การสร้างชาโดว์มาส์คโดยวิธีการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า

Fabrication of Shadow Masks Using Nickel Electroplating

สุรศักดิ์ มนัสชง[1] พิษณุนาถ จิวสิทธิประไพ[1] ถนอม โลมาศ[2] อนุรัตน์ วิศิษฏ์สรอรรถ[2] อดิสร เตือนตรานนท[2] และ สุธิชัย ชัยสิทธิศักดิ์[1]*

[1] ห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุและอุปกรณ์นาโนอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

[2] ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง ปทุมธานี

* โทรศัพท์ (02)-3264222 โทรสาร (02)-392398 E-mail: kscsutich@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

ชาโดว์มาส์ค (shadow-masks) ถูกใช้อย่างแพร่หลายในการสร้างลวดลายในกระบวนการปลูกฟิล์มด้วยวิธีการระเหยและวิธีสปัตเตอร์ในระบบสุญญากาศ เนื่องจากสร้างได้ง่ายและเสียค่าใช้จ่ายต่ำ ในรายงานนี้เป็นการสร้างชาโดว์มาส์คนิกเกิลที่ได้จากวิธีการชุบด้วยไฟฟ้า โดยใช้เทคนิคโฟโตรีซีสท์ (photoresist) น้ำยาอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) ที่ใช้เป็นชนิดนิกเกิลซัลเฟต (nickel sulfate) โดยศึกษาผลของค่า pH และความสะอาดของน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ที่มีผลต่อการการเกิดของฟิล์มนิกเกิลจากผลของการสร้างชาโดว์มาส์คนิกเกิลขนาด 85 mm x 85 mm ที่มีลวดลายแคบที่สุดอยู่ที่ 0.2 mm พบว่าชาโดว์มาส์คนิกเกิลที่ได้มีความเรียบสม่ำเสมอ และมีขนาดคลาดเคลื่อนจากต้นแบบ 0.07 mm

Abstract

A shadow-mask is used in a wide range of making patterns in vacuum evaporation and sputtering deposition processes, due to its simplicity and low-cost. In this report, we present the fabrication of electroplated nickel shadow-masks using photo-resist techniques. The used electrolyte was based on nickel sulfate solutions. The effects of pH and cleanness of electrolyte on the formation of nickel films were investigated. From the result of making 85 mm x 85 mm-size mask with a smallest width of 0.2 mm, it was found that the obtained mask was smooth and uniform and had a size-miss in the range of 0.07 mm.

1. บทนำ

วิธีการสร้างลวดลาย (pattern) ในกระบวนการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในระบบสุญญากาศ (เช่น วิธีการระเหยสารด้วยความร้อน หรือด้วยลำอิเล็กตรอน หรือวิธีการสปัตเตอร์) วิธีหนึ่ง คือ การใช้ชาโดว์มาส์ค (shadow-masks, stencils) ซึ่งเป็นวิธีที่ถูกพัฒนาขึ้นตั้งแต่เริ่มมีการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับการสร้างลวดลายด้วยวิธีอื่น เช่น วิธี Lithography การใช้ชาโดว์มาส์ค จะไม่สามารถสร้างลวดลายที่มีขนาดเล็ก หรือมุมโค้ง ได้ตามที่ต้องการ ทั้งนี้เนื่องจาก ข้อจำกัดทางด้านประสิทธิ์ภาพของชาโดว์มาส์ค อย่างไรก็ตามในปัจจุบัน ได้มีการพัฒนาการสร้างชาโดว์มาส์คที่มีความละเอียดสูง เพื่อให้สามารถใช้สร้างลวดลายในระดับซับไมครอน (sub-micron) ได้ [1] ทำให้การสร้างลวดลายด้วยชาโดว์มาส์ค ยังคงได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายจนกระทั่งทุกวันนี้ ทั้งนี้ก็เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย สะดวก สามารถสร้างลวดลายได้ทีละมากๆ รวดเร็ว และเสียค่าใช้จ่ายต่ำ

