Clear wait 1s
    }

    wait_1sec++;

        TCNT1 = start_count;      // Start counter clk_IO/1 (From prescaler)

    return;

}

//*****End Counter Part*****//
```

```

// โปรแกรมของบอร์ดตัวรับควบคุมความเร็วชุดทดสอบด้วยโปรแกรม
#include "SoR_Utils.h"
#include <avr/io.h>
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <util/delay.h>
#include <stdlib.h>
#include <avr/pgmspace.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <inttypes.h>
#include <compat/deprecated.h>

#define RX_BUFSIZE 30 // Buffer RX
#include "Lib_UART128.c" // Use Module USART ATmega128

char GetByte(void);

/*****ประกาศตัวแปร*****/
unsigned char toggleAM = 0;
unsigned char toggleBM = 0;
unsigned char toggleTOV = 0;
unsigned int Of_T1;
unsigned long int pulse_count=0; // Set Pulse Count
int p, d1, overflow, start_count, duty1, data1, i, start, wait_1sec=0; // wait time for pulse count
unsigned char r[5];
char buf[RX_BUFSIZE];
char buff[6];

/***** Main Functions *****/
int main(void){
    USART_Init(1, 96); // SENT to monitor
    // กำหนดอินพุต
    DDRE = (0<<DDE0);

```

```

    cbi(PORTE,0);
    DDRC = 0x00;
    PORTC = 0xFF;
    DDRD = (0<<DDD4);                // (ICP1)
    DDRE = (0<<DDE0);
    DDRE = (1<<DDE3);                // กำหนดขาเอาต์พุต (OC3A)
    uartInit();                      // initialize the UART (serial port)
    rprintfInit(uartSendByte);       // initialize rprintf system

    // Clear up-counting Set downcounting
    TCCR3A = (1<<COM3A1)|(0<<COM3A0);
    TCCR3A |= (1<<COM3B1)|(0<<COM3B0);
    // Mode 8: PWM,Phase and Frequency Corect (TOP = ICR3A)
    TCCR3B = (1<<WGM33)|(0<<WGM32);
    TCCR3A |= (0<<WGM31)|(0<<WGM30);
    // clk_IO/1 (From prescaler)
    TCCR3B |= (0<<CS32)|(0<<CS31)|(1<<CS30);
    TIMSK = (1<<OCIE3A)|(1<<OCIE3B)|(1<<TOIE3);

    /*******End Generate PWM Part*****
    /*******Counter Part*****

    overflow=400;
    start_count=25536;
    TCCR1B = (0<<CS12)|(0<<CS11)|(1<<CS10); // clk_IO/1 (From prescaler) error 0.1%
    TCCR1B |= (1<<ICNC1)|(1<<ICES1);
    TCNT1 = start_count;                // Start counter clk_IO/1 (From prescaler)
    TIMSK = (1<<TICIE1);                // Input Capture interrupt Enable
    TIMSK |= (1<<TOIE1);                // T/C1 Overflow interrupt Enable
    sei();                             // Set I-bit global interrupt enable

    /*******End Counter Part*****
    receive();

```

```

return 0;}

// The Receive Subroutine
void receive(void)
{
while(1)      {
    b=60;
    while(b<=150){
        delay_ms(40);
        ICR3 = 0x3E80;           // Freq = 500 kHz(TOP = ICR3) = 16000
        p=PINC;
        OCR3A = p*46;
        OCR3B = ICR3;           // Output Compare Register 3 B
        TCNT3 = 0;              // Clear Timer
        sei();                  // Set I-bit global interrupt enable
        start = GetByte();      // รับค่านำร่อง
        if (start == 1)        // เปรียบเทียบค่านำร่อง
        {
            for (i=0;i<=5;i++)
            {
                UDR =0;         //clear UDR
                data1 = GetByte(); // รับข้อมูล
                buff[i] = data1;
            }//end for
        }//endif
    }//endwhile
} //endwhile(1)
} //end sub

// Get Byte Subroutine
char GetByte(void) // Subroutine to get a byte from the UART

```

```

{
    //Syntax is var= GetByte(); where var is any variable capable of storing a byte

while((UCSR0A&(1<<RXC0)) == 0); // wait until a byte is received
    return UDR0; // once a byte is received send back to the program the byte
}

