

โฮโลกราฟฟิกรตติงแบบฟิล์มบางไวแสงชนิดแห้งตามแบบจำลองหน้ากาก  
โดยโฮโลแกรมที่สร้างด้วยคอมพิวเตอร์

LIGHT SENSITIVE DRY FILM HOLOGRAPHIC GRATING BASED ON  
MASK MODEL BY COMPUTER GENERATED HOLOGRAMS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2566

KMITL-2023-SC-M-030-001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LIGHT SENSITIVE DRY FILM HOLOGRAPHIC GRATING BASED ON  
MASK MODEL BY COMPUTER GENERATED HOLOGRAMS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE  
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS  
DEPARTMENT OF PHYSICS SCHOOL OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2023

KMITL-2023-SC-M-030-001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	โฮโลกราฟีเฟกเรตติงแบบฟิล์มบางไวแสงชนิดแห้งตามแบบจำลองหน้าฉากโดยโฮโลแกรมที่สร้างด้วยคอมพิวเตอร์
ชื่อนักศึกษา	นางสาวชนิกานต์ อินทร์เนียม
รหัสประจำตัว	63605028
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร. กिरยุทธ์ ศรีนวลจันทร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เมตยา กิติวรณ

### บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบ สร้าง และทดสอบสมบัติทางแสงของโฮโลกราฟีเฟกเรตติงแบบฟิล์มบางไวแสงชนิดแห้ง เริ่มแรกได้ทำการออกแบบรูปแบบการแทรกสอดของหน้าฉากด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้การแทรกสอดของคลื่นระนาบสองลำด้วยมุมแทรกสอดต่าง ๆ โดยที่มีมุมแทรกสอดเป็น 0.45, 0.50, 0.60, 0.70 และ 0.80 องศา ตามลำดับ เพื่อให้ได้หน้าฉากที่มีความกว้างหรือคาบของเกรตติงที่มีความแตกต่างกันตามมุมแทรกสอดต่าง ๆ หน้าฉากจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างด้วยคอมพิวเตอร์นี้จะถูกพิมพ์ลงบนแผ่นฟิล์มพลาสติก ซึ่งนั่นก็คือหน้าฉากโฮโลกราฟีเฟกเรตติง เมื่อได้หน้าฉากแล้วได้ทำการถ่ายโอนลงบนฟิล์มบางไวแสงชนิดแห้งด้วยวิธีการพิมพ์ด้วยแสง (Lithography) โดยวัสดุฐานรองที่ใช้เป็นฟิล์มใสโพลีเอทิลีนเทเรพทาเลต และเคลือบด้วยฟิล์มไวแสงชนิดแห้ง หน้าฉากโฮโลกราฟีเฟกเรตติงจะถูกวางติดอยู่บนฟิล์มไวแสงชนิดแห้ง เมื่อถูกส่องสว่างด้วยแสงยูวี รูปแบบการแทรกสอดที่อยู่บนหน้าฉากจะถูกถ่ายโอนลงบนฟิล์มไวแสงชนิดแห้งทำให้เกิดเป็นเนกาที่เฟกเรตติงปรากฏอยู่บนฟิล์มไวแสงชนิดแห้ง ซึ่งจากการทดลองพบว่าเวลาที่เหมาะสมในการฉายแสงเป็น 10 นาที จากนั้นจึงนำเนกาที่เฟกเรตติงไปสังเกตด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงเพื่อยืนยันคาบของเนกาที่เฟกเรตติงที่อยู่บนฟิล์มบางไวแสงชนิดแห้งว่ามีขนาดถูกต้องสมบูรณ์หรือไม่ พบว่าคาบของเนกาที่เฟกเรตติงมีขนาดใกล้เคียงกับรูปแบบการแทรกสอดที่อยู่บนหน้าฉากซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 45.38 – 82.38  $\mu\text{m}$  และความหนาแน่นของร่องเนกาที่เฟกเรตติงอยู่ในช่วง 220.00 – 121.00 line/cm เพื่อให้ได้โฮโลกราฟีเฟกเรตติงที่ติดทนอยู่บนฟิล์มบางจึงทำการเคลือบฟิล์มบางด้วยสารโลหะวาเนเดียมโดยวิธีการอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงด้วยกำลังของแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ 100 วัตต์ และระยะเวลาในการเคลือบฟิล์มคือ 30 นาที จากนั้นจึงนำโฮโลกราฟีเฟกเรตติงไปสังเกตด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อ