ในรายงานนี้เป็นการสร้างชาโดว์มาส์คจากฟิล์มหนานิกเกิลด้วยวิธีการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (electroplating หรือ electrodeposition หรือ electroforming) ข้อดีของวิธีชุบโลหะด้วยไฟฟ้า คือ สามารถสร้างชาโดว์มาส์คที่มีลวดลายขนาดเล็กได้ และเสียค่าใช้จ่ายไม่มาก และสาเหตุที่เลือกนิกเกิลก็เนื่องจากมีอัตราการเกิดสูงและสามารถควบง่าย ทนต่อการกัดกร่อนหลุดลอก และราคาถูก เมื่อเทียบกับโลหะอื่นๆ [2] โดยได้ทำการสร้างชาโดว์มาส์คขนาด 85 mm x 85 mm ที่มีลวดลายขนาดเล็กที่สุดอยู่ที่ 0.2 mm โดยศึกษาผลของค่า pH และความสะอาดของน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) ที่มีผลต่อการการเกิดของฟิล์มนิกเกิล

2. หลักการชุบด้วยไฟฟ้า

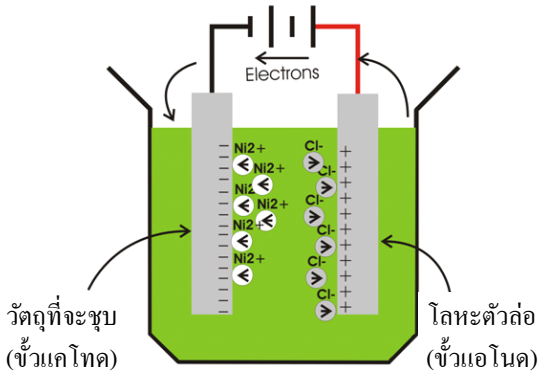
การชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเป็นการทำให้โลหะที่ต้องการ ไปเคลือบบนผิววัตถุโดยกรรมวิธีทางเคมีและไฟฟ้า โดยนำชิ้นงานที่ต้องการจะชุบ ซึ่งจะต้องเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ลงในบ่อชุบที่มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์แล้วต่อเข้ากับขั้วลบของแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าตรง ซึ่งเรียกว่าขั้วลบหรือขั้วแคโทด (cathode) ส่วนขั้วบวกหรือขั้วแอโนด (anode) จะต่อเข้ากับโลหะตัวล่อ (anode material) ซึ่งโดยส่วนมากมักจะเป็นโลหะชนิดเดียวกับโลหะที่ต้องการจะชุบ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้จะต้องมีอิออนของโลหะที่ต้องการจะชุบ เช่น ถ้าต้องการชุบนิกเกิลก็ต้องมีอิออนนิกเกิลเป็นต้น โดยกระแสไฟฟ้าจะเป็นตัวบังคับให้อิออนของโลหะมาเกาะที่ขั้วแคโทด ซึ่งเป็นชิ้นงาน รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า ทางด้านขั้วแคโทด อิออน Ni^{2+} ที่อยู่ในสารละลายจะรับอิเล็กตรอนจากขั้วแอโนด เกิดเป็นอะตอมนิกเกิลเกาะตามสมการ

$$Ni^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Ni\ (s) \qquad (1)$$

และที่ขั้วแอโนด ตัวล่อนิกเกิลจะแตกตัวเป็นอิออนละลายในสารละลาย และให้อิเล็กตรอน ตามสมการ

$$Ni\ (s) \rightarrow Ni^{2+} + 2e^{-} \qquad (2)$$

ความหนาของนิกเกิลที่ชุบจะขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลาย ความหนาแน่นกระแสที่ให้ และเวลาในการชุบ ขณะที่เกิดปฏิกิริยา จะเกิดก๊าซออกซิเจนขึ้นที่ขั้วแอโนด และก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด [3-5]



รูปที่ 1 วิธีการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า และแบบจำลองปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

