บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

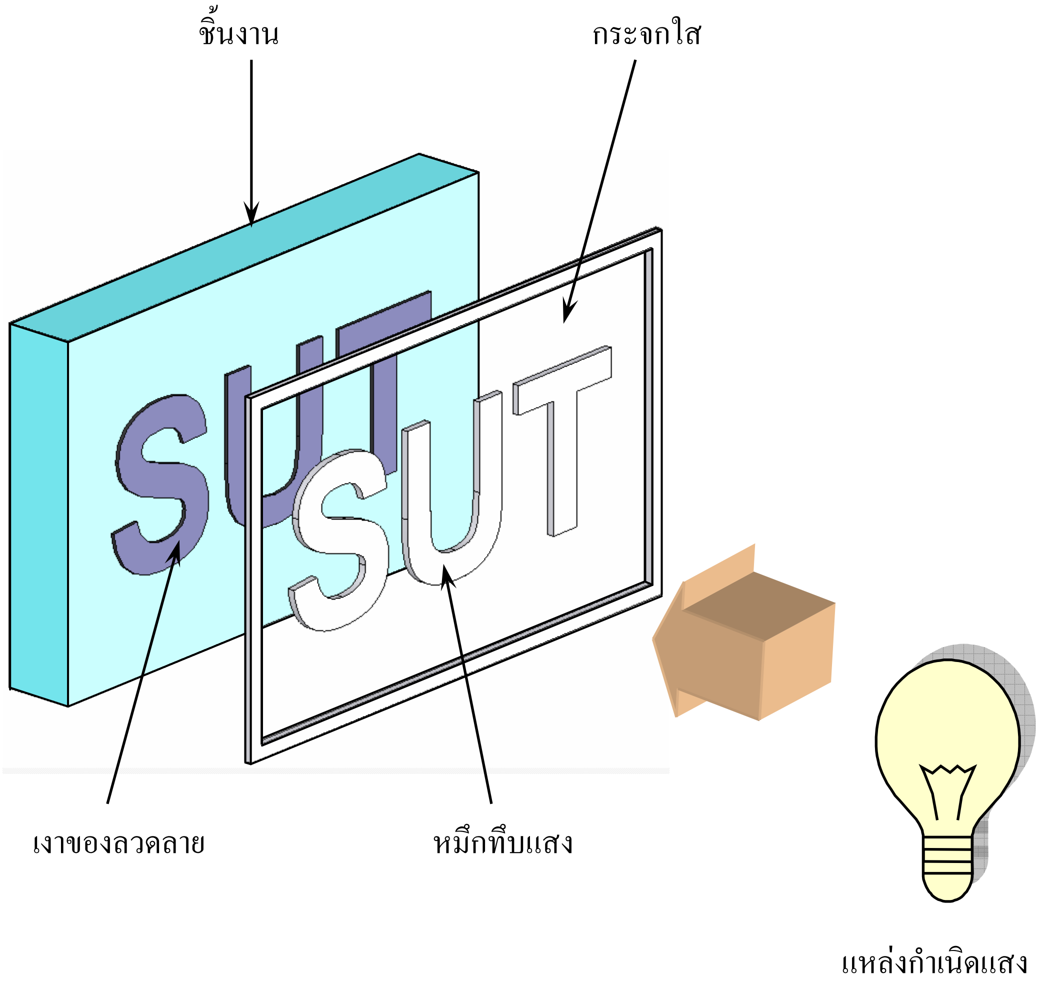
ในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านต่าง ๆ ได้มีการพัฒนาให้ก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วในทุก ๆ ด้าน สิ่งประดิษฐ์หรืออุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้งานในปัจจุบันนั้น ได้มีการย่อขนาดให้เล็กลงไปอย่างมากในขณะที่ประสิทธิภาพในการทำงานยังคงอยู่เหมือนเดิม หรืออาจมีประสิทธิภาพมากขึ้นอีกด้วย ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เทคโนโลยีในโลกปัจจุบันพัฒนาไปข้างหน้าอย่างไม่หยุดยั้ง เหตุเพราะเราสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้สิ่งประดิษฐ์ โดยที่ไม่เพิ่มขนาดของสิ่งประดิษฐ์นั้น ๆ ยกตัวอย่างเช่น ไมโครโปรเซสเซอร์ ณ ปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีให้สามารถที่จะบรรจุทรานซิสเตอร์จำนวนหลายล้านตัวลงบนไมโครชิพที่มีขนาดเพียงแค่เกือบเท่าเหรียญบาทเท่านั้น ส่งผลให้เครื่องคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันนั้นมีประสิทธิภาพในการประมวลผลอย่างมหาศาล บนตัวเครื่องที่มีขนาดเพียงแค่กล่องกล่องเดียว ซึ่งเมื่อเทียบกับคอมพิวเตอร์รุ่นแรกแล้ว จะเห็นว่าคอมพิวเตอร์รุ่นแรกนั้นมีขนาดเท่ากับห้องหนึ่งห้องเลยทีเดียว หรือจะเป็นหน่วยความจำที่ปัจจุบันมีขนาดเล็กลงอย่างมากในขณะพื้นที่หน่วยความจำมากขึ้นอย่างมาก ดังนั้นจึงได้มีนักวิจัยที่เล็งเห็นถึงประโยชน์ของการพัฒนาเทคโนโลยีให้มีขนาดเล็ก และได้มีการคิดค้นกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์ระดับจุลภาคขึ้น ซึ่งเรียกว่าระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (Micro-Electro-Mechanical Systems) หรือ MEMS ซึ่งเป็นการสร้างเครื่องจักรกลหรืออุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กถึงระดับไมโครเมตร โดยที่ยังสามารถคงลักษณะในการทำงานได้เทียบเท่ากับเครื่องจักรกลหรืออุปกรณ์ในลักษณะเดียวกันที่มีขนาดใหญ่กว่า และในกระบวนการสร้างนั้น ใช้เทคโนโลยีที่พัฒนามาจาก เทคโนโลยีการผลิตวงจรรวม (Integrated Circuits: IC) โดยระบบจะประกอบไปด้วยระบบจักรกลในการขับเคลื่อนการทำงาน และส่วนของระบบไฟฟ้าต้นกำลังในกรณีที่เป็นระบบขับเคลื่อนจุลภาค (Microactuator) หรือส่วนของไฟฟ้าสำหรับตรวจรู้การเปลี่ยนแปลงในกรณีที่เป็นระบบตรวจรู้จุลภาค (Microsensor) ซึ่งทั้งส่วนจักรกลและส่วนของไฟฟ้าจะทำงานร่วมกัน ในการสร้างระบบดังกล่าวเรียกว่าเป็นกระบวนการผลิตโครงสร้างจุลภาค (Microfabrication) และในปัจจุบัน ความต้องการในการผลิตอุปกรณ์ขนาดเล็กได้เพิ่มมากขึ้น และมีผู้คิดค้นกระบวนการสร้าง เพื่อให้ได้อุปกรณ์ที่มีคุณภาพ ประสิทธิภาพสูงและต้นทุนการผลิตที่ลดลง ดังนั้นกระบวนการสร้างชิ้นงานแบบใหม่จึงได้รับการพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง

กระบวนการในการผลิตโครงสร้างจุลภาคนั้น วิธีที่ใช้อย่างแพร่หลายคือวิธีการสร้างโครงสร้างด้วยการฉายแสงลงบนสารไวแสงเพื่อทำเป็นแม่พิมพ์ต้นแบบในการผลิต โดยแสงในย่านอัลตราไวโอเลตถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย และมีประโยชน์อย่างมากในกระบวนการสร้างวงจรรวม แต่กระบวนการที่สร้างด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตนั้นอุปกรณ์หรือชิ้นงานที่สร้างขึ้นนั้น จะเป็นชิ้นงานในลักษณะสองมิตินั่นคือความสูงของชิ้นงานนั้นถูกจำกัดอยู่ที่ความสูงไม่มากนัก แต่ในการสร้างโครงสร้างนั้น มีโครงสร้างหลายชนิดที่ต้องการสร้างให้ได้ความสูงมาก ๆ เพื่อให้อุปกรณ์ทำงานได้ดียิ่งขึ้น ด้วยเหตุผลดังที่ได้กล่าวมานี่เองจึงได้มีการพัฒนากระบวนการสร้างโครงสร้างจุลภาคโดยการฉายด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray exposure) ขึ้น โดยได้มีการนำรังสีเอ็กซ์มาใช้ในกระบวนการลิโธกราฟฟี แทนที่กระบวนการเดิมที่ใช้แสงอัลตราไวโอเลต ซึ่งนำมาใช้ร่วมกับกับสารไวแสงชื่อว่าโพลีเมธิลเมตะครีเลต (Polymethylmetacrylate : PMMA) ซึ่งสามารถพัฒนาให้การสร้างโครงสร้างจุลภาคเริ่มเป็นลักษณะสามมิติ และความสูงของชิ้นงานก็สามารถสร้างได้มากกว่า 1 มิลลิเมตร และเมื่อนำรังสีเอ็กซ์ ซึ่งมีอำนาจทะลุทะลวงสูงมาใช้นั้น หน้ากากกั้นแสงที่เคยใช้ในกระบวนการที่ใช้แสงอัลตราไวโอเลตนั้นจะไม่สามารถใช้ร่วมกับรังสีเอ็กซ์ได้ เนื่องจากหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ ต้องมีความสามารถในดูดกลืนพลังงานจากรังสีเอ็กซ์ ได้สูงเช่นเดียวกัน หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์จึงได้รับการพัฒนาขึ้น โดยส่วนฐานของหน้ากากจะเป็นวัสดุที่มีความโปร่งแสงต่อรังสีเอ็กซ์สูงหรือยอมให้รังสีเอ็กซ์ทะลุผ่านได้ดีนั่นเอง และส่วนของลวดลายโครงสร้างจะใช้วัสดุที่ดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ ได้ดีนั่นคือทองคำ การศึกษาเกี่ยวกับหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ ก็ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นมาโดยตลอด แผ่นฐานของหน้ากากได้มีการใช้วัสดุโปร่งรังสีเอ็กซ์หลายชนิด เช่น วัสดุผสมระหว่างไทเทเนียมกับซิลิคอนซึ่งวัสดุดังกล่าวจะบางมากมีความโปร่งแสงต่อรังสีเอ็กซ์สูงแต่มีข้อเสียคือมีราคาแพงและยากต่อการหยิบจับใช้งาน หรือเบอรีเลียม (Beryllium) ซึ่งมีความโปร่งรังสีเอ็กซ์สูงเช่นเดียวกัน แต่มีข้อจำกัดที่มีความเป็นพิษ (Linke, et al.) ในส่วนของวัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ นั้นในกระบวนการมาตรฐานทั่วไปจะใช้ทองคำที่ความหนา 3-15 ไมโครเมตร (Ferreira, 2004) และได้มีการพัฒนาเพื่อลดต้นทุนของหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ โดยใช้แผ่นฐานรองเป็น flat silicon wafer ซึ่งมีความหนา 15 ไมโครเมตร ร่วมกับวัสดุดูดกลืนแสงคือทองคำ (S. Cabrini et al., 2005) ซึ่งด้วยกระบวนการที่ใช้รังสีเอ็กซ์ร่วมกับ PMMA นี้ ทำให้โครงสร้างจุลภาคสามารถสร้างในรูปแบบที่เป็นสามมิติมากยิ่งขึ้น

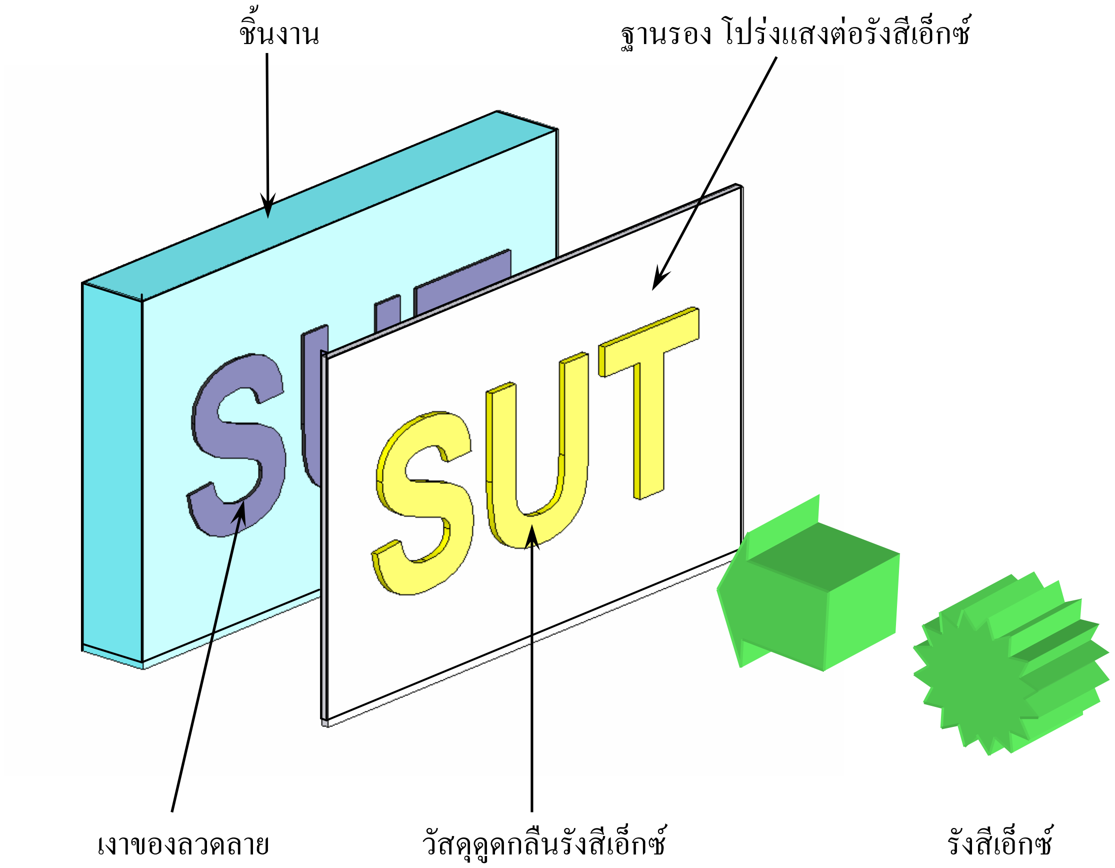
กระบวนการ LIGA (LIGA Process) เป็นกระบวนการสำหรับสร้างจุลภาค ซึ่งเริ่มพัฒนาขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1970 ณ Forschungszentrum Karlruhe (FZK) เมือง Karlruhe ประเทศเยอรมันนี โดยที่ในขณะนั้นได้ทำการพัฒนาขึ้นสำหรับสร้าง Slotted nozzles ขนาดจุลภาคสำหรับใช้กับ Uranium isotope separation (Becker, et al., 1986) โดยคำว่า LIGA เป็นกระบวนการ 3 กระบวนการหลักซึ่งมาจากภาษาเยอรมันนี คือ กระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ LI = Lithographie (X-ray

lithography) กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า G = Galvanoformung (Electroforming) และกระบวนการสร้างชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์ A = Abformung (Molding)

โดยการสร้างโครงสร้างจุลภาคจากกระบวนการ LIGA จำเป็นต้องใช้กระบวนการทั้ง 3 กระบวนการประกอบกัน ซึ่งขั้นตอนแรกจะเป็นการนำลำรังสีเอ็กซ์จากแหล่งกำเนิดแสงคือวงกักเก็บอิเล็คตรอนของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติมาใช้ เพื่อฉายลงบนชิ้นงานในการสร้างเงาของโครงสร้างลงบนวัสดุไวแสง โดยการนำหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ (X-ray mask) ที่มีลวดลายของโครงสร้างตามต้องการมาบังรังสีเอ็กซ์ก่อนที่รังสีเอ็กซ์จะไปตกกระทบยังสารไวแสง เพื่อให้เกิดเงาบนสารไวแสง ซึ่งจะมีลักษณะใกล้เคียงกับกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเลต (UV – lithography) หากแต่เปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสง และวัสดุสำหรับสร้างหน้ากากกั้นแสง โดยหลักการในการเกิดเงาของกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเลต แสดงได้ดังรูปที่ 1.1 เปรียบเทียบกับหลักการในการของกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ซึ่งแสดงในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.1 หลักการในการเกิดเงาบนชิ้นงานของกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเลต

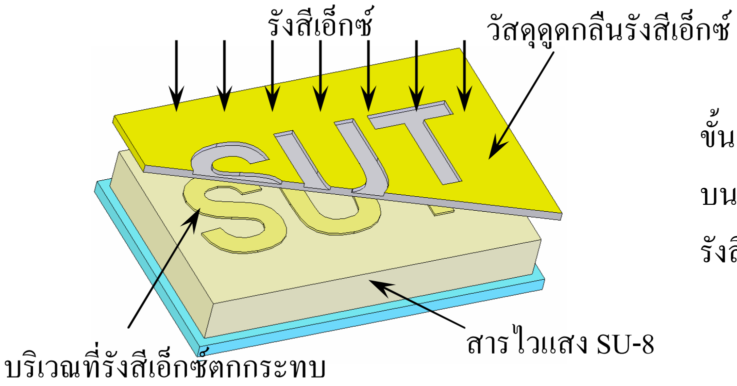


รูปที่ 1.2 หลักการในการเกิดเงาบนชิ้นงานของกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์

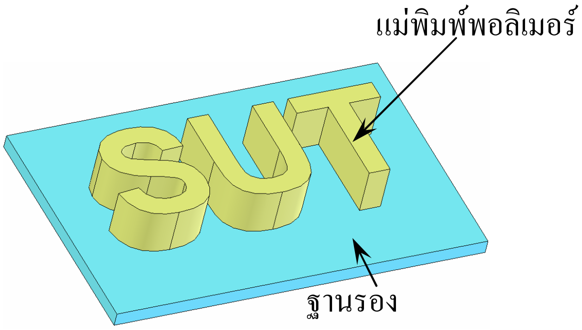
จากรูปที่ 1.1 และรูปที่ 1.2 จะเห็นว่าลักษณะการสร้างเงาบนชิ้นงานนั้นจะใช้หลักการเดียวกัน ซึ่งในกรณีของกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเลตนั้น ลักษณะการเกิดเงาจะเห็นได้ทั่วไปเมื่อเกิดการบังแสงตามธรรมชาติ แต่ในกรณีกระบวนลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์นั้น บริเวณที่เป็นบริเวณโปร่งแสงต่อรังสีเอ็กซ์นั้นจะเป็นวัสดุที่โปร่งแสงต่อรังสีเอ็กซ์เท่านั้น ไม่จำเป็นต้องโปร่งแสงทั่วไปหรือไม่จำเป็นเป็นต้องมองทะลุผ่านได้ ส่วนบริเวณทึบแสงนั้นกรณีของรังสีเอ็กจะเป็นทองคำ ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ และเมื่อสร้างลวดลายโครงสร้างให้วัสดุไวแสงแล้ว จากนั้นก็นำสารไวแสงไปล้างด้วยน้ำยาดีเวลอปเปอร์ (Developer) เพื่อสร้างโครงสร้างใช้ชิ้นงาน

กระบวนการต่อมาคือกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ซึ่งกระบวนการนี้จะเป็นขั้นตอนสำหรับการสร้างให้โครงสร้างของชิ้นงานเป็นโลหะ หรือสร้างเป็นแม่พิมพ์ของชิ้นงาน จากนั้นกระบวนการสุดท้ายคือการบวนการสร้างชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์ ซึ่งได้จากกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ซึ่งกระบวนการนี้สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การพิมพ์ตัวนูนด้วยแม่พิมพ์ร้อน (Hot embossing) หรือ หล่อแบบจากแม่พิมพ์ เป็นต้น เมื่อเสร็จสิ้นก็จะได้ชิ้นงานตามต้องการ ขั้นตอน

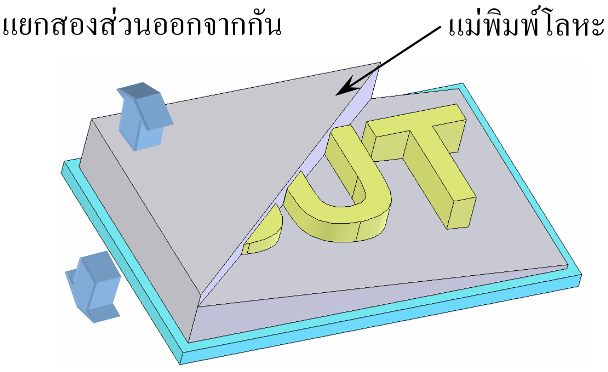
ของกระบวนการ LIGA โดยทั่วไปสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.3



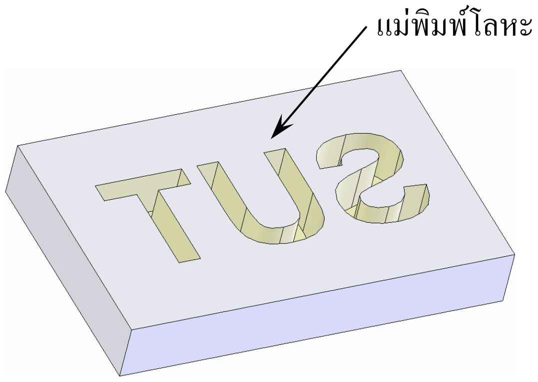
ขั้นตอนการอาบรังสีเอ็กซ์ลงบนชิ้นงานผ่านหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์เพื่อสร้างลวดลาย



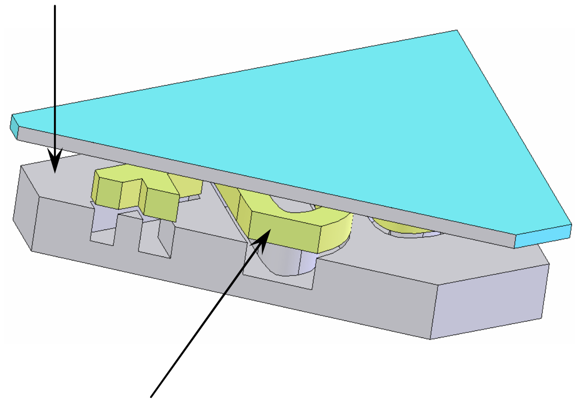
หลังจากการล้างสารไวแสงด้วยน้ำยา Developer บริเวณที่ไม่มีแสงตกกระทบจะถูกล้างออกไป

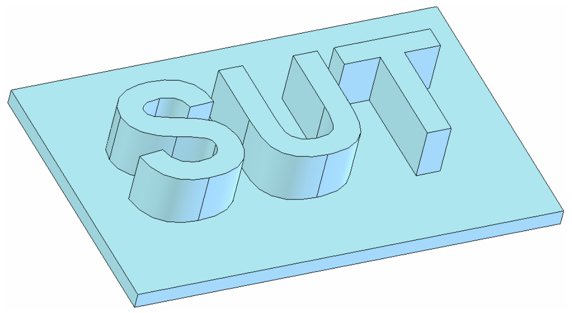


ขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเพื่อสร้างแม่พิมพ์ แล้วแยกทั้งสองส่วนออกจากกัน



หลังจากแยกแม่พิมพ์โลหะออกจากแม่พิมพ์พอลิเมอร์แล้ว จะได้แม่พิมพ์โลหะที่เป็นหลุมของลวดลายในลักษณะกลับด้าน

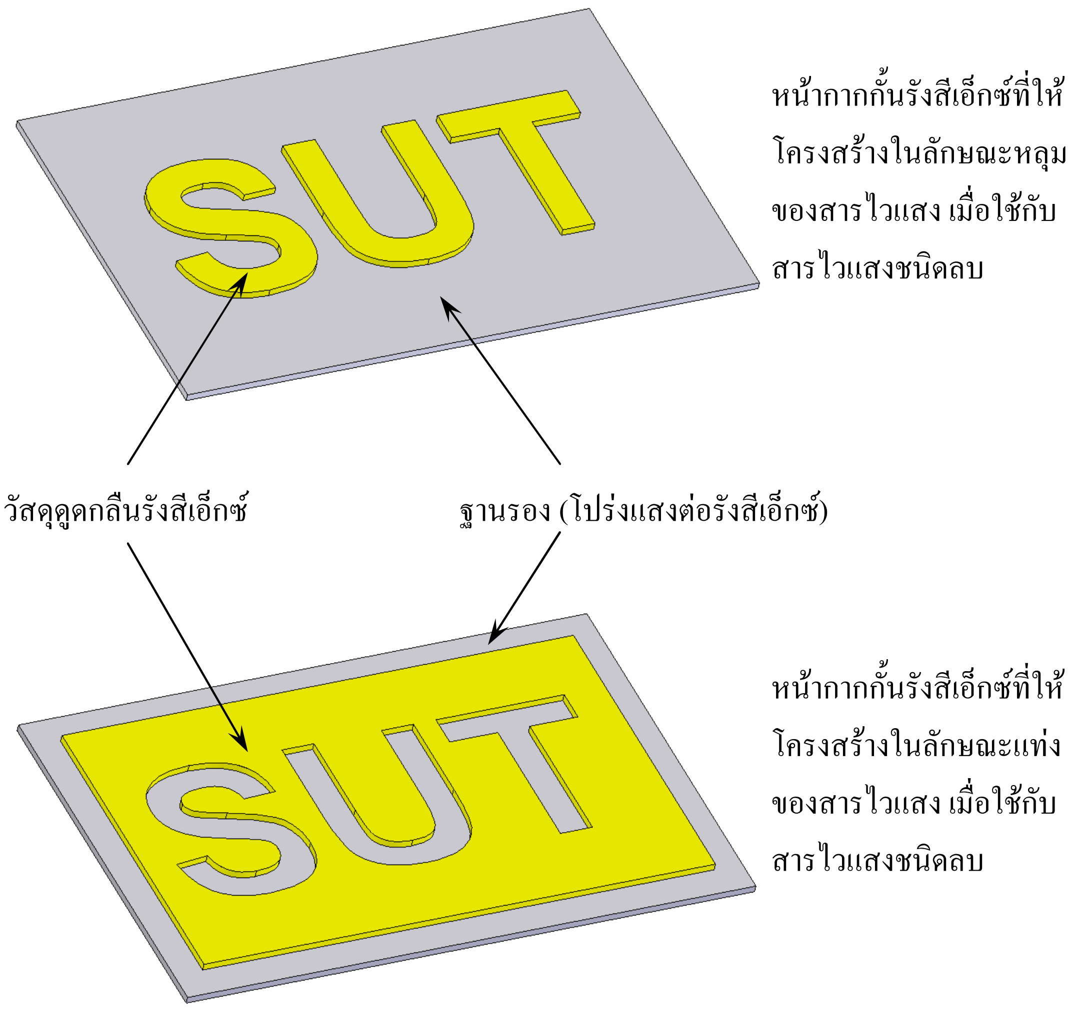




รูปที่ 1.3 ลำดับขั้นตอนกระบวนการ LIGA โดยทั่วไป

กระบวนที่แสดงในรูปที่ 1.3 นั้นเป็นกระบวนการ LIGA โดยใช้สารไวแสง SU-8 เป็นวัสดุไวแสงในกระบวนการ ซึ่ง SU-8 เป็นสารไวแสงชนิดลบ โดยคุณสมบัติของสารไวแสงชนิดลบคือบริเวณที่มีแสงมาตกกระทบนั้น จะทำให้สารไวแสงเกิดการแข็งตัว ส่วนบริเวณเงาหรือส่วนที่ไม่มีแสงมาตกกระทบนั้นเมื่อล้างด้วยน้ำยาดีเวลอปเปอร์แล้วบริเวณดังกล่าวจะถูกล้างออกไป และส่วนของฐานรองต้องนำไฟฟ้า เนื่องจากต้องทำการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

ในกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์นั้น ปัจจัยที่สำคัญคือการทำให้เกิดลวดลายบนชิ้นงาน ซึ่งโครงสร้างจะออกมาในลักษณะอย่างไรนั้น ขั้นตอนนี้มีความสำคัญอย่างมาก โดยส่วนประกอบที่จะกำหนดโครงสร้างทั้งหมดคือ หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ ซึ่งหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์มีส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วนคือ ฐานรองและวัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ โดยฐานรองนั้นจะทำจากวัสดุที่โปร่งแสงต่อรังสีเอ็กซ์ ซึ่งหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์นั้นสามารถสร้างได้ 2 ลักษณะตามลักษณะของชิ้นงานที่ต้องการดังรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ที่สร้างเป็นลวดลาย SUT

การพัฒนากระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์นั้นมีมาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสารไวแสงที่ใช้ก็คือ PMMA นั่นเอง และใช้ร่วมกับหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ที่สร้างโดยการใช้ทองคำเป็นวัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ แต่การใช้ PMMA เป็นสารไวแสงนั้น ก็ยังมีข้อเสียคือ ในกระบวนการนั้น จะใช้เวลาในการฉายรังสีนานมาก ซึ่งในบางครั้งจึงไม่สะดวกต่อการใช้งาน จึงมีการพัฒนาเพื่อนำสารไวแสงชนิดลบ SU-8 มาใช้ในกระบวนการแทน PMMA ซึ่ง SU-8 มีข้อดีที่เห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับ PMMA คือ เวลาในการฉายรังสีเอ็กซ์นั้นน้อยกว่ากรณีที่ใช้ PMMA ประมาณ 100 เท่า และสามารถเคลือบจนหนาได้เกิน 1,000 ไมโครเมตรเช่นเดียวกัน โดยที่เมื่อใช้สารแสงความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร นั้นกรณีของ PMMA ต้องทำการฉายรังสีเอ็กซ์ถึง 4,500 J/cm^3 ในขณะที่เมื่อใช้สารไวแสง SU-8 แล้วใช้การฉายรังสีเอ็กซ์เพียง 45 J/cm^3 (Lawes, et al.) และเมื่อเทียบการฉายแสงเป็นเวลาการฉายแสงแล้ว เมื่อใช้สารไวแสงที่ความหนา 1 มิลลิเมตรเท่ากัน กรณีของ SU-8

ต้องใช้เวลาการฉายรังสีเอ็กซ์เพียง 20 วินาทีต่อเซนติเมตร ในขณะที่กรณีใช้ PMMA นั้น ต้องฉายรังสีเอ็กซ์ถึง 80 นาทีต่อเซนติเมตร (Jian, et al., 2003) ซึ่งจะเห็นได้ว่าเวลาในกระบวนการแตกต่างกันค่อนข้างมาก และเมื่อใช้สารไวแสง SU-8 จะสามารถลดเวลาในกระบวนการลงได้

เนื่องจากความเป็นไปได้ที่จะสามารถพัฒนาการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์โดยใช้วัสดุที่มีเลขอะตอมสูงชนิดอื่นมาเป็นวัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์แทนที่ทองคำ เพื่อจุดประสงค์ในการลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการ เนื่องจากทองคำมีราคาแพงมาก โดยเงินเป็นหนึ่งในวัสดุที่มีเลขอะตอมสูงสามารถนำมาสร้างโครงสร้างได้ง่ายด้วยวิธีการชุบด้วยไฟฟ้า ทั้งยังมีราคาถูกกว่าทองคำหลายเท่าตัว จึงได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เงินมาเป็นวัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ ในการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กแทนที่ทองคำ ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอการสร้างหน้ากากกั้นแสงโดยใช้โลหะเงินเป็นวัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ ซึ่งถือได้ว่าเป็นครั้งแรกที่มีการนำเงินมาเป็นวัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ในกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ โดยจะทดสอบหาความหนาที่เหมาะสมเพื่อที่จะสามารถใช้เงินในกระบวนการผลิตโครงสร้างจุลภาคแทนที่ทองคำที่มีราคาแพงได้ ซึ่งทำการพัฒนาบนแผ่นฐานรองที่เป็นกราไฟต์บาง 150 ไมโครเมตร เนื่องจากกราไฟต์มีความคุณสมบัติโปร่งรังสีเอ็กซ์ และมีนักวิจัยหลายท่านนำมาใช้เป็นฐานของหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์มาแล้ว จากนั้นจึงทำการพัฒนากระบวนลิโธกราฟฟีตลอดกระบวนการให้ใช้ได้จริง ณ ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ โดยการพัฒนากระบวนการที่ใช้สารไวแสง SU-8 แทนการใช้สารไวแสง PMMA อีกด้วย เมื่อทำการพัฒนากระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray Lithography) เรียบร้อยแล้ว จึงทำการสาธิตกระบวนการที่พัฒนาขึ้นโดยการทดลองสร้างตัวตรวจรู้ความเร่งแบบเพียโซรีซิสทีฟ (Piezoresistive) ซึ่งเป็นการสร้างก้อนมวล (Proof mass) ลงบนตัวชิพที่นายวิริยะ แผนสุวรรณ์ นักศึกษาบัณฑิตศึกษา สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้สร้างไว้แล้ว และกระบวนการในการสร้างทั้งหมดใช้กระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ที่ได้พัฒนาขึ้น โดยกระบวนการดังกล่าวสามารถสร้างก้อนมวล (Proof mass) ให้สูงถึง 500 ไมโครเมตรได้ เพื่อเพิ่มความไวในการตรวจจับความเร่ง

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. พัฒนากระบวนการสร้างโครงสร้างระดับจุลภาค โดยการใช้แสงในย่านรังสีเอ็กซ์ (X-ray) ณ Beamline 6 ของศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ

2. หาวัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Absorber) แทนที่วัสดุเดิมที่เป็นทองคำ ซึ่งมีราคาแพง โดยที่คุณสมบัติในการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์เมื่อใช้เป็นหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ ยังคงเหมือนเดิม

3. ผลิตก้อนมวลเพื่อประกอบกับตัวตรวจรู้ความเร่งด้วยกระบวนการผลิตซ้ำที่พัฒนาขึ้น

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. พัฒนากระบวนสร้างโครงสร้างจุลภาค และวัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ ชนิดใหม่แทนทองคำ จนสามารถใช้ได้จริง ณ ระบบลำเลียงแสง BL-6 ของศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ

2. การพัฒนากระบวนการดังกล่าว เป็นการพัฒนาตั้งแต่ต้น ดังนั้นกระบวนการบางขั้นตอนหรือค่าบางค่าอาจยังไม่เหมาะสมที่สุด

3. การสาธิตกระบวนการ จะเป็นการสร้างก้อนมวลบนชิพที่ได้สร้างไว้แล้ว เพื่อพัฒนาให้เป็นตัวตรวจรู้ความเร่งที่ดีขึ้น

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. พัฒนากระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ โดยใช้โลหะเงินเป็นวัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์

2. พัฒนากระบวนการเคลือบสารไวแสง SU-8 ลงบนฐานรอง เพื่อให้ได้ความหนาของพอลิเมอร์ไวแสงมากกว่า 500 ไมโครเมตร

3. พัฒนากระบวนการฉายรังสีเอ็กซ์ และการล้างพอลิเมอร์ไวแสง

4. พัฒนากระบวนการสร้างชิ้นงานต้นแบบโดยวิธีการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating)

5. พัฒนากระบวนการผลิตชิ้นงานซ้ำ โดยการหล่อแบบ

6. สาธิตกระบวนการโดยการสร้างตัวตรวจรู้ความเร่ง ที่มีก้อนมวลที่สร้างขึ้นด้วยกระบวนการที่ได้พัฒนาขึ้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้กระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray Lithography) ที่สามารถสร้างอุปณ์ต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ณ ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ

2. ได้วัสดุชนิดใหม่ที่สามารถใช้แทนทองคำในการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ เพื่อลดต้นทุนในกระบวนการ

3. สร้างองค์ความรู้ในการสร้างอุปกรณ์ด้วยวิธีการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์

4. สร้างองค์ความรู้การสร้างตัวตรวจรู้ความเร่งด้วยวิธีการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์)

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 7 บทได้แก่ บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความสำคัญของ

ปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย บทที่ 2 กล่าวถึงการปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างอุปกรณ์ในระบบกลไฟฟ้าจุลภาคที่อาศัยกระบวนการลิโธกราฟฟี หลักการเกี่ยวกับกระบวนการลิโธกราฟฟีรวมถึงกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ อีกทั้งกระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ในรูปแบบต่าง ๆ บทที่ 3 กล่าวถึงระบบลำเลียงแสงซินโครตรอน ณ ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ การลำเลียงแสงออกมายังห้องปฏิบัติการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ ระบบการกรองรังสีเอ็กซ์จากวงกักเก็บอิเล็คตรอนของระบบแสงซินโครตรอน และหลักการทำงานของระบบเลื่อนฉายรังสีเอ็กซ์ บทที่ 4 กล่าวถึงขั้นตอนการพัฒนากระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ การทดสอบกระบวนการโดยการสร้างชิ้นงานทดสอบเพื่อทดลองสร้างชิ้นงานที่ความหนาต่าง ๆ การพัฒนากระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์โดยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเลต และการใช้โลหะเงินเป็นวัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์แทนทองคำเพื่อลดต้นทุนในกระบวนการ บทที่ 5 กล่าวถึงการนำชิ้นงานที่สร้างจากกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์มาสร้างเป็นตัวอุปกรณ์ด้วยวิธีการ LIGA ซึ่งเป็นขั้นตอนในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าลงไปในแม่พิมพ์ รวมถึงการสร้างอุปกรณ์ซ้ำด้วยการสร้างแม่พิมพ์ขึ้นใหม่โดยการถอดแบบจากชิ้นงานที่สร้างจากกระบวนการ LIGA หรือกระบวนลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ ด้วยวิธีการใช้พอลิเมอร์ในการถอดแบบ บทที่ 6 กล่าวถึงการนำกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ที่พัฒนาขึ้น ณ ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ ไปใช้ในการสร้างอุปกรณ์ในระบบกลไฟฟ้าจุลภาค และวิเคราะห์ข้อดีและข้อจำกัดของกระบวนการที่พัฒนาขึ้น เมื่อนำมาสร้างอุปกรณ์ในระบบกลไฟฟ้าจุลภาค บทที่ 7 เป็นบทสรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นักวิจัยและนักวิทยาศาสตร์เริ่มเล็งเห็นความสำคัญ และให้ความสนใจในการสร้างวัสดุหรือสิ่งประดิษฐ์ระดับจุลภาคมากขึ้น หลังจากที่ Feynman ได้ปาฐกถาในหัวข้อ “There’s Plenty of Room at The Bottom” ในปี 1959 ซึ่งในการปาฐกถาดังกล่าว มีส่วนสำคัญในการผลักดันการพัฒนาระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (Micro-Electro-Mechanical Systems) หรือ MEMS ซึ่งเป็นระบบกลไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตร แต่ยังสามารถทำงานในลักษณะเดียวกับระบบที่มีขนาดใหญ่กว่าได้ ซึ่งระบบดังกล่าวมีส่วนสำคัญมากต่อการพัฒนาเทคโนโลยีสมัยใหม่ ที่ต้องการให้อุปกรณ์สำหรับการใช้งานต่าง ๆ มีขนาดเล็กลงในขณะที่ความสามารถในการทำงานของอุปกรณ์เพิ่มขึ้น

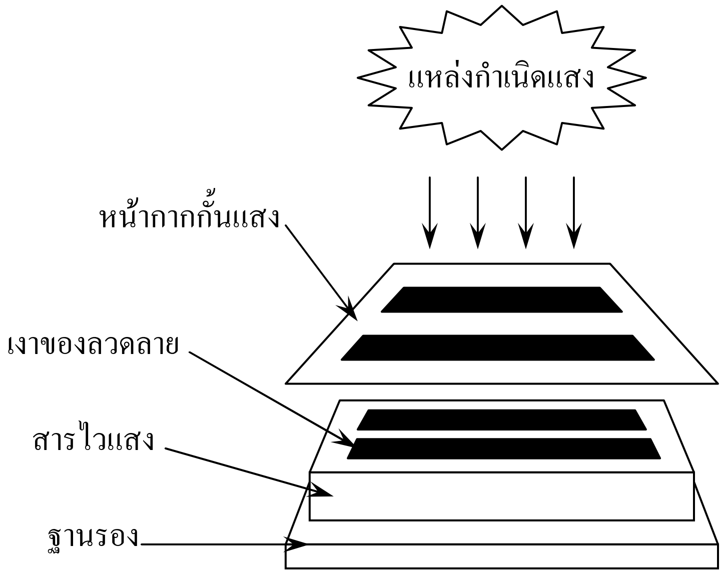
การผลิตอุปกรณ์ในระบบกลไฟฟ้าจุลภาคนั้น กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี (Photo-lithography) มีบทสำคัญในการผลิตโครงสร้างของชิ้นงาน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวมีความสามารถสูงในการสร้างชิ้นงานขนาดเล็กถึงระดับไมโครเมตร หากแต่ในอุปกรณ์หลายชนิดที่ต้องการให้มีความเป็นสามมิตินั้น กระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยแสงที่ใช้กันนั้นไม่สามารถสร้างให้เกิดความเป็นสามมิติเพียงพอต่อความต้องการของนักวิจัยได้ ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นกระบวนการที่สามารถสร้างอุปกรณ์ที่มีความเป็นสามมิติสูงขึ้น เรียกว่ากระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray lithography) โดยการใช้รังสีเอ็กซ์พลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน (Synchrotron radiation) ซึ่งกระบวนการลิโธกราฟฟี (Lithography) ที่ใช้ในปัจจุบันนั้น มีทั้งกระบวนการที่ใช้แสงอัตราไวโอเลต ที่เรียกว่า UV Lithography หรือ Photo Lithography และกระบวนการที่ใช้รังสีเอ็กซ์ที่เรียกว่า X-ray Lithography โดยการบวนการทั้งสองแบบนั้น จะใช้สำหรับสร้างอุปกรณ์จุลภาคโดยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยแสงอัตราไวโอเลตนั้น เป็นกระบวนการมาตรฐานในการสร้างวงจรรวม

2.1 กระบวนการลิโธกราฟฟี

กระบวนการลิโธกราฟฟีนั้นเป็นถือได้ว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดสำหรับอุตสาหกรรมเซมิคอนดักเตอร์ (Harriott, 2001) โดยในกระบวนการผลิตวงจรรวมในปัจจุบัน ยังคงใช้กระบวนการลิโธกราฟฟีในการผลิต แต่ในส่วนวิธีการและการดำเนินการรวมถึงแหล่งพลังงานแสงที่ใช้นั้นได้ถูกพัฒนาให้มีสมรรถภาพเพิ่มมากขึ้นมาโดยตลอด โดยแหล่งกำเนิดแสงนั้นมีทั้งการใช้แสงอัลตราไวโอเลตฉายผ่านหน้ากากกั้นแสงแบบหนึ่งต่อหนึ่ง หรือการฉายแบบผ่านเลนส์เพื่อย่อ

ขนาดของชิ้นงานลง ซึ่งในบางครั้งวิธีการดังกล่าวจะค่อนข้างมีปัญหาเกี่ยวกับความคมชัดหลังจากการฉายแสงเสร็จสิ้น โดยทั่วไปแล้วในการฉายแสงแบบหนึ่งต่อหนึ่งจะใช้ร่วมกับเครื่องฉายแสงอัลตราไวโอเลต (UV mask aligner) ซึ่งกำเนิดแสงในย่านแสงอัตราไวโอเลต ความยาวคลื่นประมาณ 365-405 นาโนเมตร ซึ่งกระบวนลิโธกราฟฟีจากแหล่งกำเนิดแสงดังกล่าวนั้น ความสูงของชิ้นงานจะสามารถเพิ่มได้ถึงระดับ 100 ไมโครเมตร แต่ในบางครั้งมีความต้องการสร้างชิ้นงานที่มีความสูงของชิ้นงานหลายร้อยไมโครเมตร จึงได้มีกระบวนการที่ใช้แสงอัลตราไวโอเลตพลังงานสูง (Deep-Ultra violet : DUV) ซึ่งแสงดังกล่าวมีความยาวคลื่นประมาณ 200-290 นาโนเมตร กระบวนการ DUV ดังกล่าวสามารถสร้างชิ้นงานที่มีความละเอียดของชิ้นงานได้ถึงประมาณ 1 ไมโครเมตร (Pelzer, et al., 2006) ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในการสร้างชิ้นงานระดับสูงขึ้นที่ต้องการความละเอียดของชิ้นงานมากขึ้น