ยืนยันคาบของโฮโลกราฟฟิเกรตติง หลังจากถูกเคลือบด้วยสารโลหะวานเดียมว่ามีขนาดถูกต้องสมบูรณ์หรือไม่ พบว่าคาบของโฮโลกราฟฟิเกรตติงมีค่าอยู่ในช่วง  $46.34 - 83.49 \mu\text{m}$  และความหนาแน่นของร่องโฮโลกราฟฟิเกรตติงอยู่ในช่วง  $215.00 - 119.00 \text{ line/cm}$

การวัดคาบของโฮโลกราฟฟิเกรตติงและวิเคราะห์สมบัติการเลี้ยวเบนของแสงผ่านโฮโลกราฟฟิเกรตติงด้วยวิธีการฉายแสงเลเซอร์ เมื่อฉายแสงเลเซอร์ผ่านโฮโลกราฟฟิเกรตติงจะปรากฏรูปแบบการเลี้ยวเบนของแสงบนฉาก คาบของโฮโลกราฟฟิเกรตติงสามารถคำนวณได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของแสงอันดับที่หนึ่ง ผลการวัดคาบของโฮโลกราฟฟิเกรตติงพบว่าอยู่ในช่วง  $45.32 - 82.40 \mu\text{m}$  และคำนวณความหนาแน่นของร่องโฮโลกราฟฟิเกรตติงอยู่ในช่วง  $220.00 - 121.00 \text{ line/cm}$  จากผลการสังเกตรูปแบบการเลี้ยวเบนของโฮโลกราฟฟิเกรตติงด้วยวิธีการฉายแสงเลเซอร์พบว่าคาบของโฮโลกราฟฟิเกรตติงและความหนาแน่นของร่องของโฮโลกราฟฟิเกรตติงมีความสอดคล้องกับคาบของโฮโลกราฟฟิเกรตติงที่สังเกตุด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และมีค่าใกล้เคียงกับคาบของหน้ากากที่สร้างจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากผลการทดลองพบว่าเราสามารถประยุกต์ใช้วิธีการนี้ในการสร้างโฮโลกราฟฟิเกรตติงที่มีคาบตามขนาดที่ต้องการได้

**คำสำคัญ:** คาบของเกรตติง วิธีการพิมพ์ด้วยแสง โฮโลกราฟฟิเกรตติงแบบฟิล์มไวแสงชนิดแห้ง โฮโลแกรมที่สร้างด้วยคอมพิวเตอร์

<b>Thesis Title</b>	Light sensitive dry film holographic grating based on mask model by computer generated holograms
<b>Student Name</b>	Chanikan Inneam
<b>Student ID</b>	63605028
<b>Degree</b>	Master of Science (Applied Physics)
<b>Department</b>	Physics
<b>Year</b>	2023
<b>Thesis Advisor</b>	Dr. Keerayoot Srinuanjan
<b>Thesis Co-advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Mettaya Kitiwan

### Abstract

In this research, we designed, fabricated, and observed optical properties of holographic grating. First, the interference pattern of mask is designed based on mathematical model using the interference of two plane waves with various interference angles, where the interference angles are 0.45, 0.50, 0.60, 0.70, and 0.80 degrees, respectively, to obtain a mask with different width or grating period according to the various interference angles. The mask generated by computer simulation is printed on the plastic film, i.e., the holographic grating mask. Once the mask is obtained, it is transferred to a dry film photoresist by using the Lithography method. The substrate of the film is polyethylene terephthalate and coated by dry film photoresist. To transfer the holographic grating from the mask to the photoresist film, the mask is attached on top of dry film photoresist. Then illuminated by UV light, the interference pattern on the mask is transferred onto the dry film photoresist causing the negative grating to appear on the dry film photoresist. From the experiment, it is found that the exposure time is 10 minutes. To confirm the grating period of the negative grating, we observe the grating by the optical microscope. It is found that the periods of negative grating are similar in size to the interference pattern on the mask, which are in the range of 45.38 – 82.38  $\mu\text{m}$  and the density of the negative grating grooves are in the range of 220.00 – 121.00 line/cm. To obtain permanent holographic grating fixed on dry film, the dry film is