/*****Generate PWM Part*****/
/***** Timer/Counter3 Compare Match A Interrupt*****/
ISR (TIMER3_COMPA_vect)
{
    if (toggleAM)
        sbi(PORTA,0);    // Set bit
    else
        cbi(PORTA,0);    // Clear bit
    toggleAM = !toggleAM;
    return;
}

/***** Timer/Counter3 Compare Match B Interrupt */
ISR (TIMER3_COMPB_vect)
{
    if (toggleBM)
        sbi(PORTA,1);    // Set bit
    else
        cbi(PORTA,1);    // Clear bit
    toggleBM = !toggleBM;
    return;
}

/***** Timer/Counter3 Overflow Interrupt */

```

```

ISR (TIMER3_OVF_vect)
{
    if (toggleTOV)
        sbi(PORTA,2);    // Set bit
    else
        cbi(PORTA,2);    // Clear bit
    toggleTOV = !toggleTOV;
    return;
}

/*****End Generate PWM Part*****/
/*****Counter Part*****/
/***** Timer/Counter1 Capture Interrupt *****/
ISR (TIMER1_CAPT_vect)
{
    pulse_count++;
}

/***** Timer/Counter1 Overflow Interrupt *****/
ISR (TIMER1_OVF_vect)
{
    if (wait_1sec >= 400) // @128 16MHz clk_IO/1 (From prescaler)
    {
        c = 1;
        while (c <= 10) {
            delay_ms(10000);
            delay_ms(3000);
            if (buff[5] == '1')
            {
                printf("\nVoltage = %c%c%c%c%c v Switch : ON speed = %lu rpm\n",
                    a = %s g b = %d", buff[0], buff[1], buff[2], buff[3], buff[4], v, a, b);
            }
        } //endif
    }
}

```

```

        else
        {
            printf("\nVoltage = %c%c%c%c%c v Switch : OFF speed = %lu rpm
a = %s g b = %d",buff[0],buff[1],buff[2],buff[3],buff[4],v,a,b);
        }//endelse
        c = c+1;}

        b=b+1;

        delay_ms(1);

        pulse_count = 0; // Clear pulse count
wait_1sec = 0; // Clear wait 1s
    }
    wait_1sec++ ;

        TCNT1 = start_count; // Start counter clk_IO/1 (From prescaler)