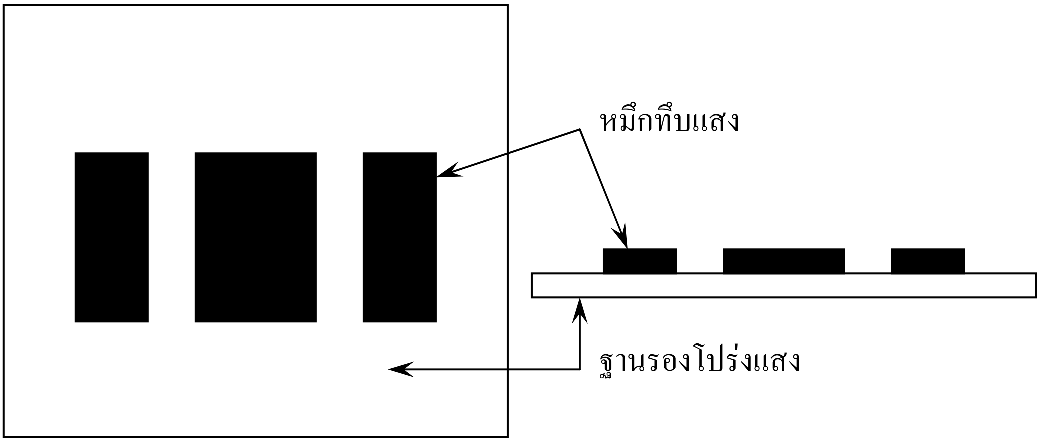
กระบวนการลิโธกราฟฟีนั้นเป็นกระบวนการในการสร้างอุปกรณ์จุลภาคซึ่งอาศัยการเกิดเงาของแสงเมื่อมีวัตถุใด ๆ มาบังแหล่งกำเนิดแสง โดยวัตถุที่จะนำมาบังแหล่งกำเนิดแสงนั้นจะเรียกว่าหน้ากากกั้นแสง (mask) ซึ่งรายละเอียดลวดลายของโครงสร้างจะถูกกำหนดโดยหน้ากากกั้นแสงนี่เอง เพื่อกำหนดการเกิดเงาลงบนสารไวแสงเพื่อสร้างเป็นโครงสร้างของอุปกรณ์ที่ต้องการ ลำดับชั้นในการติดตั้งชิ้นงานเข้ากับเครื่องฉายแสงแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การติดตั้งชิ้นงานสำหรับการฉายแสง

ในการติดตั้งนั้นปัญหาอีกหนึ่งประการสำหรับกระบวนการลิโธกราฟฟีคือ การติดตั้งหน้ากากกั้นแสงเข้ากับชิ้นงานนั้น ต้องติดให้แนบชิ้นงานมากที่สุดเพื่อป้องกันการแผ่กระจายของ

แสง ซึ่งจะทำให้ลวดลายของอุปกรณ์ผิดเพี้ยนไปจากต้นแบบได้ ซึ่งเป็นเหตุผลให้พื้นผิวของสารไวแสงนั้นต้องเรียบ เพื่อให้แนบติดกับหน้ากากกั้นแสงให้ได้มากที่สุด ส่วนหน้ากากกั้นแสงนั้นที่ใช้กันส่วนใหญ่จะทำจากพลาสติกใสที่มีลวดลายเป็นหมึกทึบแสง และกระจกใสที่ลวดลายเป็นหมึกทึบแสงเช่นเดียวกัน ซึ่งลักษณะขั้นพื้นบานของหน้ากากกั้นแสงต้องประกอบด้วย 2 ส่วนประกอบ คือส่วนของฐานรองซึ่งเป็นวัสดุที่แข็งแรงและโปร่งแสง และส่วนของหมึกทึบแสงเพื่อกำหนดลวดลาย ดังรูปที่ 2.2



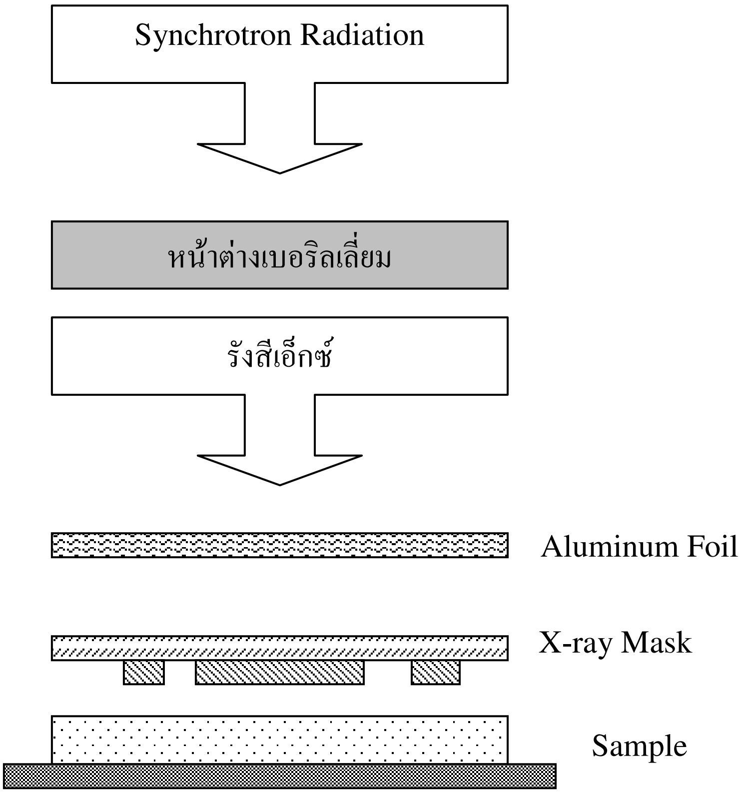
รูปที่ 2.2 ลักษณะและส่วนประกอบของหน้ากากกั้นแสง

ชิ้นงานที่มีความสูงในระดับหลายร้อยไมโครเมตรมีความจำเป็นมากในการสร้างอุปกรณ์สำหรับงานระดับสูง เนื่องจากเมื่อสามารถเพิ่มความสูงของชิ้นงานแล้ว จะทำให้สามารถเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานดังกล่าวสามารถสร้างแรงขับเคลื่อน (force) ได้มากขึ้น รวมถึงแรงบิด (torque) หรือกำลังงาน (power) ที่ได้จากชิ้นงานก็มากขึ้นอีกด้วย (Qu, et al., 1998) และในอุปกรณ์หลายชนิดต้องการความสูงของชิ้นงานในระดับมิลลิเมตร ซึ่งเกินความสามารถของกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยแสงอัตราไวโอเลตจะทำได้ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนากระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ขึ้น โดยใช้รังสีเอ็กซ์ที่กรองจากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน ซึ่งกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์นั้นทำให้สามารถสร้างอุปกรณ์ที่ต้องการความสูงของชิ้นงานหลายร้อยไมโครเมตรจนถึงระดับมิลลิเมตรได้

2.2 กระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์

กระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์นั้น โดยปกติแล้วแหล่งกำเนิดของรังสีเอ็กซ์ที่ใช้นั้นจะใช้แหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน และทำการกรองเฉพาะรังสีเอ็กซ์มาใช้ในกระบวนการ โดย

กระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์นั้นจะเป็นกระบวนการในลักษณะเดียวกันกับกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเลต แต่จะเปลี่ยนแสงที่ใช้ในกระบวนการจากแสงอัลตราไวโอเลตมาเป็นรังสีเอ็กซ์ ซึ่งพลังงานที่ได้นั้นจะค่อนข้างมาก ดังนั้นในกระบวนการจึงเกิดความร้อนขึ้นมากกว่ากระบวนการที่ใช้แสงอัลตราไวโอเลต อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการหลายจึงต้องเปลี่ยนแปลงไปตามความเหมาะสมกับการใช้งาน และในบางขั้นตอนหากใช้วิธีการที่เหมือนกับกระบวนการที่ใช้แสงอัลตราไวโอเลตอาจทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายได้ (Yi, et al., 2006) ทำให้กระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์นั้น บางขั้นตอนจะแตกต่างจากกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยแสง รวมถึงขั้นตอนจะมากขึ้นและค่าใช้จ่ายในกระบวนการก็มากขึ้นด้วย ลำดับอุปกรณ์ที่ติดตั้งในการฉายรังสีเอ็กซ์นั้นจะคล้ายกับกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต แต่จะมีการเพิ่มอุปกรณ์บางชนิดเข้าไปดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลำดับอุปกรณ์ที่ติดตั้งสำหรับการฉายรังสีเอ็กซ์ในกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์

สารไวแสงที่ใช้ในกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์นั้น หนึ่งในสารไวแสงมาตรฐานในกระบวนการคือ PMMA ซึ่งเป็นสารไวแสงที่สามารถเคลือบบนชิ้นงานให้ได้ความหนามากถึง 3 มิลลิเมตร และให้ลวดลายที่คมชัด ให้ความละเอียดสูง ความแน่นอนของลวดลายสูงและผิวเรียบ

แต่อย่างไรก็ตามข้อเสียของ PMMA ที่เห็นได้ชัดคือ มีความไวต่อรังสีเอ็กซ์น้อยมาก หากความหนาของฟิล์มถึงระดับมิลลิเมตรแล้ว ต้องฉายรังสีเอ็กซ์เป็นเวลาอย่างน้อย 10 ชั่วโมง (Shew, et al., 2004) ด้วยเหตุผลดังกล่าว ทำให้เวลาในการฉายรังสีเอ็กซ์แต่ละครั้งต้องใช้เวลาค่อนข้างนาน จึงได้มีการนำสารไวแสง SU-8 มาใช้ในกระบวนการ ซึ่ง SU-8 นั้นสามารถช่วยลดเวลาในการฉายรังสีลงได้อย่างมาก เนื่องจากสารไวแสง SU-8 นั้น มีความไวต่อรังสีเอ็กซ์มากกว่าสารไวแสง PMMA (Jian, et al., 2003) ที่ความหนาของสารไวแสงเท่ากันนั้น SU-8 และ PMMA จะใช้เวลาในการฉายแสงต่างกันค่อนข้างมาก ดังแสดงในตารางที่ 2.1 (Jian, et al., 2003)

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบเวลาในการฉายรังสีเอ็กซ์บนชิ้นงานระหว่างสารไวแสง PMMA และ SU-8ที่ความหนาของฟิล์มไวแสงต่าง ๆ

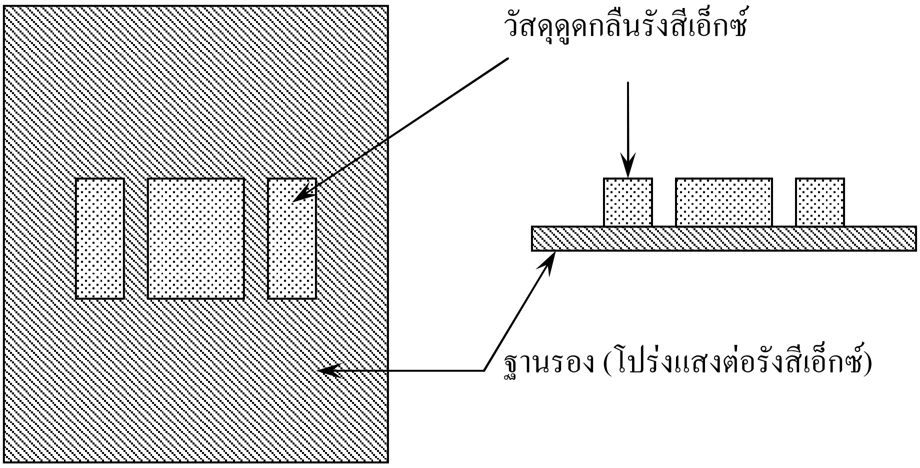
ชนิดของสารไวแสง : ความหนาของสารไวแสง	เวลาในการฉายรังสี
PMMA : 500 ไมโครเมตร SU-8 : 500 ไมโครเมตร	40 นาที 8 วินาที
PMMA : 1000 ไมโครเมตร SU-8 : 1000 ไมโครเมตร	80 นาที 20 วินาที
PMMA : 2000 ไมโครเมตร SU-8 : 2000 ไมโครเมตร	3.5 ชั่วโมง 1 นาที
PMMA : 4000 ไมโครเมตร SU-8 : 4000 ไมโครเมตร	10 ชั่วโมง 2 นาที

จากการเปรียบเทียบเวลาในการฉายแสงข้างต้น จะเห็นได้ชัดว่าเมื่อใช้สารไวแสง SU-8 แทน PMMA นั้น จะทำให้สามารถลดเวลาในการฉายแสงลงได้อย่างมาก ซึ่งข้อดีที่ตามมาอีกอย่างหนึ่งคือ ความร้อนสะสมในชิ้นงานขณะทำการฉายรังสีเอ็กซ์ก็จะลดลงตามมาด้วย ทำให้ชิ้นงานไม่เกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความร้อน และส่วนของหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ก็ต้องสามารถรับความร้อนได้เช่นเดียวกัน ทั้งยังต้องมีคุณสมบัติหลายประการที่แตกต่างจากหน้ากากกั้นแสงในกระบวนลิโธกราฟฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต

2.3 การสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์เพื่อใช้ในกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์

ในกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์นั้น หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ถือเป็นอุปกรณ์ที่ขาดไม่ได้ในกระบวนการ และได้มีการพัฒนากระบวนการผลิตหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์อย่างต่อเนื่อง

เพื่อให้ได้หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ที่ดีที่สุด ในขณะที่ต้นทุนในการผลิตลดลง หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ในอุดมคตินั้น ต้องมีความโปร่งรังสีเอ็กซ์สูง มีความแข็งแรงสูงทนต่อการหยิบจับโดยใช้มือหรือปากคีบ ในขณะที่แผ่นบางและเรียบ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายหลัง และต้องไม่ทำปฏิกิริยาใด ๆ กับสารที่จะนำมาสร้างลวดลาย (Cabrini, et al., 2005) ซึ่งส่วนประกอบหลักของหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์นั้นคือส่วนฐานรองซึ่งเป็นส่วนที่ต้องโปร่งรังสีเอ็กซ์โดยรังสีเอ็กซ์สามารถทะลุผ่านได้ดี หรือหากสามารถมองทะลุผ่านได้ก็จะเป็นประโยชน์มากขึ้นในกระบวนการที่ต้องการสร้างลวดลายหลายชั้น และอีกส่วนคือวัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ ซึ่งรังสีเอ็กซ์ไม่สามารถทะลุผ่านได้นั่นเอง โดยลักษณะของส่วนประกอบพื้นฐานของหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์นั้น แสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบพื้นฐานของหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์

ได้มีนักวิจัยหลายท่านที่พัฒนาการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ โดยวัสดุที่ใช้ทำเป็นฐานรองนั้น มีวัสดุหลายชนิดที่สามารถใช้ได้ ซึ่งคุณสมบัติก็แตกต่างกันออกไป เช่นวัสดุผสมระหว่างไทเทเนียมกับซิลิคอน วัสดุดังกล่าวจะมีคุณสมบัติที่ดีคือมีความโปร่งรังสีเอ็กซ์สูงและบางมาก แต่มีข้อเสียคือราคาแพงและยากต่อการหยิบจับใช้งาน หรือเบอริลเลียม ก็มีคุณสมบัติโปร่งรังสีเอ็กซ์สูงเช่นเดียวกัน แต่มีข้อจำกัดที่ค่อนข้างเป็นพิษ (Jian, et al., 2003) carbon diamond เป็นหนึ่งในวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมาะกับการนำมาสร้างเป็นหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ เนื่องจากการที่มีความโปร่งทั้งรังสีเอ็กซ์และแสงที่ตามองเห็นได้ (Visible light) จึงมีประโยชน์มากเมื่อต้องการสร้างชิ้นงานที่ต้องสร้างโครงสร้างแบบหลายชั้น ทั้งยังมีความคุณสมบัตินำความร้อนได้ดี แต่ข้อเสียคือยากต่อการสร้างให้ได้เนื้อที่ขนาดใหญ่ และมีความขรุขระของพื้นผิวสูง อีกทั้งมีราคาที่แพงมาก (Cabrini, et al., 2005) และวัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์นั้น ที่ใช้กันทั่วไปคือทองคำความหนาประมาณ 3-15

ไมโครเมตร (Ferreira, 2004) โดยมีการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ที่ใช้แผ่นซิลิคอนหนา 20 ไมโครเมตร เป็นฐานรองและใช้ทองคำหนา 15 ไมโครเมตรเป็นวัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ (Shew, et al., 2004) และได้มีการพัฒนาหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ที่สามารถลดต้นทุนการสร้างได้ด้วยการใช้แผ่นฐานรองเป็น flat silicon wafer ความหนา 15 ไมโครเมตร ร่วมกับวัสดุดูดกลืนแสงคือทองคำความหนา 20 ไมโครเมตร (Cabrini, et al., 2005)

ในปี 1996 Yi และคณะ ได้นำเสนอการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ที่ใช้ในกระบวนการ LIGA ซึ่งจะนำไปใช้ร่วมกับแสงซินโครตรอน โดยได้นำเสนอกระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ ด้วยระบวนการสร้างแบบสองขั้น โดยการสร้างหน้ากากชั่วคราวขึ้นมาก่อน หลังจากนั้นจึงนำหน้ากากชั่วคราวมาสร้างเป็นหน้ากากจริงต่อไป และวัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ที่จะใช้ในหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์นั้น ใช้ทองคำความหนา 15 ไมโครเมตร โดยให้แนวคิดว่ากระบวนการสร้างโดยตรงจะค่อนข้างยาก จึงนำเสนอการสร้างแบบสองขั้น ขั้นแรกจะเป็นการสร้างหน้ากากชั่วคราว (Intermediate mask) โดยใช้กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟีบนสารไวแสงบาง โดยฐานรองจะเป็นแผ่นซิลิคอนปิดทับด้วยโพลีอิไมด์ และเคลือบอีกชั้นด้วยฟิล์มทองคำความหนา 1.5 ไมโครเมตร จากนั้นจึงเคลือบสารไวแสงลงไป เมื่อสร้างลวดลายลงบนสารไวแสงแล้ว ทำการกัดแผ่นฟิล์มทองคำด้วยไอออนของอาร์กอน (Ar^+) และกัดแผ่นเวเฟอร์ทิ้ง จะได้หน้ากากชั่วคราวที่มีทองคำหนา 1.5 ไมโครเมตร เป็นวัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์อยู่บนฐานที่เป็นโพลีอิไมด์ หนา 4 ไมโครเมตร จากนั้นนำหน้ากากชั่วคราวที่สร้างเสร็จ ไปสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์โดยการใช้สารไวแสง PMMA หนา 15 ไมโครเมตรร่วมกับแสงซินโครตรอน โดยฐานรองจะเป็นแผ่นเวเฟอร์ ปิดทับด้วยโพลีอิไมด์ ต่อด้วยเคลือบทองคำ 100 อังสตอม และเคลือบสารไวแสง PMMA ลงบนฐานดังกล่าว ก่อนนำไปสร้างลวดลายด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์และจากนั้นจะลวดลายที่เป็นหลุมไปทำการชุบทองคำด้วยไฟฟ้าลงบนฐานที่สร้างลวดลายแล้ว โดยใช้ความหนาของทองคำประมาณ 15 ไมโครเมตร ก่อนทำการกัดแผ่นเวเฟอร์ทิ้ง โดยกระบวนการทั้งหมดที่กล่าวมานั้น จะเห็นว่าค่อนข้างยุ่งยาก และมีขั้นตอนค่อนข้างหลายขั้นตอน

สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการพัฒนากระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ ทั้งกระบวนการให้สามารถใช้ได้จริง ณ ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ ซึ่งเดิมยังไม่สามารถใช้งานได้ โดยการพัฒนานั้นจะเริ่มจากระบบการฉายรังสีภายในห้องปฏิบัติการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ ซึ่งทำการพัฒนาร่วมกับพนักงานภายในศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ ไปจนถึงการพัฒนากระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ทั้งกระบวนการ ซึ่งถือได้ว่าเป็นงานวิจัยแรกที่พัฒนากระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ภายในประเทศไทย เพื่อที่จะสามารถสร้างอุปกรณ์จุลภาคสัดส่วนสูง (High-aspect-ratio microdevices) ชนิดต่าง ๆ ได้โดยการสร้างที่ประเทศไทยทั้งกระบวนการ เพื่อเป็นพื้นฐานให้นักวิจัยรุ่นต่อไป อีกทั้งยังทำการ

พัฒนาหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ขึ้นใหม่ โดยการเปลี่ยนวัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ที่เดิมเป็นทองคำ มาเป็นเงินซึ่งจะทำให้สามารลดค่าใช้จ่ายในการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ลงได้อย่างน้อย 3 เท่า และหลังจากการพัฒนากระบวนลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์จนสำเร็จแล้ว จะทำการพัฒนากระบวน LIGA (Lithographie Galvanoformung Abformung) โดยการนำแม่พิมพ์จุลภาคสัดส่วนสูงที่สร้างจากกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ข้างต้น มาขึ้นด้วยวิธีการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating) โดยโลหะที่จะนำใช้ในการชุบด้วยไฟฟ้านั้น จะใช้โลหะนิกเกิล ซึ่งเป็นโลหะที่ใช้กันทั่วไปสำหรับกระบวนการ LIGA

บทที่ 3
ระบบลำเลียงแสง

ห้องปฏิบัติการแสงสยาม (Siam Photon Laboratory : SPL) เป็นห้องปฏิบัติการที่ทำการพัฒนาการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน ที่อยู่ภายในศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ หรือ ศซ. (National Synchrotron Research Center : NSRC) ตั้งอยู่ ณ จังหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย แสงซินโครตรอนนั้นสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายสายงาน ตั้งแต่การใช้งานด้านพื้นฐานไปจนถึงการใช้งานด้านการประยุกต์ใช้ทั้งด้านฟิสิกส์ เคมีและชีววิทยาซึ่งเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนนี้สร้างขึ้นโดยมีพลังงานขาออกของแสงเท่ากับ 1.2 GeV และวงกักเก็บอิเล็คตรอนขนาด 41-nm•rad มีสถานีทดลองสำหรับกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์เป็นส่วนต่อขยายระบบลำเลียงแสง BL-6 ให้กำเนิดแสงซินโครตรอนด้วยแม่เหล็กโค้ง (bending magnet) ขนาด 1.44 T และมีระบบการลำเลียงแสงซินโครตรอนและกรองแสงเพื่อให้ได้เป็นรังสีเอ็กซ์ออกมาใช้งาน ณ ห้องปฏิบัติการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ซึ่งตั้งอยู่ ณ จุดปลายของระบบลำเลียงแสง BL-6

BL-6 เป็นระบบลำเลียงแสงซินโครตรอนในย่านรังสีเอ็กซ์พลังงานต่ำ สำหรับกระบวนการประดิษฐ์โครงสร้างจุลภาคสัดส่วนสูง (high-aspect-ratio micromachining) และการอาบรังสีวัสดุ (Material X-Ray exposure) แสงซินโครตรอนที่เกิดจากการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนพลังงานสูง ณ บริเวณแม่เหล็กโค้ง BM-6 ของเครื่องกำเนิดแสงสยาม ถูกลำเลียงไปใช้งานที่สถานีอาบรังสี (Exposure Station) โดยระบบลำเลียงแสง BL-6 การลำเลียงแสงเพื่อนำออกมาใช้งานดังกล่าว มีข้อพิจารณาสามประการคือ

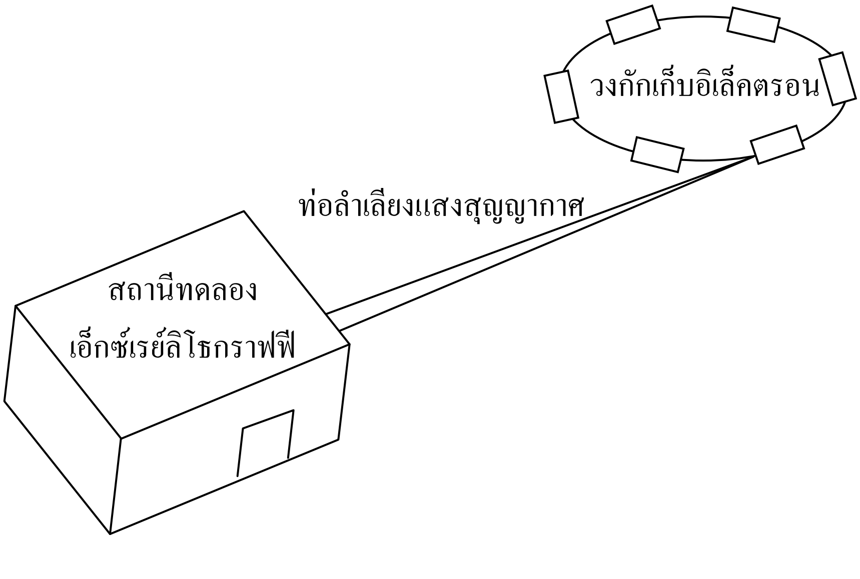
1. ตามปกติแล้วการอาบรังสีเอ็กซ์ลงบนวัสดุจะดำเนินการในบรรยากาศซึ่งมีความดันย่าน 10^{-2} - 10^{-4} ทอรร์ แต่เนื่องจากบรรยากาศภายในเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน มีความดันเพียง 10^{-9} - 10^{-11} ทอรร์ ดังนั้นระบบลำเลียงแสงที่ใช้จะต้องมีส่วนที่แยกบรรยากาศที่แตกต่างกันมากดังกล่าวออกจากกัน

2. เนื่องจากแสงที่กำเนิดจากแม่เหล็ก BM-6 มีความยาวคลื่นในย่านกว้าง ดังนั้นจึงต้องทำการกรองแสงโดยการกั้นทางเดินของแสงด้วยหน้าต่างตัวกรองเบอริลเลียม (Beryllium window filter) ให้เหลือเฉพาะย่านแสงที่มีความยาวคลื่นในย่านที่ต้องการ ผ่านออกไปยังสถานีอาบรังสีได้

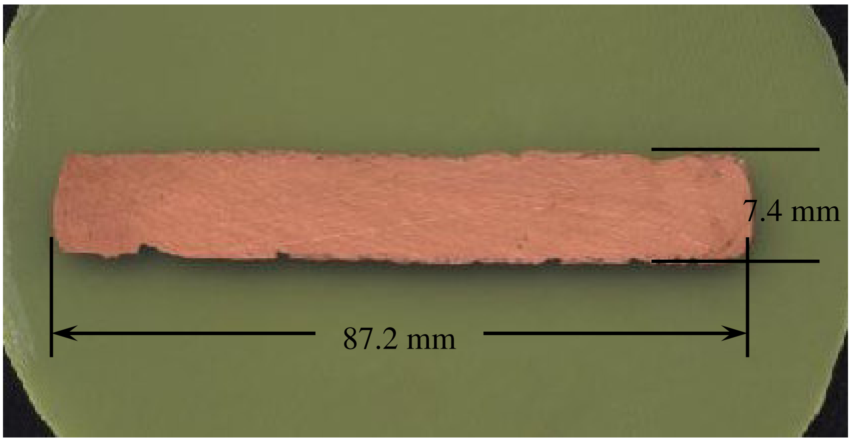
3. ลำแสงซินโครตรอนมีลักษณะเป็นแถบแบน ดังนั้นจึงต้องมีกลไกขับเคลื่อนวัสดุหรือชิ้นงาน ให้เคลื่อนที่ตัดผ่านแถบแสง จึงจะสามารถอาบรังสีเอ็กซ์ในบริเวณกว้างได้

โครงสร้างของระบบลำเลียงแสง BL-6 ได้รับการออกแบบโดยคำนึงถึงข้อพิจารณาสามประการข้างต้น ซึ่งแบ่งออกเป็นสามส่วนได้แก่ ระบบลำเลียงแสงส่วนหน้า (Front-end) ระบบลำเลียงแสงในโถงทดลอง และระบบขับเคลื่อนชิ้นงาน (X-Ray scanner)

ระบบลำเลียงแสง ณ Beamline 6 ของศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาตินั้น เป็นระบบที่นำแสงซินโครตรอนจากแหล่งกำเนิด เข้าไปยังห้องปฏิบัติการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ ซึ่งเป็นห้องสะอาดทึบแสงที่ตั้งอยู่ ณ จุดปลายของแสงที่ลำเลียงออกไปจากวงกักเก็บเพื่อที่จะนำแสงดังกล่าวไปใช้ต่อไป โดยที่ลักษณะการลำเลียงแสงจากระบบลำเลียงแสงส่วนหน้า (Front-end) ไปยังห้องสะอาดทึบแสงแสดงได้ดังรูปที่ 3.1

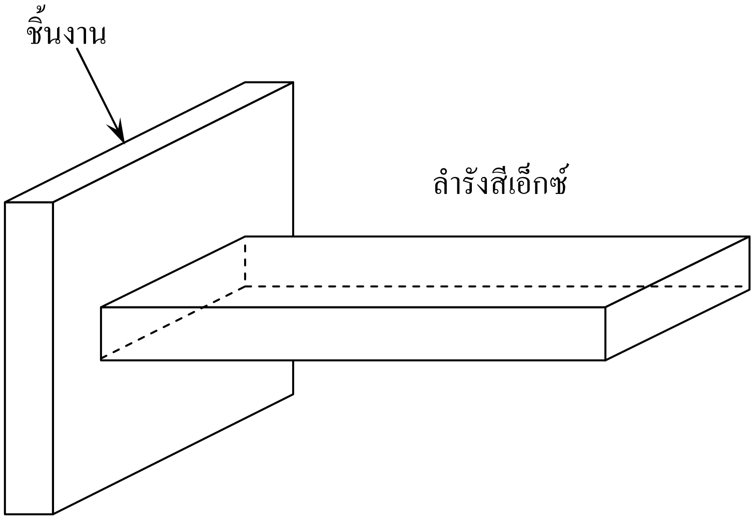


รูปที่ 3.1 การลำเลียงแสงจากระบบลำเลียงแสงส่วนหน้ามายังสถานีทดลองเอ็กซ์เรย์ลิโธกราฟฟี



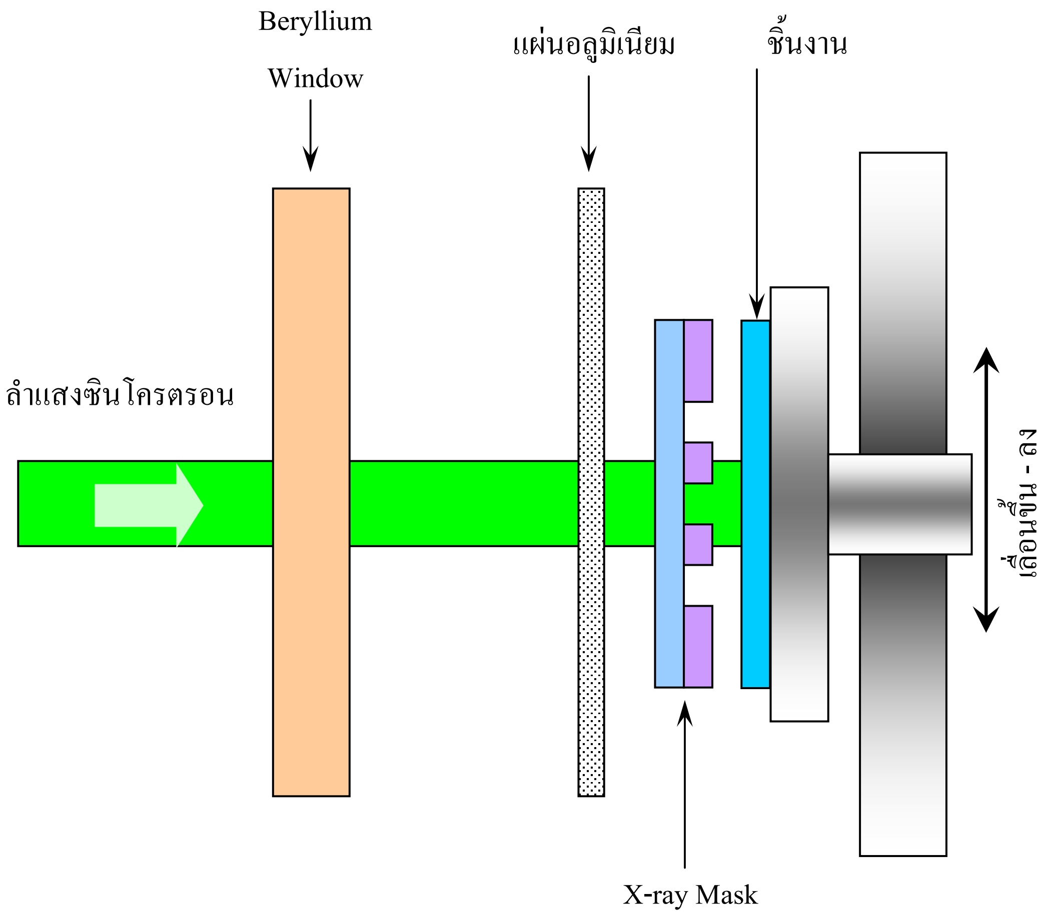
รูปที่ 3.2 ลักษณะและขนาดของลำรังสีเอ็กซ์จาก BL6

จากรูปที่ 3.2 จะเห็นว่าลำรังสีเอ็กซ์ที่ออกมาจากระบบลำเลียงแสงนั้นมีลักษณะแบนยาว โดยขนาดของลำรังสีเอ็กซ์นั้นมีขนาดความยาว 87.2 มิลลิเมตร และสูง 7.4 มิลลิเมตร ซึ่งในการฉายรังสีเอ็กซ์ลงบนชิ้นงานนั้น ขนาดของความกว้างของลำรังสีเอ็กซ์นั้นไม่เพียงพอที่จะฉายให้ทั่วทั้งชิ้นงานได้ ดังรูปที่ 3.3 ดังนั้นในกระบวนการฉายแสงจึงต้องมีระบบแสกนเพื่อให้สามารถฉายรังสีเอ็กซ์ให้ทั่วทั้งชิ้นงานได้ โดยการแสกนนั้นจากขนาดของลำรังสีเอ็กซ์แล้วจะเห็นขนาดด้านความยาวของรังสีนั้นมีความยาวที่เพียงพอต่อความต้องการ แต่ขนาดความสูงนั้นค่อนข้างน้อยมาก และไม่เพียงพอที่ฉายให้ทั่วชิ้นงาน ดังนั้นระบบสแกนจึงทำการสแกนชิ้นงานในลักษณะขึ้นลงเพื่อให้รับรังสีจนทั่วทั้งชิ้นงาน

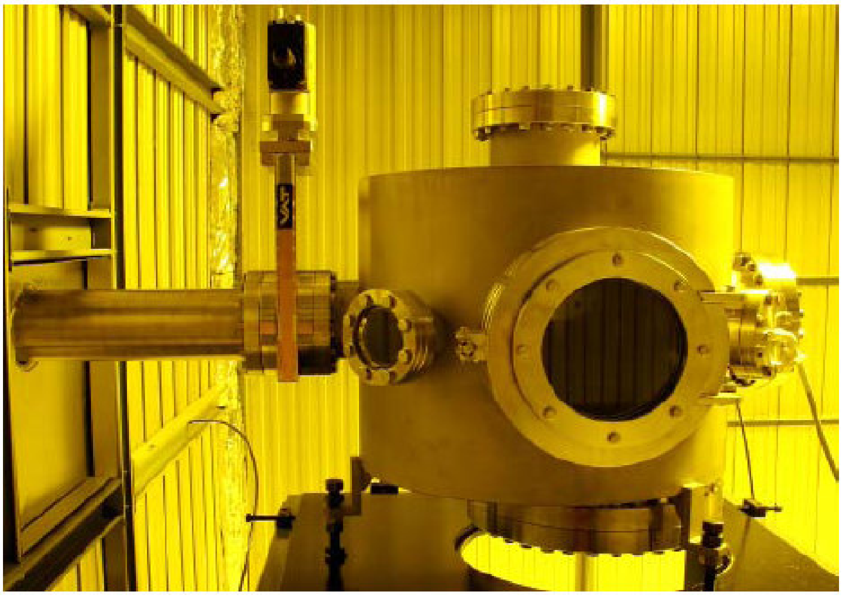


รูปที่ 3.3 การตกกระทบของรังสีเอ็กซ์ลงบนชิ้นงาน

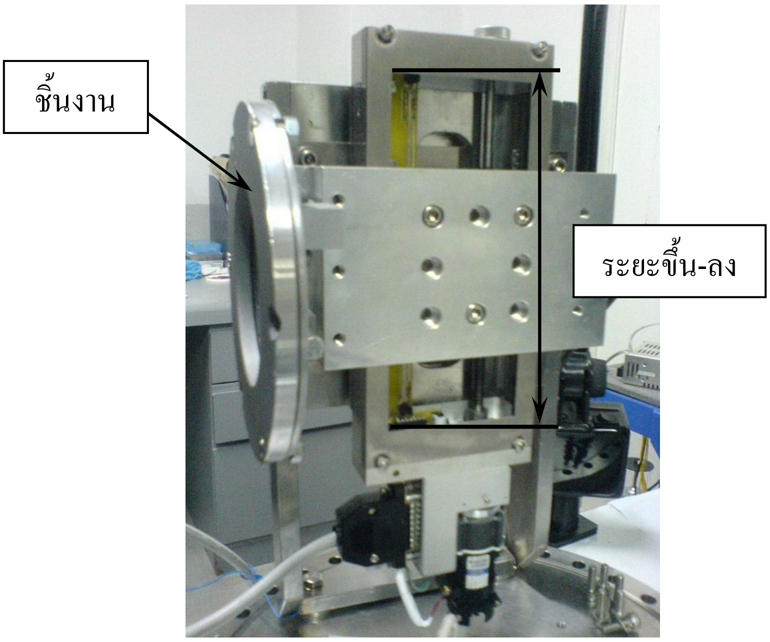
ภายในห้องทึบแสงซึ่งเป็นห้องปฏิบัติการลิโธกราฟฟีนั้น จะมีระบบขับเคลื่อนชิ้นงาน (scanner) ซึ่งเป็นระบบสำหรับการเลื่อนชิ้นงานเพื่อทำการอาบรังสีเอ็กซ์ลงบนชิ้นงาน ซึ่งการเลื่อนชิ้นงานนั้นจะทำการเลื่อนในทิศทาง ขึ้น-ลง โดยอัตราการเลื่อน 100 มิลลิเมตร ใช้เวลา 2 นาที 2 วินาที หรืออัตราการเลื่อนขึ้น-ลง เท่ากับ 49.18 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งอัตราการเลื่อนดังกล่าวนั้น เป็นตัวแปรที่สำคัญในการกำหนดค่าพลังงานรวมบนพื้นผิวชิ้นงานเมื่อทำการเลื่อนชิ้นงานเพื่ออาบรังสีครบหนึ่งรอบ และการกำหนดพลังงานรวมทั้งหมดจะกำหนดจากจำนวนรอบในการเลื่อนชิ้นงานนั่นเอง โดยระบบขับเคลื่อนชิ้นงานนั้น เป็นระบบที่ทำการเลื่อนชิ้นงานในบรรยากาศที่ความดันประมาณ 10^{-4}-10^{-6} และสามารถกำหนดจำนวนรอบในการเลื่อนชิ้นงานได้ แต่ยังไม่สามารถกำหนดความเร็วในการเลื่อนชิ้นงานได้ โดยลักษณะการแสกนชิ้นงานและการติดตั้งชิ้นงานลงบนเครื่องสแกนเนอร์นั้น แสดงได้ดังรูปที่ 3.4 ทั้งนี้ระบบขับเคลื่อนชิ้นงานยังอยู่ระหว่างการพัฒนาเพื่อให้สามารถกำหนดค่าต่าง ๆ ได้ตรงตามต้องการ ภาพแสดงส่วนประกอบของระบบขับเคลื่อนชิ้นงานที่ติดตั้งอยู่ภายในห้องปฏิบัติการลิโธกราฟฟีนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 3.5 – รูปที่ 3.6



รูปที่ 3.4 การติดตั้งชิ้นงานลงบนเครื่องแสกนเนอร์เพื่ออาบรังสีเอ็กซ์



รูปที่ 3.5 ห้องสุญญากาศ ที่มีระบบขับเคลื่อนชิ้นงานอยู่ภายใน



รูปที่ 3.6 ระบบขับเคลื่อนชิ้นงานภายในห้องสุญญากาศ

และเนื่องจากลำแสงที่มาตกกระทบยังชิ้นงานภายในห้องสุญญากาศนั้นมีลักษณะแบนยาวโดยขนาดของลำแสงนั้นมีขนาดความยาวประมาณ 87.2 มิลลิเมตร และความสูงประมาณ 7.4 มิลลิเมตร ดังนั้นชิ้นงานที่จะทำการอาบรังสีนั้น ต้องมีขนาดความกว้างมากที่สุดประมาณ 80

มิลลิเมตร และขนาดความสูงมากที่สุดประมาณ 80 มิลลิเมตร เช่นเดียวกัน เนื่องจากถูกจำกัดไว้ด้วยระยะในการขับเคลื่อนชิ้นงานนั่นเอง

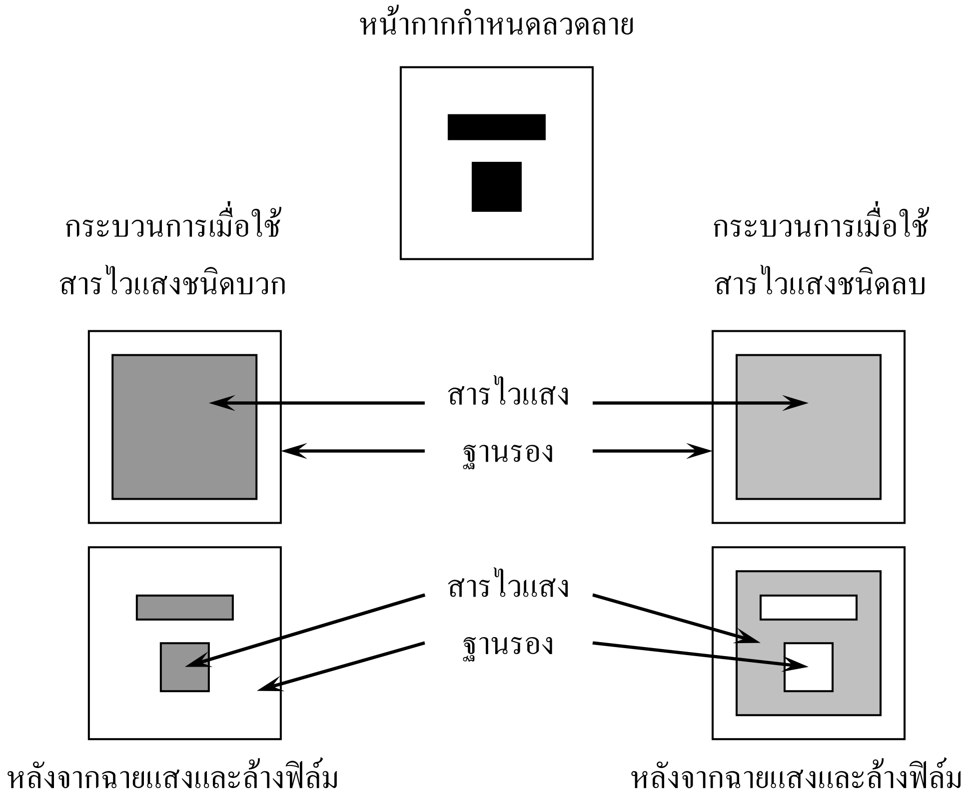
เนื่องจากระบบขับเคลื่อนชิ้นงานนั้น การเลื่อนชิ้นงาน ขึ้น-ลง ค่อนข้างช้าส่งผลให้การกำหนดค่าพลังงานรวมบนชิ้นงานจึงไม่สามารถกำหนดได้ละเอียดมากนัก ซึ่งจากความเร็วในการเลื่อนชิ้นงานของระบบขับเคลื่อนชิ้นงานนั้น หากชิ้นงานมีขนาด 1 ตารางเซนติเมตร เวลาในการเลื่อนชิ้นงานเพื่ออาบรังสี 1 รอบคือ 0.21 นาที และหากขณะนั้นพลังงานของรังสีภายในวงกักเก็บมีค่า 40.00 mA จะได้พลังงานรวมใน 1 รอบเท่ากับ 8.33 mA.min/cm จากค่าดังกล่าวจะเห็นว่า หากต้องการพลังงานรวมเท่ากับ 30 mA.min/cm จะไม่สามารถทำได้ ซึ่งหากเลื่อนชิ้นงาน 3 รอบจะได้พลังงานรวมเท่ากับ 24.99 mA.min/cm หรือหากเลื่อนชิ้นงานจำนวน 4 รอบ จะได้พลังงานรวมเท่ากับ 33.32 mA.min/cm ซึ่งระบบขับเคลื่อนชิ้นงานดังกล่าวยังอยู่ในระหว่างการพัฒนาปรับปรุงและหาจุดบกพร่องของระบบ เพื่อให้สามารถทำงานได้ตรงตามความต้องการมากที่สุด