coated with metallic vanadium by RF magnetron sputtering method, the radio-frequency power is 100 watts and the deposition of film is 30 minutes. To confirm the grating period of the holographic grating, we observe the grating by the Scanning Electron microscope. It is found that the periods of holographic grating are in the range of 46.34 – 83.49  $\mu\text{m}$  and the density of the holographic grating grooves are in the range of 215.00 – 119.00 line/cm.

Next, the measuring the period of holographic grating and analyzing the diffraction properties of light through the holographic grating by illumination of the laser beam method is present. When illuminated the holographic grating with laser light source, the diffraction patterns appear on the scene. The period of holographic grating can be calculated from the first order diffraction pattern. The experiment results show that, the period of holographic grating are in the range of 45.32 – 82.40  $\mu\text{m}$  and the density of the holographic grating grooves are in the range of 220.00 – 121.00 line/cm. It is found that the period of holographic grating and the density of the holographic grating grooves are in agree well with the period observe by Scanning Electron microscope and correspond to the period of the holographic grating mask. From the experimental results, we could apply this method to fabricate holographic grating with period of the desired size.

**Keywords:** computer-generated holograms, dry film holographic grating, grating period, lithography method

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาเป็นอย่างสูง การสนับสนุน การชี้แนะแนวทางการศึกษา การแนะนำข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยจนนำไปสู่การประยุกต์ใช้งานจริง ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.กฤษฎ์ ศรีนวลจันทร์ ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เมตยา กิตติวรรณ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี ที่กรุณาให้แนวความคิด ให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำที่ดีในการปรับปรุง แก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ในการทำงานวิจัย ตลอดจนการจัดหาอุปกรณ์เครื่องมือและสถานที่ทำวิจัยซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยนี้อย่างมาก ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ความเข้าใจ และแนวทางที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สีปตระกูล สุชาติ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประธาน บุรณศิริ เป็นอย่างสูงที่ได้ให้ความกรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ให้ข้อคิดเห็น และคำแนะนำ ช่วยเหลือในการทำวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ในภาคฟิสิกส์ทุกท่านที่ได้กรุณาให้ความรู้ ให้คำแนะนำ และความคิดเห็นเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ได้มอบทุนการศึกษา ให้แก่ข้าพเจ้าตลอดสองปีที่ผ่านมา

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณบิดา-มารดา ที่ให้ได้รับการศึกษา ตลอดจนคอยเลี้ยงดู และอบรมสั่งสอนและเป็นกำลังใจ เป็นแรงผลักดันในการทำงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้จัดทำงานวิจัยขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