3. การทดลอง

3.1. การเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์

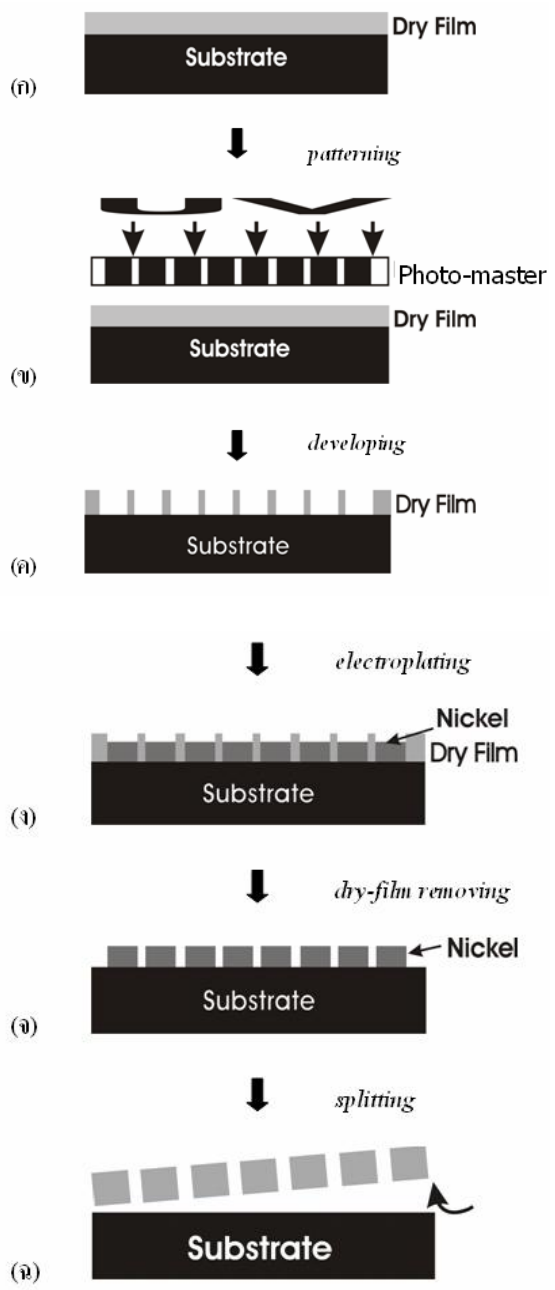
น้ำยาชุบนิกเกิลจะมีส่วนผสมของอิออนหลายชนิด ซึ่งจะประกอบด้วย นิกเกิลซัลเฟต ($NiSO_4.6H_2O$) 240-300 g/L นิกเกิลคลอไรด์ ($NiCl_2.6H_2O$) 40-60 g/L กรดบอริค (H_3BO_3) 35-45 g/L น้ำยาพื้นนิกเกิล10-15 cc/L น้ำยาเงานิกเกิล1-3 cc/L ค่า pH อยู่ในช่วง 3.0-6.0 โดยสารเคมีที่ใช้มีหน้าที่ดังนี้ [3-4] : *นิกเกิลซัลเฟต* เป็นเกลือให้นิกเกิลอิออนในสารละลาย ซึ่งจะกลายเป็นโลหะนิกเกิลที่ไปจับเคลือบบนชิ้นงานที่ทำการชุบ *นิกเกิลคลอไรด์* มีหน้าที่หลักคือ เป็นตัวทำให้การละลายของขั้วบวกดีขึ้น (รูปที่ 1) และยังช่วยเพิ่มการนำไฟฟ้าของน้ำยาชุบ ทำให้ได้ฟิล์มที่มีความสม่ำเสมอมากขึ้น *กรดบอริค* ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ (buffer) ในการควบคุมค่า pH ของน้ำยาชุบบริเวณแคโทดให้คงที่ และยังป้องกันไม่ให้เกิดการไหม้ในกรณีที่ใช้กระแสสูงๆ อีกด้วย *น้ำยาเงา (Brightener)* เป็นตัวเพิ่มความเงาให้กับผิวงานที่ชุบ โดยช่วยทำให้นิกเกิลเรียงตัวกับอยู่เป็นชั้น ๆ บาง บนผิวของชิ้นงาน