บทที่ 4
การลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์

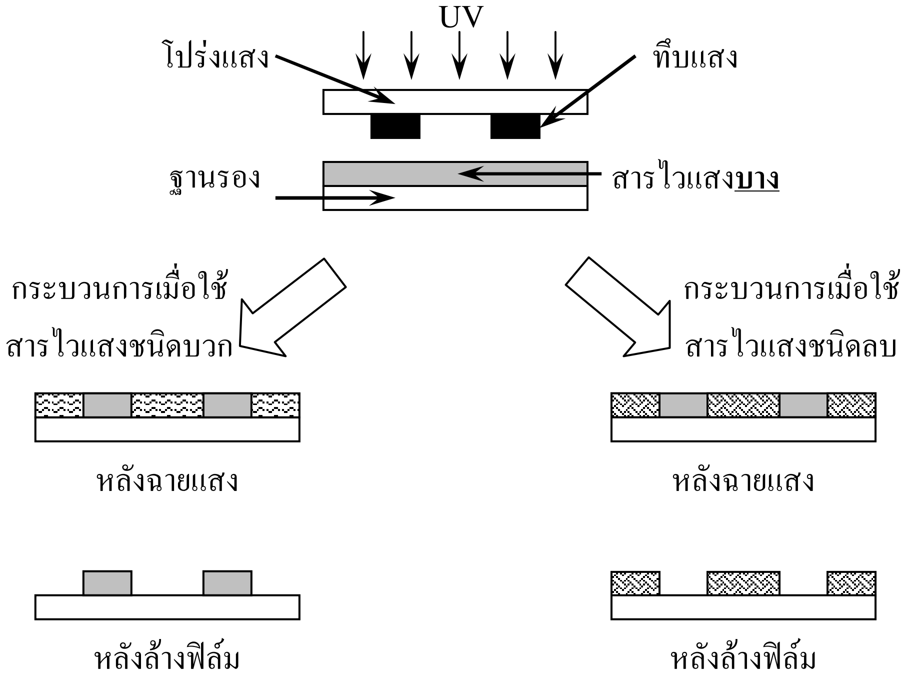
ในกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์นั้น รังสีเอ็กซ์ที่จะนำมาทำการฉายลงบนชิ้นงาน จะใช้แสงที่ทำการลำเลียงออกมาจากวงกักเก็บอิเล็กตรอน ณ ระบบลำเลียงแสง BL-6 ของศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ ซึ่งได้กล่าวมาแล้วจากบทที่ 3 ในกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ จะสามารถสร้างชิ้นงานที่มีสัดส่วนความสูงต่อความกว้างมาก ๆ (High-aspect-ratio) ได้ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการสร้างชิ้นงานทางด้านระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (Micro-electro-mechanical System : MEMS) เนื่องจากในอุปกรณ์จุลภาคหลายชนิด เมื่อเราสามารถเพิ่มความสูงขึ้นได้ จะทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ได้เช่นเดียวกัน

4.1 กระบวนการลิโธกราฟฟี

กระบวนการลิโธกราฟฟี หมายถึงการใช้กระบวนการทางเคมีในการถอดแบบลวดลายจากลวดลายต้นแบบที่เป็นลายเส้นทึบแสงลงบนพื้นผิวเรียบ ซึ่งอาจเป็นการสร้างลวดลายลงบนกระดาษหรือวัสดุอื่น ๆ โดยวัสดุดังกล่าวต้องมีลักษณะพื้นผิวที่เรียบ ในการถอดแบบนั้นจะใช้สารเคมีที่มีคุณสมบัติทางกายภาพ เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีแสงมาตกกระทบ เรียกสารดังกล่าวว่า สารไวแสง (Photoresist) สารไวแสงสามารถจำแนกออกได้เป็นสองชนิด คือ สารไวแสงชนิดบวก (Positive-tone photoresist) และสารไวแสงชนิดลบ (Negative-tone photoresist) ซึ่งสารไวแสงทั้งสองชนิดนั้น เมื่อมีแสงมาตกกระทบจะทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของสารเปลี่ยนไป ในลักษณะที่แตกต่างกัน โดยสารไวแสงชนิดบวกนั้น บริเวณที่มีแสงมาตกกระทบจะสามารถล้างออกได้ด้วยน้ำยาดีเวลอปเปอร์ เหลือไว้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีแสงมาตกกระทบเท่านั้น ส่วนสารไวแสงชนิดลบนั้น บริเวณที่ไม่มีแสงมาตกกระทบจะสามารถล้างออกได้ด้วยน้ำยาดีเวลอปเปอร์ เหลือไว้เฉพาะบริเวณที่มีแสงมาตกกระทบเท่านั้น โดยแสงที่ใช้ในการฉายลงบนสารไวแสงนั้น จะอยู่ในย่านแสงอัลตราไวโอเลต (Ultra-violet : UV) ซึ่งจากคุณสมบัติของสารทั้งสองชนิด เมื่อต้องการถอดแบบลวดลายจึงสามารถทำลวดลายที่แตกต่างกันได้สองลักษณะ ขึ้นอยู่กับการเลือกชนิดของสารไวแสงที่ใช้ในกระบวนการลิโธกราฟฟีนั่นเอง กระบวนการลิโธกราฟฟีทั้งกระบวนการโดยสังเขป แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ซึ่งทั้งสองรูปจะเป็นการเปรียบเทียบให้เห็นข้อแตกต่างระหว่างการใช้สารไวชนิดบวก และการใช้สารไวแสงชนิดลบ

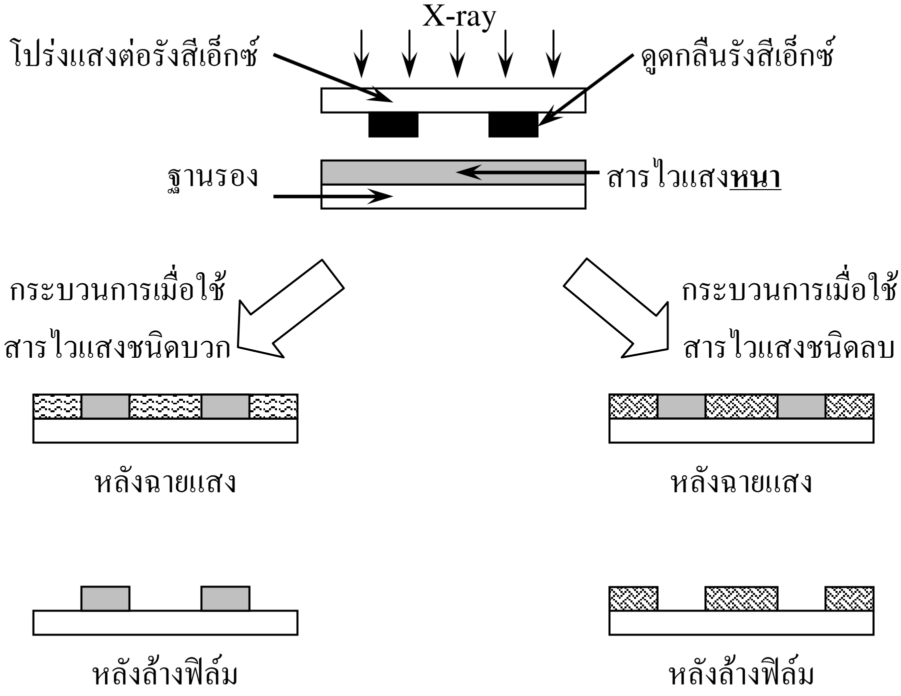


รูปที่ 4.1 การถอดแบบลวดลายด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟี



รูปที่ 4.2 ภาพตัดขวางการถอดแบบลวดลายด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟี

วิธีการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์นั้น จะเป็นกระบวนในลักษณะเดียวกันกับกระบวนการลิโธกราฟฟีที่ได้กล่าวมาข้างต้น แตกต่างกันตรงที่นำแสงในย่านรังสีเอ็กซ์ มาใช้แทนแสงในย่านแสงอัลตราไวโอเลต ซึ่งจากคุณสมบัติของรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานสูง ทำให้สามารถสร้างลวดลายสามมิติได้ กล่าวคือ สามารถเคลือบสารไวแสงให้มีความหนาเกิน 1 มิลลิเมตรได้ ซึ่งด้วยข้อดีดังกล่าว จึงสามารถใช้กระบวนลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์มาสร้างชิ้นงานทางด้านระบบกลไฟฟ้าจุลภาคที่มีสัดส่านความสูงต่อความกว้างมาก ๆ ได้ รูปที่ 4.3 แสดงกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์โดยสังเขป

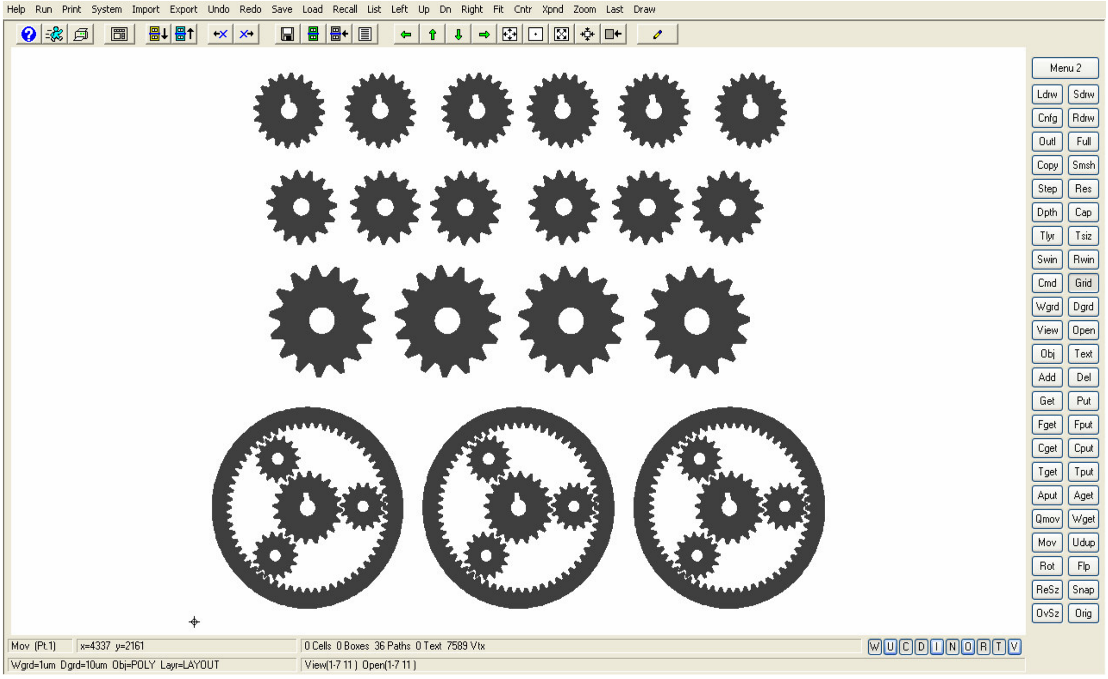


รูปที่ 4.3 ภาพตัดขวางการถอดแบบลวดลายด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์

ในกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์นั้น สิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญต่อกระบวนการอย่างมากคือ หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ ซึ่งจะทำงานเป็นลวดลายต้นแบบนั่นเอง ในกรณีการลิโธกราฟฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเลตนั้น ลวดลายต้นแบบหรือหน้ากากกั้นแสงนั้น จะเป็นลวดลายที่อยู่ในรูปของหมึกทึบแสงที่เป็นลวดลายบนวัสดุโปร่งแสง อาจจะเป็นลวดลายบนแผ่นใสหรือบนกระจก แต่ในกรณีของหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์นั้น ลวดลายจะอยู่ในรูปของวัสดุที่ดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ได้ดีเป็นลวดลายอยู่บนวัสดุที่ความโปร่งแสงได้ดี ซึ่งหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ส่วนใหญ่แล้ว จะใช้ทองคำที่มีคุณสมบัติดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ได้ดี เป็นลวดลายอยู่บนแผ่นกราไฟต์บาง ซึ่งในหัวข้อต่อ ๆ ไป จะได้กล่าวถึงกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์โดยละเอียด

4.2 การออกแบบลวดลาย

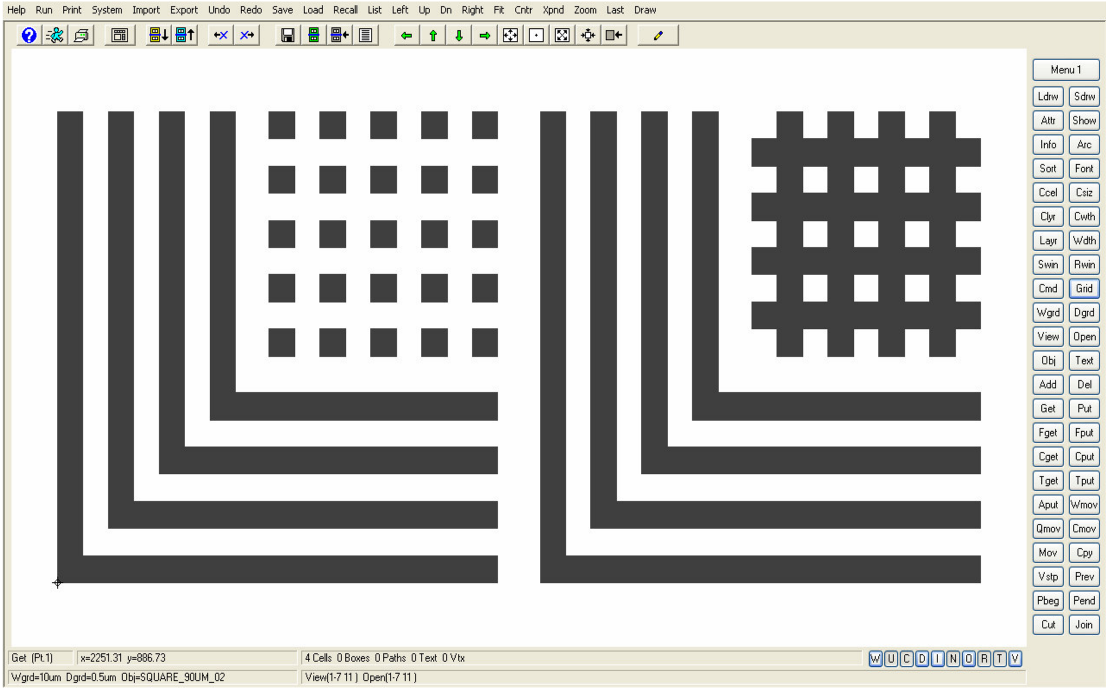
ขั้นตอนแรกสุดนั้นจะเป็นการออกแบบลวดลาย ที่จะนำมาทดสอบกระบวนลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ทั้งหมด ซึ่งลวดลายที่ทำการออกแบบนี่เองที่จะถูกนำไปสร้างเป็นหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ โดยการออกแบบลวดลายดังกล่าวจะเป็นลวดลายที่มีรายละเอียดในระดับไมโครเมตร และในการออกแบบนั้น จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ชื่อ LASI ในการวาดลวดลาย ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวเป็นโปรแกรมที่มีความสามารถในการออกแบบลวดลายต่าง ๆ ที่มีความละเอียดของลวดลายในระดับไมโครเมตรได้ โดยลวดลายที่จะนำมาใช้ในการทดสอบกระบวนการนั้น จะใช้ลวดลายที่เป็นรูปเฟืองที่เมื่องสร้างเสร็จสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง และรูปแบบแท่งคล้ายฟันหวี ที่มีทั้งส่วนสำหรับทดสอบบริเวณที่เป็นแท่ง และส่วนที่ใช้ทดสอบบริเวณที่เป็นหลุมในลวดลาย ลวดลายทั้งสองแบบแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 ลวดลายเฟืองที่ออกแบบบนโปรแกรม LASI โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเฟืองตัวบนสุด มีขนาด 370 ไมโครเมตร

เพื่อที่จะให้ลวดลายดังกล่าวเป็นฟิล์มที่สามารถกั้นแสงได้นั้น เมื่อทำการออกแบบลวดลายที่ต้องการจนเสร็จแล้ว จะทำการนำลวดลายที่ออกแบบส่งไปสร้างเป็นลวดลายด้วยหมึกดำทึบแสงลงบนแผ่นใสหรือกระจกใส และลวดลายที่สร้างเสร็จแล้วนั้น จะสามารถนำมาใช้เป็นหน้ากากกั้นแสงอัลตราไวโอเลตนกระบวนการลิโธกราฟฟีได้ โดยรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 แสดงฟิล์มทึบแสงที่

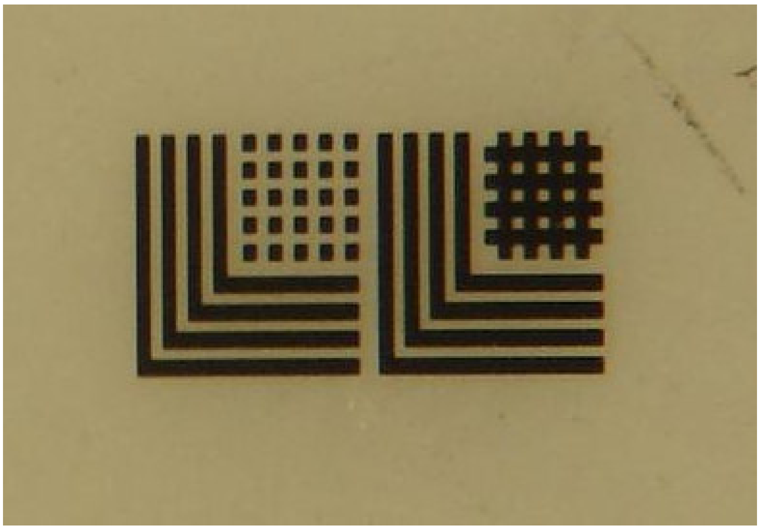
สร้างลวดลายด้วยหมึกดำทึบแสงลงบนแผ่นใส ซึ่งจะนำไปใช้เป็นหน้ากากกั้นแสงในกระบวนการลิโธกราฟฟีต่อไป



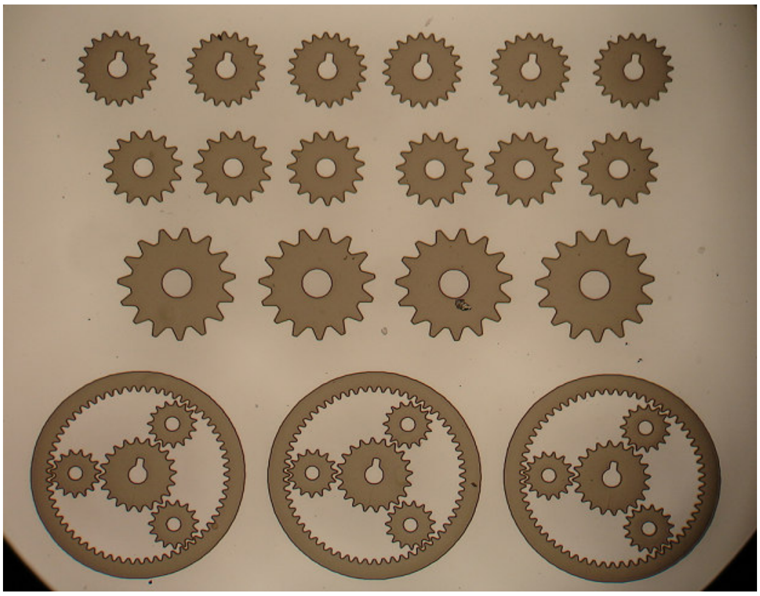
รูปที่ 4.5 ลวดลายแท่งทดสอบที่ออกแบบบนโปรแกรม LASI โดยขนาดของแท่งแต่ละอันกว้างเท่า ๆ กัน แท่งละ 60 ไมโครเมตร

เพื่อที่จะให้ลวดลายดังกล่าวเป็นฟิล์มที่สามารถกั้นแสงได้นั้น เมื่อทำการออกแบบลวดลายที่ต้องการจนเสร็จแล้ว จะทำการนำลวดลายที่ออกแบบส่งไปสร้างเป็นลวดลายด้วยหมึกดำทึบแสงลงบนแผ่นใสหรือกระจกใส และลวดลายที่สร้างเสร็จแล้วนั้น จะสามารถนำมาใช้เป็นหน้ากากกั้นแสงอัลตราไวโอเลตนกระบวนการลิโธกราฟฟีได้ โดยรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 แสดงฟิล์มทึบแสงที่สร้างลวดลายด้วยหมึกดำทึบแสงลงบนแผ่นใส ซึ่งจะนำไปใช้เป็นหน้ากากกั้นแสงในกระบวนการลิโธกราฟฟีต่อไป

จากกระบวนการที่ได้กล่าวมาข้างต้น และหน้ากากกั้นแสงที่ได้สร้างขึ้นนั้นจะเห็นว่าหน้ากากกั้นแสงที่ได้มานั้น ไม่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ได้ เนื่องจากไม่สามารถนำมาใช้เป็นหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ได้ ดังนั้นขั้นตอนต่อไป จะเป็นขั้นตอนสำหรับการนำลวดลายที่สร้างเป็นหน้ากากกั้นแสงเสร็จแล้วนั้น มาสร้างเป็นหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ โดยในกระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์นั้น จะสร้างจากกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเลต



รูปที่ 4.6 ลวดลายแท่งทดสอบที่สร้างจากหมึกดำทึบแสงบนแผ่นใส



รูปที่ 4.7 ลวดลายเฟืองที่สร้างจากหมึกดำทึบแสงบนกระจกใส

4.3 การสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์

หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ ถือได้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญ ในกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ เนื่องจากเป็นอุปกรณ์หลักในการกำหนดลวดลายของชิ้นงานที่จะทำการสร้างขึ้น ในขั้นตอนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์นั้น จะเป็นขั้นตอนการลอกแบบลวดลายที่ได้มา ซึ่งอยู่ในรูปของฟิล์มทึบแสงที่สามารถกั้นแสงในย่านแสงอัลตราไวโอเลตได้ ให้กลายมาเป็นหน้ากากที่สามารถกั้น

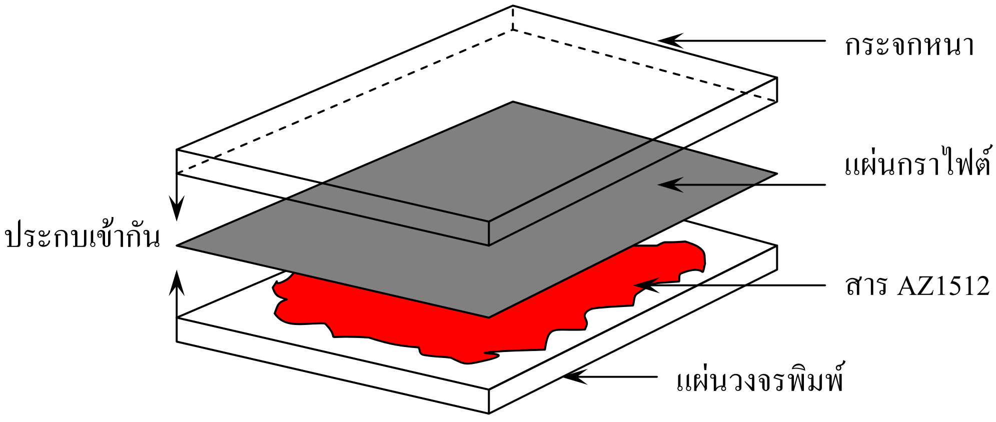
รังสีเอ็กซ์ได้ ในขั้นตอนดังกล่าวสามารถกำหนดลวดลายที่ออกมาได้ด้วยการเลือกชนิดของสารไวแสงที่จะใช้ในกระบวนการ โดยหากต้องการให้ลวดลายในบริเวณที่เคยโปร่งแสงให้ให้เป็นบริเวณที่รังสีเอ็กซ์สามารถทะลุผ่านได้ และให้ลวดลายในบริเวณที่เคยทึบแสงให้ให้เป็นบริเวณที่รังสีเอ็กซ์ไม่สามารถทะลุผ่านได้ จะเลือกใช้สารไวแสงชนิดลบ หรือหากต้องการให้ลวดลายในบริเวณที่เคยโปร่งแสงให้ให้เป็นบริเวณที่รังสีเอ็กซ์ไม่สามารถทะลุผ่านได้ และให้ลวดลายในบริเวณที่เคยทึบแสงให้ให้เป็นบริเวณที่รังสีเอ็กซ์สามารถทะลุผ่านได้แล้ว จะเลือกใช้สารไวแสงชนิดบวก และขั้นตอนดังกล่าวนี้จะใช้กระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเลตในการถอดแบบ เช่นเดียวกับฐานของหน้ากั้นแสงที่ใช้กระจกเพราะแสงในย่านรังสีอัลตราไวโอเลตหรือแสงที่สามารถมองเห็นได้สามารถทะลุผ่านกระจกได้ ดังนั้นฐานของหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ก็จะเป็นวัสดุที่รังสีเอ็กซ์สามารถทะลุผ่านได้ดี โดยทั่วไปแล้วจะใช้วัสดุที่มีเลขอะตอมน้อย เช่น เบอริลเลียม, คาร์บอน และโพลีอิไมด์ เป็นต้น ซึ่งจะใช้ฐานรองที่ความหนาในย่าน 50 – 1,000 ไมโครเมตร และส่วนทึบแสงต่อรังสีเอ็กซ์นั้นโดยทั่วไปใช้วัสดุที่มีเลขอะตอมสูง และโดยทั่วไปใช้ทองคำซึ่งมีเลขอะตอม 79 โดยมีความหนาไม่ถึง 10 ไมโครเมตร เมื่อใช้ร่วมกับโฟตอนในย่านรังสีเอ็กซ์พลังงานต่ำในช่วง 1 ถึง 4 keV โดยในการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ในงานวิจัยนี้ใช้ฐานรองเป็นกราไฟต์ (graphite) ซึ่งเป็นวัสดุในพวก Carbon และใช้คู่กับวัสดุทึบแสงต่อรังสีเอ็กซ์ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้โลหะเงิน ซึ่งเป็นวัสดุที่มีเลขอะตอม 47 และสารไวแสงในกระบวนการถอดแบบใช้สารไวแสง SU-8 ซึ่งเป็นสารไวแสงชนิดลบ โดยขั้นตอนในการถอดแบบมีดังนี้

4.3.1 การเตรียมชิ้นงานสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์

วัสดุที่จะนำมาใช้เป็นหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์นั้น เลือกใช้แผ่นกราไฟต์บางที่มีความหนาของแผ่น 150 ไมโครเมตร ซึ่งในกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์นั้น แผ่นกราไฟต์บางถือว่าเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมในการนำมาทำเป็นแผ่นฐานรองของหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ เนื่องจากคุณสมบัติที่ยอมให้รังสีเอ็กซ์ทะลุผ่านได้ดี ทนความร้อนได้สูง ทั้งยังมีราคาที่ไม่สูงมาก โดยก่อนที่จะนำแผ่นกราไฟต์บางมาใช้งานนั้น ต้องทำการล้างสิ่งสกปรกที่ติดอยู่บนผิวของแผ่นกราไฟต์ออกให้หมดเสียก่อน เนื่องจากลวดลายที่จะสร้างนั้นมีขนาดที่เล็กมาก ดังนั้นหากมีคราบหรือฝุ่นบนชิ้นงาน จะส่งผลกระทบอย่างมากต่อการสร้างชิ้นงาน หรืออาจทำให้ชิ้นงานเสียหายได้ แผ่นกราไฟต์บางที่นำมาใช้นั้นจะค่อนข้างยากต่อการใช้งาน เนื่องจากมีความบางมากจึงเปราะและแตกหักง่าย ดังนั้นก่อนที่จะนำมาใช้งาน จึงต้องทำการติดแผ่นกราไฟต์ลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed-circuit board : PCB) เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งานและลดอัตราเสี่ยงต่อการแตกหักเสียหาย โดยในการติดแผ่นกราไฟต์ลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ นั้นเลือกใช้สารไวแสงชนิดบวกเบอร์ AZ1512 ให้ทำหน้าที่เสมือนกาวในการยึดระหว่างแผ่นกราไฟต์กับแผ่นวงจรพิมพ์ เนื่องจากติดค่อนข้างดีและเป็น

สารที่ไม่เข้มข้นมากนัก จึงสามารถติดได้ทั่วทั้งแผ่น ทั้งยังสามารถล้างออกได้โดยง่ายด้วยอาซิโตน (Acetone) เมื่อต้องการให้แผ่นกราไฟต์หลุดออกจากแผ่นวงจรพิมพ์ภายหลังกระบวนการเสร็จสิ้น

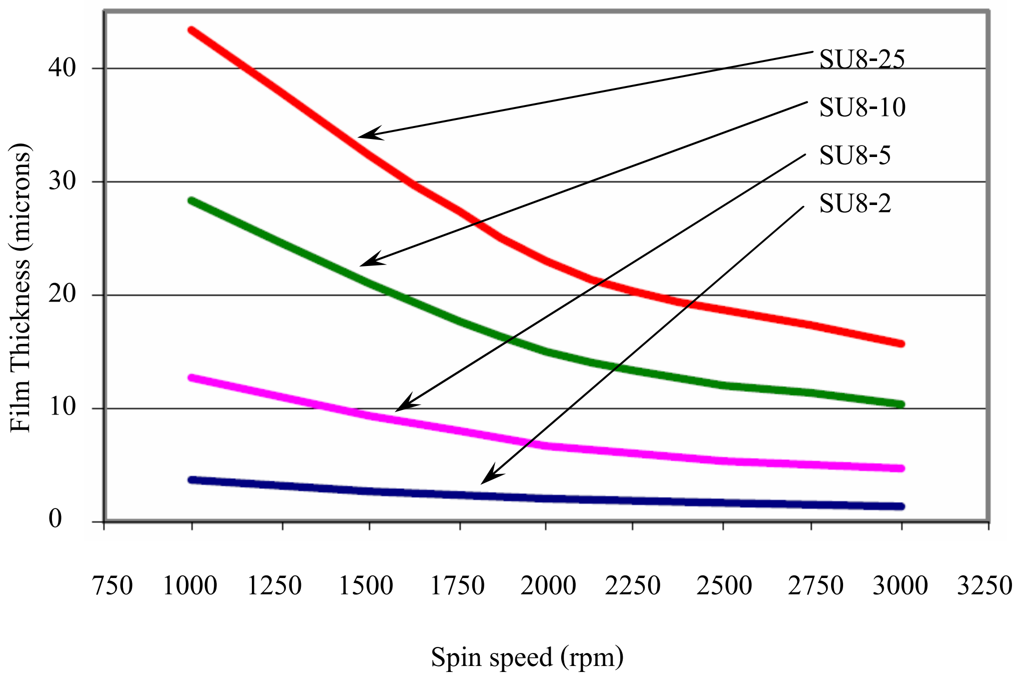
ก่อนทำการเคลือบสารเคมีใด ๆ ลงไปบนแผ่นกราไฟต์หรือติดแผ่นกราไฟต์ลงบนแผ่นวงจรพิมพ์นั้น ต้องทำการทำความสะอาดแผ่นกราไฟต์ให้สะอาดก่อน โดยการล้างด้วยอาซิโตน หลังจากนั้น ล้างต่อด้วย IPA (isopropyl alcohol) ในทันที ต่อจากนั้นนำไปจุ่มลงในน้ำดีไอ (DI water) ก่อนจะนำเข้าไปในเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic) เพื่อให้คราบหรือเศษฝุ่นที่มีขนาดเล็ก หลุดออกมา หลังจากนั้นเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน (Nitrogen) แล้วอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมงเป็นอย่างน้อย เพื่อให้แผ่นกราไฟต์แห้งสนิท เนื่องจากแผ่นกราไฟต์นั้นจะมีรูพรุนขนาดเล็กค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการอบในเวลาค่อนข้างนานเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีของเหลวใด ๆ ตกค้างอยู่ในรูพรุนของแผ่นกราไฟต์ เมื่อทำการทำความสะอาดและอบชิ้นงานเป็นที่เรียบร้อยแล้วจึงนำแผ่นกราไฟต์ดังกล่าวมาติดลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ ที่ทำความสะสาดแล้วเช่นเดียวกัน โดยกระบวนการหลังจากนี้ จะเป็นกระบวนการที่ทำในห้องทึบแสงตลอดกระบวนการ ขั้นตอนในการติดแผ่นกราไฟต์ลงบนแผ่นวงจรพิมพ์นั้น จะทำการเคลือบสารไวแสง AZP1512 ลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ ให้ทั่วทั้งแผ่น แล้วนำแผ่นกราไฟต์มาวางลงไปเบา ๆ จากนั้นนำแผ่นกระจกที่ทำความสะอาดแล้วมาวางทับบนแผ่นกราไฟต์เพื่อให้แผ่นกราไฟต์แนบกับแผ่นวงจรพิมพ์จนสนิท ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ก่อนจะทำการอบให้สารไวแสง AZP1512 แห้ง โดยการอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นจึงทำการเพิ่มอุณหภูมิในเตาอบให้เพิ่มขึ้นและค้างไว้ในเตาอบที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที แล้วปล่อยอุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้องอย่างช้า ๆ เพื่อป้องกันการโก่งตัวของชิ้นงาน เมื่อทำการติดแผ่นกราไฟต์ลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ จนพร้อมใช้งานแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นขั้นตอนในการเคลือบสารไวแสงลงไปบนแผ่นกรไฟต์ ซึ่งติดแน่นอยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์



รูปที่ 4.8 การติดแผ่นกราไฟต์บางลงบนแผ่นวงจรพิมพ์

4.3.2 การเคลือบสารไวแสงลงบนหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์

สำหรับการเคลือบสารไวแสงลงไปบนแผ่นชิ้นงานซึ่งเป็นแผ่นกราไฟต์นั้น สารไวแสงที่จะนำมาเคลือบนั้น จะอยู่ในรูปของเหลว จึงจะใช้วิธีการหมุนเคลือบ (Spin coating) ลงไปบนแผ่นกราไฟต์ และสารไวแสงที่เลือกใช้นั้น จะใช้สาร SU-8 เบอร์ 25 ซึ่งเป็นสารไวแสงชนิดลบ และโดยตามคุณสมบัติของสารไวแสงเบอร์ดังกล่าว เมื่อเคลือบลงไปบนชิ้นงานสามารถควบคุมความหนาของฟิล์มได้ที่ความหนาประมาณ 15 ถึง 45 ไมโครเมตร ซึ่งในการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์นั้น จะใช้ความหนาที่ประมาณ 25 ไมโครเมตร จากรูปที่ 4.9 จะเห็นว่า ในการในสารไวแสง SU-8 เบอร์ 25 นั้น ถ้าต้องการความหนา 25 ไมโครเมตร ต้องทำการหมุนเคลือบที่ประมาณ 2,000 รอบต่อนาที ด้วยเครื่องหมุนเคลือบยี่ห้อ Laurell รุ่น WS-400B-6NPP/LIT ของศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ

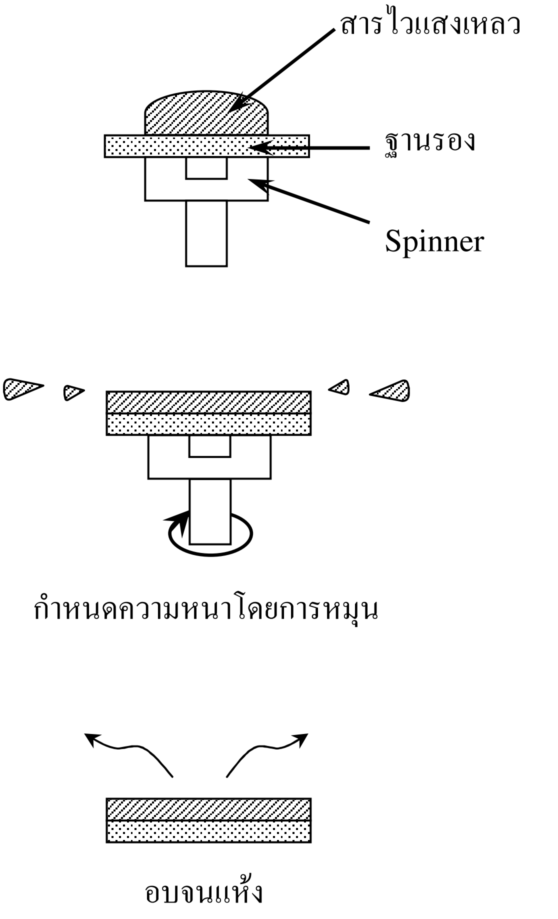


รูปที่ 4.9 กราฟคุณสมบัติของสารไวแสง SU-8 สำหรับเบอร์ที่ให้ความหนาไม่เกิน 50 ไมโครเมตร โดยเปรียบเทียบระหว่างความเร็วในการหมุนเคลือบกับความหนาของฟิล์มที่ได้ (ข้อมูลจากบริษัท MicroChem Corp. ผู้ผลิตสารไวแสง SU-8)

ขั้นตอนในการเคลือบสารไวแสงนั้น ขั้นแรกนำแผ่นกราไฟต์ที่ติดบนแผ่นวงจรพิมพ์เรียบร้อยแล้ว วางบนเครื่องหมุนเคลือบแล้วทำการหยดสารไวแสงลงไปจนทั่ว โดยเน้นให้สารไวแสงอยู่บริเวณกลางชิ้นงาน ซึ่งบริเวณดังกล่าวจะเป็นจุดศูนย์กลางการหมุนของชิ้นงาน ตั้งค่า

การหมุนของเครื่องไว้เป็นสองขั้น ขั้นแรกตั้งค่าให้เครื่องหมุนที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 วินาที แล้วขั้นที่สองจึงตั้งค่าให้เครื่องหมุนที่ความเร็วที่ต้องการนั่นคือ 2,000 รอบต่อนาที เป็นเวลาทั้งสิ้น 30 วินาที ลักษณะการทำงานของเครื่องหมุนเคลือบ แสดงได้ดังรูปที่ 4.10 โดยเมื่อเครื่องทำงานเสร็จสิ้น สารไวแสงจะเคลือบอยู่บนชิ้นงานจนทั่วด้วยความหนาที่ต้องการ แต่สารไวแสงยังคงอยู่ในสถานะของเหลว

เมื่อทำการเคลือบสารไวแสงลงบนแผ่นกราไฟต์แล้ว หลังจากนั้นนำแผ่นกราไฟต์ออกจากเครื่องหมุนเคลือบมาวางบนแผ่นความร้อน (Hot plate) ที่ทำการปรับระดับให้ได้แนวระนาบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที เมื่อครบเวลาที่กำหนด ทำการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นความร้อนขึ้นในอัตรา 2 องศาเซลเซียสต่อนาที จนอุณหภูมิถึง 95 องศาเซลเซียส แล้วค้างไว้ที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที จึงทำการปิดการทำงานของแผ่นความร้อน แล้วปล่อยให้อุณหภูมิของแผ่นความร้อนลดลงด้วยตัวเองจนถึงอุณภูมิห้อง และเมื่ออุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง จะได้แผ่นกราไฟต์ที่เคลือบสารไวแสงพร้อมใช้งานต่อไป



รูปที่ 4.10 การทำงานของเครื่องหมุนเคลือบสาร (Spinner)

ปัจจัยในการกำหนดความหนาของสารไวแสงในการหมุนเคลือบนั้น มีด้วยกันสองปัจจัยหลักคือ ความเหนียวของสารไวแสง และความเร็วรอบในการหมุนเคลือบ โดยหนาสุดท้ายหลังจากการหมุนเคลือบสามารถอธิบายได้ดังสมการ

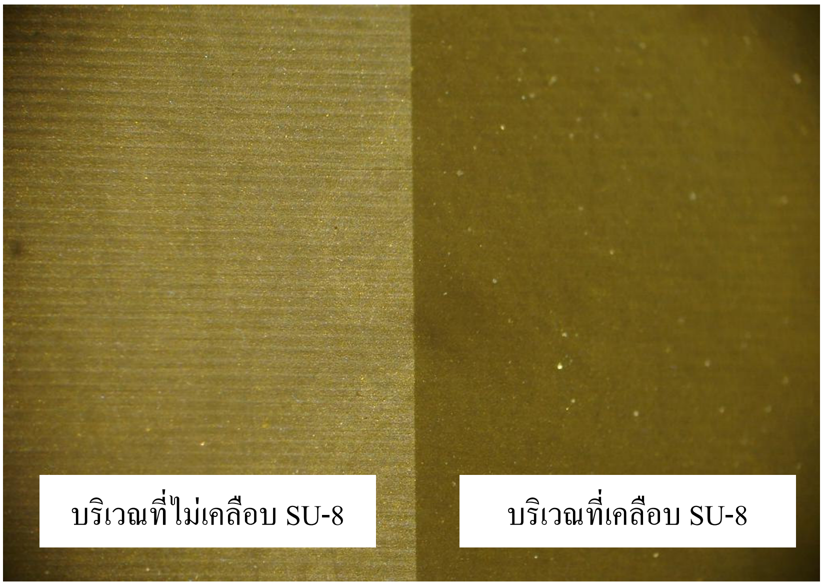
$$Thickness = \frac{kp^2}{\sqrt{w}} \tag{4.1}$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่ของเครื่องเคลือบหมุน (ปกติมีค่า 80 – 100)

p คือ อัตราส่วนของสารไวแสงที่ผสมกับสารประกอบ (%)

w คือ ความเร็วในการหมุนเคลือบ (rpm/1000)

เมื่อเคลือบสารไวแสง SU-8 ลงบนแผ่นกราไฟต์บางเรียบร้อยแล้ว จะได้ลักษณะดังรูปที่ 4.11 ซึ่งแสดงสารไวแสงบางที่เคลือบลงบนแผ่นกราไฟต์เรียบร้อยแล้ว

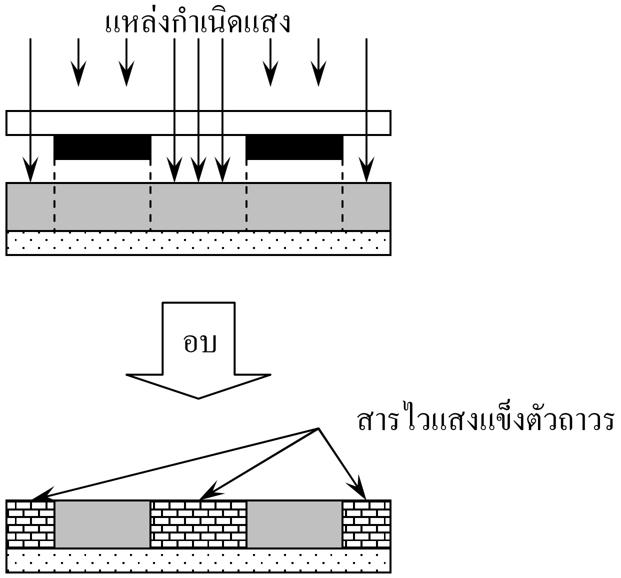


รูปที่ 4.11 แผ่นกราไฟต์บางเปรียบเทียบบริเวณที่ทำความสะอาดเรียบร้อยแล้วกับส่วนที่เคลือบสารไวแสง SU-8 ความหนาประมาณ 25 ไมโครเมตรเรียบร้อยแล้ว

4.3.3 การถ่ายทอดลวดลายต้นแบบโดยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต

หลังจากที่ทำการเคลือบแผ่นกราไฟต์ด้วยสารไวแสงตามความหนาที่ต้องการแล้ว จากนั้นจะนำแผ่นกราไฟต์ดังกล่าวมาทำการฉายแสงเพื่อสร้างลวดลายลงบนแผ่นกราไฟต์ดังกล่าว โดยใน

ขั้นตอนนี้ จะนำหน้ากากกั้นแสงมาวางประกบกับแผ่นกราไฟต์ที่เคลือบสารไวแสงเรียบร้อยแล้ว โดยในการประกบนั้น ต้องให้หน้ากากกั้นแสงด้านที่มีหมึกหันเข้าหาสารไวแสงที่เคลือบบนแผ่นกราไฟต์ ให้ลวดลายชิดกับสารไวแสงมากที่สุด เพื่อให้ได้ลวดลายที่คมชัดที่สุดที่เป็นไปได้ จากนั้นนำไปฉายด้วยแสงอัลตราไวโอเลต เป็นเวลาทั้งสิ้น 1 นาที 45 วินาที แล้วนำหน้ากากกั้นแสงที่ประกบกันอยู่ออก แล้วนำไปทำการอบหลังการฉายแสง (Post-exposure bake) โดยการวางบนแผ่นความร้อน ที่ทำการปรับระดับให้ได้แนวระนาบเดียวเรียบร้อยแล้ว ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที เมื่อครบเวลาที่กำหนด ทำการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นความร้อนขึ้นในอัตรา 3 องศาเซลเซียสต่อนาที จนอุณหภูมิถึง 95 องศาเซลเซียส แล้วให้ไว้ที่ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 นาที 30 วินาที จึงทำการปิดการทำงานของแผ่นความร้อน แล้วปล่อยให้อุณหภูมิของแผ่นความร้อนลดลงด้วยตัวเองจนถึงอุณภูมิห้อง การทำให้อุณหภูมิของแผ่นกราไฟต์ลดลงเร็วเกินไปนั้น อาจทำให้สารไวที่เคลือบอยู่บนแผ่นกราไฟต์ เกิดการแตกร้าวเสียหายได้ หลังจากทำการอบหลังการฉายแสงเรียบร้อยแล้ว จะทำให้สารไวแสงบริเวณที่มีแสงมาตกกระทบ เกิดการแข็งตัวถาวร ส่วนบริเวณที่ไม่มีแสงมาตกกระทบนั้น คุณสมบัติของสารจะยังคงเหมือนเดิม ดังรูปที่ 4.12