นางสาวชนิกานต์ อินทร์เนียม

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญรูป	ญ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
2.1 การแทรกสอดของลำแสงสองลำ	4
2.1.1 การแทรกสอดของคลื่นแสง	4
2.1.2 รูปแบบการแทรกสอดของแสง	5
2.1.3 การกระจายความเข้มแสง	6
2.2 เกรตติงเลี้ยวเบน	10
2.2.1 โอลิกราฟีเกรตติง	10
2.3 โฟโตลิโทกราฟี	11
2.4 โฟโตรีซิส	12
2.4.1 โฟโตรีซิสแบบฟิล์มแห้ง	12
2.5 การสปีตเตอร์ริง	13
2.5.1 หลักการเบื้องต้นทางฟิสิกส์ของสปีตเตอร์ริง	13
2.5.2 ดีซีหรืออาร์เอฟสปีตเตอร์ริง	14
2.5.3 แมกนีตรอนสปีตเตอร์ริง	14
2.6 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบของฟิล์มบาง	15
2.6.1 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	15
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	17
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	18
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการสร้างโฮโลกราฟฟิเคเรตติงแบบฟิล์มบางไวแสงชนิด แห้ง	18
3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในเคลือบโฮโลกราฟฟิเคเรตติงโดยวิธีการอาร์เอฟแมกนีตรอน สปัตเตอริง	19
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	20
3.2.1 ออกแบบหน้ากากโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างด้วยคอมพิวเตอร์	20
3.2.2 การถ่ายโอนรูปแบบการแทรกสอดที่อยู่บนหน้ากากลงบนฟิล์มบางไวแสงชนิดแห้งด้วยวิธีการ พิมพ์ด้วยแสง	22
3.2.3 การยืนยันคาบของเนกาทีฟเกรตติงด้วยวิธีการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	24
3.2.4 การเคลือบโฮโลกราฟฟิเคเรตติงด้วยวิธีการอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง	24
3.2.5 การยืนยันคาบของโฮโลกราฟฟิเคเรตติงด้วยวิธีการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กราด	29
3.3 การวัดคาบของโฮโลกราฟฟิเคเรตติงและวิเคราะห์สมบัติการเลี้ยวเบนของแสงผ่านโฮโล กราฟฟิเคเรตติง	29
3.3.1 การวัดคาบของโฮโลกราฟฟิเคเรตติงด้วยวิธีการฉายแสงเลเซอร์	29
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล</b>	31
4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการตรวจสอบความถูกต้อง	31
4.1.1 ผลการออกแบบหน้ากากโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างด้วยคอมพิวเตอร์	31
4.1.2 ผลการวัดคาบของเนกาทีฟเกรตติงด้วยวิธีการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	33
4.1.3 ผลการวัดคาบของโฮโลกราฟฟิเคเรตติงด้วยวิธีการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด	36
4.1.4 ผลการวัดคาบของโฮโลกราฟฟิเคเรตติงด้วยวิธีการฉายแสงเลเซอร์	39
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	42
5.1 สรุปผลการวิจัย	42
5.2 ข้อเสนอแนะ	43
เอกสารอ้างอิง	44

ภาคผนวก	46
ภาคผนวก ก	47
ภาคผนวก ข	48
ประวัติผู้เขียน	49



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการสร้างโฮโลกราฟฟิกเกรตติง	16
3.1 เงื่อนไขสำหรับการเคลือบโฮโลกราฟฟิกเกรตติงด้วยสารโลหะวาเนเดียม	29
4.1 คำนวณคาบของเกรตติงจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างด้วยคอมพิวเตอร์ของหน้ากาก	33
4.2 การส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงในการสังเกตคาบของเนกาทีฟเกรตติง	35
4.3 การส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในการสังเกตคาบของโฮโลกราฟฟิกเกรตติง	38
4.4 เปรียบเทียบผลการสังเกตคาบของเกรตติงด้วยวิธีการต่าง ๆ	38
4.5 วัดคาบของโฮโลกราฟฟิกเกรตติงด้วยวิธีการฉายแสงเลเซอร์	39
4.6 เปรียบเทียบผลการวัดคาบของโฮโลกราฟฟิกเกรตติงทั้งสามวิธีการ	40
4.7 เปรียบเทียบผลความหนาแน่นของร่องเกรตติงทั้งสามวิธีการ	41