3.2 การเตรียมชิ้นงาน

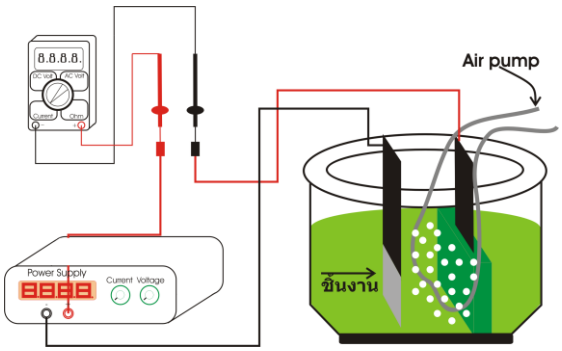
ประสิทธิภาพของการชุบนั้นจะขึ้นกับการเกาะติดแน่นของฟิล์มนิกเกิลที่จะชุบกับฐานรองที่ใช้เป็นแคโทด ดังนั้นการทำความสะอาดผิวฐานรองจึงนับว่าเป็นสิ่งสำคัญ การชุบบนผิวที่สกปรก เช่น มีคราบไขมัน น้ำมัน หรือรอยเปื้อนอื่นๆ จะทำให้ผิวงานที่ผ่านการชุบนั้นลอกออกได้ง่าย ในการทดลองนี้ใช้อัลตร้าโซนิค [4] ในการทำให้สิ่งสกปรกเล็กๆ ที่เกาะติดบนผิวชิ้นงานหลุดออก โดยการสั่นในอะซิโตน (acetone) ตามด้วยในแอลกอฮอล์ (Methanol) และล้างด้วยน้ำบริสุทธ์ (DI) แล้วเป่าให้แห้งสนิทด้วยไนโตรเจน จากนั้น ฐานรองจะถูกนำไปขึ้นลวดลาย ซึ่งมีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2 ฐานรองที่ใช้คือ แผ่นสแตนแลสขัดเรียบขนาด 95 mm x 95 mm ใช้ dry-films ในการสร้างลวดลาย เพราะสามารถหาได้ง่ายในท้องตลาด ณ ที่นี้ ลวดลายของชาโดว์มาส์คที่สร้างขึ้นนั้น เป็นลวดลายสำหรับทำขั้วอลูมิเนียมของเซลล์แสงอาทิตย์ มีจำนวนทั้งหมด 49 เซลล์ แต่ละเซลล์มีขนาด 11.75 x 11.75 mm โดยขนาดของลวดลายที่เล็กที่สุดคือ 0.2 mm หลังจากที่ได้ลวดลายบนฐานรองแล้วก็จะนำไปทำการชุบนิกเกิลจากนั้นก็จะทำการลอกฟิล์มออกจากฐานรอง ซึ่งก็จะได้ชาโดว์มาส์คนิกเกิล

3.3. ขั้นตอนการชุบ

ระบบการชุบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 ซึ่งจะประกอบไปด้วย บ่อชุบที่ทำจากแก้ว ชิ้นงานที่มีลวดลาย ตัวล่อนิกเกิลที่เป็นเม็ดซึ่งใส่ในตะแกรงไทเทเนียม ปั๊มลมใช้ในการกวนสารละลาย แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง และมิเตอร์วัดกระแส หลังจากต่อระบบตามรูปที่ 3 แล้วก็จะเริ่มทำการชุบโดยจ่ายไฟกระแสตรง ต่อขั้วบวกของแหล่งจ่ายให้กับตัวล่อและขั้วลบต่อกับชิ้นงาน อุณหภูมิของบ่อชุบคือ อุณหภูมิห้อง โดยความหนาของโลหะที่มาเกาะที่ผิวชิ้นงานจะแปรผันตามเวลาและความหนาแน่นกระแสที่ใช้ตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) [3, 5] ความหนาแน่นกระแสที่ใช้อยู่ประมาณ 30-60 mA/cm^2 โดยใช้เวลาในการชุบประมาณ 3-4 ชั่วโมงต่อหนึ่งชิ้นงาน ก็จะได้ฟิล์มที่มีความหนาประมาณ 0.2-0.25 mm