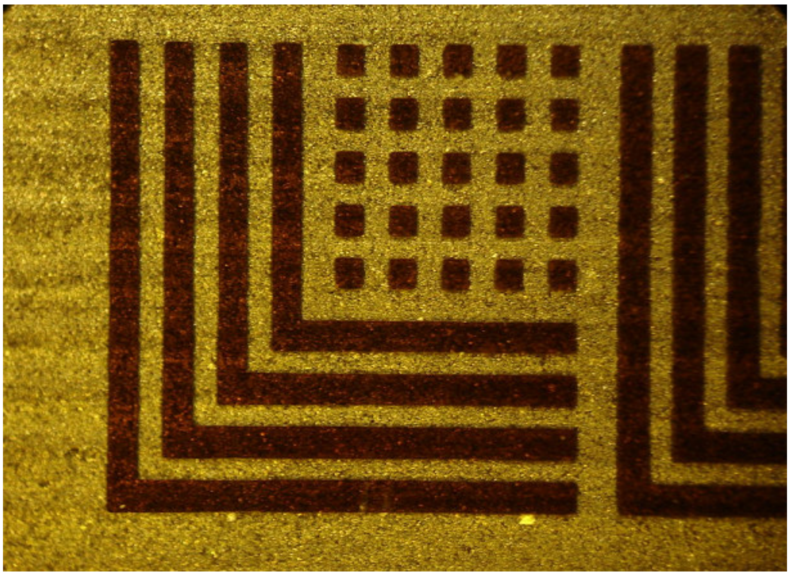


รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนคุณสมบัติของสารไวแสงหลังการฉายแสง

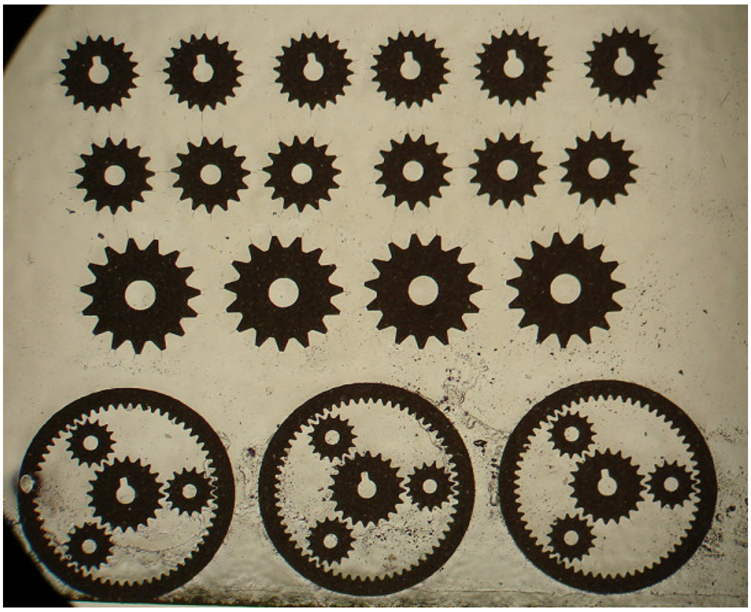
4.3.4 การล้างฟิล์มไวแสงบาง

ในการล้างฟิล์มไวแสง (Developing) นั้น จะเป็นการสร้างลวดลายบนแผ่นกราไฟต์ โดยในการล้างฟิล์มนั้น ทำโดยการแกว่งชิ้นงานที่ฉายแสงเรียบร้อยแล้วในสาร SU-8 developer ซึ่งในขั้นตอนนี้จะเป็นการล้างสารไวแสงในส่วนที่ไม่มีแสงมาตกกระทบออกไป เหลือไว้เฉพาะบริเวณที่

มีแสงมาตกกระทบ ซึ่งบริเวณดังกล่าวจะเกิดการแข็งตัว ไม่สามารถล้างออกได้ด้วยสาร SU-8 developer และขั้นตอนนี้จะทำโดยการเทสาร SU-8 developer ลงในถาดแก้วพอให้ท่วมชิ้นงานโดยประมาณ ใช้ปากคีบหยิบชิ้นงานบริเวณขอบชิ้นงานซึ่งไม่มีรายละเอียดของโครงสร้างเพื่อไม่ให้โครงสร้างเกิดการเสียหาย จุ่มชิ้นงานลงไปในสาร SU-8 developer ให้สาร SU-8 developer ท่วมชิ้นงานจนหมด แกว่งชิ้นงานในสาร SU-8 developer เป็นเวลาทั้งสิ้น 1 นาที 45 วินาที ซึ่งเวลาสำหรับการล้างฟิล์มไวแสงในสาร SU-8 developer นั้นจะขึ้นกับความหนาของสารไวแสงที่เคลือบอยู่บนชิ้นงาน โดยจากการทดลองหาเงื่อนไขที่เหมาะสมแล้วได้ว่า ที่ความหนาประมาณ 25 ไมโครเมตร นั้นใช้เวลาในการล้างฟิล์มประมาณ 1 นาที 45 วินาที หลังจากแกว่งชิ้นงานในสาร SU-8 developer จนครบกำหนดเวลาข้างต้นแล้ว นำชิ้นงานออกมาจากสาร SU-8 developer และล้างด้วย IPA ทันที โดยการฉีด IPA ไปบนบริเวณลวดลายโครงสร้างเบา ๆ และฉีดล้างชิ้นงานให้ทั่ว ใช้เวลาประมาณ 1 นาที หรือจนแน่ใจว่าล้างสาร SU-8 Developer ออกจนหมด แล้วเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน โดยรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 แสดงชิ้นงานที่เคลือบสารไวแสง SU-8 และดำเนินการตามกระบวนการลิโธกราฟฟี จนเสร็จสิ้นจนได้หลุมซึ่งเป็นลวดลายของโครงสร้าง โดยที่บริเวณที่เป็นลวดลายของหมึกดำทึบแสงของหน้ากากกั้นแสงนั้น หลังจากถอดแบบออกมาเสร็จสิ้นจะได้เป็นหลุมของสารไวแสง ซึ่งหลุมดังกล่าวจะลึกลงไปประมาณ 25 ไมโครเมตร หรือจนถึงพื้นของแผ่นกราไฟต์นั่นเอง ส่วนบริเวณที่โปร่งแสงของหน้ากากกั้นแสงนั้น หลังจากการถอดแบบออกมาเสร็จสิ้นจะได้เป็นบริเวณที่มีสารไวแสงแข็งตัวยึดติดอยู่บนแผ่นกราไฟต์นั่นเอง



รูปที่ 4.13 ลวดลายทดสอบที่ถ่ายทอดจากหน้ากากกั้นแสงอัลตราไวโอเลตมายังแผ่นกราไฟต์โดยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต



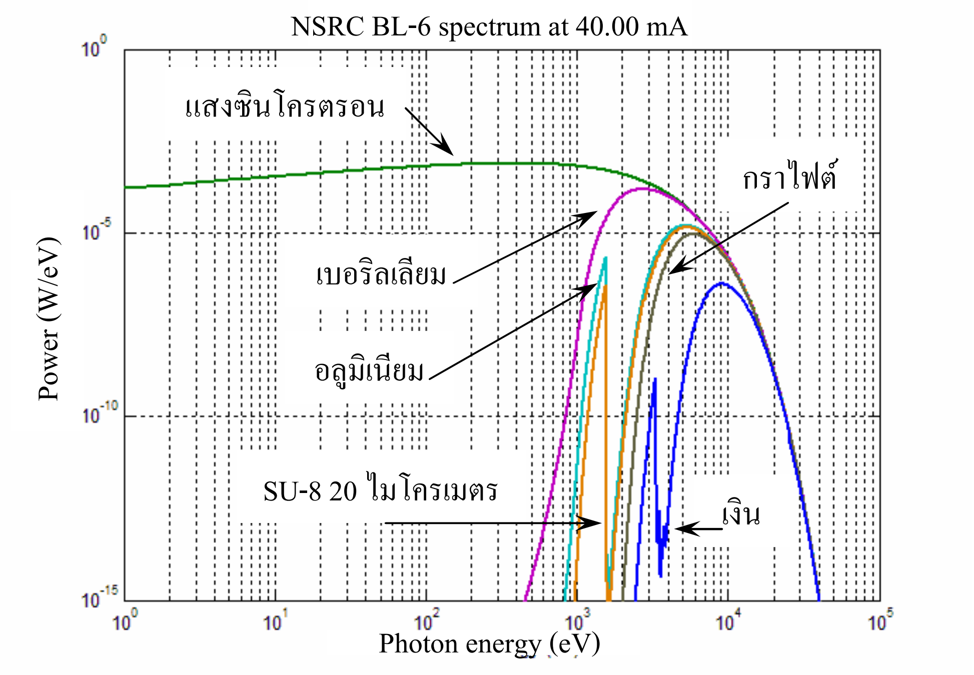
รูปที่ 4.14 ลวดลายเฟืองที่ถ่ายทอดจากหน้ากากกั้นแสงอัลตราไวโอเลตมายังแผ่นกราไฟต์ โดยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต

4.3.5 การเติมวัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ลงบนหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์

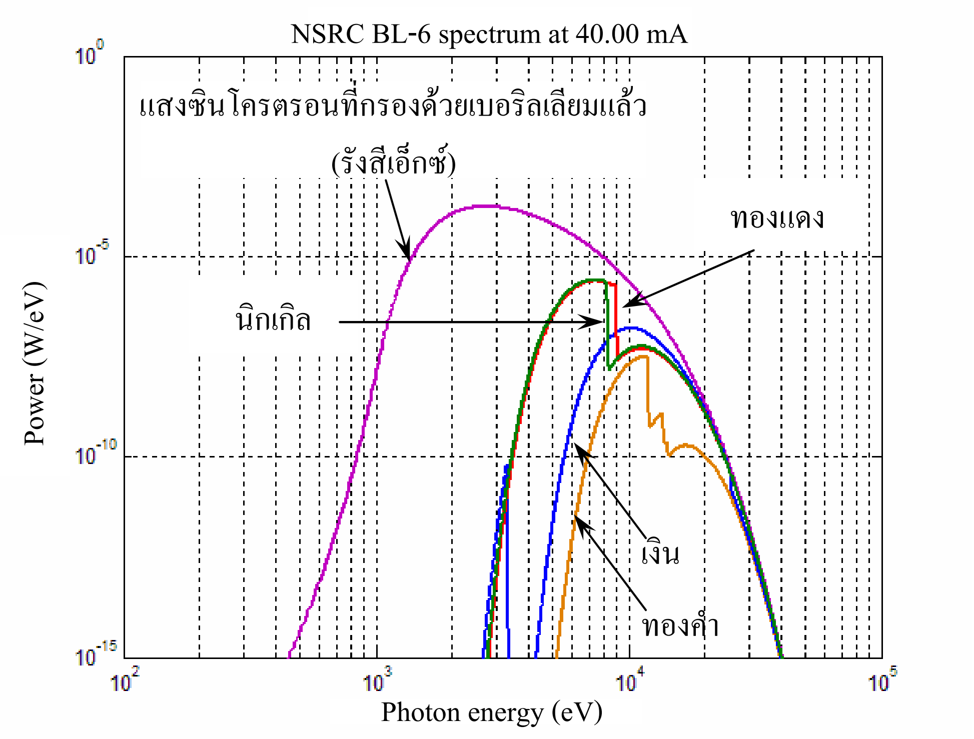
หลังจากที่สร้างลวดลายลงบนแผ่นกราไฟต์ที่จะนำมาทำเป็นหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแล้ว ขั้นตอนต่อไปซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายในการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์คือ ขั้นตอนการเติมวัสดุที่มีคุณสมบัติในการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ได้ดี ลงในในหลุมของลวดลายที่เกิดขึ้น วัสดุดูดกลืนแสงที่ถือว่าเป็นวัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์มาตรฐาน ในการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ที่ใช้ในกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์นั้นคือทองคำที่ความหนาของเนื้อทองคำ 3-15 ไมโครเมตร (Ferreira, 2004) ซึ่งสามารถดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ได้ดี

ในกระบวนการที่ทำการพัฒนาขึ้นนี้ ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำวัสดุชนิดอื่นมาใช้แทนทองคำ เนื่องจากทองคำมีราคาที่แพงมาก หากสามารถใช้วัสดุอื่นที่ราคาถูกกว่าทองคำมาใช้ในกระบวนการแทนทองคำได้ จะทำให้สามารถลดต้นทุนในกระบวนการลงได้ ซึ่งจากการศึกษาการดูดกลืนพลังงานของวัสดุที่ใช้เป็นชั้นตัวกรองต่าง ๆ โดยใช้การจำลองผลด้วยโปรแกรม XOP (X-ray Oriented Programs) โดยรูปที่ 4.15 (ก) เป็นผลการจำลองการดูดกลืนพลังงานของชั้นกรองต่าง ๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในกระบวนการ ประกอบกับการพิจารณารูปที่ 4.15 (ข) ซึ่งเป็นรูปกราฟการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์เปรียบเทียบระหว่างทองคำ ทองแดง นิกเกิลและเงิน จึงสรุปได้ว่า มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถใช้โลหะเงินเป็นวัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ในการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์แทนทองคำได้ และเมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระหว่างการใช้ทองคำกับการใช้เงินแล้ว การใช้เงินแทนที่

ทองคำนั้น สามารถลดค่าใช้จ่ายได้ค่อนข้างมาก



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 4.15 กราฟการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ (ก.) กราฟการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์หลังผ่านชั้นกรองต่าง ๆ (ข.) กราฟการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์เปรียบเทียบระหว่างทองคำ ทองแดง นิกเกิลและเงิน

เนื่องจากเงินสามารถใช้แทนที่ทองคำในการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ ทั้งยังมีราคาที่ต่ำกว่าทองคำมาก ซึ่งสารละลายทองคำสำหรับการชุบทองคำด้วยไฟฟ้านั้น ราคาลิตรละ 22,000 บาท ส่วนสารละลายเงินสำหรับชุบเงินด้วยไฟฟ้านั้น ราคาลิตรละ 1,350 บาท ดังนั้นในการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ในที่นี้ จะใช้เงินเป็นวัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ ก่อนอื่นต้องทำการเตรียมสารละลายเงินที่จะนำมาใช้สำหรับการชุบเงินด้วยไฟฟ้า (Silver electroplating) ลงไปบนหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ ซึ่งหลักการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า อย่างละเอียดนั้น จะกล่าวถึงในบทต่อไป เตรียมสารละลายเงิน ทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) เตรียมน้ำดีไอ ปริมาตร 3,000 มิลลิลิตร ลงในภาชนะซึ่งทำการกวนน้ำในภาชนะตลอดเวลา และภาชนะดังกล่าวต้องมีปริมาตรอย่างน้อยประมาณ 6,000 มิลลิลิตร จากนั้นเติม Potassium cyanide น้ำหนัก 833 กรัม ลงไปโดยค่อย ๆ เติมลงไปทีละน้อย ในขณะที่ทำการกวนน้ำในภาชนะตลอดเวลา และควรตั้งภาชนะผสมสารไว้ในตู้ดูดอากาศ และสวมผ้าปิดจมูกพร้อมทั้งใส่ถุงมือยางด้วย เพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นได้ เนื่องจากส่วนผสมต่าง ๆ อาจเป็นพิษต่อผิวหนังและระบบทางเดินหายใจ

2) กวนสารละลายต่อเนื่องประมาณ 10 นาที เพื่อให้มั่นใจว่า Potassium cyanide ที่เติมลงไปนั้นละลายผสมกับน้ำจนเข้ากันโดยเห็นเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว จึงทำการเติม Potassium carbonate น้ำหนัก 75 กรัม ลงไปทีละน้อย และรอประมาณ 5 นาที จนสารละลายเข้ากันจนหมด

3) เติม Silver cyanide 80% น้ำหนัก 225 กรัม ลงไปทีละน้อย โดยการใช้ช้อนตักสารขนาดเล็กเติมลงไปทีละช้อน แล้วรอให้ละลายเข้ากันก่อน จึงเติมช้อนต่อไปเรื่อย ๆ จนครบตามน้ำหนักที่ต้องการ

4) กวนสารทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที จากนั้นจึงเติมน้ำดีไอเพิ่มลงไปในภาชนะ จนกระทั่งปริมาตรทั้งหมดได้ 5,000 มิลลิลิตร

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

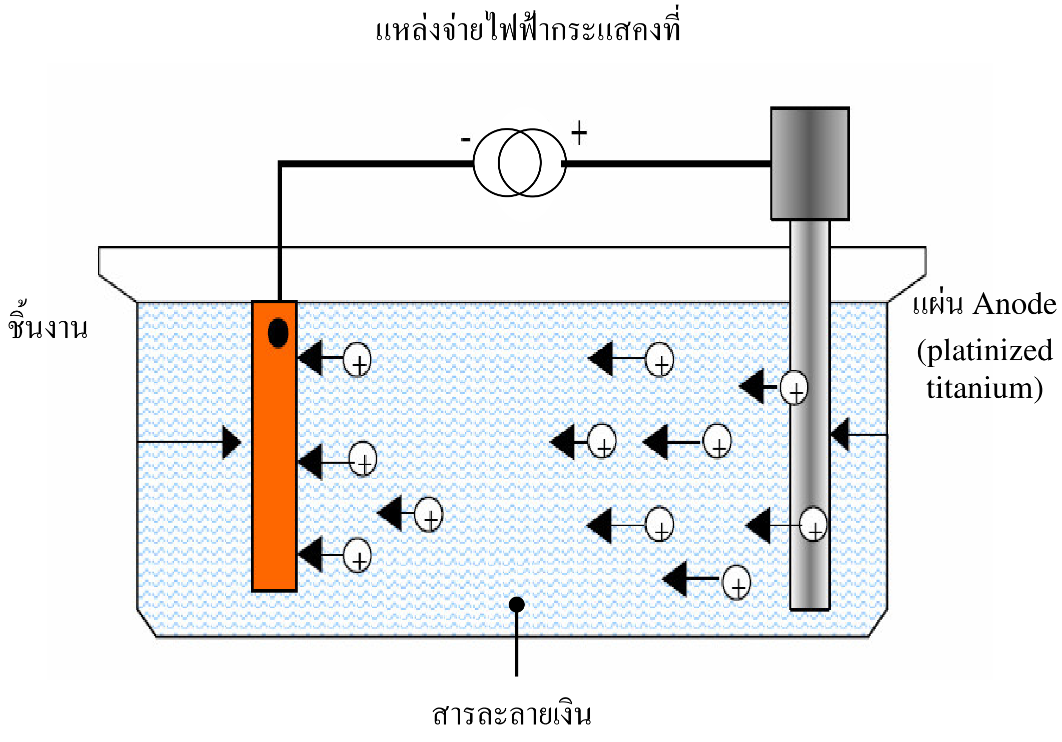
6) เมื่อครบเวลาที่กำหนด นำสารละลายมากรองด้วยกระดาษกรอง 3-5 ครั้ง เพื่อกรองเอาผงคาร์บอน ซึ่งไม่ละลายน้ำและฝุ่นที่อาจมีในสารละลายออกมาให้หมด

7) ทำความสะอาดสารละลายขั้นสุดท้ายด้วยการกรองด้วยไฟฟ้าโดยนำสารละลายที่ทำการผสมเสร็จแล้วมาทำการชุบด้วยไฟฟ้า ปรับให้แรงดันคงที่ที่ 1.5 โวลต์ โดยใช้โลหะ Platinized titanium เป็นขั้วบวก (Anode) และใช้ Stainless steel เป็นขั้วลบ (Cathode) เป็นเวลาทั้งสิ้น 15 นาที เพื่อให้สารละลายสะอาดและพร้อมใช้งาน

8) เติมสาร Silver Glo 3K Make up ปริมาตร 30 มิลลิลิตร และสาร Silver Glo 3K TY ปริมาตร 6.5 มิลลิลิตร เพื่อทำให้ผิวของโลหะเงินหลังจากทำการชุบด้วยไฟฟ้าออกมาเรียบเนียนและเงางาม

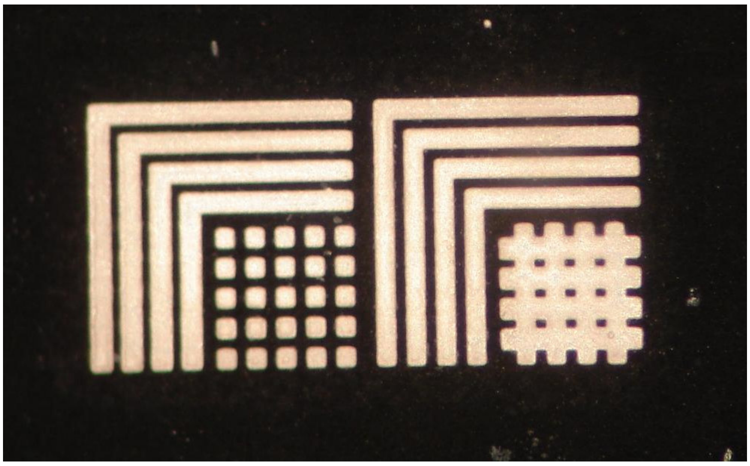
หลังจากทำการเตรียมสารละลายเงินเรียบร้อยแล้ว ในการชุบนั้นต้องชุบในขณะที่ทำการกวนสารละลายตลอดเวลาด้วยเช่นกัน โดยในการชุบนั้นจะใช้กระแสในอัตรา 20 mA/cm^2 โดยใช้โลหะ Platinized titanium เป็นขั้วบวก และชิ้นงานที่ต้องการชุบเงินเป็นขั้วลบ ซึ่งเมื่อปรับกระแสด้วยอัตราดังกล่าวจะได้อัตราการเกิดของเงินโดยประมาณที่ 5 ไมครอน ในเวลา 7 นาที 30 วินาที ซึ่งอัตราการเกิดดังกล่าวอาจเปลี่ยนไปตามลักษณะและคุณสมบัติของชิ้นงาน ที่นำมาชุบ อุณหภูมิขณะทำการชุบก็อาจส่งผลต่ออัตราการเกิดด้วยเช่นกัน (หลังจากทำการชุบจนเสร็จทุกครั้ง ก่อนเก็บสารละลายควรทำการกรองสารละลายด้วยกระดาษกรอง 1-2 รอบ)

เมื่อได้สารละลายสำหรับใช้ในการชุบเงินแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นขั้นตอนการนำชิ้นงานที่เตรียมไว้เพื่อสร้างเป็นหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ มาทำการเติมโลหะเงินลงไปในหลุมของลวดลายที่เตรียมไว้ โดยรูปที่ 4.16 แสดงการต่อวงจรสำหรับการชุบเงินด้วยไฟฟ้า โดยก่อนที่จะทำการชุบเงินนั้น ทำการกัดทำความสะอาดผิวหน้าของชิ้นงานรวมถึงหลุมของลวดลายด้วยพลาสมาของออกซิเจนที่ความดัน 350 มิลลิทอรร์ ด้วยกำลัง 100 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที

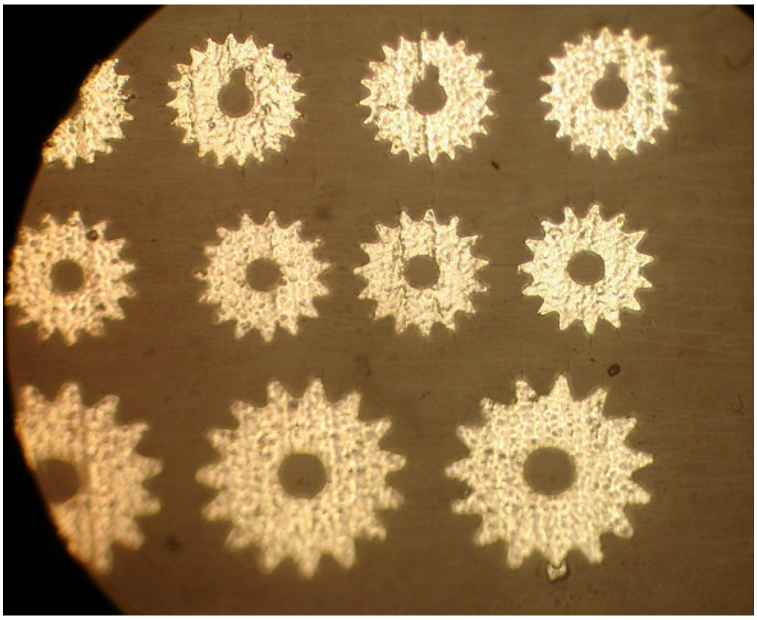


รูปที่ 4. 16 การต่อวงจรไฟฟ้าสำหรับการชุบเงินด้วยไฟฟ้าลงบนแผ่นกราไฟต์

ในการชุบเงินด้วยไฟฟ้านั้น ต้องมั่นใจว่าสารละลายเงินสามารถเข้าถึงลวดลายได้ทั่วทั้งแผ่น โดยไม่มีฟองอากาศมาบัง เนื่องจากหากเกิดฟองอากาศขึ้น จะทำให้เงินไม่สามารถก่อตัวขึ้นในบริเวณดังกล่าวได้ และทำให้ลวดลายไม่สมบูรณ์ได้ เมื่อทำการเติมเงินลงไปในลวดลายที่สร้างขึ้นโดยใช้วิธีการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าจนเต็มหลุมแล้ว จะได้ความหนาของเงินประมาณ 25 ไมโครเมตร รูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 แสดงหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ที่เติมเงินจนเต็มหลุม และเป็นหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ที่เสร็จสมบูรณ์ พร้อมที่จะนำไปใช้ในกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ต่อไป



รูปที่ 4.17 หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ลวดลายทดสอบ

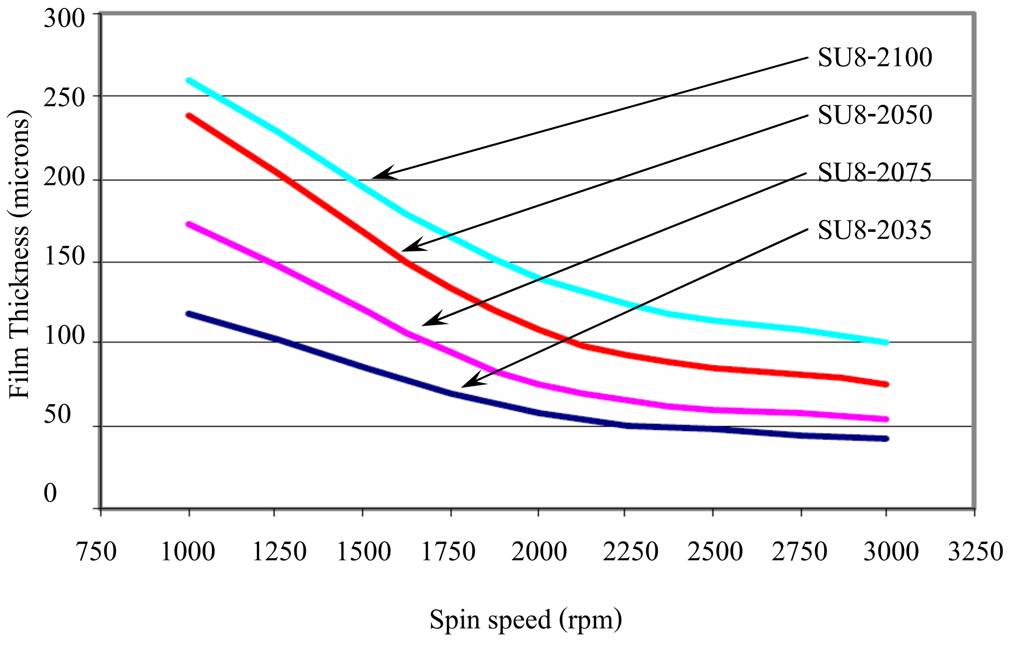


รูปที่ 4.18 หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ลวดลายเฟืองขนาดต่าง ๆ

4.4 การเตรียมชิ้นงานและเคลือบสารไวแสง

แผ่นฐานรอง (Substrate) ที่จะใช้ในกระบวนการนั้น จะใช้แผ่นสเตนเลส (Stainless sheet) หนาประมาณ 1 มิลลิเมตร นำมาขัดจนพื้นผิวเรียบสม่ำเสมอกัน จากนั้นนำไปพ่นทรายให้เกิดรอยขรุขระเล็กน้อย ก่อนนำมาทำความสะอาดโดยการอัลตราโซนิกในสารอาซิโตน เป็นเวลาทั้งสิ้น 15 นาที และนำออกมาจากเครื่องอัลตราโซนิคแล้ว ล้างต่อด้วย IPA แล้วเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน จากนั้นนำมาจุ่มในน้ำดีไอให้ท่วม ก่อนนำเข้าเครื่องอัลตราโซนิกอีกครั้งเป็นเวลา 30 นาที เมื่อนำออกจากเครื่องอัลตราโซนิกแล้ว เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน ก่อนนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานดังกล่าวไปเคลือบสารไวแสงด้วยเครื่องหมุนเคลือบต่อไป

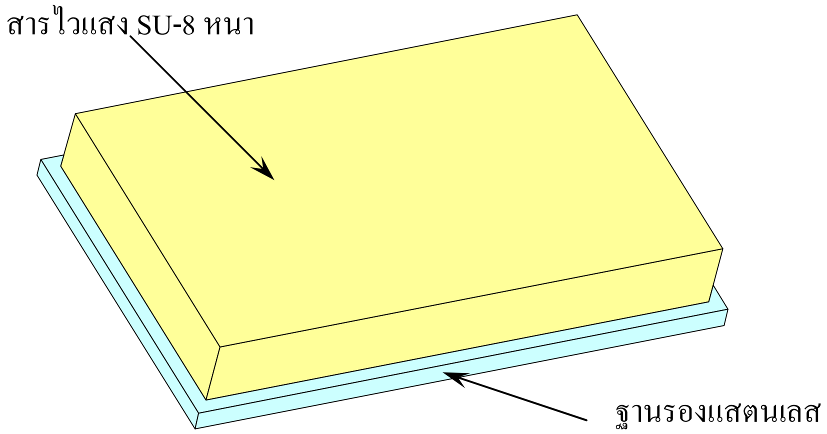
ความหนาของสารไวแสงที่ต้องการ ในการทดสอบกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์นั้น จะใช้ความหนาประมาณ 500 ไมโครเมตร โดยเลือกใช้สารไวแสง SU-8 เบอร์ 2100 ซึ่งเป็นสารไวแสงชนิดลบ โดยสารไวแสงเบอร์ดังกล่าวสามารถเคลือบลงบนชิ้นงานได้ที่ความหนาประมาณ 100-260 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ดังนั้นในการเคลือบสารไวแสงเบอร์ดังกล่าวจำเป็นต้องทำการเคลือบสองชั้น ชั้นละ 250 ไมโครเมตร เพื่อให้ได้ความหนาของสารไวแสงรวมเป็น 500 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นความหนาที่ต้องการ



รูปที่ 4.19 กราฟคุณสมบัติของสารไวแสง SU-8 สำหรับเบอร์ที่ให้ความหนาไม่เกิน 50 ไมโครเมตร โดยเปรียบเทียบระหว่างความเร็วในการหมุนเคลือบกับความหนาของฟิล์มที่ได้ (ข้อมูลจากบริษัท MicroChem Corp. ผู้ผลิต SU-8)

ในการเคลือบสารไวแสงลงบนแผ่นสเตนเลสนั้น ขั้นแรกนำแผ่นสเตนเลสวางบนเครื่องหมุนเคลือบแล้วทำการหยดสารไวแสงลงไปจนทั่ว โดยเน้นให้สารไวแสงอยู่บริเวณกลางชิ้นงานและเทให้สารไวแสงพูนขึ้นเล็กน้อย ซึ่งบริเวณดังกล่าวจะเป็นจุดศูนย์กลางการหมุนของชิ้นงาน ในการเทสารไวแสงนั้นต้องทำอย่างช้า ๆ เนื่องจากสารไวแสง SU-8 เบอร์ 2100 นั้นมีความเข้มข้นสูงจึงหนืดมาก และหากเกิดฟองอากาศขณะเทนั้น จะเป็นการยากในการที่จะทำให้ฟองอากาศแตก ดังนั้นจึงควรระมัดระวังอย่าให้เกิดฟองอากาศขึ้น ทำการตั้งค่าการหมุนของเครื่องไว้เป็นสองขั้น โดยขั้นแรกตั้งค่าให้เครื่องหมุนที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 วินาที และขั้นที่สองตั้งค่าให้เครื่องหมุนที่ความเร็วที่ต้องการ โดยจากกราฟในรูปที่ 4.19 นั้น เมื่อต้องการความหนาประมาณ 250 ไมโครเมตร ต้องทำการตั้งค่าความเร็วในการหมุนไว้ที่ 1,000 รอบต่อนาที โดยลักษณะการทำงานของเครื่องหมุนเคลือบได้แสดงไว้แล้วดังรูปที่ 4.10 ซึ่งจะทำงานในลักษณะเดียวกันกับตอนเคลือบสารไวแสงลงบนแผ่นกราไฟต์ในการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ โดยเมื่อเครื่องทำงานเสร็จสิ้น สารไวแสงจะเคลือบอยู่บนชิ้นงานจนทั่วด้วยความหนาที่ต้องการ แต่สารไวแสงยังคงอยู่ในสถานะของเหลว

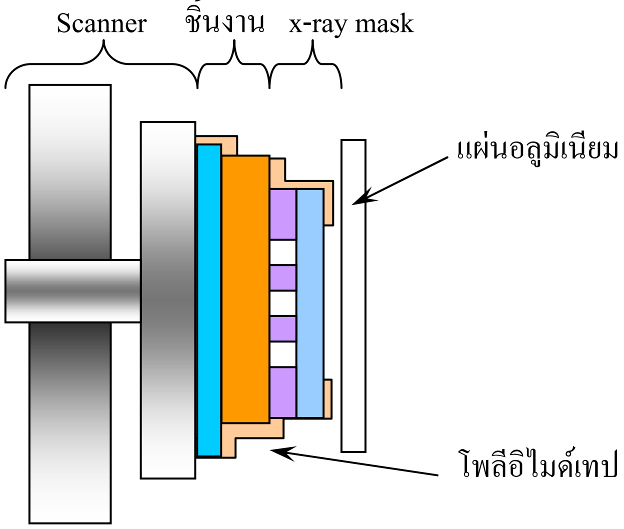
เมื่อทำการหมุนเคลือบสารไวแสงเรียบร้อยแล้ว หลังจากนั้นนำแผ่นสเตนเลสออกจากเครื่องหมุนเคลือบมาวางบนแผ่นความร้อน ที่ทำการปรับระดับให้ได้แนวระนาบเรียบร้อยแล้ว ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบเวลาที่กำหนด ทำการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นความร้อนขึ้นในอัตรา 2 องศาเซลเซียสต่อนาที จนอุณหภูมิถึง 95 องศาเซลเซียส แล้วค้างไว้ที่ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 ชั่วโมง เนื่องจากสารไวแสงหนามาก ดังนั้นเวลาในการที่จะทำให้ตัวทำละลาย (Solvent) ของสารไวแสงระเหยออกจนหมดนั้น จึงใช้เวลาค่อนข้างนาน เมื่อครบเวลาที่กำหนดแล้วทำการลดอุณหภูมิของแผ่นความร้อนลงในอัตรา 2 องศาเซลเซียสต่อนาที จนอุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิห้องจึงทำการปิดการทำงานของแผ่นความร้อน เนื่องจากสารไวแสงที่มีความหนามาก ๆ การให้อุณหภูมิของสารไวแสงลดลงเร็วจนเกินไป อาจส่งผลให้สารไวแสงเกิดการแตกร้าวได้โดยง่าย เมื่อชิ้นงานมีอุณหภูมิเท่าอุณหภูมิห้องแล้วนำชิ้นงานวางบนเครื่องหมุนเคลือบอีกครั้งและทำการเคลือบสารไวแสงทับลงไปอีกชั้นหนึ่ง โดยใช้เงื่อนไขการเคลือบสารไวแสงเหมือนเดิมทุกประการ ยกเว้นเวลาในการอบนั้น จะอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบเวลาที่กำหนด ทำการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นความร้อนขึ้นในอัตรา 2 องศาเซลเซียสต่อนาที จนอุณหภูมิถึง 95 องศาเซลเซียส แล้วค้างไว้ที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เนื่องจากสารไวแสงหนาเพิ่มขึ้น และสารไวแสงในชั้นแรกจะมีผลต่อการระเหยของตัวทำละลายเล็กน้อยจึงต้องทำการเพิ่มเวลาในการอบขึ้นอีก เพื่อให้แน่ใจว่าสารไวแสงที่ทำการเคลือบลงไปนั้น แห้งจนแข็งพอที่จะนำไปใช้งานได้ ซึ่งอยู่ในลักษณะของสารไวแสง SU-8 หนาติดอยู่บนฐานสแตนเลสดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 แบบจำลองชิ้นงานที่เคลือบสารไวแสงหนาลงบนฐานเรียบร้อยแล้ว

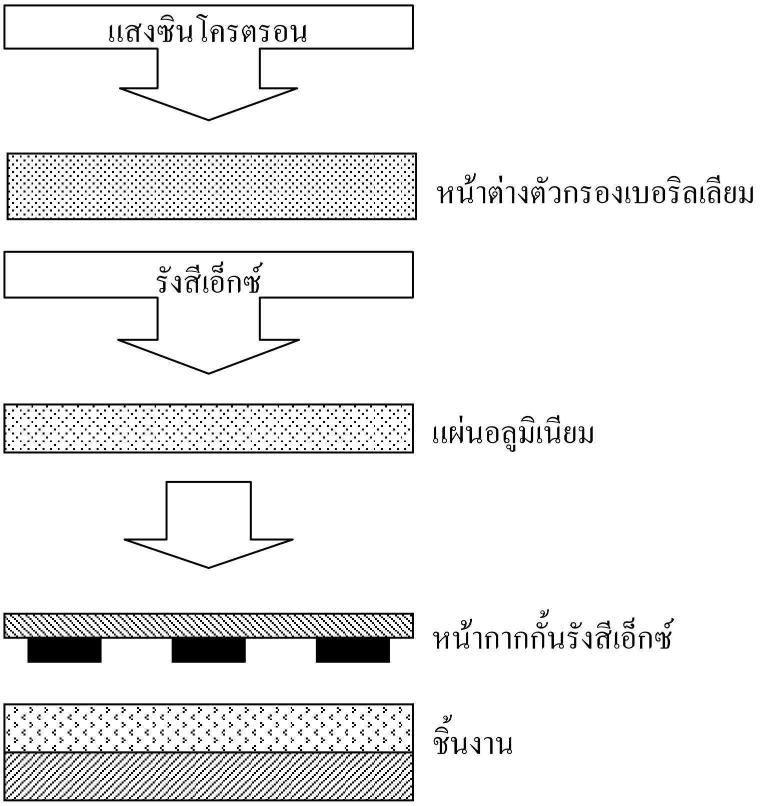
4.5 การฉายรังสีเอ็กซ์ลงบนชิ้นงาน

หลังจากที่ได้ชิ้นงานที่เคลือบสารไวแสงเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการฉายรังสีเอ็กซ์ลงบนชิ้นงาน โดยอันดับแรกนำหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ที่ได้สร้างเสร็จแล้วนั้น มาวางทับสารไวแสงที่เคลือบบนแผ่นสเตนเลส ใช้เทปโพลีอิไมด์ ในการยึดระหว่างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์กับชิ้นงาน เนื่องจากเทปโพลีอิไมด์ เป็นเทปกาวที่ทนความร้อนได้สูง และไม่ไหม้เมื่อถูกฉายด้วยรังสีเอ็กซ์เป็นเวลานาน เมื่อติดชิ้นงานกับหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์เรียบร้อยแล้ว นำอลูมิเนียมฟอยล์มาปิดทับทั้งหมดเป็นชั้นสุดท้าย จากนั้นจึงนำชิ้นงานเข้าไปยังเครื่องขับเคลื่อนชิ้นงาน ที่อยู่ภายในห้องฉายรังสีเอ็กซ์ โดยลำดับในการติดตั้งชิ้นงานแสดงได้ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ลำดับชั้นในการติดตั้งชิ้นงานลงบนเครื่องสแกนชิ้นงาน

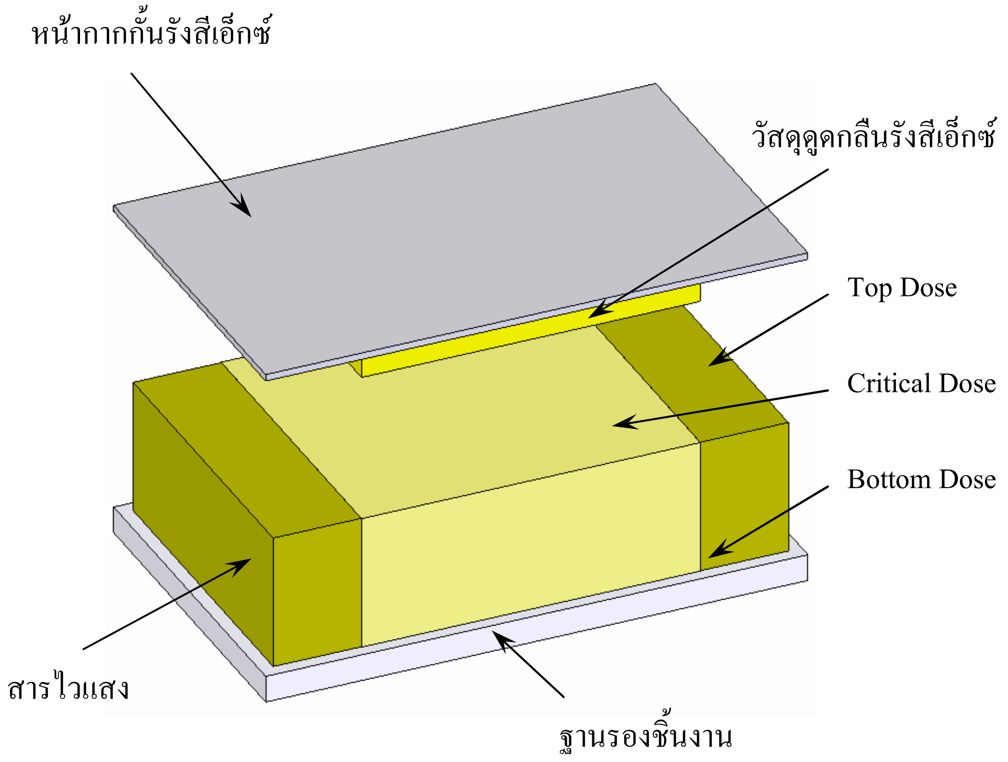
นำชิ้นงานไปติดตั้งยังเครื่องขับเคลื่อนชิ้นงานที่อยู่ภายในห้องสุญญากาศ โดยในการติดตั้งชิ้นงานเข้าไปในเครื่องขับเคลื่อนชิ้นงานนั้น ให้หมุนด้านที่มีหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ติดอยู่ออกไปรับรังสีเอ็กซ์ โดยลำดับขั้นตัวกรองรังสีทั้งหมดก่อนมาตกกระทบยังชิ้นงาน แสดงได้ดังรูปที่ 4.22 จากนั้นทำการดูดอากาศออกจากห้องสุญญากาศให้ได้ความดันภายในห้องสุญญากาศต่ำกว่า 2.5×10^{-5} มิลลิทอร์ จึงเริ่มทำการฉายรังสี ในการฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่องขับเคลื่อนชิ้นงานนั้น จะใช้จำนวนรอบในการขับเคลื่อนชิ้นงานเป็นตัวกำหนดเวลาในการฉายแสงแต่ละครั้ง ซึ่งจำนวนรอบก็จะขึ้นกับค่ากระแสในวงกักเก็บอิเล็กตรอน (Storage-ring current) ณ ขณะนั้นด้วยว่ามีค่าเท่าไร ยกตัวอย่างเช่น กรณีที่กระแสของอิเล็กตรอนในวงกักเก็บอิเล็กตรอนมีค่าเป็น 40.00 mA ซึ่งค่าดังกล่าวจะได้ค่าพลังงานที่สารไวแสงได้รับ (Dose) หลังจากการฉายแสงหนึ่งรอบมีค่าเท่ากับ 28.125 mJ/cm^3 และจากการทดสอบหาค่าการฉายแสงที่เหมาะสมสำหรับชิ้นงานที่เคลือบสารไวแสง SU-8 หนาประมาณ 500 ไมโครเมตร นั้นต้องใช้ค่าพลังงานที่สารไวแสงได้รับในการฉายรังสีประมาณ 280 mJ/cm^3 ดังนั้นในกรณีนี้จะทำการฉายรังสีทั้งสิ้น 10 รอบ ซึ่งเมื่อฉายรังสีเอ็กซ์จนครบ 10 รอบจะได้พลังงานที่สารไวแสงได้รับมีค่าเท่ากับ 281.25 mJ/cm^3 เมื่อทำการฉายรังสีเอ็กซ์จนเสร็จสิ้นแล้ว จึงนำชิ้นงานออก เพื่อที่จะนำไปทำกระบวนการต่อไป



รูปที่ 4.22 ลำดับของตัวกรองรังสีเอ็กซ์จากวงกักเก็บอิเล็กตรอนก่อนจะมาตกกระทบชิ้นงาน