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การทดลองของยังแสดงวิถีของแสงเมื่อผ่านช่องแคบคู่	5
2.2 ความเข้มของสวดลายการแทรกสอดของช่องเล็กยาวคู่	6
2.3 การทดลองของยังแสดงการกระจายความเข้มแสงของการแทรกสอด	9
2.4 การแทรกสอดของลำแสงเดี่ยว	10
2.5 การแทรกสอดของสองลำแสง	11
2.6 ขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี	11
2.7 โครงสร้างโฟโตรีซิสแบบฟิล์มแห้ง	13
2.8 การเกิดสปัตเตอร์ริงที่ผิวเป้า	13
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการสร้างเกรตติง (ก) ฟิล์มไวแสงชนิดแห้ง (ข) ฟิล์ม PET (ค) หลอดไฟแสงยูวี (ง) โซเดียมคาร์บอเนต (จ) ภาตพลาสติก (ฉ) ที่คืบ	18
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการสร้างเกรตติง (ก) อะซีโตน (ข) เมทานอล (ค) น้ำปอดประจุ (ง) อ่างอัลตราโซนิก (จ) ผ้าสำหรับเช็ดทำความสะอาด (ฉ) เป้าวาเนเดียม 99.5%	19
3.3 การแทรกสอดของลำแสงสองลำที่มุมแทรกสอดต่าง ๆ	20
3.4 แผนผังการทำงานของโปรแกรมในการจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยการแทรกสอดของลำแสงสองลำ	21
3.5 หน้ากากโฮโลกราฟฟิกเกรตติง	22
3.6 เคลือบฟิล์มไวแสงชนิดแห้งลงบนแผ่นฟิล์มใส PET	22
3.7 การประกบแผ่นหน้ากากกับแผ่นฟิล์มไวแสงชนิดแห้ง	23
3.8 การฉายแสงด้วยยูวี	23
3.9 ไตอะแกรมการตั้งค่าการทดลองสำหรับการสร้างโฮโลกราฟฟิกเกรตติงด้วยกระบวนการพิมพ์แสง	23
3.10 ไตอะแกรมการล้างแผ่นฟิล์มสำหรับกระบวนการพิมพ์แสง	24
3.11 เนกาที่ฟเกรตติง	24
3.12 ทำความสะอาดและห่อลুমินีเยมพอยล์กับชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ติดตั้งอยู่ในแชมเบอร์สุญญากาศ	25
3.13 ชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ติดตั้งอยู่ในแชมเบอร์สุญญากาศ	26
3.14 ติดตั้งแผ่นโฮโลกราฟฟิกเกรตติงบนแผ่นยึดจับแผ่นฐานรอง	26
3.15 ติดตั้งเป้าวาเนเดียม	27

3.16 การเคลือบฟิล์ม	28
3.17 โอลิโกราฟีฟิเคเรตติงที่ได้รับการเคลือบด้วยสารโลหะวานาเดียม	28
3.18 ไดอะแกรมรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ปรากฏบนฉากรับได้จากการฉายแสงเลเซอร์ผ่านโอลิโกราฟีฟิเคเรตติงแบบส่องผ่าน	30
4.1 แบบจำลองเกรตติงทางคณิตศาสตร์ของ Sample 1	31
4.2 แบบจำลองเกรตติงทางคณิตศาสตร์ของ Sample 2	31
4.3 แบบจำลองเกรตติงทางคณิตศาสตร์ของ Sample 3	32
4.4 แบบจำลองเกรตติงทางคณิตศาสตร์ของ Sample 4	32
4.5 แบบจำลองเกรตติงทางคณิตศาสตร์ของ Sample 5	32
4.6 ภาพการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของ Sample 1	33
4.7 ภาพการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของ Sample 2	34
4.8 ภาพการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของ Sample 3	34
4.9 ภาพการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของ Sample 4	34
4.10 ภาพการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของ Sample 5	35
4.11 ภาพการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ Sample 1	36
4.12 ภาพการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ Sample 2	36
4.13 ภาพการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ Sample 3	37
4.14 ภาพการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ Sample 4	37
4.15 ภาพการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ Sample 5	37
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคาบของเกรตติงและมุมการแทรกสอด	40

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เกรตติงเลี้ยวเบน (Diffraction grating) เป็นโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นคาบ โดยเกิดจากสลิตเดี่ยวหลาย ๆ อันวางเรียงต่อกันอย่างเป็นระเบียบแบบแผน เกรตติงเลี้ยวเบนถูกสร้างขึ้นเป็นครั้งแรกโดยนักดาราศาสตร์ชาวอเมริกัน เดวิด ริทเทินเฮาส์ (David Rittenhouse) ในปี ค.ศ. 1785 ซึ่งเขาสร้างเกรตติงกว้างครึ่งนิ้วที่มีรูรับแสงห้าสิบสามช่อง เมื่อแสงขนานตกกระทบลงบนเกรตติงจะเกิดการเลี้ยวเบนและการแทรกสอดขึ้นทำให้เกิดเป็นแถบมืดหรือแทรกสอดแบบหักล้าง และแถบสว่างหรือแทรกสอดแบบเสริมกันที่บริเวณต่าง ๆ บนฉาก เนื่องจากความกว้างของแต่ละช่องมีค่าน้อยมาก จึงมีผลทำให้ความกว้างของแถบสว่างตรงกลางจะใหญ่มาก ภายในช่องแถบสว่างตรงกลางของการเลี้ยวเบนจะถูกแทรกด้วยแถบมืดและแถบสว่างของการแทรกสอดที่เกิดจากช่องเล็กๆที่ติดกัน [1-3]