รูปที่ 2 ขั้นตอนการเตรียมลวดลายบนฐานรองโดยใช้ dry-film (ก) รีด dry-film ให้แนบกับฐานรอง (ข) ฉายแสง UV (ultra violet) เพื่อให้ได้ส่วนที่ทำและไม่ทำปฏิกิริยาตามลวดลาย (ค) นำไป develop เพื่อเอา dry-film ส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาออก (ง) ทำการชุบนิกเกิล(จ) เอา dry-film ที่เหลือออก (ฉ) ลอกแผ่นฟิล์มหนานิกเกิลออกจากฐานรอง



รูปที่ 3 อุปกรณ์ที่ใช้ในขบวนการชุบด้วยไฟฟ้า

4. ผลการทดลองและวิเคราะห์

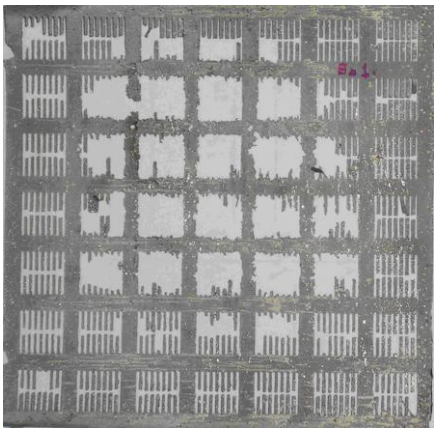
จากการทดลองหลายๆ ครั้งพบว่า สภาพของสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีผลอย่างมากต่อการเกิดของฟิล์มนิกเกิลโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ค่า pH ที่มีผลต่อการหลุดลอกของฟิล์ม และความสะอาดของสารละลายที่มีผลต่อความสมบูรณ์ของฟิล์ม โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1. ผลของค่า pH กับการหลุดลอกของฟิล์มนิกเกิล

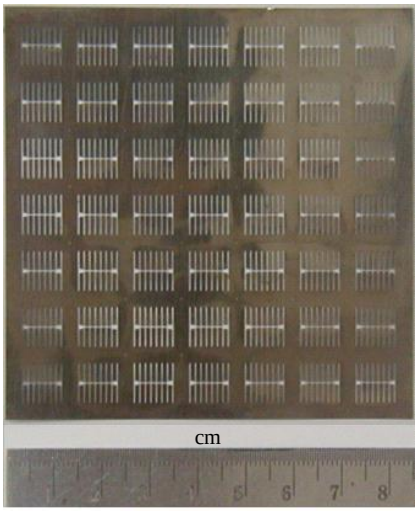
รูปที่ 4 (ก) และ (ข) แสดงภาพถ่ายของแผ่นชาโดว์มาส์คนิกเกิลบนฐานรอง โดยได้จากการชุบที่ค่า pH ที่ 5.0~6.0 และที่ 3.0~4.5 ตามลำดับ

จากรูปจะเห็นได้ว่าค่า pH มีผลอย่างมากต่อการหลุดลอกของนิกเกิลในกรณีที่ค่า pH อยู่ในช่วง 5.0~6.0 (รูปที่ 4 (ก)) ฟิล์มนิกเกิลที่ได้นั้น จะเกิดการหลุดลอกของนิกเกิลระหว่างการชุบ ทำให้นิกเกิลเกาะติดไม่ทั่วทั้งแผ่น โดยส่วนมากจะมาเกาะหนาแน่นที่บริเวณขอบของฐานรอง อย่างไรก็ตาม ถ้าค่า pH อยู่ในช่วง 3.0~4.5 (รูปที่ 4 (ข)) ฟิล์มนิกเกิลที่ได้ จะมีความเรียบและสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น