เมื่อฉายรังสีเอ็กซ์ลงบนชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว จากนั้นทำการอบหลังการฉายแสง โดยการวางบนแผ่นความร้อน ที่ทำการปรับระดับให้ได้แนวระนาบเดียวเรียบร้อยแล้ว ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบเวลาที่กำหนด ทำการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นความร้อนขึ้นในอัตรา 3 องศาเซลเซียสต่อนาที จนอุณหภูมิถึง 95 องศาเซลเซียส แล้วค้างไว้ที่ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง 30 นาที เมื่อครบเวลาที่กำหนดแล้วทำการลดอุณหภูมิของแผ่นความร้อนลงในอัตรา 2 องศาเซลเซียสต่อนาที จนอุณหภูมิลอลงถึงอุณหภูมิห้องจึงทำการปิดการทำงานของแผ่นความร้อน หลังจากทำการอบหลังการฉายแสงเรียบร้อยแล้ว จะทำให้สารไวแสงบริเวณที่มีแสงมาตกกระทบ เกิดการแข็งตัวถาวร ส่วนบริเวณที่ไม่มีแสงมาตกกระทบนั้น คุณสมบัติของสารจะยังคงเหมือนเดิม ซึ่งสามารถล้างออกได้

ในการฉายแสงลงบนชิ้นงานนั้น อัตราส่วนค่าพลังงานสะสมของแสงที่มาตกกระทบยังสารไวแสง ณ บริเวณผิวของสารไวแสงใต้วัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ (Critical dose) และบริเวณพื้นลึกสุดของสารไวแสงใต้วัสดุโปร่งแสงต่อรังสีเอ็กซ์ ดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 จุดสำคัญในการวัดค่าพลังงานรวมในการฉายรังสีเอ็กซ์ลงบนสารไวแสง

ซึ่งอัตราส่วนระหว่างค่า Critical dose กับค่า Bottom dose หรือเรียกว่า Contrast ซึ่งต้องมีค่ามากกว่า 80% จึงจะรับรองได้ว่าชิ้นงานที่ทำการฉายแสงเสร็จสิ้นไปนั้น จะสามารถล้างฟิล์มแล้วให้

โครงสร้างที่สามารถใช้งานได้ ซึ่งเมื่อดูจากภาพที่ 4.23 จะเห็นว่า Bottom dose คือค่าพลังงานรวมบริเวณที่ต้องได้รับพลังงานมากพอที่จะทำให้สารไวแสงแข็งตัว ในขณะที่ Critical dose คือพลังงานรวมบริเวณที่ต้องมีค่าพลังงานน้อยจนสารไวแสงไม่เกิดการแข็งตัว และสามารถล้างสารไวแสงบริเวณดังกล่าวทิ้งได้ในกระบวนการล้างฟิล์ม ซึ่งปัจจัยสำคัญที่จะทำให้สามารถได้ค่า Contrast มากเกิน 80% คือ วัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ต้องดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ได้มากพอที่จะไม่ทะลุมาตกกระทบยังสารไวแสง โดยการคำนวณค่า Contrast สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$C(d) = \frac{E_1(d) - E_0(d)}{E_1(d) - E_0(d)}, 0 < C(d) < 1 \quad (4.1)$$

โดยที่ $C(d)$ คือ ค่า Contrast สำหรับสารไวแสงหนาเท่ากับ d

$E_1(d)$ คือ ค่าพลังงาน Top dose สำหรับสารไวแสงหนาเท่ากับ d

$E_0(d)$ คือ ค่าพลังงาน Bottom dose สำหรับสารไวแสงหนาเท่ากับ d

ซึ่งความสามารถในการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของวัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์นั้นจะแปรผันตรงกับความหนาของวัสดุดังกล่าว ซึ่งการคำนวณหาค่าความหนาที่เหมาะสมนั้น ใช้โปรแกรมจำลองพลังงานจากวงกักเก็บอิเล็กตรอน ชื่อ XOP (X-ray Oriented Programs) ซึ่งเป็นโปรแกรมจำลองพลังงานของระบบเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนโดยเฉพาะ ซึ่งเป็นโปรแกรมที่พัฒนาโดย European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) ซึ่งจากผลการจำลองโดยใช้ความหนาของสารไวแสงเท่ากับ 500 ไมโครเมตร ได้ผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่า Contrast เปรียบเทียบระหว่างการใช้เงินและทองคำความหนาต่าง ๆ เมื่อฉายลงบนสารไวแสงความหนา 500 ไมโครเมตร ที่กระแสในวงกักเก็บอิเล็กตรอนเท่ากับ 40 mA

ชนิดของวัสดุ	ความหนาของวัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์							
	6 μm	8 μm	10 μm	12 μm	14 μm	16 μm	18 μm	20 μm
เงิน	54.57%	64.76%	69.52%	78.14%	82.50%	85.85%	88.44%	90.48%
ทองคำ	78.17%	86.80%	91.88%	94.90%	96.76%	97.90%	98.63%	99.10%

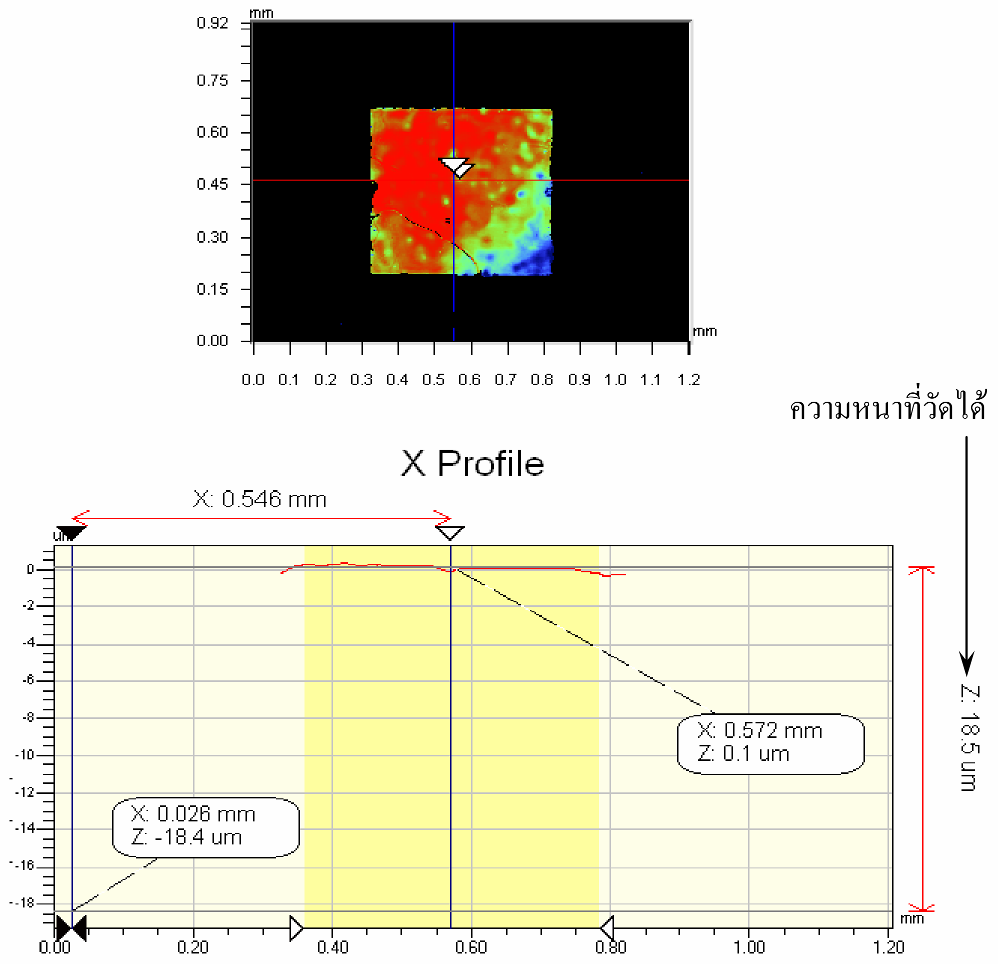
ซึ่งจะได้ว่า ในการฉายรังสีเอ็กซ์ที่กระแสภายในวงกักเก็บอิเล็คตรอนมีค่า 40 mA และใช้ความหนาของสารไวแสง SU-8 เท่ากับ 500 ไมโครเมตร จะต้องใช้วัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ที่เป็นทองคำความหนาอย่างน้อย 7 ไมโครเมตร หรือถ้าใช้วัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ที่เป็นโลหะต้องใช้ความ

หนาอย่างน้อย 13 ไมโครเมตร โดยสามารถเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระหว่างการใช้ทองคำเทียบกับการใช้เงินในกระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ได้ดังนี้

สารละลายทองคำสำหรับการชุบทองคำด้วยไฟฟ้าราคาลิตรละ 22,000 บาท โดยภายในหนึ่งลิตรมีทองคำทั้งสิ้น 18 กรัม แต่สามารถชุบได้เพียง 13 กรัม (เหลือ 5 กรัมที่คงเหลือเนื่องจากสารละลายเจือจางจนไม่สามารถชุบด้วยไฟฟ้าได้) และเมื่อทองคำก่อตัวขึ้นโดยการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าจะมีความหนาแน่น 17 กรัมต่อลูกบาศเซนติเมตร พิจารณาการก่อตัวของทองคำบนหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ โดยให้ลวดลายเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1 ตารางเซนติเมตร และต้องใช้ความสูง 7 ไมครอน ดังนั้นจะพื้นที่ของเนื้อทองคำเท่ากับ 0.7×10^{-3} ลูกบาศเซนติเมตร และทองคำมีความหนาแน่น 17 กรัมต่อลูกบาศเซนติเมตร จะได้ว่า ต้องใช้ทองคำทั้งสิ้น 11.9 มิลลิกรัมกรัม คิดเป็นค่าใช้จ่ายของทองคำประมาณ 20.14 บาท สำหรับการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ที่ลวดลาดลายขนาด 1 ตารางเซนติเมตร

สารละลายเงินสำหรับการชุบเงินด้วยไฟฟ้าราคาลิตรละ 1,350 บาท โดยภายในหนึ่งลิตรมีเงินทั้งสิ้น 65 กรัม และสามารถชุบได้เพียง 40 กรัม (เหลือ 15 กรัมที่คงเหลือเนื่องจากสารละลายเจือจางจนไม่สามารถชุบด้วยไฟฟ้าได้) และเมื่อเงินก่อตัวขึ้นโดยการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าจะมีความหนาแน่น 10.5 กรัมต่อลูกบาศเซนติเมตร พิจารณาการก่อตัวของเงินบนหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ โดยให้ลวดลายเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1 ตารางเซนติเมตร และต้องใช้ความสูง 13 ไมครอน ดังนั้นจะพื้นที่ของเนื้อโลหะเงินเท่ากับ 1.3×10^{-3} ลูกบาศเซนติเมตร และเงินมีความหนาแน่น 10.5 กรัมต่อลูกบาศเซนติเมตร จะได้ว่า ต้องใช้โลหะเงินทั้งสิ้น 13.65 มิลลิกรัม คิดเป็นค่าใช้จ่ายของโลหะเงินประมาณ 0.461 บาท สำหรับการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ที่ลวดลาดลายขนาด 1 ตารางเซนติเมตร

จะเห็นว่าในการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ที่มีขนาดลวดลายเท่ากัน ถึงแม้ว่าการใช้โลหะเงินเป็นวัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์แทนทองคำนั้น ต้องใช้ความหนามากกว่าทองคำเกือบสองเท่า แต่เมื่อเทียบค่าใช้จ่ายแล้ว เมื่อใช้โลหะเงินสามารถลดค่าใช้จ่ายได้มากกว่า 40 เท่าเมื่อเทียบกับการใช้ทองคำ โดยในการใช้งานจริงนั้น เมื่อเทียบราคาทองคำกับเงินแล้ว จะเห็นว่าในกระบวนการชุบโลหะเงินลงบนหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์นั้น สามารถชุบให้มีความหนาสูงเผื่อไว้ที่ประมาณ 20 ไมโครเมตรได้ โดยที่ค่าใช้จ่ายในกระบวนการยังคงลดลงเมื่อเทียบกับกระบวนการในการใช้ทองคำหลายสิบเท่า ทั้งยังสามารถตัดกระบวนการควบคุมความหนาออกไปได้อีกด้วย ซึ่งในกระบวนการทดสอบนั้น ทำการชุบเงินลงไปบนหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ได้ประมาณ 18 ไมโครเมตร ลงบนฐานรองกราไฟต์ในการสร้างเป็นหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ ซึ่งจากการทดลองชี้ให้เห็นว่าความน้อยที่สุดที่สามารถใช้งานได้คือ 13 ไมโครเมตร ซึ่งในกรณีนี้ทำการเผื่อความหนาไว้ 5 ไมโครเมตร โดยรูปที่ 4.24 แสดงผลการวัดความสูงของโลหะบนหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ โดยใช้เครื่องวัดความหนารุ่น Wyko NT1100 ของบริษัท Veeco

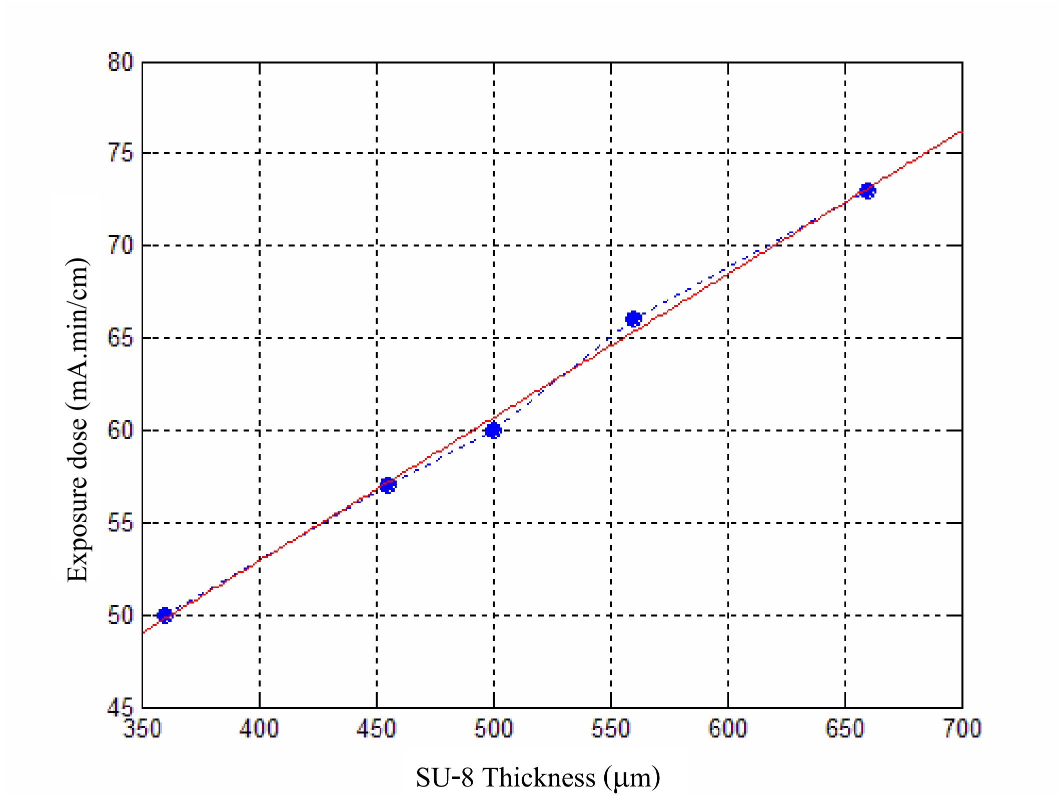


รูปที่ 4.24 ผลการวัดความหนาของโลหะเงินบนหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์

เมื่อสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ตามเงื่อนข้างต้นเสร็จสิ้น จึงได้นำหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ที่สร้างขึ้นไปใช้ในกระบวนการ เพื่อแสดงให้เห็นว่าโลหะเงินสามารถใช้แทนทองคำในการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์สำหรับกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ ซึ่งการทดลองใช้หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ดังกล่าวในกระบวนการก็สามารถใช้งานได้ โดยชิ้นงานที่ฉายแสงผ่านหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ที่สร้างจากโลหะเงินนั้น ได้ลวดลายโครงสร้างที่ดี ยืนยันได้ว่าสามารถใช้โลหะเงินเป็นวัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ได้

จากนั้นทำการทดลองฉายแสงลงบนสารไวแสง SU-8 ความหนาอื่น ๆ เพื่อหาค่าพลังงานสะสมที่เหมาะสมบนชิ้นงาน ซึ่งจากการทดลองได้ผลดังรูปที่ 4.25 โดยในการฉายรังสีเพื่อทดลองนั้น ชิ้นงานที่เสร็จสิ้นกระบวนการฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยค่าพลังงานสะสมดังแสดงข้างต้นนั้น สามารถล้างฟิล์มและได้ลวดลายของโครงสร้างที่ดี ซึ่งกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดนั้น ปัจจุบันยังคงทำการพัฒนาเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด ทั้งยังทำการพัฒนาระบบขับเคลื่อนชิ้นงานเพื่อให้ได้

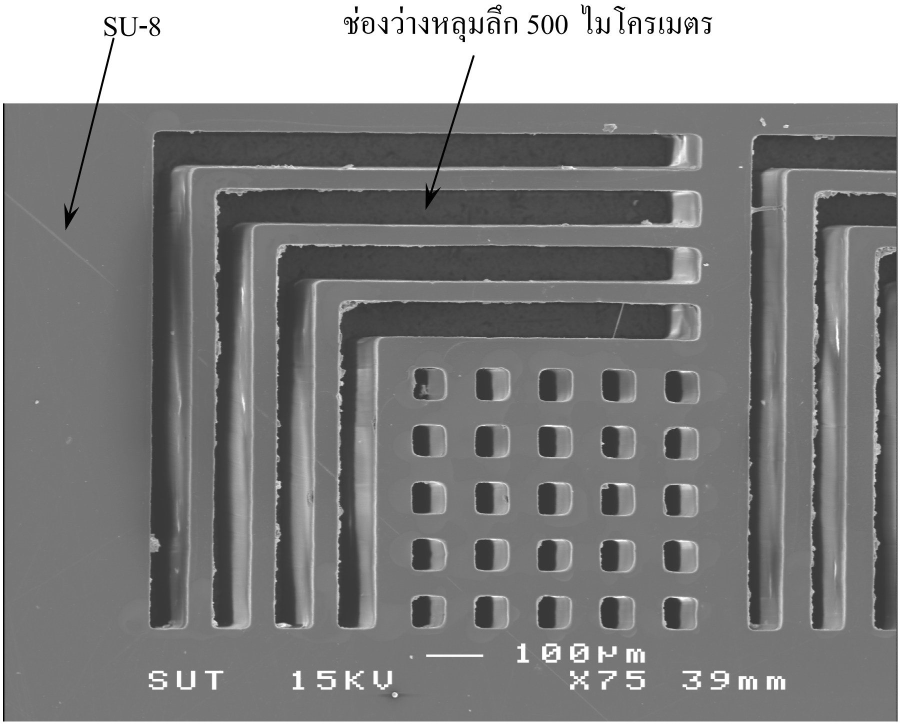
ระบบขับเคลื่อนชิ้นงานในกระบวนการลิโธกราฟฟีที่ดีที่สุด และสามารถกำหนดค่าพลังงานที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ



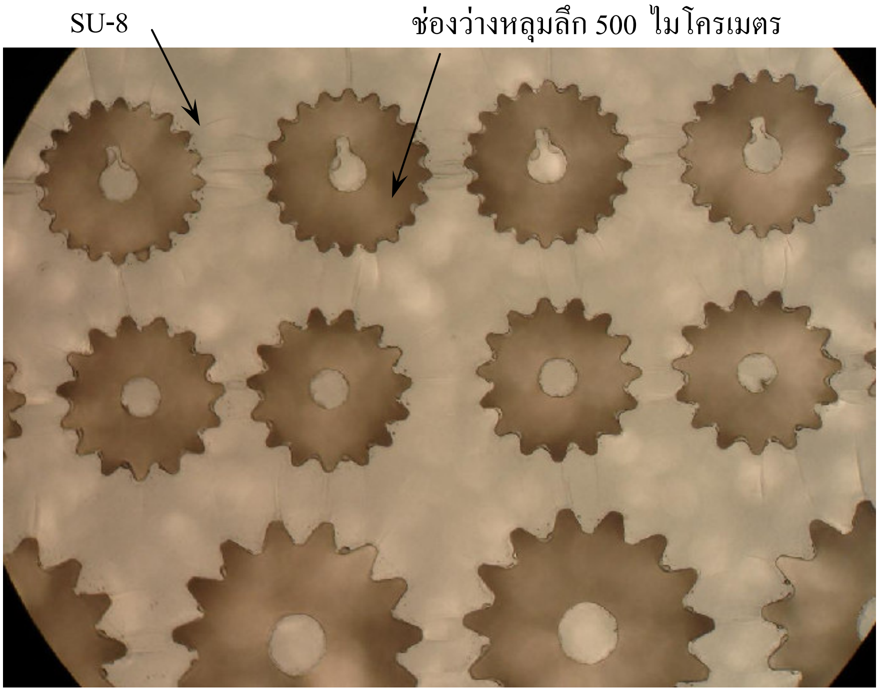
รูปที่ 4.25 ค่าพลังงานสะสมบนชิ้นงาน (mA.min/cm)ที่เคลือบด้วยสารไวแสง SU-8 ความหนาค่าต่าง ๆ ที่สามารถล้างฟิล์มแล้วได้โครงสร้างที่ดี

4.6 การล้างสารไวแสง (Developing)

ขั้นท้ายสุดของกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์คือ ขั้นตอนของการล้างสารไวแสง (Developing) โดยสารไวแสงที่ใช้ในกระบวนการคือ SU-8 ซึ่งส่วนที่มีแสงมาตกกระทบจะเกิดการแข็งตัว และส่วนที่ไม่มีแสงมาตกกระทบจะมีคุณสมบัติเหมือนเดิมและสามารถล้างทิ้งได้ ดังนั้นในขั้นตอนการล้างสารไวแสง จะใช้สาร SU-8 Developer ในการล้างสารไวแสงส่วนที่ไม่มีแสงมาตกกระทบออก ในการล้างสารไวแสงนั้นจะใช้ปากคีบหยิบชิ้นงานมาแกว่งในน้ำยา SU-8 Developer ซึ่งเทใส่ในบีคเกอร์ให้ท่วมชิ้นงาน จากนั้นแช่ชิ้นงานไว้ในน้ำยา SU-8 Developer และทำการกวนน้ำยา SU-8 Developer เป็นเวลาทั้งสิ้น 2 ชั่วโมง 30 นาที จากนั้นจึงยกชิ้นงานออกมา แล้วใช้สาร IPA ฉีดลงไปบนชิ้นงานเพื่อทำการล้างน้ำยา SU-8 Developer ออกจากชิ้นงานจนหมด จึงทำการเป่าเบา ๆ ด้วยแก๊สไนโตรเจน จะได้ชิ้นงานที่สร้างจากกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ ดังรูปที่ 4.26 และรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.26 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โครงสร้างทดสอบที่สร้างจากกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์



รูปที่ 4.27 โครงสร้างเฟือง ที่สร้างจากกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์

จากรูปที่ 4.26 และรูปที่ 4.27 จะเห็นว่าชิ้นงานที่ออกมานั้นมีลักษณะโครงสร้างที่ดี ตรงตามลวดลายโครงสร้างที่กำหนดบนหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ ซึ่งสามารถนำชิ้นงานที่ได้นี้ไปดำเนินการในกระบวนการต่อไปได้

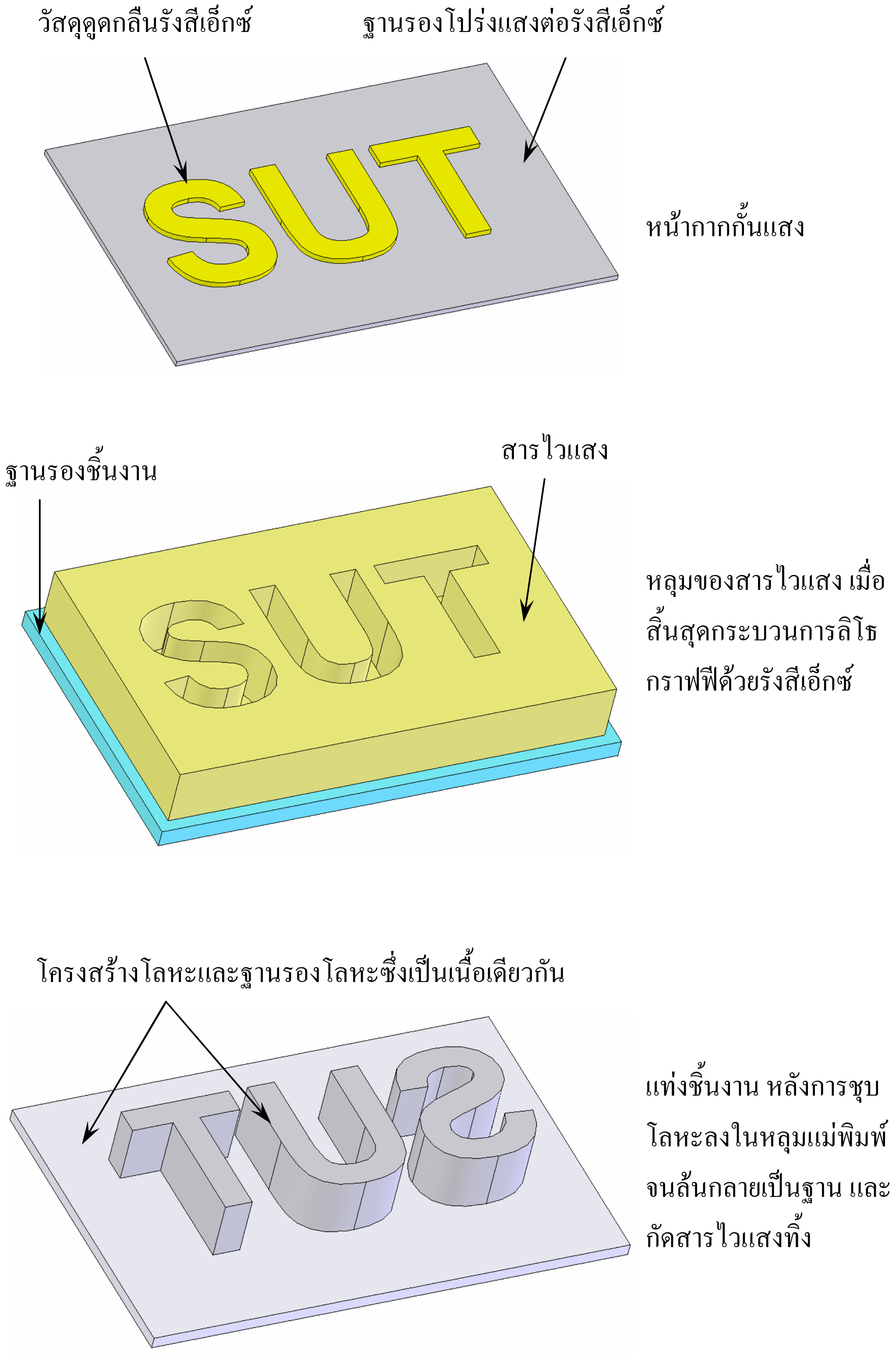
บทที่ 5
การสร้างแม่พิมพ์โลหะและการผลิตซ้ำชิ้นงาน

หลังจากที่สร้างชิ้นงานด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์จนเสร็จสิ้นกระบวนการแล้วนั้น ก็จะสามารถนำชิ้นงานไปใช้งานได้ แต่ในบางกรณีอาจมีความจำเป็นต้องใช้ชิ้นงานที่เป็นโลหะ โดยชิ้นงานที่สร้างจนเสร็จด้วยพอลิเมอร์นั้นอาจใช้งานไม่ได้ หรือในบางกรณีนั้นชิ้นงานที่ทำการสร้างจนเสร็จสิ้นเพียงชิ้นเดียว แต่ในการทดสอบหรือการใช้งานนั้น มีความจำเป็นต้องใช้หลายชิ้น ด้วยเหตุผลข้างต้นจึงมีความจำเป็นต้องสร้างชิ้นงานจากโลหะ รวมถึงการสร้างแม่พิมพ์เพื่อที่จะทำการผลิตชิ้นงานซ้ำโดยไม่ต้องอาศัยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ ซึ่งทำให้สามารถลดต้นทุนในกระบวนการได้มาก รวมถึงยังสามารถลดเวลาได้อีกด้วย

5.1 หลักการสร้างแม่พิมพ์โลหะ

ในงานหลายชนิดมีความจำเป็นต้องใช้ชิ้นงานที่สามารถนำไฟฟ้าได้ และการสร้างชิ้นงานให้มีคุณสมบัติที่สามารถนำไฟฟ้าได้นั้น ส่วนใหญ่แล้วจะทำการสร้างจากโลหะ เช่น ทองคำ ทองแดง หรือนิกเกิล ซึ่งสาเหตุที่นิยมใช้โลหะมากกว่าวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าได้ชนิดอื่นนั้น เนื่องจากโลหะดังที่ได้กล่าวมานั้น สามารถขึ้นรูปได้ด้วยวิธีการชุบด้วยไฟฟ้า (Electroplating) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายต่อการสร้างชิ้นงาน ทั้งยังสามารถสร้างชิ้นงานที่มีความคมชัด มีโครงสร้างที่ดีอีกด้วย ในการสร้างชิ้นงานจากโลหะนั้น จะเป็นการนำชิ้นงานที่สร้างจากกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์มาสร้างต่อ โดยการออกแบบลวดลายเริ่มต้นนั้นแบ่งตามวัตถุประสงค์ในการสร้างชิ้นงานออกได้เป็นสองประเภท คือ การออกแบบเพื่อสร้างชิ้นงานเป็นโลหะ และการออกแบบเพื่อสร้างชิ้นงานเป็นวัสดุอื่นโดยสร้างแม่พิมพ์จากโลหะ ซึ่งสำหรับขั้นตอนการสร้างชิ้นงาน ฐานรองชิ้นงานในกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์นั้น ต้องเป็นวัสดุที่นำไฟฟ้า และสามารถเป็นฐานสำหรับการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าได้อีกด้วย

หากต้องการให้ชิ้นงานสุดท้ายเป็นโลหะ กระบวนการสร้างชิ้นงานด้วยวิธีการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์นั้น ลวดลายโครงสร้างชิ้นงานต้องเป็นลวดลายที่กลับด้าน เนื่องจากเมื่อสร้างจนเสร็จสิ้นกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์แล้ว ลวดลายโครงสร้างจะได้เป็นลวดลายตามจริง ซึ่งต้องนำชิ้นงานดังกล่าวไปเป็นแม่พิมพ์สำหรับการชุบด้วยโลหะ และเมื่อทำการชุบโลหะลงไปแล้ว โครงสร้างที่เป็นโลหะนั้น จะเป็นโครงสร้างที่มีลวดลายกลับด้านกับลวดลายที่ออกแบบไว้ ดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ลวดลายโครงสร้างในลำดับขั้นการขึ้นรูปด้วยสารไวแสง SU-8

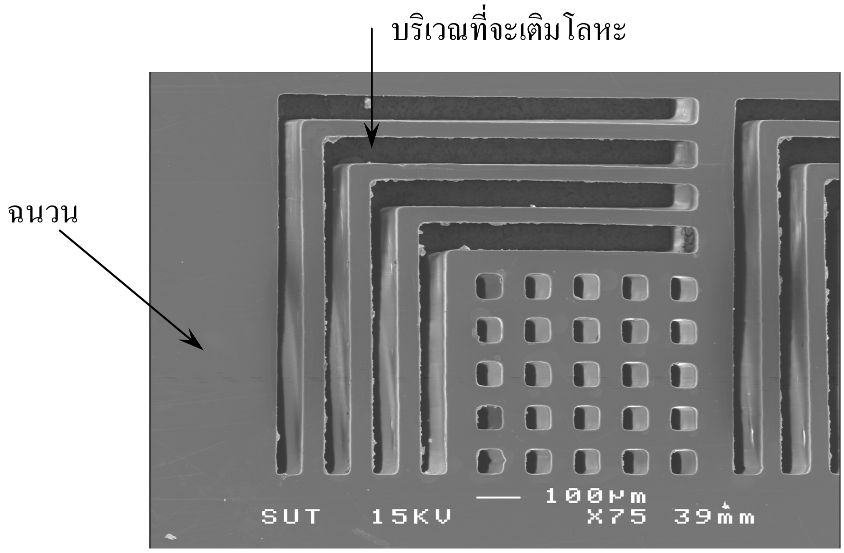
จากรูปที่ 5.1 จะเห็นว่าหลังจากที่เสร็จสิ้นกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์แล้ว จะได้

ชิ้นงานตามลวดลายต้นแบบดังหน้ากากกั้นแสง และเมื่อทำการชุบโลหะลงไปบนชิ้นงาน เพื่อสร้างเป็นชิ้นงานโลหะนั้น ชิ้นงานที่ได้จะอยู่ในลักษณะกลับด้านกับลวดลายที่ออกแบบไว้ ซึ่งด้วยเหตุผลดังกล่าว ในการออกแบบลวดลายในแต่ละครั้งแล้ว นอกจากจะต้องคำนึงว่าจะใช้กับสารไวแสงชนิดบวกหรือลบแล้ว ยังต้องคำนึงด้วยว่าต้องการชิ้นงานเป็นพอลิเมอร์หรือว่าโลหะ เพื่อจะได้ออกแบบลวดลายได้ตรงตามความต้องการว่าจะเป็นหน้าตรงหรือกลับด้าน

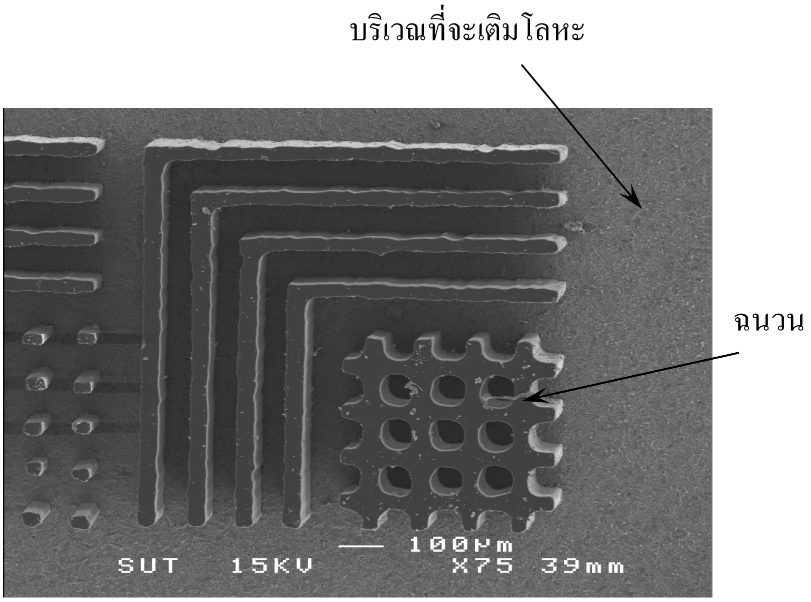
กรณีชิ้นงานทดสอบที่สร้างขึ้นนั้น จากที่ได้แสดงในขั้นตอนกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ จะเห็นว่าจากลวดลายของชิ้นงานเริ่มต้นที่หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์เทียบกับหลุมของลวดลายที่สร้างเสร็จสิ้นกระบวนการ เป็นไปดังแสดงในรูปที่ 5.1 ดังนั้น เมื่อทำการสร้างชิ้นงานต่อให้เป็นโลหะนั้น ชิ้นงานโลหะที่ได้จะเป็นชิ้นงานที่มีลวดลายกลับด้านกับลวดลายบนหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ ซึ่งจะเห็นว่าในการสร้างชิ้นงานเป็นโลหะด้วยกระบวนการนี้นั้น ต้องออกแบบชิ้นงานให้กลับด้าน เพื่อชิ้นงานโลหะสุดท้ายจะได้เป็นชิ้นงานจริงที่ไม่กลับด้านนั่นเอง

5.2 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

หลังจากที่ทำการสร้างชิ้นงานด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์จนเสร็จสิ้นกระบวนการแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นขั้นตอนสำหรับการนำชิ้นงานที่สร้างเสร็จนั้นมาทำการเติมโลหะเข้าไปในหลุมของสารไวแสง ด้วยวิธีการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating) เข้าไปจนเต็มหลุม และล้นออกมาจนก่อเป็นฐานของของชิ้นงานซึ่งจะทำให้ฐานเป็นเนื้อเดียวกันกับชิ้นงาน หรือในบางกรณีอาจชุบแค่พอดีเต็มหลุม ซึ่งก็ขึ้นกับความจำเป็นและการออกแบบชิ้นงานนั่นเอง โดยชิ้นงานทดสอบที่สร้างเสร็จสิ้นกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์นั้น แสดงได้ดังรูปที่ 5.2



(ก.)

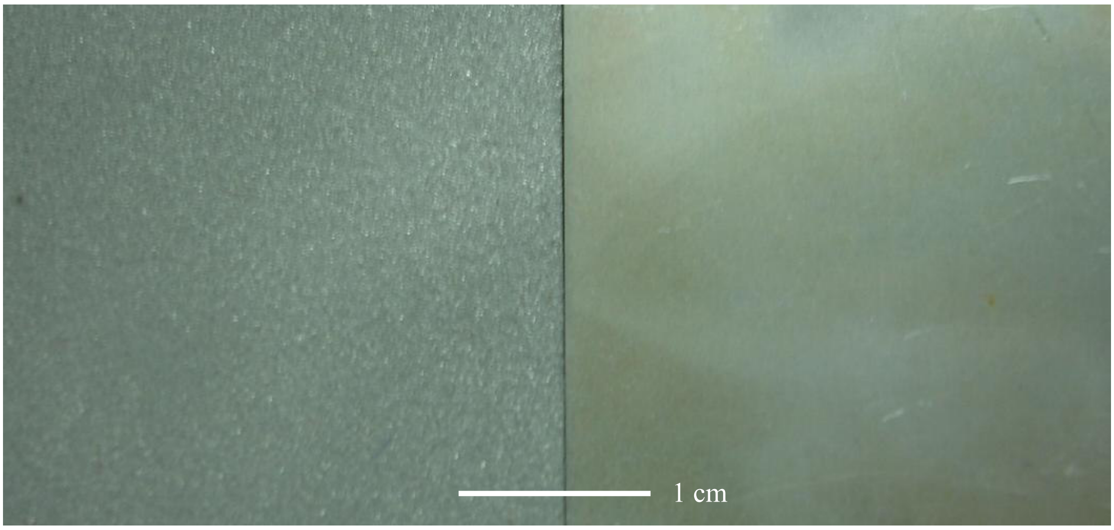


(ข.)