        return;
}

//*****End Counter Part*****//

```

ภาคผนวก ค

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

Promwikorn S., Chathirat N., Atiwongsangthong N., Muanghlua R., Titiroongruang W., Niemchareon S., Songsiriritthigul P., Klysubun P., and Chomnawang N., "**Transfer of Metallic High-Aspect-Ratio Microstructures using Hard LIGA Stencil**", International Conference on Materials for Advanced Technologies 2007 (ICMAT 2007), Symposium N Synchrotron Radiation for Making and Measuring Materials, Singapore, July 1-6, 2007

Phatthanakun R., Mapato M., Wanburee W., Promwikorn S., Chathirat N., Klysubun P., Songsiriritthigul P., and Chomnawang N., "**Copier transparent Support for X-ray Mask Absorbers**", International Conference on Materials for Advanced Technologies 2007 (ICMAT 2007), Symposium N Synchrotron Radiation for Making and Measuring Materials, Singapore, July 1-6, 2007

Transfer of Metallic High-Aspect-Ratio Microstructures Using Hard LIGA Stencil

S. Promwikorn¹, N. Chathirat², N. Atiwongsangthong³, R. Muanghlua³, W. Titiroongruang³, S. Niemcharoen³, P. Songsiriritthigul^{1,2}, P. Klysubun² and N. Chomnawang^{1,2}

¹*Suranaree University of Technology, Thailand*

²*National Synchrotron Research Center, Thailand*

³*King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand*

Synchrotron radiation in x-ray region has been used in fabrication of high-aspect-ratio microstructures with LIGA processes. Due to limited access to synchrotron light sources, low-cost methods to replicate a large number of microstructures from a LIGA fabricated master are desirable. Traditional methods including hot embossing and injection molding have limitations in replication of metallic microstructures. Metal electroplating through disposable polymer stencil bonded to a conductive substrate has also been proposed. However, a large degree of shape-distortion can easily occur at narrow regions of polymeric stencil. In this paper, we propose a novel replication method of metallic microstructures using a reusable hard LIGA stencil with low shape-distortions at narrow regions.

A hard LIGA stencil is fabricated by coating a thick SU-8 film on a conductive substrate and patterning this thick film by x-ray lithography. Cavities in the thick film obtained after development are filled with electroplated nickel. After removal of SU-8 thick film in remover solution followed by O₂/CF₄ plasma cleaning, the thick nickel plate is detached from the substrate for use as a hard LIGA stencil. The holes in stencil plate reflect shapes of desired microstructures.

Transfer of microstructures is done in ambient yellow light by dipping a hard LIGA stencil in low-viscosity SU-8 2002 photoresist. The stencil is suspended in air until excessive photoresist drops away. The soaked stencil is attached to a conductive substrate and dried in an oven. Cavities surrounded by insulated LIGA stencil are then filled with electroplated metal. Since the hard LIGA stencil is passivated by unexposed SU-8 2002, it can be released from the substrate and microstructures by dipping in stirred SU-8 developer. Hard LIGA stencil released by this method can be reused repeatedly with negligible wear.

Copier Transparency as a Transparent Support for X-Ray Mask Absorbers

R. Phatthanakun^{1,2}, M. Mapato^{1,2}, W. Wanburee^{1,2}, S. Promwikorn¹, N. Chathirat², P. Songsiriritthigul^{1,2}, P. Klysubun² and N. Chomnawang^{1,2}

¹*Suranaree University of Technology, Thailand*

²*National Synchrotron Research Center, Thailand*

Recently, SU-8 photoresist has been used in x-ray lithography. Due to its high sensitivity, SU-8 thick film requires much less exposure time than PMMA photoresist. This reduces fabrication cost of LIGA microstructures and devices significantly. Traditional x-ray mask contains an absorber pattern on a thin graphite support. It can withstand heat accumulated in x-ray mask during long exposure. Unfortunately, graphite sheet is opaque to visible light and mask alignment needed in fabrication of multilayer LIGA microstructures is difficult. Since short exposure time is required by SU-8 photoresist, negligible heat is accumulated in an x-ray mask. Therefore, non-graphite transparent materials can be used to allow x-ray mask alignment. Although polyimide sheet has been used as absorber support of an x-ray mask, the membrane is still not transparent enough. Furthermore, a typical 25 micron-thick polyimide installed on a frame can deform easily. Obviously, absorber support with more transparency and less deformation is desirable. This paper demonstrates use of a transparency sheet for a plain paper copier as a transparent support for x-ray absorber that allow easy alignment for multilayer LIGA devices.

In fabrication of transparent x-ray mask, a sheet of 100 micron-thick transparency film for copier machine is coated with Ti/Cu plating base followed by electroplating of a thin nickel layer on top of Cu layer. The film is spin-coated by SU-8 2025 onto nickel layer and a pattern of microstructures is transferred and developed. Metal absorber is filled in the mold and photoresist is stripped in SU-8 remover. Etching of Ti/Cu/Ni plating base resulting in a perfectly transparent x-ray mask membrane. X-ray exposure with the fabricated mask gives a good microstructures. Fabrication of multilayer polymer microparts is also demonstrated.

ประวัติผู้เขียน

นาย สุภกิตต์ พรหมวิกร เกิดเมื่อวันที่ 4 สิงหาคม พ.ศ. 2525 ที่อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษา จากโรงเรียนแสงทองวิทยา มัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนหาดใหญ่วิทยาลัยสมบูรณ์กุลกัลยา มัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนหาดใหญ่วิทยาลัย จังหวัดสงขลา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2548 จากนั้นได้เข้าศึกษาระดับมหาบัณฑิตในสาขาวิชาเดียวกัน ขณะศึกษาได้ทำงานวิจัยด้านระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS) โดยทำการพัฒนาและสร้างสวิตช์ความเร่ง โดยใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษาดังภาคผนวกค. และได้อสอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จำนวน 4 รายวิชา ดังนี้ (1) Electrical Engineering Laboratory I (2) Engineering Electronics Laboratory (3) Control Systems Laboratory และ (4) Circuits & Devices Laboratory เป็นเวลา 4 ปี