โดยทั่วไปแล้ว การละลายของขั้วแอโนดจะมีประสิทธิ์ที่สูงเกือบ 100 % อย่างไรก็ตาม ถ้า pH ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีค่าสูงเกินไป จะทำให้อิออนไฮดรอกซิล (hydroxyl ions) เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด ซึ่งจะทำให้ประสิทธิ์ภาพของขั้วแอโนดลดลง [3] ซึ่งก็จะทำให้ความเข้นข้นของอิออน Ni^{2+} ในสารละลายเพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้อัตราการเกิดนิกเกิลลดลงและไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นสาเหตุของการหลุดลอก ค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองอยู่ในช่วง 3.0~4.5 โดยปรกติ ในระหว่างการชุบ ค่า pH ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างช้าๆ ซึ่งสามารถปรับค่า pH ให้ลดลงได้โดยการเติมกรดเช่น กรดซัลฟูริก แต่ในกรณีที่ค่า pH ต่ำเกินไป ก็สามารถแก้ไขได้ด้วยการเติมเบส เช่น นิกเกิลคาร์บอเนต เป็นต้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 4 ภาพถ่ายของแผ่นฟิล์มนิกเกิลบนฐานรอง ขนาด 85 mm x 85 mm ที่ได้จากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีค่า pH แตกต่างกัน (ก) 5.0~6.0 และ (ข) 3.0~4.5 ค่า pH ที่เหมาะสมจะทำให้ฟิล์มนิกเกิลไม่หลุดลอก

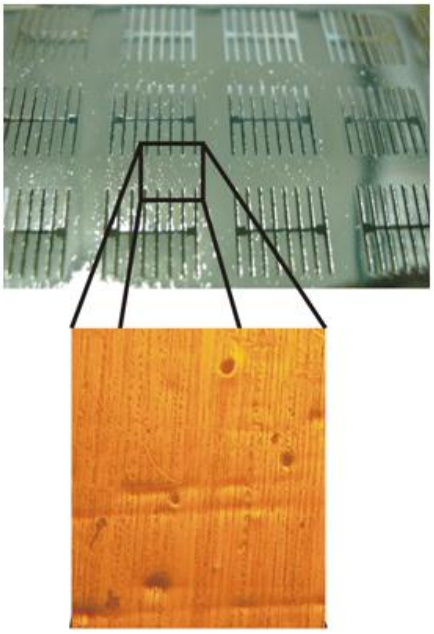
4.2. ความสะอาดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับตามดในฟิล์มนิกเกิล

หลังจากที่ได้ทำการปรับค่า pH ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์แล้ว ก็ไม่พบปัญหาการหลุดลอก แต่ฟิล์มนิกเกิลที่ได้นั้นยังไม่สมบูรณ์เพียงพอ เมื่อดูจากภายนอกจะสามารถสังเกตที่ผิวว่า มีรอยขีดข่วนทั่วแผ่นฟิล์ม (รูปที่ 5 (ก)) บางบริเวณ เมื่อส่องดูกับแสงไฟ จะสังเกตเห็นเป็นรูขนาดเล็กที่แสงส่องผ่านได้ และเมื่อสังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะพบว่ามีรอยร่องยาวหรือหลุม ดังรูปที่ 5 (ก) จากการตรวจสอบสาเหตุที่ทำให้เกิดรอยหรือหลุมที่มักเรียกกันว่า ตามด นั้น พบว่าเกิดจากความไม่สะอาดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งอาจจะเป็นโลหะแปลกปลอม เช่น ทองแดง หรืออลูมิเนียม ที่หลุดออกจากนิกเกิลที่ใช้เป็นตัวล่อ หรือสายไฟฟ้า ที่จุ่มลงในบ่อชุบ อย่างไรก็ตาม ปัญหานี้ก็สามารถแก้ไขได้ด้วยการกรองและวิธีดัมมี่ (dummy) [4] จากการทำความสะอาดด้วยการกรองด้วยกระดาษกรองขนาดรู 20 μm พบว่ากระดาษกรองมีคราบสีน้ำตาลเกาะติด ซึ่งจะต้องทำการกรองประมาณ 2 – 3 ครั้ง ขึ้นอยู่กับความสกปรก นอกจากนี้ ยังได้ใช้ผ้าหุ้มตะแกรงไททาเนียมที่ใส่เม็ดนิกเกิลไว้ เพื่อป้องกันการหลุดลอยของสิ่งแปลกปลอมสู่สารละลาย อีกด้วย ฟิล์มนิกเกิลที่ได้หลังจากการทำความสะอาดสารละลายอิเล็กโทรไลต์แล้ว จะมีลักษณะที่สมบูรณ์ ราบเรียบ สม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น และไม่มีตามด ดังแสดงในรูปที่ 5 (ข)