รูปที่ 5.2 ชิ้นงานที่สร้างจากกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ (ก.) ชิ้นงานในลักษณะหลุมของสารไวแสง (ข.) ชิ้นงานในลักษณะแท่งของสารไวแสง

ฐานของชิ้นงานที่จะนำมาชุบโลหะด้วยไฟฟ้านั้น ต้องเป็นวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าได้ โดยในขั้นการทดลองนั้น ได้ทดลองนำวัสดุหลายชนิดมาทำเป็นฐานของชิ้นงาน โดยเน้นวัสดุที่หาง่ายและราคาไม่แพงมากนัก จากการทดลองใช้กราไฟต์ ผลปรากฏว่า สามารถสร้างชิ้นงานจนสิ้นสุดกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ได้ แต่เมื่อนำมาทำการชุบโลหะด้วยไฟฟ้านั้น โลหะเกาะกับฐานกราไฟต์ได้ไม่ดีนัก เนื่องจากกราไฟต์เกิดการหลุดร่อนที่บริเวณผิวได้ง่าย จึงทำให้หลายครั้งที่ชิ้นงานเกิดการหลุดจากฐานในขณะที่ยังทำการชุบโลหะไม่เสร็จ ทำให้ชิ้นงานเสียหายและไม่สามารถชุบโลหะต่อจนเสร็จได้ จากนั้นทำการทดลองใช้แผ่นสเตนเลส ขัดจนเรียบเงา ปรากฏว่าไม่สามารถสร้างชิ้นงานจนเสร็จสิ้นกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ได้ เนื่องจากการยึดเกาะของสารไวแสงบนพื้นผิวสแตนเลสนั้นไม่ดีเท่าที่ควร ทำให้เกิดการหลุดร่อนของสารไวแสงออกจากฐาน ซึ่งส่งผลให้ลวดลายของชิ้นงานเสียหาย และสุดท้ายทดลองกับแผ่นสแตนเลสที่ขัดจนเรียบแล้วนำไปพ่นทรายด้วยความเร็วสูง เพื่อให้เกิดหลุมขรุขระขนาดเล็กบนพื้นผิว โดยลักษณะพื้นผิวแสดงได้ดังรูปที่ 5.3 และเมื่อนำแผ่นสเตนเลสที่ทำการพ่นทรายเรียบร้อยแล้วมาใช้ในกระบวนการผลปรากฏว่า สามารถสร้างชิ้นงานจนสิ้นสุดกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ได้โดยที่สารไวแสงสามารถเกาะกับฐานได้ดี ไม่มีการหลุดร่อน และเมื่อนำชิ้นงานมาทำการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ก็ไม่เกิดการหลุดร่อนของชิ้นงานออกจากฐานระหว่างการดำเนินการชุบโลหะแต่อย่างใดดังนั้นจึง

เลือกใช้ฐานที่เป็นแผ่นสเตนเลสที่ทำการพ่นทรายเรียบร้อยแล้ว ในกระบวนการทดลองสร้างชิ้นงานสำหรับการทดสอบ



รูปที่ 5.3 ขวาคือพื้นผิวของแผ่นสเตนเลส และซ้ายคือพื้นผิวของแผ่นสเตนเลสหลังทำการพ่นทราย

การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (electroplating) นั้นเป็นกระบวนการของการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี เมื่อมีการไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้ว โดยผ่านสารละลายซึ่งมีส่วนผสมของเกลือของโลหะที่ต้องการ โดยกระแสจะไหลผ่านสารละลายในทิศทางการไหลของไอออนบวก (อิเล็กตรอนไหลในทิศทางตรงกันข้าม) ซึ่งสามารถใช้อัตราการไหลดังกล่าวเพื่อวัดอัตราการเกิดของปฏิกิริยาได้ โดยปฏิกิริยาที่เกิด ณ ขั้วบวกจะเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังสมการที่ 5.1

$$M \longrightarrow M^{n+} + ne^{-} \tag{5.1}$$

ส่วนขั้วลบจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ดังสมการที่ 5.2

$$M^{n+} + ne^{-} \longrightarrow M \tag{5.2}$$

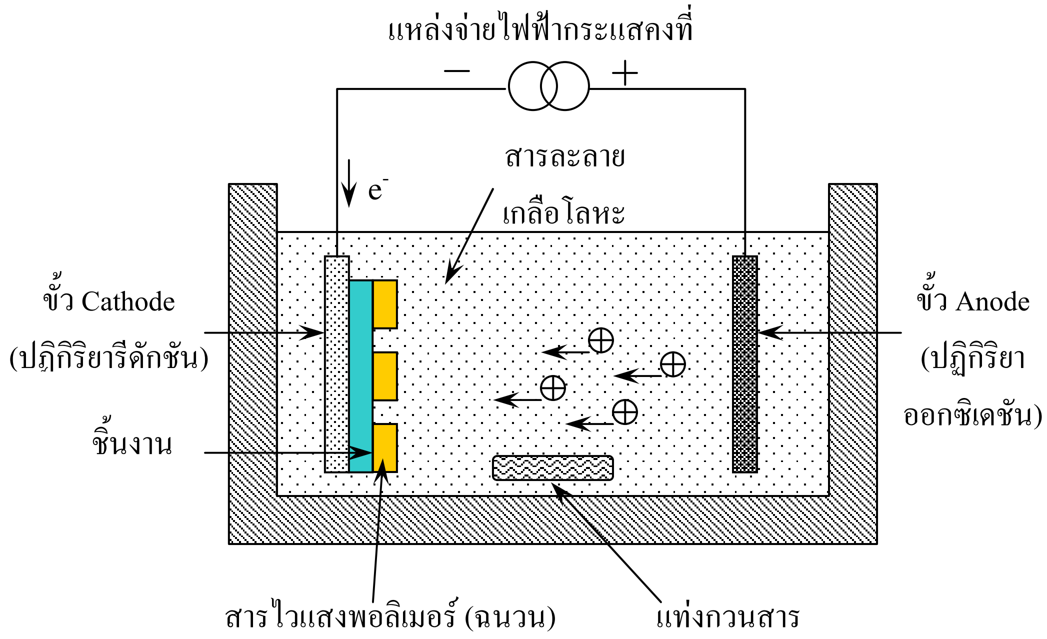
โดยที่ M คือ วัสดุที่เกิดปฏิกิริยา

M^{n+} คือ จำนวนไอออนของวัสดุที่เกิดปฏิกิริยา

ne^{-} คือ จำนวนอิเล็กตรอนในการเกิดปฏิกิริยา

ถ้าสมมุติให้กระแสของทั้งขั้วบวกและขั้วลบมีค่าเท่ากันจะได้ว่า มวลของไอออนของโลหะ

ในสารละลายจะมีค่าคงที่ โดยลักษณะการต่อวงจรในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าแสดงได้ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 แผนภาพแสดงการติดชิ้นงานและการต่อวงจรสำหรับการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

การติดตั้งนั้นชิ้นงานที่ต้องการเติมโลหะลงไปจะติดตั้งไว้ที่ขั้วลบ (cathode) ส่วนขั้วบวก (anode) จะเป็นโลหะที่ต้องการเติมลงไปในชิ้นงาน จากนั้นจุ่มทั้งสองขั้งลงไปในภาชนะพร้อมทั้งเติมสารละลายเกลือของโลหะ (electrolyte) ที่ต้องการเติมลงในชิ้นงานลงไปจนท่วมทั้งสองขั้ว เมื่อต่อไฟเข้าไปทั้งสองขั้วแล้ว กระแสจะไหลระหว่างขั้วบวกและขั้วลบผ่านสารละลายที่เติมลงไป และในกระบวนการ LIGA นั้น วัสดุที่ใช้ในการชุบโลหะโดยทั่วไปแล้วใช้นิกเกิล (Nickel : Ni) เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการชุบโลหะที่ดีเยี่ยม และกระบวนการชุบส่วนใหญ่ใช้กระบวนการจ่ายกระแสแบบคงที่ (Galvanostatic plating) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ควบคุมเพียงกระแสที่ไหลระหว่างขั้วสองขั้วเท่านั้น ซึ่งควบคุมได้ง่ายผ่านทางแหล่งจ่ายกระแสซึ่งเป็นแหล่งจ่ายแบบคงค่ากระแสนั่นเอง

อัตราการเกิดของโลหะบนชิ้นงานคำนวณได้โดยใช้กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law)

$$\omega = \frac{A_{\omega}}{(F)(n_{el})}(I)(t) \tag{5.3}$$

โดยที่ ω คือ มวลของโลหะที่เกิดขึ้นที่ขั้วลบหรือที่หลุดออกจากขั้วบวก (g)

A_ω คือ มวลอะตอม (atomic weight) ของโลหะที่ชุบ
n_{el} คือ จำนวนอิเล็กตรอนในการเกิดปฏิกิริยา
F คือ ค่าคงที่ฟาราเดย์มีค่าเท่ากับ 96,487 คูลอมบ์ต่อโมล
I คือ กระแสที่ไหลผ่านสารละลายในภาชนะ (mA)
t คือ เวลาในการชุบโลหะ (วินาที)

ถ้าคิดว่าในการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีต่าง ๆ เช่นการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของไฮโดรเจน (Reduction of hydrogen) ใช้กระแสในอัตราที่น้อยมาก จะได้สมการเป็นดังนี้

$$\omega_{practical} = \eta \frac{A_\omega}{(F)(n_{el})}(I)(t) \tag{5.4}$$

โดยที่ η คือ ประสิทธิภาพในการชุบโลหะ (Plating efficiency)

ความหนาของโลหะที่ก่อตัวขึ้นสามารถคำนวณได้โดยพิจารณาจากปริมาณและความหนาแน่นของโลหะที่ใช้ในการชุบดังสมการ

$$\omega = \rho A h \tag{5.5}$$

โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่นของโลหะ
A คือ พื้นที่การชุบโลหะ
h คือ ความสูงของโลหะก่อตัวขึ้น

ดังนั้นความสูงของโลหะที่ก่อตัวขึ้นสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$h = \eta \frac{(A_\omega)(I)(t)}{\rho A F (n_{el})} \tag{5.6}$$

และอัตราในการชุบโลหะ (Electroplating rate) สามารถหาได้ดังนี้

$$\frac{dh}{dt} = \eta \frac{A_\omega I}{\rho A F (n_{el})}$$

$$= \eta \frac{A_{\omega} J}{\rho F(n_{el})} \quad (5.7)$$

โดยที่ J คือ ความหนาแน่นกระแส (A/cm^2)

ยกตัวอย่างการชุบโลหะนิกเกิลซึ่งเป็นโลหะที่ใช้กันทั่วไป ในการคำนวณความสูงของโลหะที่เกิดขึ้น โดยใช้มีคุณสมบัติดังนี้

มวลอะตอม (atomic weight) เท่ากับ 58.69 กรัมต่อโมล

จำนวนอิเล็กตรอนในการเกิดปฏิกิริยา $n_{el} = 2$

ความหนาแน่น $\rho = 8.9$ g/cm^3

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวกเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันดังนี้

$$Ni \longrightarrow Ni^{2+} + 2e^{-}$$

ส่วนขั้วลบจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันดังนี้

$$Ni^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow Ni$$

ความหนาของโลหะที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$h[cm] = \eta \frac{A_{\omega} I}{\rho A F(n_{el})}$$

$$h[cm] = \eta \cdot \frac{58.69}{8.9 x 96487 x 2} \cdot \frac{I}{A} \cdot t$$

$$= \frac{\eta}{29263} \cdot J \cdot t$$

ถ้าสมมุติให้ค่าประสิทธิภาพมีค่า 95.5% ความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 10 mA/cm^2 จะได้ว่าหากต้องการความหนาของโลหะเท่ากับ 5 ไมโครเมตร ต้องใช้เวลาเท่ากับ

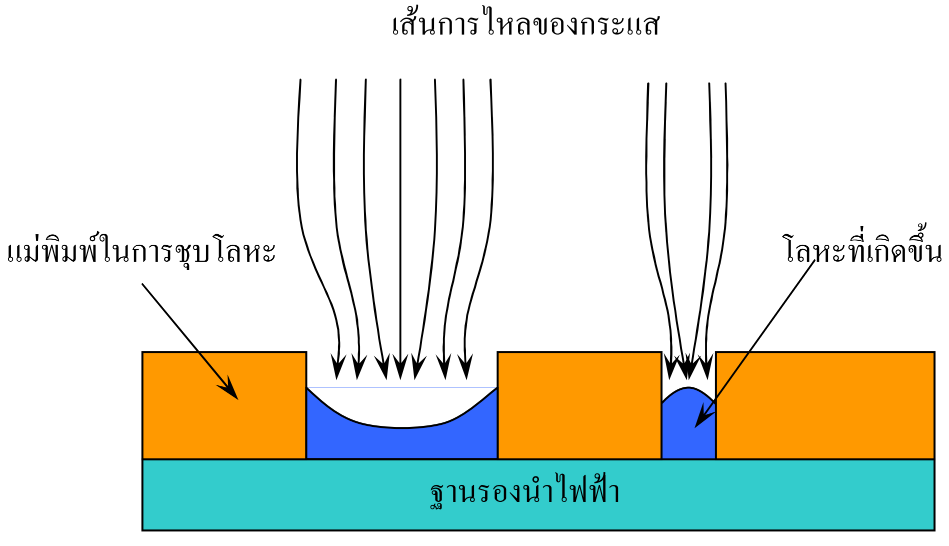
$$t = \frac{29263}{\eta J} h[cm]$$

$$t = \frac{29263}{0.955x0.01}0.0005$$

$$t = 1532.09\,\text{sec}$$

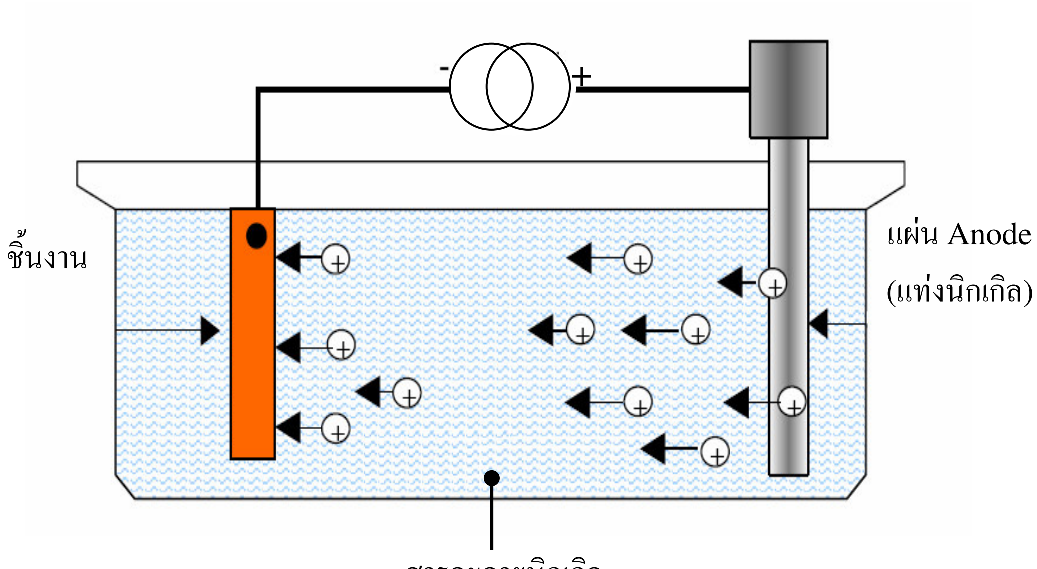
จะได้ว่าต้องทำการชุบด้วยเวลาประมาณ 25.5 นาที และถ้าต้องการให้ได้ความหนาที่ 50 ไมโครเมตร ต้องทำการชุบด้วยเวลาทั้งสิ้น 255.4 นาที และหากเพิ่มความหนาแน่นกระแสขึ้นเป็น 50 mA/cm^2 เวลาที่ใช้ในการชุบเพื่อให้ได้ความหนา 50 ไมโครเมตร จะใช้เวลาทั้งสิ้นประมาณ 51 นาที

โดยทั่วไปแล้วการเกิดของโลหะบนชิ้นงานนั้น จะเกิดขึ้นในลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นผลมาจากหลายปัจจัย เช่น ความไม่สม่ำเสมอของกระแส ซึ่งเกิดจากหลายกรณีอาทิเช่น ลักษณะรูปร่างหรือลวดลายของชิ้นงานที่ทำการชุบ ทิศทางในการหมุนของชิ้นงานเมื่อเทียบกับขั้วลบ (anode) หรือแม้แต่ตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าในภาชนะชุบ ลักษณะการเกิดของโลหะแบบไม่สม่ำเสมอนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 5.5 ซึ่งเปรียบเทียบการเกิดของโลหะที่บริเวณของชิ้นงานที่มีขนาดรูปร่างที่แตกต่างกัน ซึ่งในการลดผลจากความไม่สม่ำเสมอนั้นการให้ความหนาแน่นกระแสน้อย ๆ ในการชุบสามารถช่วยลดผลดังกล่าวลงได้แต่เมื่อลดความหนาแน่นกระแสก็จะส่งผลให้ต้องเพิ่มเวลาในการชุบขึ้นเพื่อให้ได้ความหนาที่ต้องการ ดังนั้นในการชุบโลหะหลายครั้งจะทำการชุบให้ล้นจากหลุมขึ้นไปส่วนหนึ่ง แล้วจึงทำการขัดผิวหน้าของชิ้นงานออก เพื่อให้ผิวของชิ้นงานเรียบ ซึ่งหากไม่ทำการชุบให้ล้นนั้นจะเห็นว่า อาจมีบางส่วนที่ยังไม่เต็มตามต้องการ



รูปที่ 5.5 การเกิดของโลหะแบบไม่สม่ำเสมอบนชิ้นงานที่มีขนาดช่องต่างกัน

โลหะที่จะทำการชุบด้วยไฟฟ้าเพื่อสร้างเป็นชิ้นงานในงานวิจัยนี้ ใช้โลหะนิกเกิล (Nickel) เนื่องจากเป็นโลหะที่มีความแข็งแรง มีจุดหลอมเหลวสูงถึง 1,453 องศาเซลเซียส สามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการชุบด้วยไฟฟ้าได้ ทั้งยังเป็นโลหะที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในกระบวนการสร้างชิ้นงานจุลภาค และการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้านั้น จำเป็นต้องมีสารละลายนิกเกิลที่ใช้สำหรับการชุบด้วยไฟฟ้า โดยสารละลายสำหรับชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้านั้น จะผสมตามอัตราส่วนของสารต่าง ๆ โดยมี $NiSO_46H_2O$ (Nickel Sulfate) ปริมาตร 200 กรัม $NiCl_26H_2O$ (Nickel Chloride) ปริมาตร 5 กรัม H_3BO_3 (Boric Acid) ปริมาตร 25 กรัม และน้ำดีไอปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร เมื่อทำการผสมสารข้างต้นจนเข้ากันแล้ว จะได้สารละลายนิกเกิลสำหรับชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า ซึ่งอยู่ในรูปน้ำสีเขียวใส ทำการกรองด้วยกระดาษกรองสารแบบละเอียด (cat No 1001 หรือ 1002) จำนวน 5 รอบจากนั้นก็จะสามารถนำไปใช้งานได้ โดยในการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้านั้นจะทำการต่อวงจรเหมือนการชุบโลหะอื่น ๆ ด้วยไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 5.6

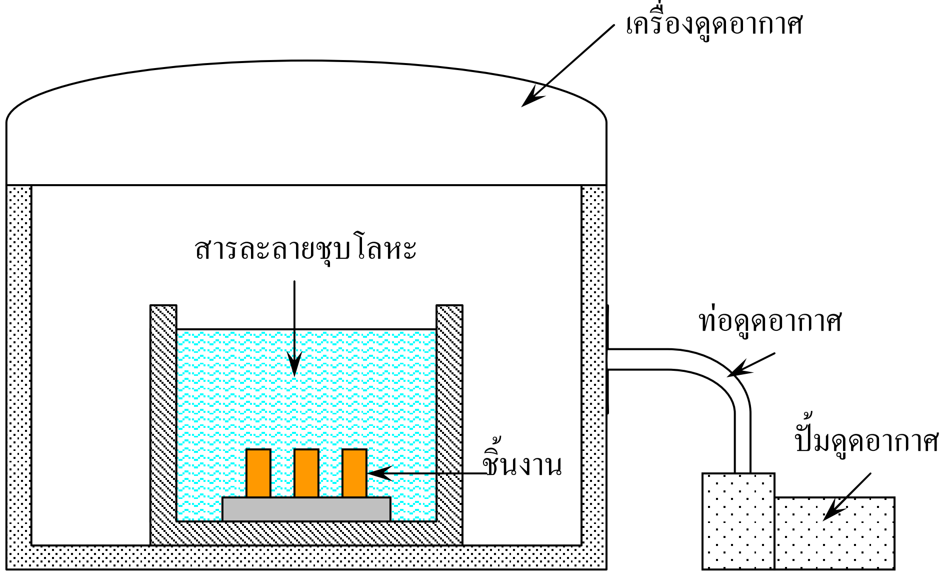


รูปที่ 5.6 การต่อวงจรชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า

ในกระบวนการชุบนิกเกิลลงในแม่พิมพ์ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ไวแสงที่ทำการสร้างลวดลายเรียบร้อยแล้วนั้น จะนำชิ้นงานมาต่อกับวงจรขั้วลบ ส่วนขั้วบวกนั้นจะใช้แท่งโลหะนิกเกิลในการต่อให้ครบวงจร ซึ่งต้องทำการเทสารละลายให้ท่วมชิ้นงานจนหมดทั้งส่วนของขั้วบวกและขั้วลบ โดยให้สารละลายเป็นตัวนำระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ จากนั้นปล่อยให้กระแสไหลผ่านชิ้นงานช้า ๆ โดยในการตั้งค่าแหล่งจ่ายนั้นจะใช้แรงดันไฟฟ้าประมาณ 5-15 โวลต์ และทำการคงค่ากระแส

ให้ไหลคงที่ประมาณ 20 -30 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรและในระหว่างการดำเนินการนั้นต้องทำการกวนสารละลายตลอดเวลาเพื่อป้องกันการตกตะกอนของสารละลาย และให้สารสะหมุนเวียนทั่วทั้งภาชนะ ข้อที่ควรระมัดระวังในระหว่างการดำเนินการมีหลัก ๆ 3 ข้อ คือ

1. การเกิดฟองน้ำภายในลวดลาย เนื่องจากลวดลายที่ทำการสร้างให้เป็นแม่พิมพ์บนสารไวแสงนั้น เป็นลวดลายที่มีขนาดเล็กถึงระดับ 10 ไมโครเมตรในขณะที่ความสูงหรือความลึกของโครงสร้างนั้นสูงประมาณ 500 ไมโครเมตร ดังนั้นการที่น้ำหรือสารละลายนิกเกิลจะสามารถซึมเข้าไปจนทั่วนั้นค่อนข้างยาก ดังนั้นสิ่งที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างคือฟองน้ำ ซึ่งจะทำให้บริเวณดังกล่าวนิกเกิลไม่สามารถก่อตัวขึ้นได้ และทำให้ชิ้นงานเสียหายได้ วิธีแก้ไขจุดดังกล่าวคือ ก่อนที่จะทำการต่อวงจรชุบนิกเกิลลงไปนั้นควรมั่นใจว่า ไม่มีฟองน้ำหลงเหลืออยู่ในโครงสร้างเป็นอันขาด ซึ่งการที่จะกำจัดฟองน้ำออกไปนั้น ทำได้โดยการนำชิ้นงานจุ่มลงไปในสารละลายจนสารละลายท่วมทั่วทั้งชิ้นงาน แล้วนำเข้าเครื่องดูดอากาศเพื่อทำการดูดอากาศออกดังแสดงในรูปที่ 5.7 เป็นเวลาอย่างน้อย 30 นาที เพื่อให้ฟองอากาศที่ติดอยู่ในซอกของโครงสร้างขนาดเล็กหลุดออกมา จากนั้นจึงนำไปดำเนินการกระบวนการชุบโลหะต่อโดยไม่ต้องนำชิ้นงานขึ้นจากสารละลาย



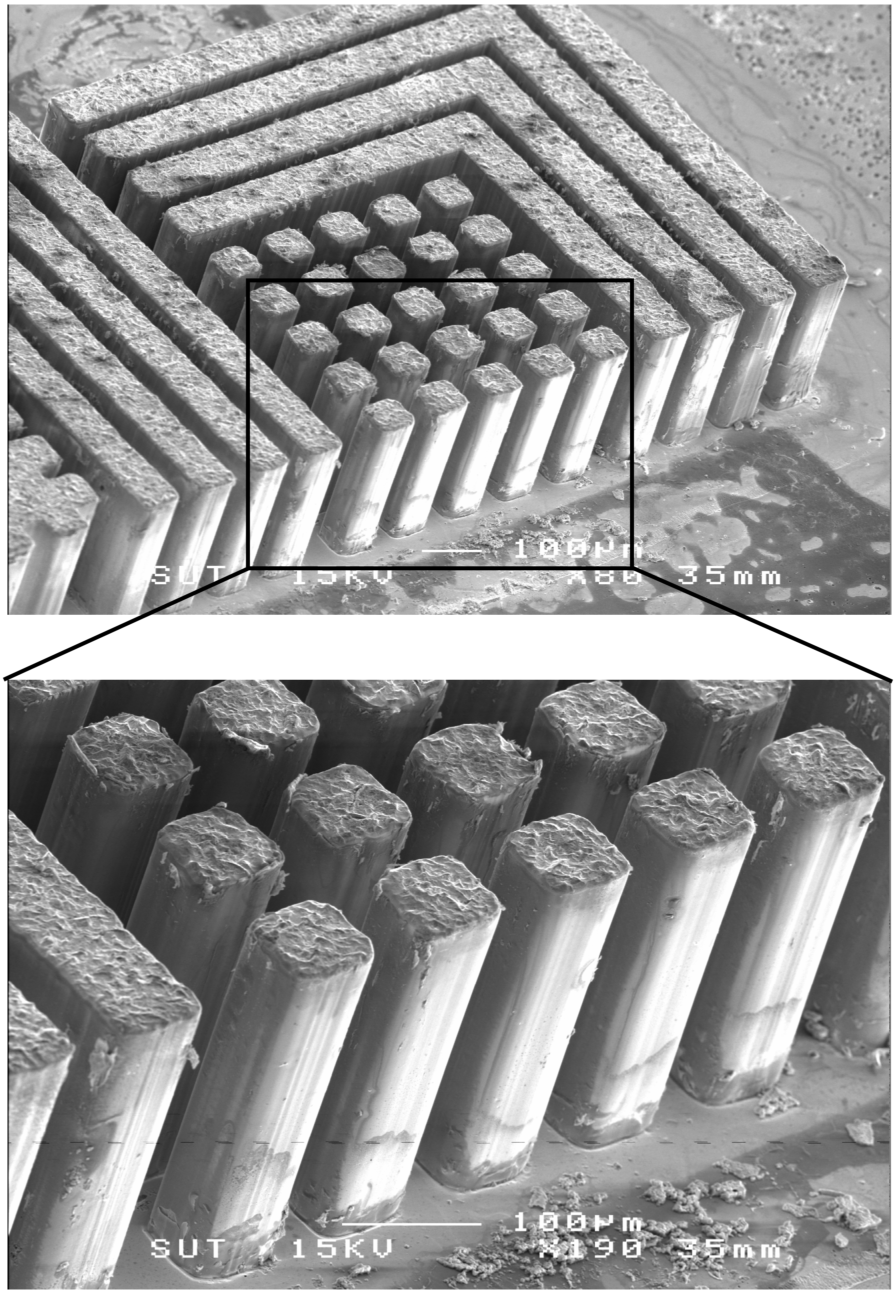
รูปที่ 5.7 การดูดฟองอากาศออกจากชิ้นงานด้วยเครื่องดูดอากาศ

2. การเกิดความขรุขระหรือก้อนโลหะส่วนเกินบนชิ้นงาน ก้อนโลหะขนาดเล็กหรือรอยขรุขระบนชิ้นงานนั้นสามารถเกิดขึ้นได้ โดยในบางครั้งก็ไม่ส่งผลกับชิ้นงาน แต่ในบางกรณีก็ทำให้ชิ้นงานไม่สามารถใช้งานได้ โดยสาเหตุของการเกิดรอยขรุขระนั้นเกิดจากในกระบวนการชุบโลหะนั้นโลหะเกิดการก่อตัวแบบไม่สม่ำเสมออาจเกิดจากการใช้กระแสมากเกินไปหรือการที่มี

ฟองอากาศในลวดลายของโครงสร้างก็เป็นได้ และหากไม่ต้องการให้ปัญหานี้เกิดขึ้นในกระบวนชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ควรปรับกระแสงในวงจรชุบโลหะให้ไหลน้อย ๆ ซึ่งอาจทำให้ใช้เวลาในการชุบเพิ่มขึ้นแต่จะทำให้ชิ้นงานที่ออกมานั้นเรียบเนียนไม่เกิดปัญหารอยขรุขระและไม่เกิดก้อนโลหะไม่พึงประสงค์ขึ้นกับชิ้นงาน โดยกระแสในการชุบที่เหมาะสมในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้านั้นควรให้กระแสคงที่อยู่ที่ประมาณ 20 – 30 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

3. การเกิดการแยกชั้นของโลหะ การแยกชั้นของโลหะนั้นทำให้ชิ้นงานเกิดความไม่แข็งแรง เนื่องจากอาจเกิดการหลุดระหว่างชั้นแต่ละชั้นออกจากกัน โดยการเกิดชั้นของโลหะนั้นมีสาเหตุมาจาก ในระหว่างกระบวนการชุบโลหะนั้น ได้มีการนำชิ้นงานขึ้นจากสารละลายทำให้ผิวของโลหะที่ก่อตัวขึ้นเกิดออกไซด์และคราบสกปรกต่าง ๆ ขึ้น และเมื่อนำชิ้นงานลงในสารละลายเพื่อทำการชุบต่อจะทำให้ชั้นโลหะเดิมและชั้นของโลหะที่เกิดขึ้นใหม่เกาะกันแบบไม่สนิทและสามารถหลุดออกจากกันได้ง่าย ซึ่งในการชุบโลหะหลายครั้งจำเป็นต้องยกชิ้นงานออกจากสารละลายชั่วคราวเพื่อตรวจสอบว่าการก่อตัวของโลหะเพียงพอหรือยัง โดยหากมีความจำเป็นต้องทำการยกชิ้นงานออกจากสารละลายนั้น ควรนำชิ้นงานจุ่มในน้ำดีไอทันที และสังเกตุการก่อตัวของโลหะผ่านน้ำดีไอแทนที่การสังเกตุผ่านอากาศ จะทำให้ไม่เกิดปัญหาการแยกชั้นของโลหะ

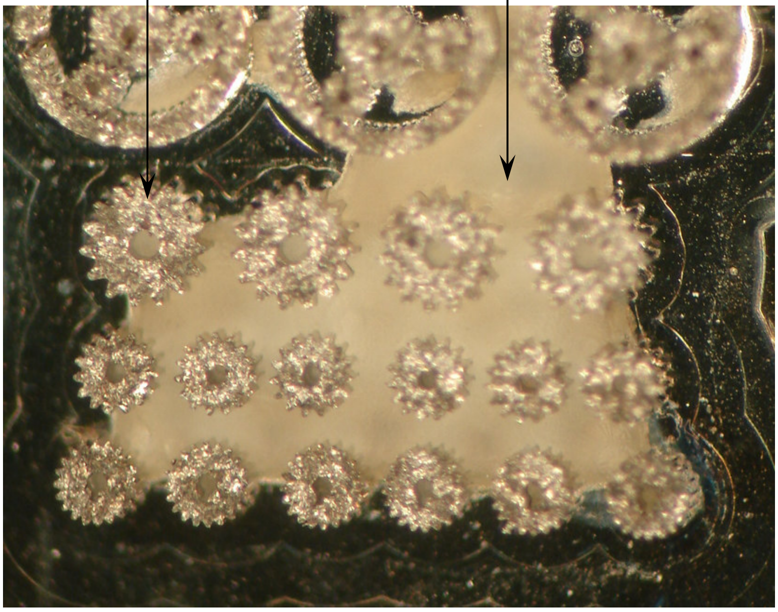
เมื่อทำการชุบโลหะลงบนชิ้นงานที่สร้างจากกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ดังรูปที่ 5.2 จนเต็มหลุมและล้นออกมาจนกลายเป็นฐานได้แล้ว จึงทำการแยกฐานและโลหะที่ก่อตัวขึ้นออกจากกันโดยการนำไปต้มในสาร Remover PG ที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส ส่วนเวลาในการต้มเพื่อแยกโลหะออกจากฐานนั้น จะขึ้นกับขนาดของชิ้นงาน โดยปกติแล้วจะใช้เวลาในการต้มประมาณ 30 นาที ก็จะทำให้ฐานรองชิ้นงานหลุดออกจากชิ้นงาน จากนั้นทำการต้มที่อุณหภูมิประมาณ 50 – 70 องศาเซลเซียสต่อเป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อให้พอลิเมอร์ไวแสงละลายหลุดออกจากชิ้นงานที่เป็นโลหะบางส่วน ซึ่งโดยปกติแล้วการต้มในสาร Remover PG จะไม่สามารถกำจัดพอลิเมอร์ในซอกโลหะได้ เนื่องจากการต้มในสาร Remover PG จะทำให้สารไวแสงละลายและในส่วนที่สารไวแสงอยู่ในซอกขนาดเล็กนั้น สารไวแสงจะเพียงแค่พองตัวไม่สามารถละลายออกมาได้ จะทำให้เหลือเศษของสารไวแสงค้างอยู่ดังรูปที่ 5.9 ซึ่งการต้มในสาร Remover PG นั้นจะทำได้แค่ทำให้เนื้อโลหะที่ก่อตัวขึ้นหลุดออกจากฐานรองของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ส่วนเศษสารไวแสงที่ยังคงเหลืออยู่นั้นต้องใช้กระบวนการอย่างอื่นในการกำจัด ดังนั้นจึงต้องนำไปสกัดทิ้งด้วยพลาสมาของออกซิเจนในเครื่องพลาสมาความดันต่ำ ที่ความดัน 0.2 มิลลิทอร์ และโดยปล่อยให้ออกซิเจนไหลเข้าไปในเครื่องพลาสมาในอัตราการไหลของออกซิเจนประมาณ 40 ลูกบาศเซนติเมตรต่อนาที ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวจะใช้เวลาค่อนข้างนานโดยใช้เวลาในการกัดประมาณ 3 – 7 วัน เมื่อเสร็จสิ้นจะได้ชิ้นงานโลหะดังรูปที่ 5.8 ซึ่งจะเห็นว่าลวดลายของโครงสร้างนั้นจะกลับด้านกับรูปที่ 5.2 ซึ่งเป็นแม่พิมพ์



รูปที่ 5.8 ภาพชิ้นงานที่เป็นโครงสร้างของโลหะนิกเกิล

จากผลการสร้างชิ้นงานด้วยโลหะดังที่ได้แสดงข้างต้นจะเห็นว่าโครงสร้างที่ได้นั้น เป็นโครงสร้างที่มีรายละเอียดที่ดีเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ ในส่วนผนังของโครงสร้างนั้นเนียนเรียบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารไวแสง SU-8 ให้โครงสร้างที่ดีเมื่อใช้เป็นแม่พิมพ์ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า และบริเวณพื้นผิวส่วนบนจะขรุขระเล็กน้อย เนื่องจากฐานรองที่ใช้เป็นแผ่นสแตนเลสพ่นทราย ซึ่งค่อนข้างขรุขระ และพื้นผิวส่วนบนคือส่วนที่สัมผัสกับฐานรองดังกล่าว ซึ่งจากผลที่ได้แสดงให้เห็น

ว่ากระบวนการสร้างชิ้นงานโดยวิธีที่นำเสนอนี้ สามารถสร้างชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

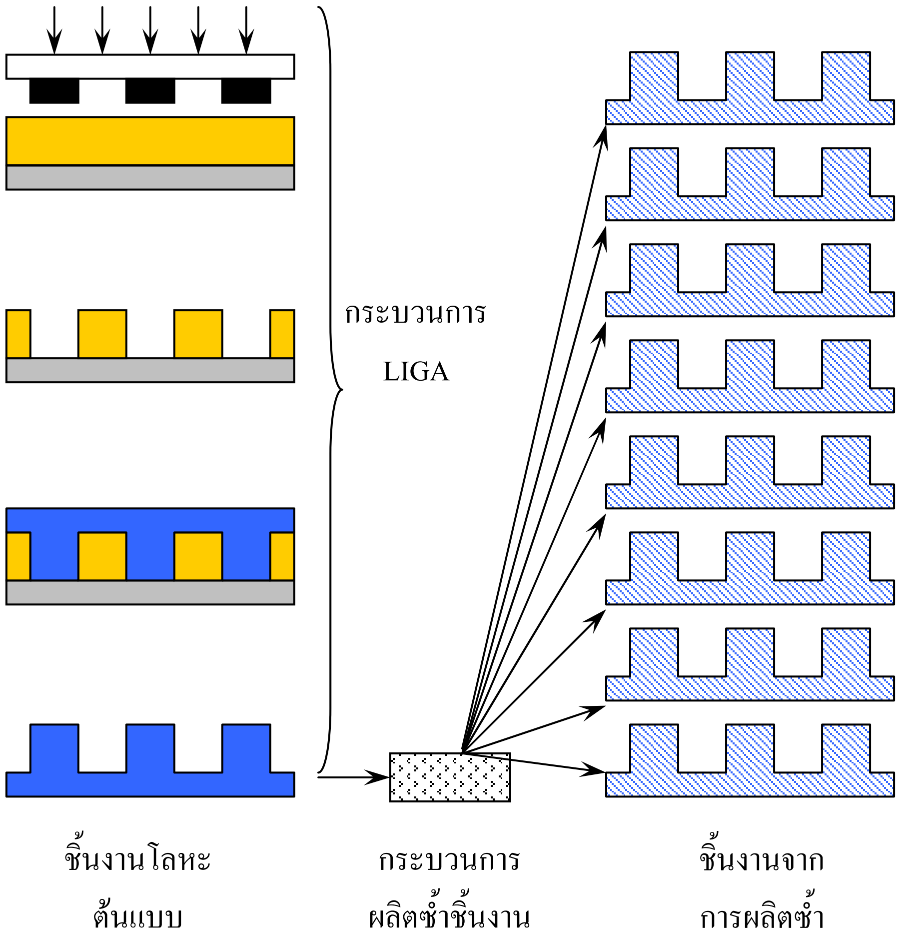


รูปที่ 5.9 เศษสารไวแสงที่อยู่บริเวณซอกของโครงสร้าง

5.3 การสร้างแม่พิมพ์ในการผลิตซ้ำ

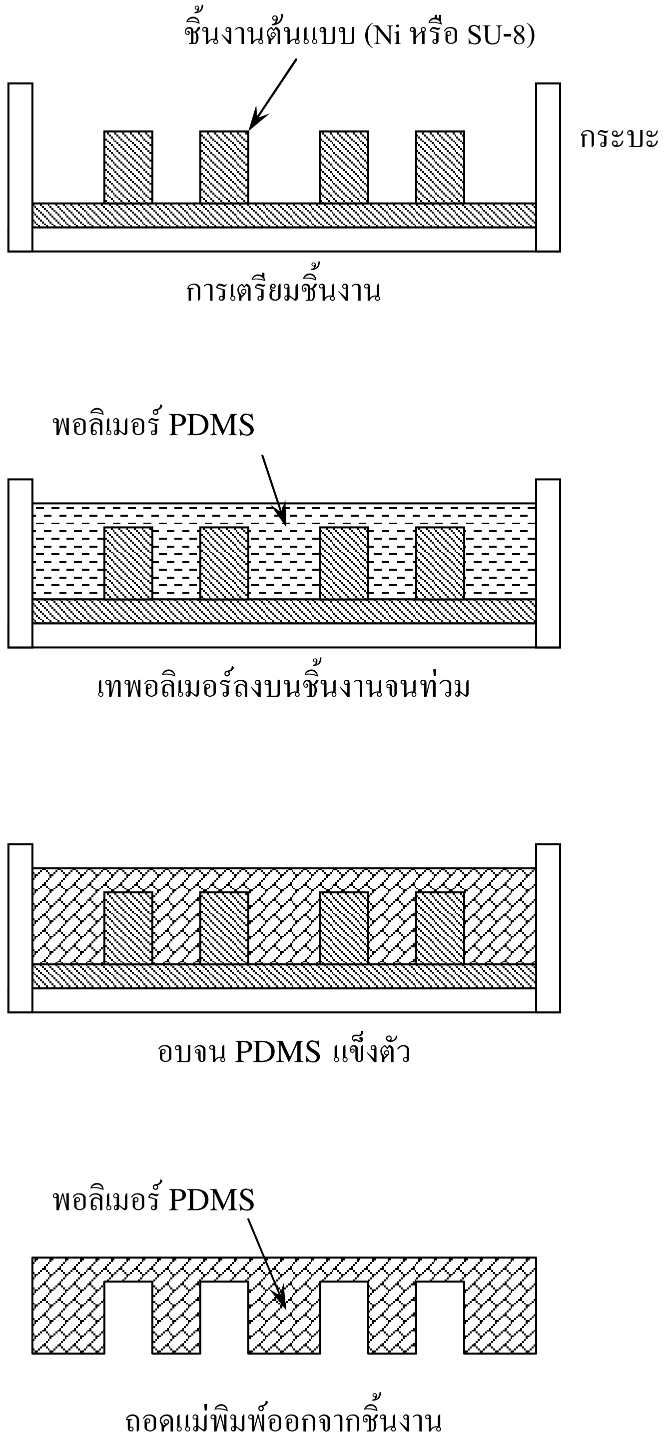
จากการนำเสนอกระบวนการสร้างชิ้นงานข้างต้นนั้น จะเห็นว่ากระบวนที่นำเสนอนั้นมีประสิทธิภาพสูงในการสร้างชิ้นงานจุลภาคและอุปกรณ์จุลภาคต่าง ๆ ทั้งแบบโครงสร้างที่เป็นพอลิเมอร์ไวแสงโดยตรงและแบบโครงสร้างที่สร้างจากโลหะโดยใช้สารไวแสงเป็นแม่พิมพ์ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า แต่จะเห็นว่าในการสร้างชิ้นงานจุลภาคด้วยวิธีการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์นั้นหากต้องการสร้างชิ้นงานหลายชิ้นต้องใช้เวลาในการสร้างค่อนข้างมาก เนื่องจากกระบวนการทั้งหมดนั้นใช้เวลาในกระบวนการค่อนข้างมากกว่าจะได้ชิ้นงานแต่ละชิ้น ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนากระบวนการในการที่จะนำชิ้นงานที่สร้างเสร็จแล้วนั้น มาเป็นแม่แบบสำหรับการสร้างแม่พิมพ์เพื่อที่จะทำการผลิตซ้ำชิ้นงานให้มีจำนวนมาก (replication) โดยที่ไม่ต้องสร้างชิ้นงานด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ทุกครั้ง ซึ่งแนวคิดการผลิตซ้ำแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 5.10 โดยการผลิตซ้ำชิ้นงานให้มีจำนวนมาก ๆ นั้น ทำให้สามารถลดเวลาในกระบวนการสร้างชิ้นงานลงได้ โดยในการสร้างแม่พิมพ์นั้นเลือกใช้พอลิเมอร์ PDMS ในการถอดแบบเพื่อใช้งานเป็นแม่พิมพ์สำหรับการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่ง่ายต่อการขึ้นรูป และมีความยืดหยุ่นสูง การถอดแม่พิมพ์ออกจากชิ้นงานต้นแบบก็ทำได้โดยง่าย ทำให้ในกระบวนการผลิตซ้ำ

ชิ้นงานนั้นเกิดปัญหาขึ้นค่อนข้างน้อย และในการถอดแบบชิ้นงานให้มาเป็นแม่พิมพ์ PDMS นั้น สามารถถอดแบบได้ทั้งจากชิ้นงานต้นแบบที่เป็นพอลิเมอร์ไวแสงและชิ้นงานต้นแบบที่สร้างเป็นโลหะเรียบร้อยแล้ว และเมื่อต้องการสร้างชิ้นงานจุลภาคเพิ่มก็สามารถนำชิ้นงานจุลภาคต้นแบบมาสร้างเป็นแม่พิมพ์ PDMS เพื่อสร้างชิ้นงานจุลภาคเพิ่มได้ทันที โดยเวลาในการสร้างชิ้นงานแต่ละชิ้นด้วยกระบวนการผลิตซ้ำชิ้นงานนั้น ใช้เวลาในการสร้างน้อย สามารถประหยัดได้ทั้งเวลาและค่าใช้จ่าย



รูปที่ 5.10 แนวคิดการผลิตซ้ำชิ้นงาน

กระบวนการในการผลิตซ้ำชิ้นงานโดยการใช้พอลิเมอร์ PDMS ในการถอดแบบนั้นมีลำดับการดำเนินการดังรูปที่ 5.11 โดยที่หลังจากการถอดแบบชิ้นงานให้กลายเป็นแม่พิมพ์พอลิเมอร์ PDMS เสร็จเรียบร้อยแล้ว และหลังจากที่ทำการถอดแม่พิมพ์พอลิเมอร์ PDMS ออกจากชิ้นงานเสร็จแล้ว ชิ้นงานต้นแบบดังกล่าวก็ยังสามารถนำมาเป็นต้นแบบในการถอดแบบเป็นแม่พิมพ์ได้เรื่อย ๆ โดยที่ชิ้นงานไม่เสียหาย

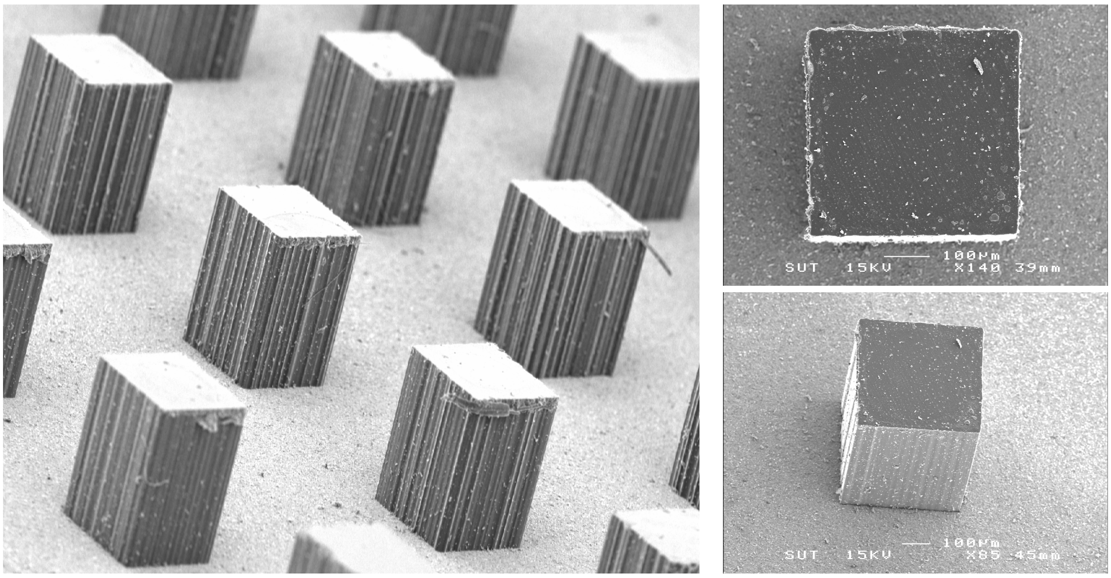


รูปที่ 5.11 กระบวนการผลิตซ้ำชิ้นงานโดยการถอดแบบด้วยพอลิเมอร์ PDMS

ในการถอดแบบนั้นทำได้โดยการนำชิ้นงานที่สร้างจนเสร็จสิ้นแล้ว มาทำกรอบล้อมรอบด้วยกระบะชั่วคราวเพื่อกำหนดขอบเขตของแม่พิมพ์ หลังจากนั้นเทพอลิเมอร์ PDMS ซึ่งอยู่ในรูปของเหลวลงไปบนชิ้นงานจนท่วมชิ้นงาน ก่อนที่จะนำชิ้นงานทั้งหมดรวมทั้งกระบะทั้งหมดไปอบ

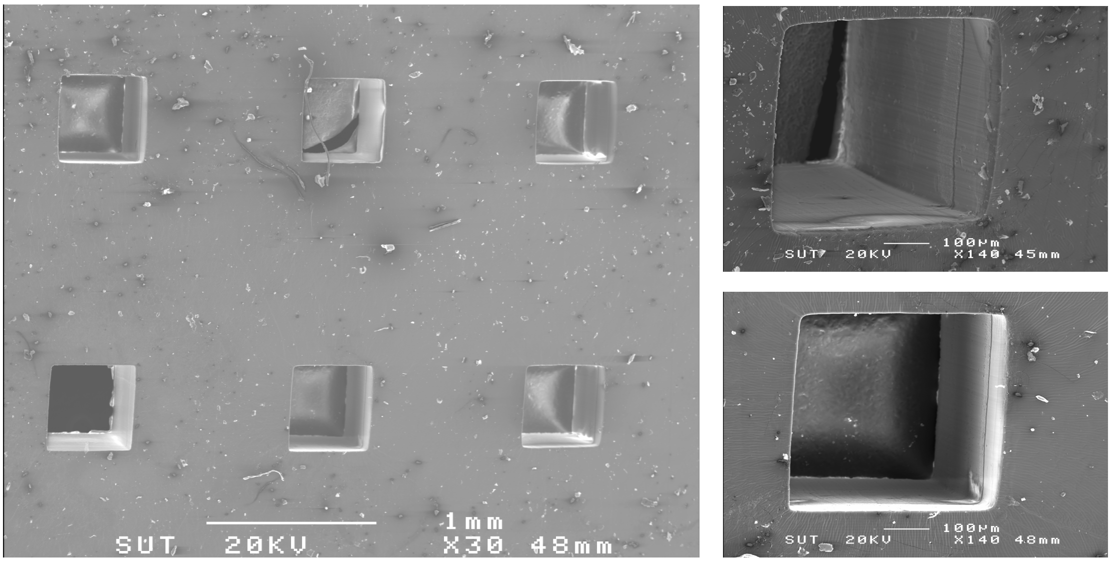
ในเตาอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้พอลิเมอร์ PDMS แข็งตัวจนกลายเป็นของแข็ง จากนั้นจึงทำการลอกพอลิเมอร์ PDMS ออกจากชิ้นงานต้นแบบ จะได้แม่พิมพ์โครงสร้างชิ้นงานอยู่ในรูปของพอลิเมอร์ PDMS ซึ่งสามารถนำไปเป็นแม่พิมพ์ในการสร้างชิ้นงานชิ้นต่อไปได้

สำหรับการทดสอบการผลิตซ้ำนั้นใช้ชิ้นงานนั้น ได้ทำการทดสอบการลอกแบบทั้งชิ้นงานจากชิ้นงานต้นแบบที่เป็นทั้งโครงสร้างของพอลิเมอร์ไวแสงและชิ้นงานที่เป็นโครงสร้างของโลหะนิกเกิล โดยใช้โครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 5.12 ซึ่งเป็นโครงสร้างในลักษณะแท่งขนาดความกว้าง 500x500 ไมโครเมตร ความสูงประมาณ 650 ไมโครเมตร และเป็นโครงสร้างหลายชิ้น โดยการสร้างแม่พิมพ์เพียงครั้งเดียวสามารถสร้างเป็นชิ้นงานได้หลายชิ้น