เกรตติงเป็นอุปกรณ์ทางแสงที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก มีลักษณะเป็นร่องตรง มีคาบที่เท่ากันและขนานกันซึ่งในการสร้างโฮโลกราฟีฟิสิกเกรตติงขึ้นอยู่กับการรบกวนของลำแสง [4-5] ด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (Computer-generated holograms) [6-7] และการเปิดรับแสงของฟิล์มไวแสง นักวิจัยหลายคนได้เสนอวิธีการพิมพ์ด้วยลำแสงรบกวน (Interference lithography) ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการสร้างโฮโลกราฟีฟิสิกเกรตติง เช่น Nanoimprint lithography [8-9], Extreme ultraviolet interferometric lithography (EUVIL) [10-11], X-ray lithography [12] และ Atom lithography [13] เป็นต้น ซึ่งสามารถใช้วิธีการเหล่านี้ได้ดีเพื่อวัดพารามิเตอร์ทางกายภาพ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบ สร้าง และทดสอบสมบัติทางแสงของโฮโลกราฟีฟิสิกเกรตติงแบบฟิล์มบางไวแสงชนิดแห้ง โดยเริ่มแรกได้ทำการออกแบบหน้ากากด้วยการจำลองทางคณิตศาสตร์จากคอมพิวเตอร์ หน้ากากจะถูกสร้างขึ้นจากรูปแบบการแทรกสอดซึ่งสร้างด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้การแทรกสอดของคลื่นระนาบสองลำด้วยมุมแทรกสอดต่าง ๆ โดยที่มีมุมแทรกสอดเป็น 0.45, 0.50, 0.60, 0.70 และ 0.80 องศา ตามลำดับ จะสังเกตเห็นว่าหน้ากากที่ได้มีความกว้างหรือคาบของเกรตติงมีความแตกต่างกันตามมุมแทรกสอดต่าง ๆ หน้ากากจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างด้วยคอมพิวเตอร์นี้จะถูกพิมพ์ลงบนแผ่นฟิล์มพลาสติก นั่นคือหน้ากากโฮโลกราฟีฟิสิกเกรตติง จากนั้นเมื่อได้หน้ากากแล้วจะทำการถ่ายโอนลงบนฟิล์มบางไวแสงชนิดแห้งด้วยวิธีการพิมพ์ด้วยแสง ในกระบวนการพิมพ์แสงนี้จะใช้ฟิล์มใสโพลีเอทิลีนเทเรพทาเลตเป็นวัสดุฐานรอง และเคลือบด้วยฟิล์มไวแสงชนิดแห้ง หน้ากากโฮโลกราฟีฟิสิกเกรตติงจะถูกวางติดอยู่บนฟิล์มไวแสงชนิดแห้ง เมื่อถูกส่องสว่างด้วยแสงยูวี

