สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ(ภาษาไทย) ..... ก

บทคัดย่อ(ภาษาอังกฤษ) ..... ข

กิตติกรรมประกาศ ..... ค

สารบัญ ..... ง

สารบัญตาราง ..... ฉ

สารบัญรูป ..... ช

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ ..... ฎ

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย 8

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น 9

1.4 ขอบเขตของการวิจัย 9

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 9

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์ 10

2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 11

2.1 กระบวนการลิโธกราฟฟี 11

2.2 กระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ 13

2.3 การสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์เพื่อใช้ในกระบวนการลิโธกราฟฟี ด้วยรังสีเอ็กซ์ 15

3 ระบบลำเลียงแสง 19

4 การลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ 25

4.1 กระบวนการลิโธกราฟฟี 25

4.2 การออกแบบลวดลาย 28

4.3 การสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ 30

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.3.1 การเตรียมชิ้นงานสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ 31
4.3.2 การเคลือบสารไวแสงลงบนหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ 33
4.3.3 การถ่ายทอดลวดลายต้นแบบโดยกระบวนการลิโธกราฟฟี ด้วยรังสีอัตราไวโอเลต 35
4.3.4 การล้างฟิล์มไวแสงบาง 36
4.3.5 การเติมวัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ลงบนหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ 38
4.4 การเตรียมชิ้นงานและเคลือบสารไวแสง 43
4.5 การฉายรังสีเอ็กซ์ลงบนชิ้นงาน 45
4.6 การล้างสารไวแสง (Developing) 51
5 การสร้างชิ้นงานด้วยโลหะและการผลิตซ้ำ 54
5.1 หลักการสร้างชิ้นงานด้วยโลหะ 54
5.2 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า 56
5.3 การสร้างแม่พิมพ์ในการผลิตซ้ำ 67
6 การนำกระบวนการไปประยุกต์ใช้งาน 72
6.1 ตัวตรวจรู้ความเร่ง 72
6.2 กระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความเร่ง 74
6.3 การสร้างก้อนมวล (proof mass) ลงบนตัวชิพ 80
7 สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ 89
7.1 สรุปงานวิจัย 89
7.2 ข้อเสนอแนะ 90
รายงานอ้างอิง 91
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 97
ประวัติผู้เขียน 98

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 เปรียบเทียบเวลาในการฉายรังสีเอ็กซ์บนชิ้นงานระหว่างสารไวแสง PMMA และ SU-8 ที่ความหนาของฟิล์มไวแสงต่าง ๆ 15

4.1 ค่า Contrast เปรียบเทียบระหว่างการใช้เงินและทองคำความหนาต่าง ๆ เมื่อฉายลงบสารไวแสงความหนา 500 ไมโครเมตร ที่กระแสในวงกักเก็บอิเล็กตรอนเท่ากับ 40 mA 48

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

1.1 หลักการในการเกิดเงาบนชิ้นงานของกระบวนการลิโธกราฟฟี ด้วยแสงอัลตราไวโลเลต 3

1.2 หลักการในการเกิดเงาบนชิ้นงานของกระบวนการลิโธกราฟฟี ด้วยรังสีเอ็กซ์ 4

1.3 ลำดับขั้นตอนกระบวนการ LIGA โดยทั่วไป 6

1.4 หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ที่สร้างเป็นลวดลาย SUT 7

2.1 การติดตั้งชิ้นงานสำหรับการฉายแสง 12

2.2 ลักษณะและส่วนประกอบของหน้ากากกั้นแสง 13

2.3 ลำดับอุปกรณ์ที่ติดตั้งสำหรับการฉายรังสีเอ็กซ์ในกระบวนการลิโธกราฟฟี ด้วยรังสีเอ็กซ์ 14

2.4 ส่วนประกอบพื้นฐานของหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ 16

3.1 การลำเลียงแสงจากระบบลำเลียงแสงส่วนหน้ามายังสถานีทดลอง เอ็กซ์เรย์ลิโธกราฟฟี 20

3.2 ลักษณะและขนาดของลำรังสีเอ็กซ์จาก BL6 21

3.3 การตกกระทบของรังสีเอ็กซ์ลงบนชิ้นงาน 21

3.4 การติดตั้งชิ้นงานลงบนเครื่องสแกนเนอร์เพื่ออาบรังสีเอ็กซ์ 22

3.5 ห้องสุญญากาศ ที่มีระบบขับเคลื่อนชิ้นงานอยู่ภายใน 23

3.6 ระบบขับเคลื่อนชิ้นงานภายในห้องสุญญากาศ 23

4.1 การถอดแบบลวดลายด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟี 26

4.2 ภาพตัดขวางการถอดแบบลวดลายด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟี 26

4.3 ภาพตัดขวางการถอดแบบลวดลายด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ 27