รูปที่ 5.12 โครงสร้างที่จะทำการทดสอบการถอดแบบด้วย PDMS

โดยที่เมื่อทำการถอดแบบเสร็จสิ้นจะได้แม่พิมพ์ที่เป็นพอลิเมอร์ PDMS ดังแสดงในรูป 5.13 ซึ่งในการลอกแบบเช่นนี้นั้น เป็นการสร้างแม่พิมพ์เพื่อที่จะนำไปผลิตชิ้นงานที่เป็นโครงสร้างโลหะด้วยกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยที่แม่พิมพ์ที่สร้างจากพอลิเมอร์ PDMS นั้น เมื่ออบจนแห้งแล้ว จะเป็นพอลิเมอร์ที่อยู่ในลักษณะของแข็งแต่มีความยืดหยุ่นสูงและสามารถลอกออกจากชิ้นงานต้นแบบได้โดยตรง ซึ่งในบางกรณีที่โครงสร้างมีความซับซ้อนมาก อาจต้องทาน้ำยาถอดแบบหรือน้ำมันมะกอกเคลือบผิวของชิ้นงานให้ทั่วก่อนที่จะเทพอลิเมอร์ PDMS ลงไป เพื่อช่วยให้ในขั้นตอนการลอกแม่พิมพ์ออกจากชิ้นงานต้นแบบทำได้ง่ายขึ้น และชิ้นงานไม่เกิดความเสียหายระหว่างการถอดแบบ



รูปที่ 5.13 แม่พิมพ์ที่สร้างจากพอลิเมอร์ PDMS

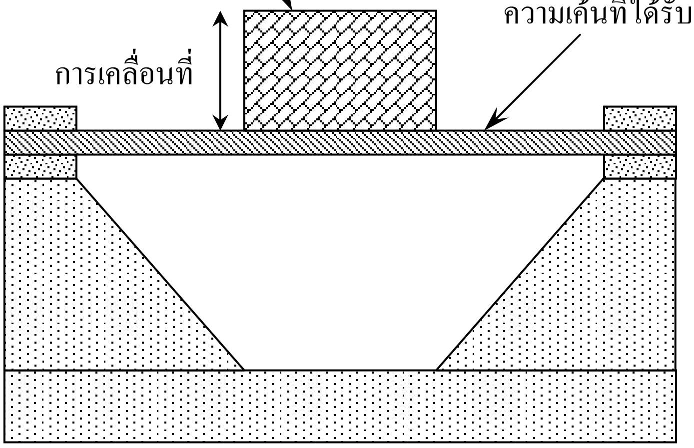
หลังจากที่ได้แม่พิมพ์ที่เป็นพอลิเมอร์ PDMS ข้างต้นแล้วนั้น ขั้นตอนต่อไปจะเป็นขั้นตอนในการนำแม่พิมพ์ที่ได้ไปติดลงบนฐานโลหะเรียบแล้วอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง เพื่อให้แม่พิมพ์ติดยึดแน่นกับฐานโลหะ ก่อนที่จะนำแม่พิมพ์ที่ติดอยู่บนฐานโลหะ ไปทำการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าลงในชิ้นงานแม่แบบเพื่อสร้างเป็นชิ้นงานจริง เมื่อติดลงบนชิ้นงานแล้ว ก่อนทำการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าลงไปในแม่พิมพ์ ต้องทำการเปิดรูด้านบนของลวดลายซึ่งมีส่วนของพอลิเมอร์ PDMS ปกคลุมอยู่ออก แล้วทำการจุ่มลงในสารละลายโลหะที่จะทำการชุบ จากนั้นจึงนำเข้าเครื่องดูดอากาศเพื่อทำการไล่อากาศที่อยู่ภายในซอกของโครงสร้างออกให้หมด ก่อนจะทำการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าลงไป ด้วยกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าดังที่ได้นำเสนอมาแล้วในหัวข้อ 5.2

บทที่ 6
การนำกระบวนการไปประยุกต์ใช้งาน

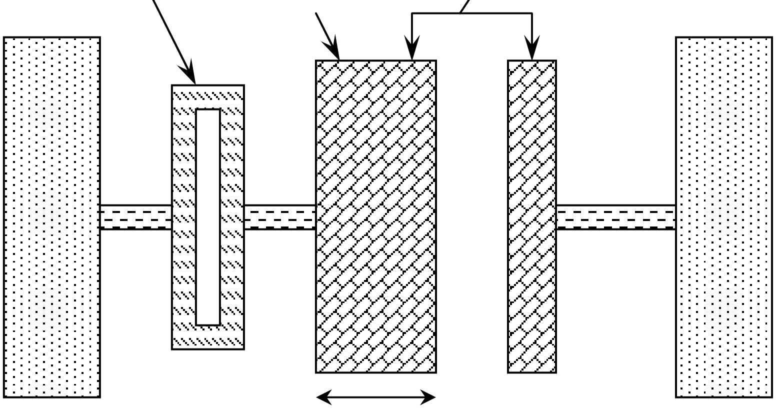
หลังจากที่ได้ทำการพัฒนากระบวนการสร้างอุปกรณ์จุลภาคจนสามารถสร้างอุปกรณ์จุลภาคในการทดสอบได้แล้วนั้น ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการทดลองใช้กระบวนการดังกล่าวเพื่อทำการทดสร้างสร้างอุปกรณ์จริง เพื่อจะเป็นการทดสอบให้มั่นใจว่ากระบวนที่ทำการพัฒนาขึ้นนั้นสามารถใช้งานในการสร้างอุปกรณ์จุลภาคได้ โดยในการทดสอบนั้นจะนำกระบวนการที่ทำการพัฒนาขึ้นดังกล่าวนั้นมาทดลองสร้างตัวตรวจรู้ความเร่ง เนื่องจากมีนักวิจัยในสายงานเดียวกันได้ทำการพัฒนาตัวตรวจรู้ความเร่งแบบจุลภาคขึ้น โดยใช้กระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเลต (UV Lithography) ในการสร้างตัวตรวจรู้ความเร่งดังกล่าว ดังนั้นจึงจะทำการสร้างตัวตรวจรู้ความเร่งด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray Lithography) เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ที่พัฒนาขึ้นกับกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเลต

6.1 ตัวตรวจรู้ความเร่ง

ระบบกลไฟฟ้าจุลภาคถูกนำมาพัฒนาเพื่อสร้างตัวตรวจรู้ (sensor) ชนิดต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย เช่น ตัวตรวจรู้อุณหภูมิ, ตัวตรวจรู้ความดัน, ตัวตรวจรู้ความเร่ง เป็นต้น ซึ่งตัวตรวจรู้แต่ละชนิดก็จะมีหลักการทำงานที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งในงานวิจัยนี้จะนำเสนอเฉพาะลักษณะและคุณสมบัติของตัวตรวจรู้ความเร่ง (micro accelerometer) โดยอาศัยหลักการการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของวัสดุเมื่อได้รับแรงมากระทำจากภายนอกจนเกิดความเค้นขึ้นในเนื้อวัสดุ และทำให้สัมประสิทธิ์ความต้านทานของวัสดุดังกล่าวเปลี่ยนแปลง หลักการทำงานของตัวตรวจรู้ความเร่งมีอยู่หลายชนิดแบ่งตามการทำงานได้ 2 ชนิดคือแบบเพียโซรีซิสทีฟ (Piezoresistive) ใช้หลักการในการใช้แรงกระทำจากภายนอกเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความเค้นในวัสดุ ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานภายในวัสดุเกิดการแปรเปลี่ยนไปตามความเค้นที่เกิดขึ้น ซึ่งแรงกระทำนั้นมาจากความเร่งนั่นเอง โดยลักษณะโดยทั่วไปของตัวตรวจรู้ความเร่งชนิดนี้แสดงได้ดังรูปที่ 6.1 (ก.) และแบบคาปาซิทีฟ (Capacitive) ใช้หลักการในการใช้ความเร่งซึ่งอยู่ในรูปแรงกระทำจากภายนอกเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความเก็บประจุของแผ่น dielectric ที่ประกบเข้าหากัน ทำให้ค่าความเก็บประจุแปรเปลี่ยนไปตามความเร่ง ลักษณะโดยทั่วไปของตัวตรวจรู้ความเร่งชนิดนี้แสดงได้ดังรูปที่ 6.1 (ข.)



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 6.1 ลักษณะโครงสร้างของตัวตรวจรู้ความเร่ง (ก.) ตัวตรวจรู้ความเร่งแบบเพียโซรีซิสทีฟ (ข.) ตัวตรวจรู้ความเร่งแบบคาปาซิทีฟ

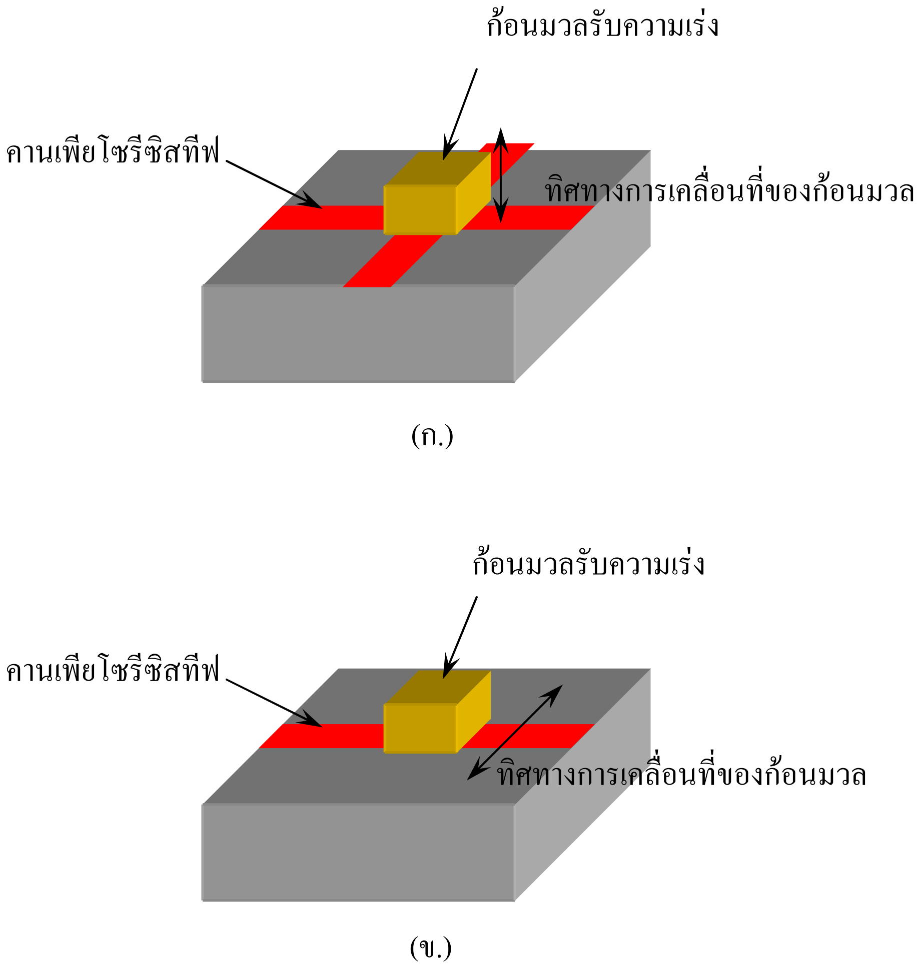
ในการสาธิตกระบวนการในงานวิจัยนี้ จะนำเทคโนโลยีการสร้างตัวตรวจรู้ความเร่งแบบเพียโซรีซิสทีฟ มาใช้ในการสาธิตกระบวนการ ซึ่งสำหรับตัวตัวรู้ความเร่งชนิดนี้นั้น ความไวในการตรวจรู้ความเร่งจะขึ้นอยู่กับมวลของก้อนมวลรับความเร่ง (proof mass) ที่วางอยู่บนคานซึ่ง

เป็นเพียโซรีซิสทีฟ และการสร้างตัวตรวจรู้ความเร่งนี้ใช้เทคโนโลยีการสร้างตัวตรวจรู้ความเร่งโดยใช้กระบวนการ PolyMUMPs (A three layer polysilicon surface micromachining multi user MEMS processes) ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าระดับจุลภาคซึ่งอนุญาตให้ผู้ใช้งานจากทั่วโลกส่งชิ้นงานของตนเองมารวมกันแล้วส่งไปสร้างในคราวเดียวกันโดยมีบริษัท MEMSCAP ประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นผู้สร้างซึ่งสามารถช่วยให้ผู้ใช้งานประหยัดในเรื่องค่าใช้จ่ายในการสร้างเนื่องจากเทคโนโลยีการสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้าระดับจุลภาคซึ่งรวมถึงตัวตรวจวัดความเร่งนั้นมีค่าใช้จ่ายในการสร้างที่ค่อนข้างสูงซึ่งห้องปฏิบัติการสำหรับนักศึกษาตามมหาวิทยาลัยทั่วไปหรือแม้กระทั่งบริษัทที่ผลิตชิพเกี่ยวกับทางด้าน MEMS ที่เพิ่งเริ่มก่อตั้งจะไม่มีเครื่องมือที่สามารถสร้างชิพที่มีประสิทธิภาพได้ แต่กระบวนการ PolyMUMPs ก็ยังมีข้อจำกัดอยู่บางประการนั่นคือกระบวนการสร้างจะจำกัดอยู่ที่การสร้างชั้นของโพลีซิลิคอนจำนวน 3 ชั้น ประกอบไปด้วยชั้นที่เรียกว่า โพลีซิลิคอน 1, โพลีซิลิคอน 2 และโพลีซิลิคอน 3 ซึ่งความสูงของแต่ละชั้นจะจำกัดอยู่ที่ 2 ไมโครเมตรเท่านั้นทำให้ตัวตรวจวัดความเร่งที่สร้างด้วยกระบวนการ PolyMUMPs หรือวิธีการที่ใช้ชั้นของโพลีซิลิคอนหรือใช้ซิลิคอนเป็นส่วนประกอบหลักของอุปกรณ์จึงมีความไวต่อการรับสัญญาณที่ค่อนข้างต่ำ ซึ่งในปี 1998 Sim jun-hwan และคณะได้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาในเรื่องความไวของตัวตรวจวัดความเร่งโดยการสร้างตัวตรวจวัดความเร่งด้วยการใช้ชั้นโพลีซิลิคอนและซิลิคอนที่มีรูพรุนในลักษณะคล้ายฟองน้ำ เป็นโครงสร้างของตัวตรวจรู้ความเร่ง และทำการเพิ่มความไวในการรับความเร่งของตัวตรวจรู้ความเร่งโดยการสร้าง ก้อนมวลรับความเร่งบนโครงสร้างเดิมของตัวตรวจวัดความเร่งด้วยสกรีนสารประกอบของ Pb/Sn/Ag (ตะกั่ว ดีบุกและเงิน) และทำการเพิ่มอุณหภูมิให้สารประกอบถึงจุดหลอมเหลวและหลอมรวมกันเป็นก้อนลักษณะครึ่งวงกลมกลายเป็น ก้อนมวลรับความเร่ง ทำให้ได้ตัวตรวจวัดความเร่งที่มีความไวสูงขึ้น แต่วิธีการนี้ก็ยังมีข้อจำกัดอยู่บางประการคือ ตัวตรวจวัดความเร่งที่สร้างจะมีย่านการทำงานอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ไม่สูงมากนักเนื่องจากหากนำไปใช้งานกับอุณหภูมิที่สูง ก้อนมวลรับความเร่ง ที่ประกอบไปด้วยสารประกอบของ Pb/Sn/Ag จะละลายเมื่อถึงจุดหลอมเหลวทำให้ตัวตรวจวัดความเร่งไม่สามารถทำงานได้และการจัดวางช่องสำหรับทำการสกรีนก้อนมวลรับความเร่งทำได้ยากและขนาดของก้อนมวลรับความเร่ง ที่สร้างมีขนาดจำกัดขึ้นอยู่กับพื้นที่เดิมของตัวตรวจรู้ความเร่งที่ทำสกรีนก้อนมวลรับความเร่งลงไป

6.2 กระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความเร่ง

ตัวตรวจรู้ความเร่งสำหรับการทดสอบ ใช้ตัวตรวจรู้ความเร่งแบบเพียโซรีซิสทีฟ โดยมีโครงสร้างเป็นสองลักษณะคือ โครงสร้างแบบวัดความเร่งในแนวตั้งฉากกับฐานรอง (vertically detection accelerometer) และโครงสร้างแบบวัดความเร่งในแนวขนานกับฐานรอง (horizontally

detection accelerometer) ลักษณะดังรูปที่ 6.2 โดยมีก้อนมวลรับความเร่ง สำหรับรับความเร่งวางอยู่บนคาน ซึ่งคานนั้นเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเพียโซรีซิสทีฟ



รูปที่ 6.2 โครงสร้างตัวตรวจรู้ความเร่ง (ก.) แบบวัดความเร่งในแนวตั้งฉากกับฐานรอง
(ข.) แบบวัดความเร่งในแนวขนานกับฐานรอง

ในการทดสอบสำหรับงานวิจัยนี้ใช้โครงสร้างตัวตรวจรู้ความเร่งแบบวัดความเร่งในแนวขนานกับฐานรอง สำหรับตัวชิพนั้นนายวิริยะ แผนสุวรรณ์ ได้ทำการออกแบบไว้แล้วในงานวิจัย “การออกแบบและสร้างตัวตรวจวัดความเร่งด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค” โดยกระบวนการสร้างฐานและส่วนคานรับน้ำหนักของตัวตรวจวัดความเร่งจะใช้วิธีการสร้างด้วยกระบวนการ PolyMUMPs ซึ่งกระบวนการสร้างแบบนี้ผู้สร้างจะต้องทำการออกแบบตัวชิ้นงานตามแบบที่ต้องการด้วยโปรแกรม L – edit ในการออกแบบจะต้องคำนึงถึงกฎการสร้างซึ่งทางผู้สร้างจะเป็นผู้ตั้งกฎการสร้างต่าง ๆ เช่นระยะห่างในแต่ละส่วนหรือขนาดของชิ้นงานเป็นต้น โดย

ในการออกแบบมีการกำหนดขนาดของพื้นที่ในส่วนประกอบต่าง ๆ บนชิพดังนี้

Bonding pad สำหรับใช้เป็นจุดต่อทางไฟฟ้าเพื่อใช้ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเพื่อสร้างก้อนมวลรับความเร่ง มีขนาด 323x957 ไมโครเมตร

Bonding pad สำหรับต่อสัญญาณไฟฟ้าจากคานเพียโซรีซิสทีฟ ออกสู่วงจรไฟฟ้าภายนอกชิพมีขนาด 323x957 ไมโครเมตร

พื้นที่สำหรับใช้ในการสร้างก้อนมวลด้วยการชุบโลหะด้วยไฟฟ้ามีขนาด 500x500 ไมโครเมตร

ตัวต้านทานเพียโซมี sheet resistance (เป็นคุณสมบัติของวัสดุที่จะมีค่าความต้านทานค่าหนึ่งเมื่อขนาดของวัสดุมีขนาดกว้าง ยาวเท่ากันเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส) ขนาด 30x30 ไมโครเมตรโดยใช้ชั้นโพลีซิลิคอน 1 เป็นตัวต้านทานคิดเป็นค่าความต้านทานได้เท่ากับ 240 โอห์ม คานสำหรับรองรับน้ำหนักก้อนมวล มีขนาดกว้างxยาวxสูงเท่ากับ 30x360x0.5 ไมโครเมตร

ในการออกแบบตัวตรวจวัดความเร่งโครงสร้างแบบวัดความเร่งในแนวขนานกับฐานรอง (horizontally detection accelerometer) มีข้อแตกต่างกับโครงสร้างแบบวัดความเร่งในแนวตั้งฉากกับฐานรองตรงที่โครงสร้างในแนวตั้งฉากจะใช้การเคลื่อนที่ของก้อนมวลในแนวตั้งฉากกับฐานรองเมื่อได้รับความเร่งซึ่งโครงสร้างแบบนี้จะมีความไวที่ดีกว่าแบบโครงสร้างในแนวขนานเนื่องจากลักษณะของคานรองรับก้อนมวลมีลักษณะแบนราบอยู่ในแนวเดียวกับฐานชิพและมีอัตราส่วนความกว้างมากกว่าความสูงอยู่มากและบนคานรับน้ำหนักจะมีตัวต้านทานเพียโซอยู่เมื่อคานเกิดการบิดตัวเนื่องจากก้อนมวลเคลื่อนที่คานจะสามารถบิดตัวในแนวตั้งฉากได้ดีกว่าแนวขนานกับฐานชิพทำให้ความต้านทานเกิดการเปลี่ยนแปลงมากกว่าเมื่อวัดความเร่งในแนวตั้งฉากกับฐานรองจึงทำให้มีความไวมากกว่าโครงสร้างแบบวัดความเร่งในแนวขนานกับฐานรอง แต่โครงสร้างแบบวัดความเร่งในแนวตั้งฉากกับฐานรองก็ยังมีข้อเสียอยู่บางประการเมื่อเทียบกับโครงสร้างแบบวัดความเร่งในแนวขนานกับฐานรองนั่นคือ การติดตั้งชิพบนอุปกรณ์จะทำได้ยากกว่าเนื่องจากทิศทางของความเร่งจะต้องเป็นไปในแนวตั้งฉากกับชิพเมื่อนำมาติดตั้งบนอุปกรณ์บางอย่างที่ต้องการวัดความเร่งในแนวระนาบเช่นบนรถยนต์จึงต้องติดชิพตั้งฉากกับตัวรถและแผงวงจรไฟฟ้าซึ่งอาจเป็นเรื่องที่ยุ่งยากกว่าการติดตั้งในแนวขนานกับตัวรถซึ่งสามารถติดตั้งชิพลงไปบนตัวรถและแผงวงจรไฟฟ้าได้เลยซึ่งเป็นการง่ายกว่า นอกจากนั้นกระบวนการสร้างในแบบวัดความเร่งในแนวตั้งฉากกับฐานรองจะมีความยุ่งยากกว่าแบบวัดความเร่งในแนวขนานกับฐานรองเนื่องจากต้องมีขั้นตอนการกัดฐานชิพที่เป็นซิลิคอนทำให้เสียเวลาในการสร้างมากกว่าและขั้นตอนซับซ้อนกว่าจึงได้ทำการสร้างชิพบนโครงสร้างทั้งสองแบบเพื่อเปรียบเทียบถึงข้อดีและข้อเสียซึ่งกันและกัน

เมื่อทำการออกแบบตามกฎการสร้างแล้วผู้ออกแบบจะส่งชิ้นงานไปสร้างซึ่งการสร้างชิพจะมีกระบวนการต่าง ๆ ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. กระบวนการเริ่มด้วยแผ่นซิลิคอนซึ่งจะถูกเคลือบด้วยซิลิคอนไนไตรด์หนา 600 nm

2. เคลือบด้วยโพลีซิลิคอน 0 (Poly0) และสารไวแสง (photoresist) ทำลวดลายโครง สร้างบนสารไวแสงและเปิดช่องทางการสกัดโพลีซิลิคอน 0

3. สกัดโพลีซิลิคอน 0 ด้วยวิธี Reactive ion etching (RIE) ภายหลังการสกัดสารไวแสงจะถูกนำออกไป

4. เคลือบออกไซด์ 1 (1st OXIDE) หนา 2 μm เพื่อใช้เป็นชั้นวัสดุชั่วคราว (sacrificial) ซึ่งจะสกัดทิ้งในภายหลัง

5. เคลือบสารไวแสงบนออกไซด์ 1 และเปิดช่องให้สกัดออกไซด์ออกเป็นช่องตื้น ๆ (dimple) ลึก 0.75 μm ภายหลังการสกัดสารไวแสงจะถูกนำออกไป ตัวตรวจรู้ความเร่งที่สร้างจะใช้ขั้นตอนนี้ในการสร้างหมุดรอง ก้อนมวลรับความเร่ง และคานใช้สำหรับรองรับน้ำหนักของ ก้อนมวลรับความเร่ง และคานเพื่อให้ลอยอยู่ได้เล็กน้อยเหนือพื้นด้านล่างของชิพ

6. เคลือบสารไวแสงอีกครั้งและเปิดช่องเพื่อสร้างหลักยึด 1 (Anchor 1)

7. เคลือบโพลีซิลิคอน 1 (Poly1) หนา 2 μm

8. เคลือบสารไวแสงและเปิดช่องเพื่อสกัดโพลีซิลิคอน 1 เพื่อสร้างเป็นจุดเชื่อมต่อทางไฟฟ้าใช้ในการ electroplate ก้อนมวลลงไปบนแท่นรองรับซึ่งจะเชื่อมต่อบริเวณ bonding pad กับแท่นรองเข้าด้วยกัน และส่วนนี้จะใช้เป็นส่วนที่สร้างตัวต้านทานเพียโซเพื่อใช้ในการจับความเปลี่ยนแปลงความเค้นที่เกิดขึ้นบนคานรับน้ำหนักและใช้เป็นตัวต้านทานคงที่เพื่อสร้างเป็นวงจรวีดสโตนบริดจ์ด้วย ภายหลังการสกัดสารไวแสงจะถูกนำออกไป

9. เคลือบออกไซด์ 2 (2nd OXIDE) หนา 0.75 μm

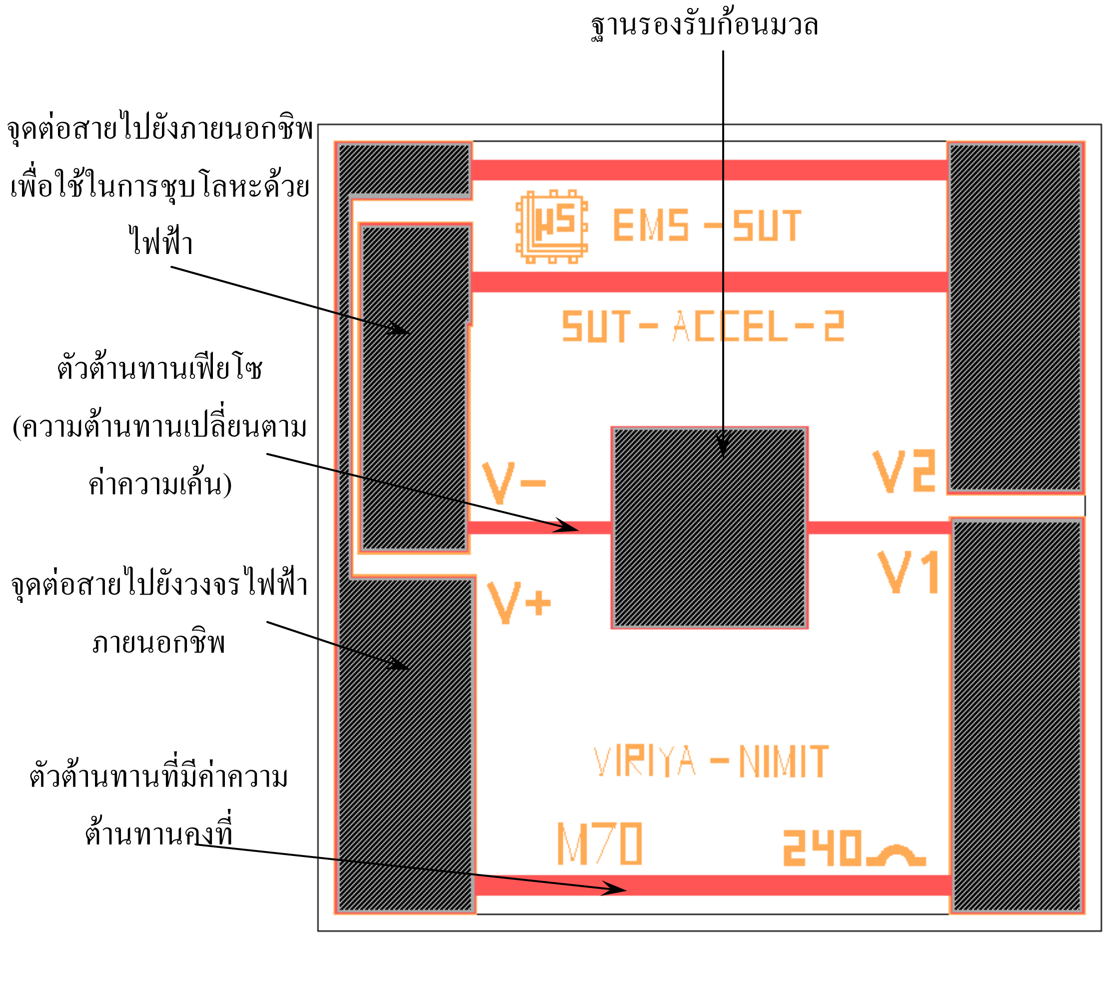
10. เคลือบสารไวแสงและเปิดช่องเพื่อสกัดออกไซด์ 2 (P1_P2_Via) เพื่อใช้เป็นจุดเชื่อมต่อทางไฟฟ้าระหว่างชั้นโพลีซิลิคอน 1 กับชั้นโพลีซิลิคอน 2 ซึ่งจะเปิดช่องบริเวณ bonding pad และขาของตัวต้านทานแต่ละตัว

11. เคลือบโพลีซิลิคอน 2 (Poly2) หนา 1.5 μm

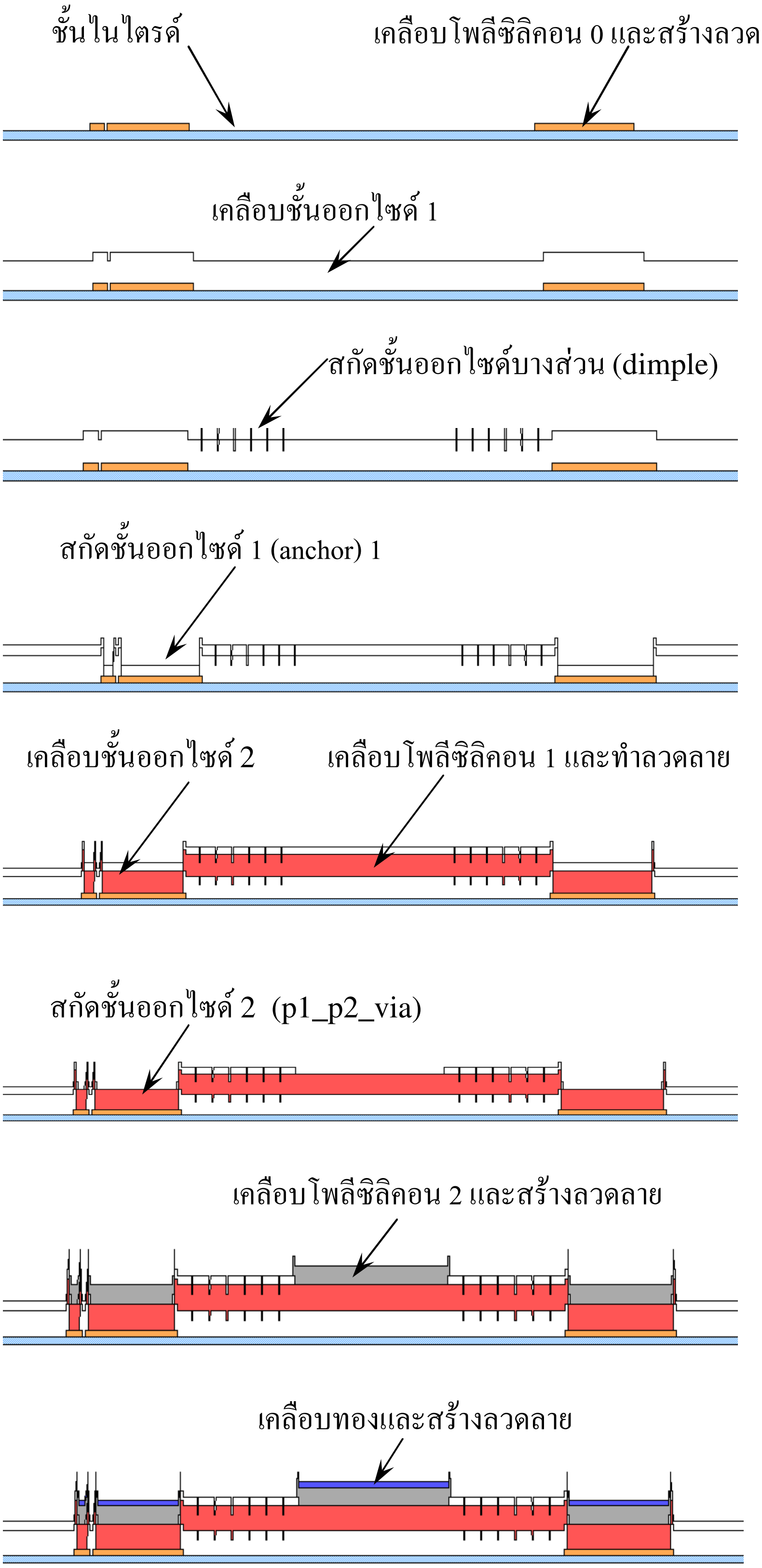
12. เคลือบสารไวแสงและเปิดช่องเพื่อสกัดโพลีซิลิคอน 2 เพื่อสร้างจุดเชื่อมต่อบริเวณ bonding pad สำหรับใช้ในการ electroplate ก้อนมวลรับความเร่ง ภายหลังการสกัดสารไวแสงจะถูกนำออกไป

13. เคลือบสารไวแสงและเปิดช่องเพื่อเคลือบทองลงที่จุดต่อทางไฟฟ้า ภายหลังการสกัดสารไวแสงจะถูกนำออกไป และเคลือบสารไวแสงอีกครั้งเพื่อป้องกันผิวหน้าของอุปกรณ์และตัดแยกชิ้นส่วนส่งกลับมา

รายละเอียดของโครงสร้างตัวตรวจวัดความเร่งที่สร้างด้วยกระบวนการ PolyMUMPsแสดงดังรูปที่ 6.3 ซึ่งแสดงถึงส่วนประกอบที่สำคัญของตัวตรวจรู้ความเร่ง ซึ่งประกอบด้วยฐานรองรับก้อนมวลอยู่บริเวณกึ่งกลางของตัวชิพ ซึ่งมีขนาดความกว้างและความยาวเท่ากันโดยมีขนาด 500x500 ไมโครเมตร ซึ่งก้อนมวลดังกล่าวจะใช้กระบวนการสร้างชิ้นส่วนจุลภาคเพื่อสร้างก้อนมวลลงไปวางยังฐานรองรับก้อนมวลดังกล่าว โดยจะอาศัยกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเพื่อให้โลหะก่อตัวบนฐานรองรับก้อนมวล ดังจึงต้องมีจุดต่อไฟฟ้าสำหรับกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าซึ่งอยู่บริเวณขอบทั้งสองข้างของตัวชิพ ซึ่งทำหน้าที่เป็นจุดต่อสายไปยังวงจรภายนอกชิพ และจุดต่อสายสำหรับการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า และส่วนประกอบของตัวชิพที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งคือตัวต้านทานโดยจะมีตัวต้านทานวางต่อวงจรกันแบบวงจรบริดจ์ ซึ่งจะมีตัวต้านทานแบบความต้านทานคงที่และตัวต้านทานที่ค่าความต้านทานเปลี่ยนตามความเค้น ขั้นตอนการสร้างและภาคตัดขวางของลำดับขั้นกระบวนการสร้างตัวชิพ แสดงได้ดังรูปที่ 6.4 ซึ่งจะเห็นว่าชั้นไนไตรด์จะถูกสกัดออกไปเรื่อย ๆ จากขั้นตอนที่ 5, 6, 10 จนทำให้เกิดช่องลึกลงไปในชั้นไนไตรด์ลงไปถึงชั้นซิลิคอน

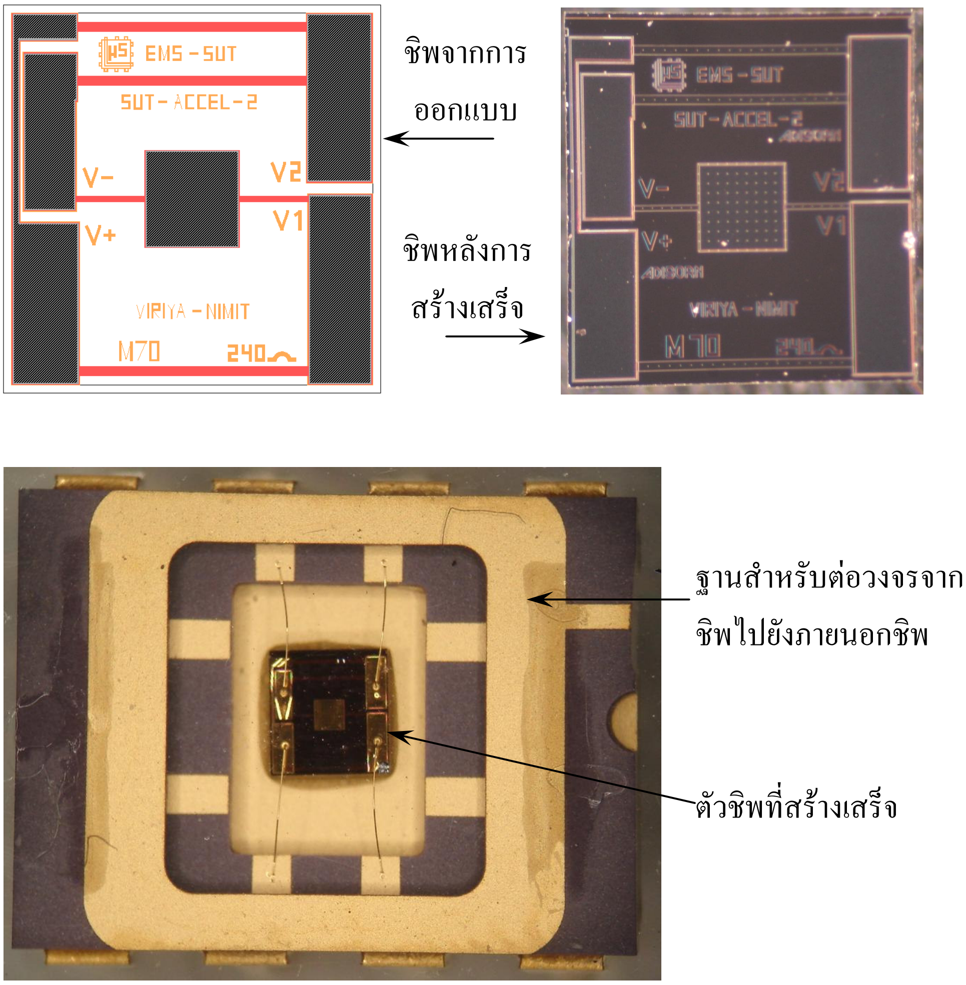


รูปที่ 6.3 โครงสร้างตัวตรวจรู้ความเร่งแบบวัดความเร่งในแนวตั้งฉากกับฐานรอง



รูปที่ 6.4 ภาคตัดขวางของลำดับขั้นกระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความเร่งด้วยกระบวนการ PolyMUMPs โดยใช้โปรแกรม L-edit ในการออกแบบ

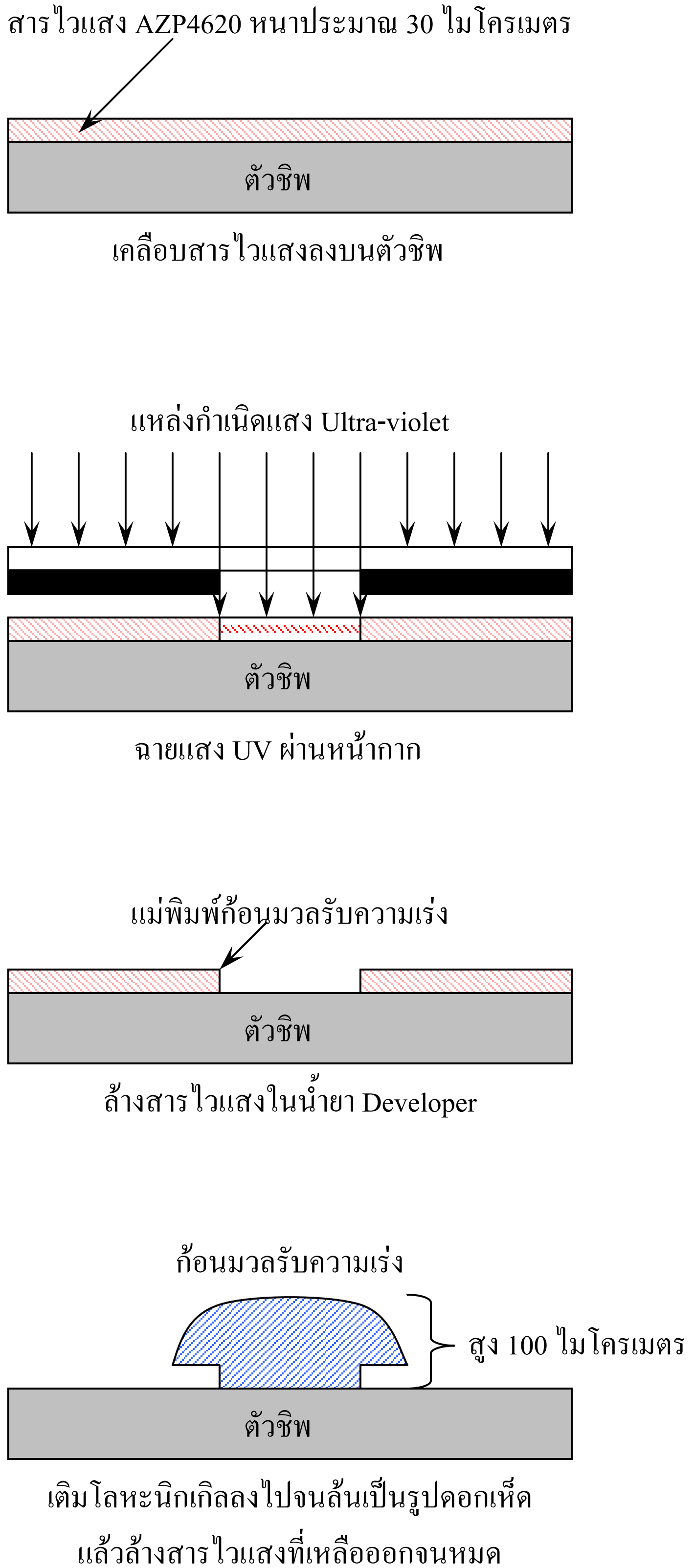
เมื่อส่งตัวชิพที่ทำการออกแบบไปสร้างเป็นตัวชิพจริง จะได้ตัวชิพดังรูปที่ 6.5 โดยบริเวณที่รองรับ ก้อนมวลรับความเร่ง มีขนาด 500x500 ไมโครเมตร



รูปที่ 6.5 ตัวตรวจรู้ความเร่งหลังจากส่งสร้างด้วยกระบวนการ PolyMUMPs

6.3 การสร้างก้อนมวล (proof mass) ลงบนตัวชิพ

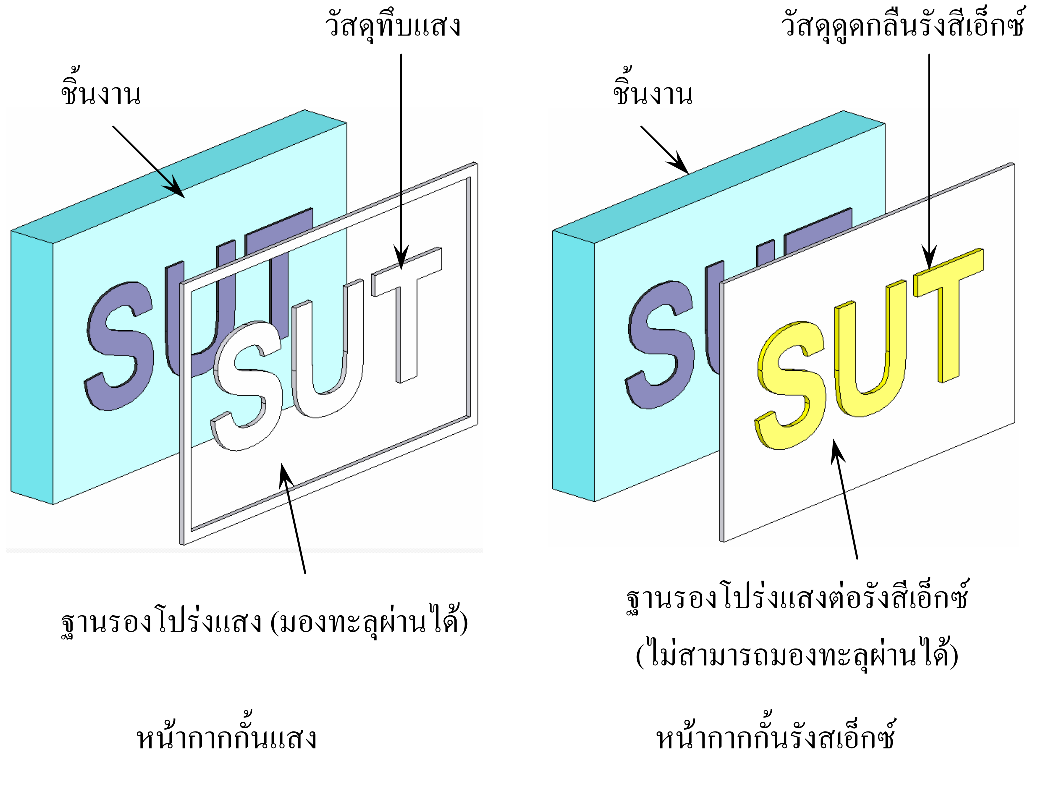
ในการสร้างก้อนมวลรับความเร่ง ลงไปบนบริเวณที่เตรียมไว้บนตัวชิพนั้น จะใช้กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าในการเติมโลหะซึ่งจะทำหน้าที่เป็นก้อนมวลรับความเร่ง และแม่พิมพ์สำหรับก้อนมวลรับความเร่งนั้น จะสร้างจากกระบวนการลิโธกราฟฟี โดยนายวิริยะ แผนสุวรรณ์ได้เสนอการใช้กระบวนลิโธกราฟฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต คู่กับสารไวแสง AZP4620 ซึ่งเป็นสารไวแสงชนิดบวก ในขั้นตอนการสร้างแม่พิมพ์บนตัวชิพ โดยขั้นตอนดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 6.6 โดยในกระบวนการสร้างแม่พิมพ์นั้นจะสร้างลงบนตัวชิพโดยตรง (ใช้ตัวชิพเป็นฐานรองชิ้นงาน) ซึ่งสารไวแสงที่ใช้จะมีลักษณะสีแดงใส จึงสามารถมองเห็นลวดลายด้านล่างได้