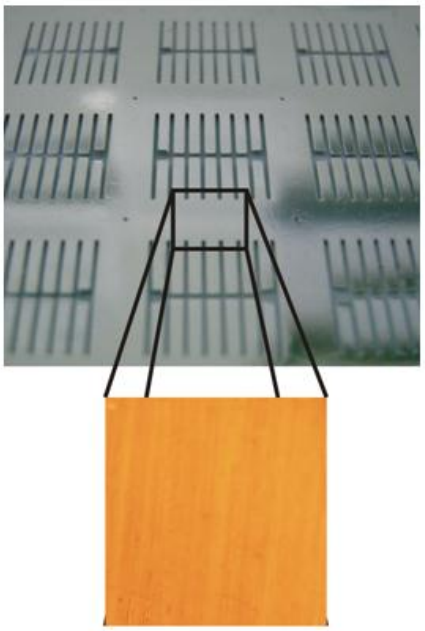
4.3. ลวดลายของชาโดว์ชาโดว์มาส์ค

หลังจากที่ได้ทำการปรับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสม ก็จะสามารถสร้างชาโดว์มาส์คนิกเกิลที่สมบูรณ์ ไม่มีริ้วรอย และเรียบสม่ำเสมอได้

รูปที่ 6 แสดงขนาดของลวดลายของชาโดว์มาส์คนิกเกิลที่ได้ เปรียบเทียบกับลวดลายของต้นแบบ (แผ่นพิมพ์พลาสติกบาง) ที่ได้ออกแบบไว้ โดยในรูป 6 (ก) เป็นลวดลายที่มีลายที่เล็ก ขนาด 0.2 mm ในขณะที่ รูป 6 (ข) เป็นลวดลายที่มีลายที่ใหญ่ ขนาด 1.0 mm จากการวิเคราะห์พบว่า ขนาดของลวดลายที่ได้จะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของต้นแบบเฉลี่ยประมาณ 0.07 mm (ขนาด



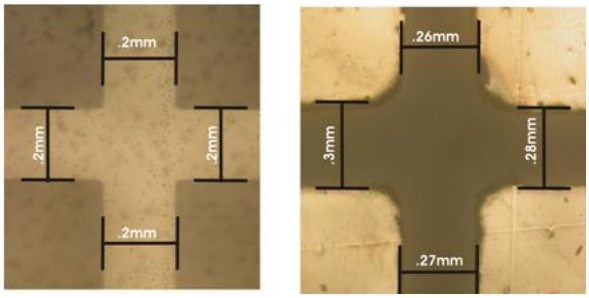
(ก)



(ข)

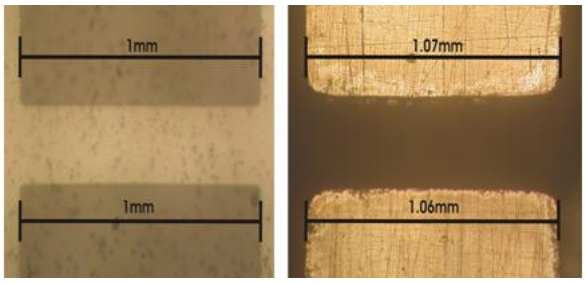
รูปที่ 5 ภาพถ่ายของชาโดว์มาส์คนิกเกิล(ก) แผ่นฟิล์มที่มีรอยตามด ที่ได้จากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่สะอาด และ (ข) แผ่นฟิล์มที่ไม่มีรอยตามด หลังจากทำให้สะอาดด้วยการกรองและวิธีดัมมี่