4.4 ลวดลายเฟืองที่ออกแบบบนโปรแกรม LASI โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ของเฟืองตัวบนสุด มีขนาด 370 ไมโครเมตร 28

4.5 ลวดลายแท่งทดสอบที่ออกแบบบนโปรแกรม LASI โดยขนาดของ แท่งแต่ละอันกว้างเท่า ๆ กัน แท่งละ 60 ไมโครเมตร 29

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.6 ลวดลายแท่งทดสอบที่สร้างจากหมึกดำทึบแสงบนแผ่นใส 30
4.7 ลวดลายเฟืองที่สร้างจากหมึกดำทึบแสงบนกระจกใส 30
4.8 การติดแผ่นกราไฟต์บางลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ 32
4.9 กราฟคุณสมบัติของสารไวแสง SU-8 สำหรับเบอร์ที่ให้ความหนาไม่เกิน 50 ไมโครเมตรโดยเปรียบเทียบระหว่างความเร็วในการหมุนเคลือบกับความหนาของฟิล์มที่ได้ 33
4.10 การทำงานของเครื่องหมุนเคลือบสาร (Spinner) 34
4.11 แผ่นกราไฟต์บางเปรียบเทียบบริเวณที่ทำความสะอาดเรียบร้อยแล้วกับส่วนที่เคลือบสารไวแสง SU-8 ความหนาประมาณ 25 ไมโครเมตรเรียบร้อยแล้ว 35
4.12 การเปลี่ยนคุณสมบัติของสารไวแสงหลังการฉายแสง 36
4.13 ลวดลายทดสอบที่ถ่ายทอดจากหน้ากากกั้นแสงอัลตราไวโอเลตมายังแผ่นกราไฟต์ โดยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต 37
4.14 ลวดลายเฟืองที่ถ่ายทอดจากหน้ากากกั้นแสงอัลตราไวโอเลตมายังแผ่นกราไฟต์ โดยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต 38
4.15 กราฟการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์
(ก.) กราฟการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์หลังผ่านชั้นกรองต่าง ๆ 39
(ข.) กราฟการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ปรียบเทียบระหว่างทองคำ, ทองแดง, นิกเกิลและเงิน 39
4.16 การต่อวงจรไฟฟ้าสำหรับการชุบเงินด้วยไฟฟ้าลงบนแผ่นกราไฟต์ 41
4.17 หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ลวดลายแท่งทดสอบ 42
4.18 หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ลวดลายเฟืองขนาดต่าง ๆ 42
4.19 กราฟคุณสมบัติของสารไวแสง SU-8 สำหรับเบอร์ที่ให้ความหนาไม่เกิน 50 ไมโครเมตร โดยเปรียบเทียบระหว่างความเร็วในการหมุนเคลือบกับความหนาของฟิล์มที่ได้ 43
4.20 แบบจำลองชิ้นงานที่เคลือบสารไวแสงหนาลงบนฐานเรียบร้อยแล้ว 45
4.21 ลำดับชั้นในการติดตั้งชิ้นงานลงบนเครื่องแสกนชิ้นงาน 45
4.22 ลำดับของตัวกรองรังสีเอ็กจากวงกักเก็บอิเล็คตรอนก่อนจะมาตกกระทบชิ้นงาน 46
4.23 จุดสำคัญในการวัดค่าพลังงานรวมในการฉายรังสีเอ็กซ์ลงบนสารไวแสง 47
4.24 ผลการวัดความหนาของโลหะเงินบนหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ 50

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.25 ค่าพลังงานสะสมบนชิ้นงาน (mA.min/cm) ที่เคลือบด้วยสารไวแสง SU-8 ความหนาค่าต่าง ๆ ที่สามารถล้างฟิล์มแล้วได้โครงสร้างที่ดี 51

4.26 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โครงสร้างทดสอบที่สร้างจากกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ 52

4.27 โครงสร้างเฟือง ที่สร้างจากกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ 52

5.1 ลวดลายโครงสร้างในลำดับขั้นการขึ้นรูปด้วยสารไวแสง SU-8 55

5.2 ชิ้นงานที่สร้างจากกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์

(ก.) ชิ้นงานในลักษณะหลุมของสารไวแสง 56

(ข.) ชิ้นงานในลักษณะแท่งของสารไวแสง 57

5.3 ขวาคือพื้นผิวของแผ่นสเตนเลส ซ้ายคือพื้นผิวของแผ่นสเตนเลสหลังทำการพ่นทราย 58

5.4 แผนภาพแสดงการติดชิ้นงานและการต่อวงจรสำหรับการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า 59