รูปที่ 6.6 ขั้นตอนการสร้างก้อนมวลรับความเร่งลงบนชิพด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟี ด้วยแสงอัลตราไวโอเลต คู่กับสารไวแสงชนิดบวก AZP4620

การใช้กระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเลตในการสร้างก้อนมวลรับความเร่งนั้น ความสูงจะถูกจำกัดอยู่ที่ประมาณไม่เกิน 50 ไมโครเมตร ซึ่งจากกระบวนการสร้างที่นำเสนอมานั้น สามารถสร้างแม่พิมพ์ของก้อนมวลได้เพียง 30 ไมโครเมตร แต่เนื่องจากด้วยความสูงดังกล่าว ทำให้ความไวของตัวตรวจรู้ความเร่งไม่มากพอ จึงต้องทำการชุบโลหะให้ล้นจากแม่พิมพ์ ซึ่งเมื่อโลหะล้นออกไปนั้นจะไม่สามารถควบคุมรูปแบบการเกิดของโลหะได้ ทำให้โลหะเกิดขึ้นทุกทิศทางจึงกลายเป็นรูปดอกเห็ดดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.6

ในงานวิจัยนี้จะทำการสร้างก้อนมวล ก้อนมวลรับความเร่ง ด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ที่ได้พัฒนาขึ้น ซึ่งจะทำให้สามารถสร้าง ก้อนมวลรับความเร่ง ได้สูงมากกว่า 500 ไมโครเมตร เพื่อเพิ่มความไวในการรับรู้ความเร่งเนื่องจากมวลของ ก้อนมวลรับความเร่ง มากขึ้น (Sim, et al., 1998) แต่ลักษณะคุณสมบัติของหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์จะแตกต่างจากหน้ากากกั้นแสงดังรูปที่ 6.7

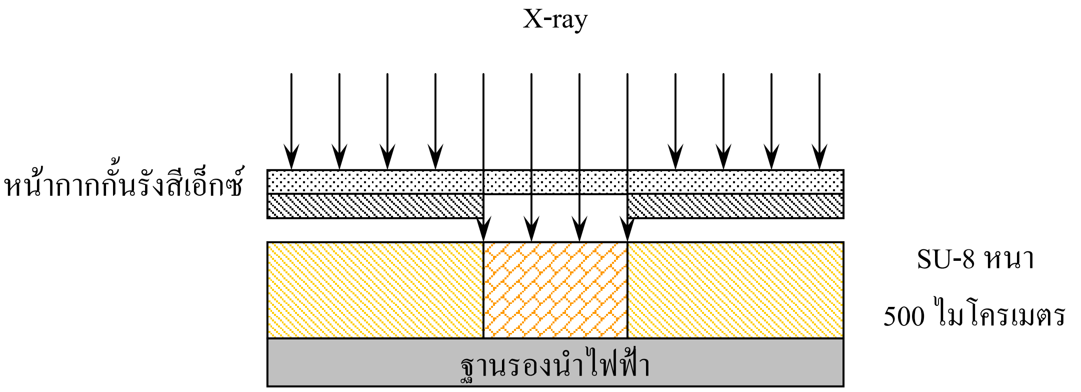


รูปที่ 6.7 ลักษณะของหน้ากากเมื่อทับบนชิ้นงาน

เมื่อสังเกตจากรูปที่ 6.7 จะเห็นว่า ในกรณีใช้แสงอัลตราไวโอเลตในกระบวนการนั้น เมื่อวางหน้ากากกั้นแสงลงบนชิ้นงานจะสามารถมองเห็นชิ้นงานด้านล่างได้ ทำให้สามารถวางหน้ากากให้อยู่บริเวณที่ต้องการได้ง่าย แต่กรณีของหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์นั้น จะทึบแสงเมื่อวางหน้ากากทับ

ชิ้นงานจะไม่สามารถมองทะลุไปเห็นชิ้นงานด้านล่างได้ ทำให้ไม่สามารถวางหน้ากากให้ทับบริเวณที่ต้องการ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะสร้างก้อนมวลบนตัวชิพด้วยวิธีการถอดแบบก้อนมวลด้วยพอลิเมอร์ PDMS ซึ่งจะสร้างก้อนมวลลงบนฐานรองที่ไม่ตัวชิพก่อนจะทำการถอกแบบก้อนมวลมาวางบนตัวชิพภายหลัง ซึ่งกระบวนการดังกล่าวมีข้อดีหลายประการคือ (1) สามารถวางชิ้นงานได้ตรงบริเวณที่ต้องการ (2) สามารถสร้างก้อนมวลลงบนชิ้นงานหลายชิ้นได้โดยไม่ต้องใช้กระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ซ้ำ เนื่องจากกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์นั้นใช้เวลานาน และค่าใช้จ่ายในกระบวนการสูง จึงทำให้ลดเวลาและค่าใช้จ่ายลงได้ (3) สามารถสร้างแม่พิมพ์เพิ่มได้เรื่อย ๆ โดยใช้ชิ้นงานต้นแบบเดิม

ในกระบวนการสร้างก้อนมวลนั้น จะใช้กระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์คู่กับสารไวแสง SU-8 ซึ่งเป็นสารไวแสงชนิดลบโดยมีกระบวนการสร้างดังรูปที่ 6.8

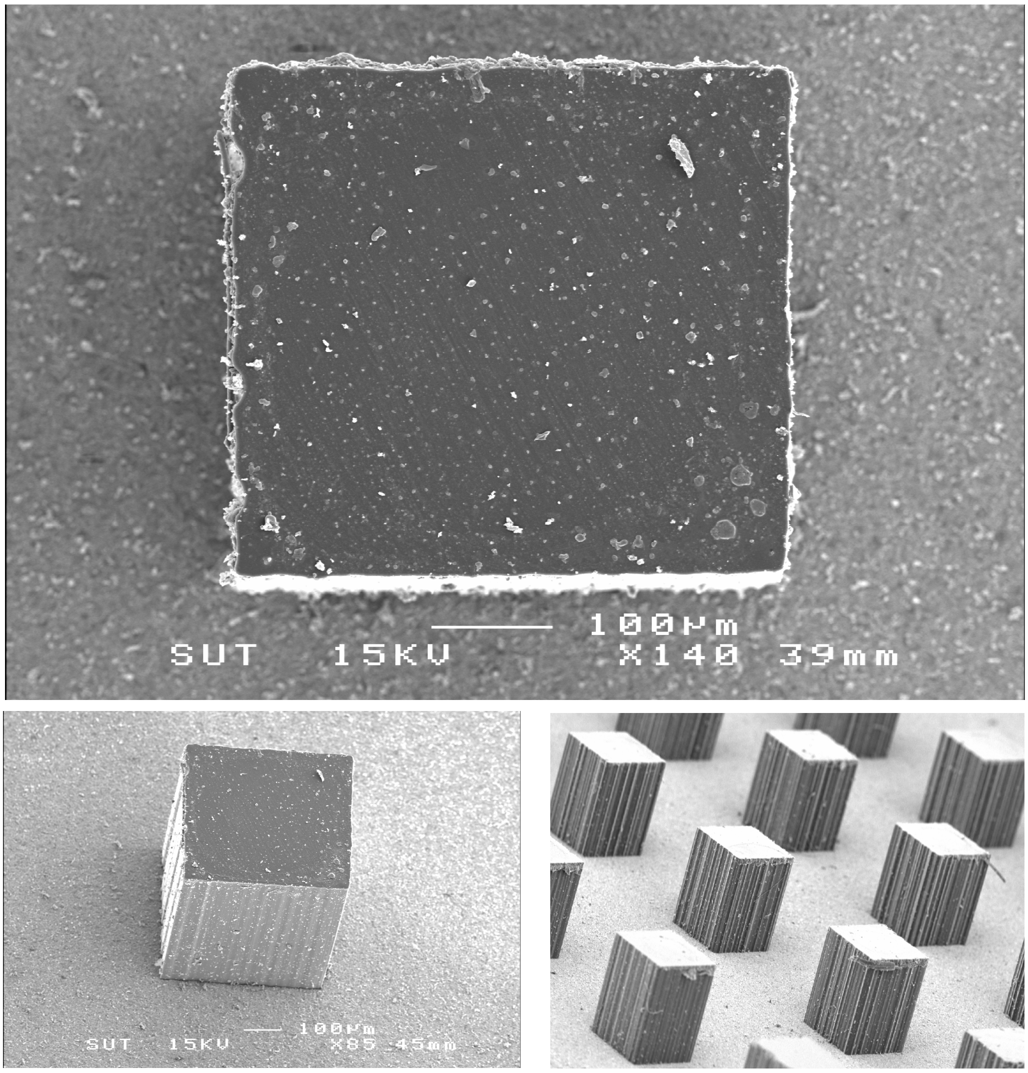


ฉายรังสีเอ็กซ์ผ่านหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์

ล้างสารไวแสงด้วยน้ำยา Developer

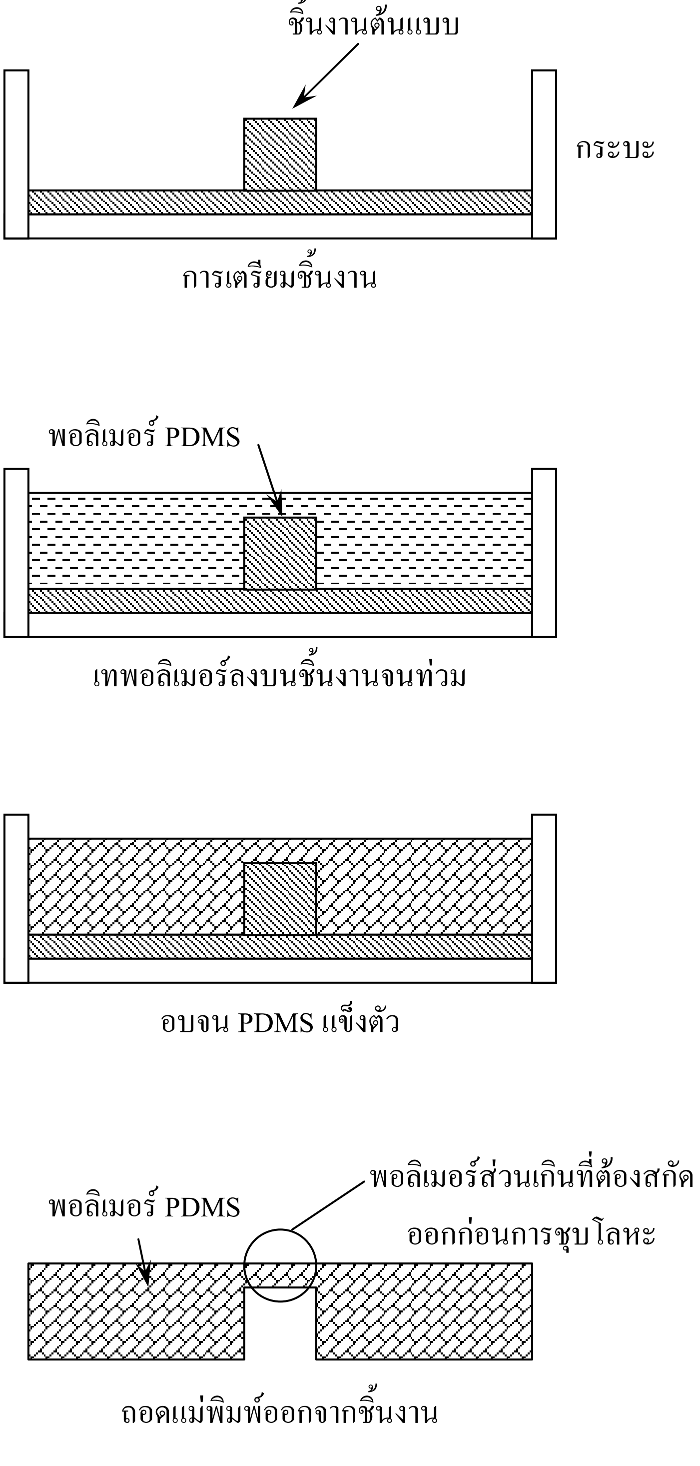
รูปที่ 6.8 กระบวนการสร้างก้อนมวลรับความเร่ง ด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์

เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการในรูปที่ 6.8 จะได้ก้อนมวลอยู่ในรูปสารไวแสง SU-8 ที่แข็งตัวอยู่บนฐานรอง ความสูงของก้อนมวลประมาณ 500 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 6.9



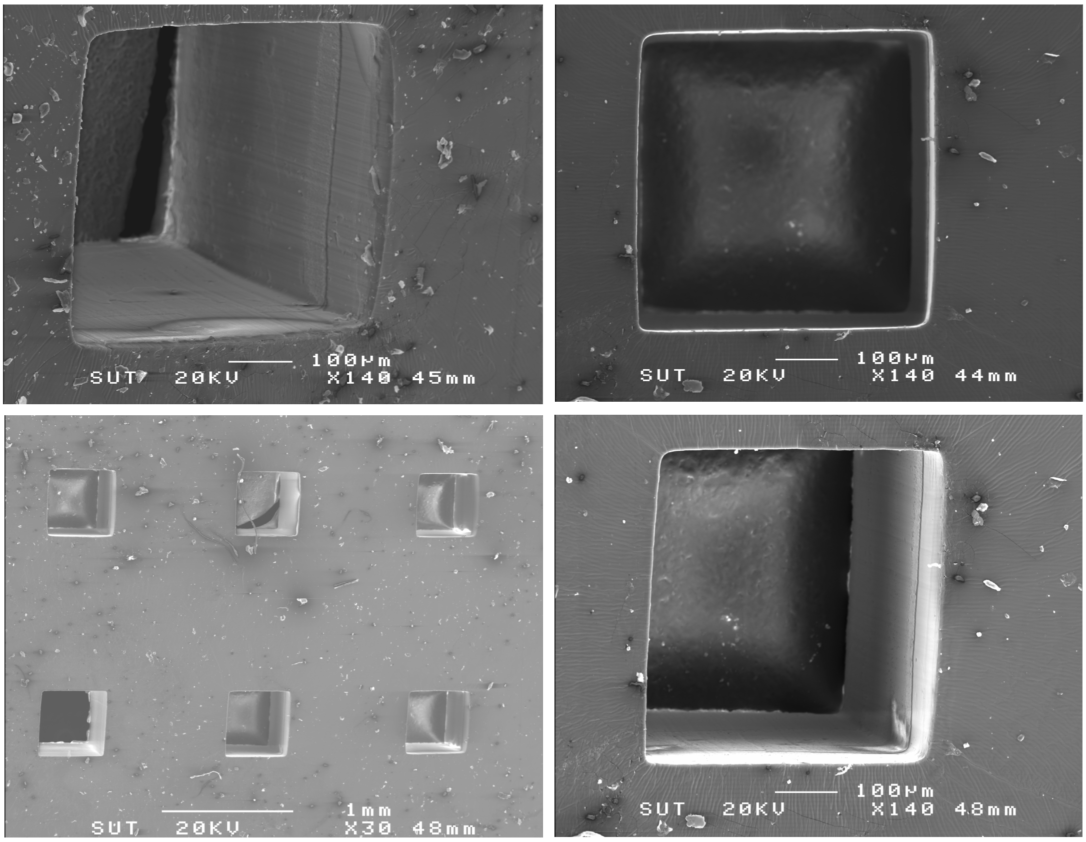
รูปที่ 6.9 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของก้อนมวล SU-8 ต้นแบบ

จากนั้นขั้นตอนต่อไปจะเป็นการถอดแบบก้อนมวลดังกล่าวเพื่อที่จะนำไปสร้างเป็นก้อนมวลรับความเร่งบนฐานรองรับก้อนมวลบนตัวชิพ โดยในการถอดแบบนั้นใช้พอลิเมอร์ PDMS ในการหล่อเพื่อสร้างเป็นแม่พิมพ์โดยการสร้างกระบะล้อมชิ้นงานจนทั่วเพื่อกำหนดขอบเขตของแม่พิมพ์ก่อนที่จะเทพอลิเมอร์ PDMS เหลวลงบนชิ้นงานจนกระทั่งท่วมจนทั่วชิ้นงาน จากนั้นจึงทำการอบจนพอลิเมอร์ PDMS แข็งตัวอยู่ในลักษณะของแข็งที่มีความยืดหยุ่นตามลักษณะของพอลิเมอร์ PDMS ก่อนทำการลอก PDMS ออกจากชิ้นงานต้นแบบ เพื่อนำไปใช้เป็นแม่พิมพ์ในการสร้างก้อนมวลบนตัวชิพต่อไป โดยการสร้างแม่พิมพ์ด้วย PDMS มีลำดับขั้นตอนดังรูปที่ 6.10 ซึ่งในกระบวนสร้างนั้นไม่จำเป็นต้องอยู่ภายในห้องทึบแสง และสามารถสร้างแม่พิมพ์ได้หลายตัวโดยใช้ชิ้นงานต้นแบบเพียงตัวเดียว



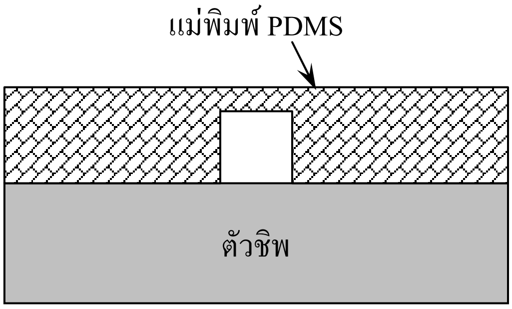
รูปที่ 6.10 กระบวนการสร้างแม่พิมพ์โดยการถอดแบบชิ้นงานด้วยพอลิเมอร์ PDMS

โดยที่เมื่อทำการถอดแบบเสร็จสิ้นจะได้แม่พิมพ์ที่เป็นพอลิเมอร์ PDMS ดังแสดงในรูป 6.11 โดยแม่พิมพ์ PDMS ที่สร้างขึ้นจะนำไปวางบนตัวชิพ ซึ่งสามารถกำหนดบริเวณที่ต้องการได้ก่อนที่จะทำการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าลงไปในหลุมของแม่พิมพ์

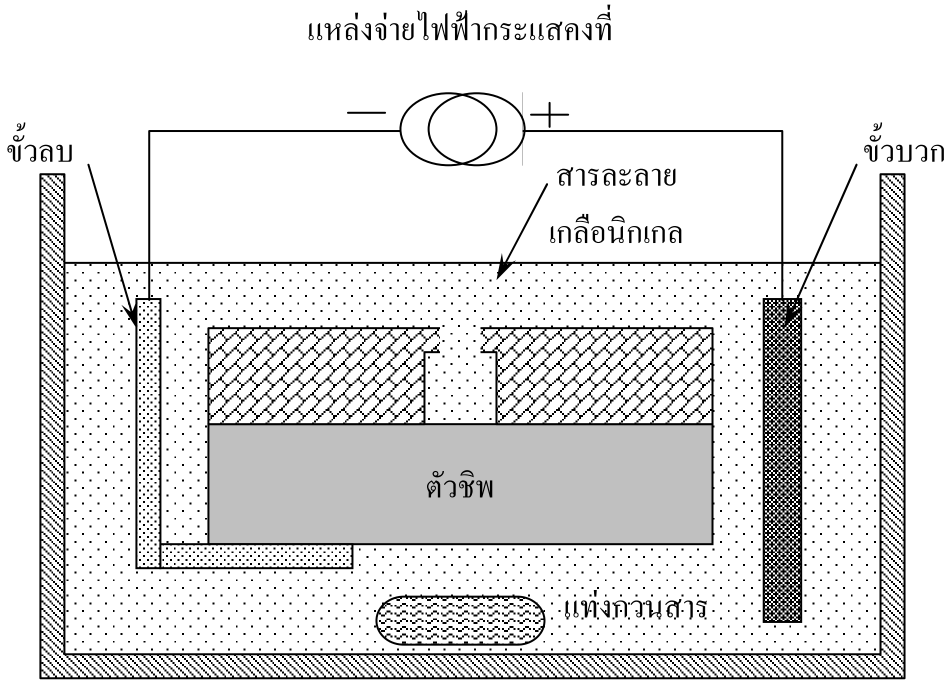


รูปที่ 6.11 แม่พิมพ์ของก้อนมวลที่สร้างจากพอลิเมอร์ PDMS

หลังจากที่ได้แม่พิมพ์ที่เป็นพอลิเมอร์ PDMS ข้างต้นแล้วนั้น ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการนำแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้นมาติดลงบนตัวชิพเพื่อที่จะทำการชุบนิกเกิลลงไปในแม่พิมพ์เพื่อสร้างก้อนมวล โดยกระบวนการสร้างก้อนมวลลงบนตัวชิพนั้น แสดงได้ดังรูปที่ 6.12 ซึ่งในการติดแม่พิมพ์ลงบนตัวชิพนั้น จะติดลงบนตัวชิพโดยตรงโดยไม่ต้องทำการทากาวหรือวัสดุสำหรับยึดติดระหว่างตัวชิพกับแม่พิมพ์ ซึ่งในการติดนั้นจำเป็นต้องรักษาความสะอาดของผิวแม่พิมพ์ ไม่ให้เกิดคราบหรือมีฝุ่นมาเกาะ เนื่องจากหากเกิดความสกปรกขึ้นแล้ว การยึดติดระหว่างแม่พิมพ์พอลิเมอร์ PDMS กับตัวชิพนั้น อาจไม่ดีเท่าที่ควร และอาจทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายระหว่างการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเพื่อสร้างก้อนมวลขึ้นได้ เมื่อทำการติดแม่พิมพ์ลงบนตัวชิพและสร้างก้อนมวลลงบนตัวชิพเรียบร้อยแล้ว จึงทำการกำจัดแม่พิมพ์ทิ้ง โดยการลอกออกหรือใช้มีดปลายแหลมตัดแม่พิมพ์ออกจากตัวชิพจากนั้น จะได้ตัวตรวจรู้ความเร่งที่มีก้อนมวลสำหรับรับความเร่งเป็นโลหะนิกเกิลความสูงประมาณ 500 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 6.13 ซึ่งหากต้องความสูงเพิ่มขึ้นหรือลดลงกว่าก็สามารถทำได้โดยการกำหนดเวลาและอัตราการเกิดของโลหะ ในกระบวนการสร้างด้วยวิธีนี้นั้น ยังสามารถสร้างก้อนมวลลงบนชิ้นงานได้พร้อมกันทีละหลายตัวอีกด้วย



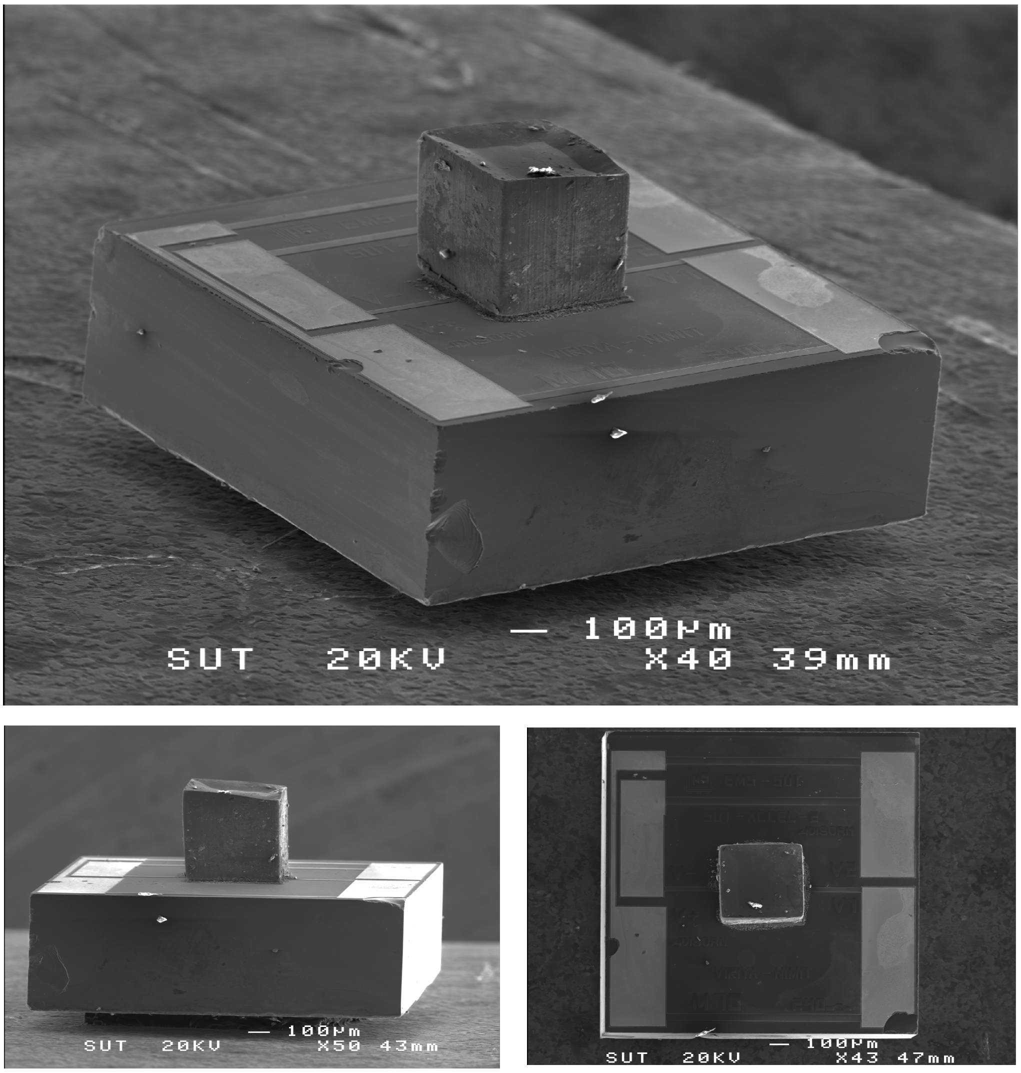
ติดแม่พิมพ์ลงบนตัวชิพ



เปิดช่องบนแม่พิมพ์และทำการชุบนิกเกิลลงไปในแม่พิมพ์

ลอกแม่พิมพ์ PDMS ทิ้ง

รูปที่ 6.12 ขั้นตอนการสร้างก้อนมวลลงบนชิพด้วยแม่พิมพ์ PDMS



รูปที่ 6.13 ตัวตรวจรู้ความเร่งที่มีก้อนมวลรับความเร่ง ที่สร้างจากกระบวนการการถอดแบบด้วยแม่พิมพ์ PDMS สูงประมาณ 500 ไมโครเมตร

จะเห็นว่ากระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์และการถอดแบบชิ้นงานด้วยพอลิเมอร์ PDMS มีประสิทธิภาพในการสร้างอุปกรณ์จุลภาค สามารถสร้างชิ้นงานที่มีความสูงมากกว่า 500 ไมโครเมตรได้ และมีประสิทธิภาพในการสร้างชิ้นงานคราวละหลาย ๆ ตัวได้

บทที่ 7
สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการพัฒนากระบวนการสร้างอุปกรณ์จุลภาค เนื่องจากอุปกรณ์จุลภาคเป็นอุปกรณ์ที่นำมาใช้อย่างแพร่หลาย กระบวนการสำหรับการสร้างอุปกรณ์จุลภาคก็มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนากระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ ซึ่งเป็นการพัฒนากระบวนการขั้นพื้นฐานภายในศูนย์วิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ ให้สามารถใช้เป็นกระบวนการพื้นฐานภายในศูนย์วิจัยได้ ซึ่งในการพัฒนานั้นได้เริ่มจากการพัฒนาระบบสแกนชิ้นงานเพื่อฉายรังสีเอ็กซ์ลงบนชิ้นงาน ประกอบกับการพัฒนากระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ โดยใช้สารไวแสง SU-8 ซึ่งเป็นสารไวแสงชนิดลบ เป็นสารไวแสงมาตรฐานในกระบวนที่ทำการพัฒนาขึ้น เป็นสารไวแสงมาตรฐานสำหรับกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ภายในศูนย์วิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ

ในกระบวนการพัฒนานั้นได้พัฒนากระบวนการจนสิ้นสุดกระบวนการ X-ray LIGA ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า และกระบวนการสร้างชิ้นงานด้วยการสร้างจากการถอดแบบจากมีพิมพ์จุลภาค โดยในกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์นั้น ได้ทำการพัฒนากระบวนการสำหรับการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ (X-ray mask) โดยการนำเงินมาใช้เป็นวัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์แทนที่ทองคำ ซึ่งเป็นกระบวนสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์แบบใหม่ สามารถลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ลงได้อย่างมากเมื่อเทียบกับการใช้ทองคำ เมื่อใช้หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ที่สร้างขึ้นร่วมกับสารไวแสง SU-8 ความหนา 500 ไมโครเมตร ได้ผลว่าต้องใช้โลหะเงินในการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ด้วยความหนา 13 ไมโครเมตรขึ้นไป และหากใช้ทองคำต้องใช้ความหนาอย่างน้อย 7 ไมโครเมตร ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบราคาแล้วปรากฏว่าในการสร้างลวดลายขนาดเท่ากันนั้น การใช้โลหะเงินสามารถลดค่าใช้จ่ายลงได้ถึง 40 เท่า และสร้างบนฐานรองที่เป็นแผ่นกราไฟต์บาง ซึ่งมีคุณสมบัติโปร่งแสงต่อรังสีเอ็กซ์สูง นอกจากนี้ยังได้พัฒนาระบบขับเคลื่อนชิ้นงานในระบบฉายแสงภายในห้องฉายแสงจนสามารถใช้งานในกระบวนลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ได้ จากผลการทดลองสร้างชิ้นงานจริงโดยใช้เงินเป็นวัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์นั้น ได้อุปกรณ์จุลภาคออกมาในลักษณะของอุปกรณ์ที่โครงสร้างลวดลายที่ดี ไม่มีการผิดเพี้ยนของลวดลายที่ได้ทำการออกแบบ ซึ่งถือได้ว่าเงินเป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพในการที่จะนำมาสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์

ทั้งนี้ได้ทำการสาธิตกระบวนการที่ได้พัฒนาขึ้น ณ ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ โดยการทดลองสร้างก้อนมวลรับความเร่ง (proof mass) บนตัวตรวจรู้ความเร่งแบบเพียโซรีซิสทีฟ (Piezoresistive) ซึ่งตัวตรวจรู้ความเร่งชนิดดังกล่าวนั้นความไวในการรับรู้ความเร่งจะขึ้นกับมวลของก้อนมวลรับความเร่งที่อยู่บนคานของตัวชิพ โดยสามารถสร้างก้อนมวลรับความเร่ง ลงบนตัวชิพให้มีความสูงมากเกิน 500 ไมโครเมตรได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการที่ทำการพัฒนาขึ้นนั้นมีประสิทธิภาพสูงในการสร้างอุปกรณ์จุลภาคชนิดต่าง ๆ และเป็นกระบวนการพื้นฐานให้กับนักวิจัยรุ่นต่อไปที่จะมาทำการพัฒนากระบวนการต่อ หรือแม้แต่นำกระบวนการดังกล่าวไปใช้สำหรับการพัฒนาอุปกรณ์จุลภาคชนิดต่าง ๆ ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เช่นการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นจุลภาค, การสร้างมอร์เตอร์ไฟฟ้าจุลภาค เป็นต้น เพื่อเป็นประโยชน์ในอนาคตได้

7.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมา ผลที่ได้จากกระบวนการและปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทำวิจัย ทำให้เกิดแนวคิดและข้อเสนอแนะในการดำเนินงานวิจัยในอนาคต สำหรับส่วนการแสกนชิ้นงานนั้น จากการดำเนินการวิจัยประสบปัญหาคือ ความเร็วในการแสกนชิ้นงานของเครื่องสแกนเนอร์นั้นมีค่าน้อยมาก ทำให้การควบคุมค่าพลังงานรวมบนชิ้นงานทำได้ในลักษณะเป็นขั้นบันได ซึ่งมีความละเอียดน้อย ดังนั้นระบบจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้สูงขึ้นได้ โดยการปรับปรุงระบบแสกนชิ้นงาน ให้สามารถแสกนชิ้นงานในอัตราความเร็วที่สูงขึ้น เพื่อให้สามารถควบคุมพลังงานรวมบนชิ้นงานได้ละเอียดยิ่งขึ้น

ฐานรองของหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์นั้น เป็นวัสดุที่โปร่งแสงต่อรังสีเอ็กซ์แต่ทึบแสงปกติ ทำให้ไม่สามารถทำการวางลวดลายบนหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ลงให้ทับกับลวดลายบนชิ้นงานได้ เนื่องจากไม่สามารถมองทะลุผ่านหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ลงไปจนถึงชิ้นงานได้ ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้ดียิ่งขึ้น ควรทำการหาวัสดุที่สามารถใช้เป็นฐานรองของหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ได้ โดยที่มีคุณสมบัติโปร่งแสงต่อรังสีเอ็กซ์สูง และสามารถมองทะลุผ่านหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ลงไปจนถึงชิ้นงานได้ เพื่อให้สามารถสร้างชิ้นงานที่มีหลายชั้นได้

รายการอ้างอิง

Becnel, C. (2004). **Ultra Deep SU-8 Manufacturing and Characterization for MEMS Applications**. Master Thesis, Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College.

Bjorkholm, J. E. (1998). **EUV Lithography-The Successor to Optical Lithography**. Advanced Lithography Department, Technology and Manufacturing Group, Santa Clara, CA.

Cabrini, S., Pe´renne`s, F., Marmiroli, B., Olivo, A., Carpentiero, A., Kumar, R., Candeloro, P., and Fabrizio, E.Di. (2005). Low cost transparent SU-8 membrane mask for deep X-ray lithography. **Microsystem Technologies**. 11: 370–373.

Chen, H., Bao, M., Zhu H., and Shen, S. (1997). A piezoresistive accelerometer with a novel vertical beam Structure**. Solid State Sensors and Actuators**. 2: 1201–1204.

Chen, H., Shen, S., and Bao, M. (1997). Over-range capacity of piezoresistive micro-accelerometer. **Sensors and Actuators.** 58(3): 197–201.

Fahrenberg, J., Schaller, Th., Bacher, W., El-Kholi, A., and Schomburg W. K. (1996). High aspect ratio multi-level mold inserts fabricated by mechanical micro machining and deep etch X-ray lithography. **Microsystem Technologies**. 2: 174-177

Guckel, H. (1995). Micromechanics via synchrotron radiation. **Particle Accelerator Conference.** 1: 63-66.

Guo, Y., Liu, G., Xiong, Y., Zhu, X., Jun, W. and Tian, Y. (2006). Fabrication of LIGA mold insert using Ni-PTFE composite micro-electroforming. **Journal of Physics: Conference**. 34: 870-874.

Hruby, J. (2000). **The State of LIGA Development.** Sandia National Laboratories**.**

Huang, S., Li, X., Wang, Y., Jiao, J., Ge, X., Lu, D., Che, L., Zhang, K., and Xiong, B. (2003). A piezoresistive accelerometer with axially stressed tiny beams for both much increased sensitivity and much broadened frequency bandwidth. **Transducers, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems**. 1: 91 – 94.

Ivanov, T., Gotszalk, T., Sulzbach T., and Rangelow, I. W. (2003). Quantum size aspects of the piezoresistive effect in ultra thin piezoresistors. **Ultramicroscopy.** 97(1-4): 377-384.

Carter, J. M., Fleming, R. C., Savas, T. A., Walsh, M. E., and O'Reilly, T. B. (2003). Interference Lithography. **Submicron and Nanometer Structures.** : 186-188.

Jian, L., Desta, Y. M., Goettert, J., Bednarzik, M., Loechel, B., Yoonyoung, J., Aigeldinger, G., Singh, V., Ahrens, G., Gruetzner, G., Ruhmann, R., and Degen, R. (2003). SU-8 based deep x-ray lithography/LIGA. **Proc. of SPIE.** 4979: 394-401.

Jian, L., Loechel, B., Scheunemann, H.-U., Bednarzik, M., Desta, Y.M., and Goettert, J. (2003). Fabrication of ultra thick, ultra high aspect ratio microcomponents by deep and ultra deep X-ray lithography. **MEMS, NANO and Smart Systems**. (ICMENS'03): 14-17

Jian, L. K., Casse, B. D. F., Heussler, S. P., Kong, J. R., Saw, B. T., Mahmood, S. b., and Moser, H. O. (2006). Industrial applications of micro/nanofabrication at Singapore Synchrotron Light Source. **Journal of Physics: Conference.** 34: 891–896.

José, A. P., Collado, A., Cabruja, E., and Esteve, J. (2002). Piezoresistive Accelerometers for MCM Package**. Journal of Microelectromechanical Systems.** 11(6): 794-801.

Kawase, K., Hirata, Y., Haga, T., Yorita, J., Mori, C., and Ueno T. (2004). Development of LIGA Contact Probe with Tip Sharpened by Micro-Electro Discharge Machining. **Sei Technical Review**. 58: 12-15.

Kim, K., Park, S., Lee, J.-B., Manohara, H., Desta, Y., Murphy, M., and Ahn, C. H. (2002). Rapid replication of polymeric and metallic high aspect ratio microstructures using PDMS and LIGA technology. **Microsystem Technologies**. 9: 5-10.

Kwon, K., and Park, S. (1997). Three axis piezoresistive accelerometer using polysilicon layer**. Solid State Sensors and Actuators.** 2: 1221–1224.

Mookherjea, S. (2005). Principles and applications of coupled microring optical resonators**. Fibres and Optical Passive Components.** : 51- 57.

Moser, H. O., **Industry and Synchrotron Radiation - Prospects Using ANKA**. Forschungs-zentrum Karlsruhe, Germany**.**

Munnik, F., Benninger , F., Mikhailov , S., Bertsch, A., Renaud, P., Lorenz, H., and Gmur, M. (2003). High aspect ratio, 3D structuring of photoresist materials by ion beam LIGA. **Microelectronic Engineering**. 67–68: 96–103.

Pavelescu, I., and Matei, P. (2000). Uniaxial silicon piezoresistive accelerometer**. Semiconductor Conference.** 2: 479 – 482.

Rolland, J. P., Hagberg, E.C., Denison,G. M., Carter, K. R., and De Simone J. M. (2004). High-Resolution Soft Lithography: Enabling Materials for Nanotechnologies. **Angew. Chem. Int. Ed.** 43: 5796–5799.

Ruprecht, R., Kalb, H., Kowanz, B., and Bacher, W. (1996). Molding of LIGA microstructures from fluorinated polymers**. Microsystem Technologies.** 2: 182-185.

Shimada, O., KusumI S., Mekaru, H., Sato, N., Yamashita, M., and Hattori, T. (2004). Fabrication of Spiral Micro-Coil Utilizing LIGA Process. **LASTI Annu Rep**. 6: 84-87.

Silvaa, E. C. N., Souzaa, B. R. D., Ornelasa, M. G., and Nishiwakib, S. (2005). Piezoresistive Sensor Design Using Topology Optimization. **6th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization.** Brazil, Rio de Janeiro.

Sim, J. H., Hahm, S. H., Lee, J. H., Lee, J. H., Yu, I. S., and Kim, J. S. (1997). Eight-beam piezoresistive accelerometer fabricated by using a selective porous silicon etching method. **Solid State Sensors and Actuators**. 2: 1193-1196.

Sim, J. H., Kim, D. K., Bae, Y. H., Nam, K. H., and Lee, J. H. (1998). Six-beam piezoresistive accelerometer with self-cancellingcross - axis sensitivity. **Electronics Letters**. 34(5): 497- 499**.**

Siva-Prasad, M. S. Y., Kumar, S., and Ravi, G. (2005). Modelling and Experimental Verification of Temperature effectsof a Piezo-Resistor and Design of Compensation Electronics. **Proceedings of ISSS 2005 International Conference on Smart Materials Structures and Systems (SE44-SE48).** India, Bangalore.

Tao, W., Andrew, B. M., Richard, M. ., Kevin, W. K., Hensley, D., Desta, Y., and Ling, Z. G. (2005). Fabrication of Monolithic Multilevel High-Aspect-Ratio Ferromagnetic Devices. **Journal OF Microelectromechanical Systems**. 14(2): 400-409.

Tolfree, D. W. L. (1998). The status of deep X-ray lithography in the UK for the development of precision microstructures. **Microsystem Technologies.** 4: 51-55.

Tsai, T. H., Yang, H., and Chein, R. (2004). New electroforming technology pressure aid for LIGA process. **Microsystem Technologies.** 10: 351–356

Urbanski, J. P., Thies, W., Rhodes, C., Amarasinghe, S., and Thorsen, T. (2006). Digital microfluidics using soft lithography. **Lab on a Chip**. 6: 96-104.

Yi, F., Jin, M., Tang, E., and Xian, D., (1996). The fabrication of LIGA masks using photolitho graphy and synchrotron radiation lithography. **Microsystem Technologies.** 3: 7-9.

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. W. Wanburee, T. Maturos, T. Lomas, A. Tuantranont, N. Atiwongsang-thong, R. Muanghlua,W. Titiroongruang, S. Niemcharoen, P. Songsiriritthigul, P. Klysubun, and N. Chomnawang. “Alternative X-ray Mask Absorber for LIGA Applications.” International Conference on Materials for Advanced Technologies – ICMAT, Singapore, July 1-7, 2007

2. R. Phatthanakun, M. Mapato, W. Wanburee, S. Promwikorn, N. Chathirat, P. Songsiriritthigul, P. Klysubun and N. Chomnawang. “Copier Transparency as a Transparent Support for X-ray Mask Absorber.” International Conference on Materials for Advanced Technologies – ICMAT, Singapore, July 1-7, 2007

ประวัติผู้เขียน

นายวินัย วันบุรี เกิดเมื่อวันที่ 10 พฤศจิกายน พ.ศ. 2525 ที่อำเภอหนองพอก จังหวัดร้อยเอ็ด สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนหนองแวงบึงงาม อำเภอหนองพอก จังหวัดร้อยเอ็ด สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนหนองพอกวิทยา จังหวัดร้อยเอ็ด และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ พ.ศ. 2548 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ขณะศึกษาได้ทำงานวิจัยทางด้านระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS) ทั้งการออกแบบและสร้างด้วยกระบวนการผลิตชิ้นส่วนจุลภาค และได้ร่วมมือกับศูนย์วิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ ในการ*พัฒนาระบบฉายรังสีเอ็กซ์ลงบนชิ้นงาน ณ จุดปลายของระบบลำเลียงแสง BL-6* และ*พัฒนากระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์สำหรับใช้ภายในศูนย์วิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ โดยใช้โลหะเงินเป็นวัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์สำหรับการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์* และสามารถใช้กระบวนการที่ได้พัฒนาขึ้น เป็นกระบวนการมาตรฐานภายในศูนย์วิจัย ผู้วิจัยมีความสนใจในการประยุกต์ใช้แสงซินโครตรอนมาพัฒนากระบวนการประดิษฐ์โครงสร้างจุลภาคสัดส่วนสูง และในระหว่างการศึกษานั้น ได้นำเสนอผลงานวิจัยจำนวนสองเรื่องดังนี้ (1) “Alternative X-ray Mask Absorber for LIGA Applications.” และ (2) “Copier Transparency as a Transparent Support for X-ray Mask Absorber.” ในการประชุมทางวิชาการนานาชาติ International Conference on Materials for Advanced Technologies – ICMAT 2007 ณ ประเทศสิงคโปร์ ระหว่างวันที่ 1-6 กรกฎาคม พ.ศ. 2550