ชาโดว์มาส์ค - ขนาดต้นแบบ) โดยไม่ขึ้นกับขนาดของลวดลาย ทำให้ไม่สามารถสร้างลวดลายที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้ นอกจากนี้ ลวดลายที่ทำได้ก็ไม่สามารถทำให้เกิดเป็นมุมฉากตามที่ต้องการได้ (รูปที่ 6) ซึ่งสาเหตุที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน ก็อาจจะเกิดจากการเลี้ยวแบนของแสงและความไม่สม่ำเสมอของมุมตกกระทบของแสงที่ใช้ในการสร้างลวดลายของ dry-film หรืออาจจะเกิดจากความไม่สม่ำเสมอในขั้นตอนของการชุบ ซึ่งอยู่ระหว่างการหาสาเหตุและปรับปรุง



ลวดลายของต้นแบบ ชาโดว์มาส์คนิกเกิลที่ได้

(ก)



ลวดลายของต้นแบบ ชาโดว์มาส์คนิกเกิลที่ได้

(ข)

รูปที่6 เปรียบเทียบขนาดของลวดลายของฟิล์มนิกเกิลที่ได้ กับลวดลายของต้นแบบ (ก) ลวดลายต้นแบบขนาด 0.2 mm (ข) ลวดลายต้นแบบขนาด 1.0 mm

5. สรุปการทดลอง

รายงานนี้เป็นการสร้างชาโดว์มาส์คจากฟิล์มหนานิกเกิลด้วยวิธีการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าจากสารละลายซัลเฟต ที่อุณหภูมิห้อง จากการศึกษาผลของค่า pH และความสะอาดของน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ ที่มีผลต่อการการเกิดของฟิล์มนิกเกิลพบว่า ค่า pH มีผลต่อการหลุดลอกของฟิล์มในระหว่างการชุบ ซึ่งค่า pH ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 3.0~4.5 และความสะอาดของน้ำยาอิเล็กโทรไลต์มีผลต่อการเกิดตามด การทำความสะอาดน้ำยาอิเล็กโทรไลต์สามารถแก้ปัญหาตามดนี้ได้ และจากผลการสร้างชาโดว์มาส์คนิกเกิลขนาด 85 mm x 85 mm ที่มีลวดลายขนาดเล็กที่สุดอยู่ที่ 0.2 mm ด้วยเงื่อนไขการชุบที่เหมาะสม พบว่า ชาโดว์มาส์คนิกเกิลที่สร้างขึ้นในรายงานนี้มีความเรียบสม่ำเสมอ และมีขนาดคลาดเคลื่อนจากต้นแบบเพียง 0.07 mm นอกจากนี้ ชาโดว์มาส์คที่สร้างขึ้น ได้ถูกนำไปใช้จริงในการสร้างขั้วอลูมิเนียมสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ฟิล์มบางในห้องปฏิบัติการวิจัยของผู้เขียน

ผลของรายงานนี้ สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาการสร้างชาโดว์มาส์คสำหรับใช้ในการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบง่ายๆ ในระดับห้องปฏิบัติการ ต่อไปได้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] T. Schallenberg, C. Schumacher, S. Gundel and W. Faschinger, “Shadow mask technology”, Thin Solid Films **412** (2002) 24–29.

[2] Tweedie Evans Consulting Limited, “Photo electroforming PEF”, http://www.tecon.co.uk

[3] INCO Limited , “The Science Behind Nickel Electroplating”, http://incoltd.com/customercentre/nickelplating/science/default.aspx

[4] อนันต์ ทองมอญ “ชุบโลหะด้วยไฟฟ้า” สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกล กรุงเทพฯ พ.ศ. 2542 หน้า 1-296

[5] คณะวิทยาศาสตร์ สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ (อัญมณีและเครื่องประดับ) มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ “การชุบและเคลือบผิว” http://mylesson.swu.ac.th/gj437