5.5 การเกิดของโลหะแบบไม่สม่ำเสมอบนชิ้นงานที่มีขนาดช่องต่างกัน 62

5.6 การต่อวงจรชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า 63

5.7 การดูดฟองอากาศออกจากชิ้นงานด้วยเครื่องดูดอากาศ 64

5.8 ภาพชิ้นงานที่เป็นโครงสร้างของโลหะนิกเกิล 66

5.9 เศษสารไวแสงที่อยู่บริเวณซอกของโครงสร้าง 67

5.10 แนวคิดการผลิตซ้ำชิ้นงาน 68

5.11 กระบวนการผลิตซ้ำชิ้นงานโดยการถอดแบบด้วยพอลิเมอร์ PDMS 69

5.12 โครงสร้างที่จะทำการทดสอบการถอดแบบด้วย PDMS 70

5.13 แม่พิมพ์ที่สร้างจากพอลิเมอร์ PDMS 71

6.1 ลักษณะโครงสร้างของตัวตรวจรู้ความเร่ง

(ก.) ตัวตรวจรู้ความเร่งแบบเพียโซรีซิสทีฟ 73

(ข.) ตัวตรวจรู้ความเร่งแบบคาปาซิทีฟ 73

6.2 โครงสร้างตัวตรวจรู้ความเร่ง

(ก.) แบบวัดความเร่งในแนวตั้งฉากกับฐานรอง 75

(ข.) แบบวัดความเร่งในแนวขนานกับฐานรอง 75

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

6.3 โครงสร้างตัวตรวจรู้ความเร่งแบบวัดความเร่งในแนวตั้งฉากกับฐานรอง 78

6.4 ภาคตัดขวางของลำดับขั้นกระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความเร่งด้วยกระบวนการ PolyMUMPs โดยใช้โปรแกรม L-edit ในการออกแบบ 79

6.5 ตัวตรวจรู้ความเร่งหลังจากส่งสร้างด้วยกระบวนการ PolyMUMPs 80

6.6 ขั้นตอนการสร้างก้อนมวลรับความเร่งลงบนชิพด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเลตคู่กับสารไวแสงชนิดบวก AZP4620 81

6.7 ลักษณะของหน้ากากเมื่อทับบนชิ้นงาน 82

6.8 กระบวนการสร้างก้อนมวลรับความเร่ง ด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ 83

6.9 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของก้อนมวล SU-8 ต้นแบบ 84

6.10 กระบวนการสร้างแม่พิมพ์โดยการถอดแบบชิ้นงานด้วยพอลิเมอร์ PDMS 85

6.11 แม่พิมพ์ของก้อนมวลที่สร้างจากพอลิเมอร์ PDMS 86

6.12 ขั้นตอนการสร้างก้อนมวลลงบนชิพด้วยแม่พิมพ์ PDMS 87

6.13 ตัวตรวจรู้ความเร่งที่มีก้อนมวลรับความเร่ง ที่สร้างจากกระบวนการการถอดแบบด้วยแม่พิมพ์ PDMS สูงประมาณ 500 ไมโครเมตร 88

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

k	คือ	ค่าคงที่ของเครื่องเคลือบหมุน (ปกติมีค่า 80 – 100)
p	คือ	อัตราส่วนของสารไวแสงที่ผสมกับสารประกอบ (%)
w	คือ	ความเร็วในการหมุนเคลือบ (rpm/1000)
$C(d)$	คือ	ค่า Contrast สำหรับสารไวแสงหนาเท่ากับ d
$E_1(d)$	คือ	ค่าพลังงาน Top dose สำหรับสารไวแสงหนาเท่ากับ d
$E_0(d)$	คือ	ค่าพลังงาน Bottom dose สำหรับสารไวแสงหนาเท่ากับ d
M	คือ	วัสดุที่เกิดปฏิกิริยา
M^{n+}	คือ	จำนวนไอออนของวัสดุที่เกิดปฏิกิริยา
ne^-	คือ	จำนวนอิเล็กตรอนในการเกิดปฏิกิริยา
ω	คือ	มวลของโลหะที่เกิดขึ้นที่ขั้วลบหรือที่หลุดออกจากขั้วบวกในหน่วยกรัม (g)
A_ω	คือ	มวลอะตอม (atomic weight) ของโลหะที่ชุบ
n_{el}	คือ	จำนวนอิเล็กตรอนในการเกิดปฏิกิริยา
F	คือ	คือค่าคงที่ฟาราเดย์ (Faraday's constant) มีค่าเท่ากับ 96,487 (คูลอมบ์ต่อโมล)
I	คือ	กระแสที่ไหลผ่านสารละลายในภาชนะ (mA)
t	คือ	เวลาในการชุบโลหะ (วินาที)
η	คือ	ประสิทธิภาพในการชุบโลหะ (Plating efficiency)
ρ	คือ	ความหนาแน่นของโลหะ
A	คือ	พื้นที่การชุบโลหะ
h	คือ	ความสูงของโลหะก่อตัวขึ้น
J	คือ	ความหนาแน่นกระแส (A/cm^2)