รูปแบบการแทรกสอดที่อยู่บนหน้ากากจะถูกถ่ายโอนลงบนฟิล์มไวแสงชนิดแห้งทำให้เกิดเป็นเนกาทีฟเกรตติงปรากฏอยู่บนฟิล์มไวแสงชนิดแห้ง โดยที่บริเวณที่สัมผัสกับแสงจะปรากฏเป็นแถบสีดำ ในขณะที่บริเวณที่ไม่ได้สัมผัสแสงจะปรากฏเป็นแถบสว่าง ซึ่งจากการทดลองพบว่าเวลาที่เหมาะสมในการฉายแสงเป็น 10 นาที จากนั้นจึงนำเนกาทีฟเกรตติงไปสังเกตด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงเพื่อยืนยันคาบของเนกาทีฟเกรตติงที่อยู่บนฟิล์มบางไวแสงชนิดแห้งว่ามีขนาดถูกต้องสมบูรณ์หรือไม่ เพื่อให้ได้โฮโลกราฟฟิคเกรตติงที่ติดคงทนอยู่บนฟิล์มบางจึงทำการเคลือบฟิล์มบางด้วยสารโลหะวานาเดียมโดยวิธีการอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงด้วยกำลังของแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ 100 วัตต์ และระยะเวลาในการปลูกฟิล์ม 30 นาที เมื่อได้โฮโลกราฟฟิคเกรตติงที่เคลือบด้วยโลหะวานาเดียม แล้วนำไปสังเกตด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อยืนยันคาบของโฮโลกราฟฟิคเกรตติงหลังจากถูกเคลือบด้วยสารโลหะวานาเดียมว่ามีขนาดถูกต้องสมบูรณ์หรือไม่ หลังจากนั้นการวัดคาบของเกรตติงและวิเคราะห์สมบัติการเลี้ยวเบนของแสงผ่านโฮโลกราฟฟิคเกรตติงด้วยวิธีการฉายแสงเลเซอร์ เมื่อฉายแสงเลเซอร์ผ่านโฮโลกราฟฟิคเกรตติงจะปรากฏรูปแบบการเลี้ยวเบนของแสงบนฉาก คาบของโฮโลกราฟฟิคเกรตติงสามารถคำนวณได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของแสงอันดับที่หนึ่ง จากผลการสังเกตรูปแบบการเลี้ยวเบนของโฮโลกราฟฟิคเกรตติงด้วยวิธีการฉายแสงเลเซอร์พบว่าคาบของโฮโลกราฟฟิคเกรตติงและความหนาแน่นของร่องของโฮโลกราฟฟิคเกรตติงมีความสอดคล้องกับคาบของโฮโลกราฟฟิคเกรตติงที่สังเกตด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และมีค่าใกล้เคียงกับคาบของหน้ากากที่สร้างจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากผลการทดลองงานวิจัยนี้พบว่าเราสามารถประยุกต์ใช้วิธีการนี้ในการสร้างโฮโลกราฟฟิคเกรตติงที่มีคาบตามขนาดที่ต้องการได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ออกแบบรูปแบบการแทรกสอดของหน้ากากด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้การแทรกสอดของคลื่นระนาบสองลำด้วยมุมแทรกสอดต่าง ๆ
- 2) สร้างโฮโลกราฟฟิคเกรตติงจากหน้ากากที่ออกแบบขึ้นโดยการถ่ายโอนรูปแบบการแทรกที่อยูบนหน้ากากลงบนฟิล์มไวแสงชนิดแห้ง แล้วเคลือบผิวฟิล์มไวแสงชนิดแห้งด้วยโลหะโดยใช้วิธีการอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ออกแบบรูปแบบการแทรกสอดของหน้ากากด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้การแทรกสอดของคลื่นระนาบสองลำด้วยมุมแทรกสอดต่าง ๆ
- 2) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมุมแทรกสอดกับคาบของเกรตติง

- 3) ถ่ายโอนรูปแบบการแทรกสอดที่อยู่บนหน้ากาลงบนฟิล์มไวแสงชนิดแห้งด้วยวิธีการพิมพ์ด้วยแสง
- 4) สร้างโฮโลกราฟฟิเคเรตติงด้วยการเคลือบผิวโลหะลงบนฟิล์มไวแสงชนิดแห้งโดยวิธีการอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง
- 5) วิเคราะห์สมบัติการเลี้ยวเบนของแสงผ่านโฮโลกราฟฟิเคเรตติงด้วยวิธีการฉายแสงเลเซอร์

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถออกแบบเกรตติงได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้การแทรกสอดของคลื่นระนาบสองลำด้วยมุมแทรกสอดต่าง ๆ
- 2) ทราบความสัมพันธ์ระหว่างมุมการแทรกสอดกับคาบของเกรตติง
- 3) สามารถสร้างโฮโลกราฟฟิเคเรตติงที่มีคาบตามขนาดที่ต้องการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องโดยอธิบายถึงการแทรกสอดของลำแสงสองลำ ไฮโลกราฟีฟิกรตติง โฟโตลิโทกราฟี โฟโตรีซิส การสปีดเทอริง และสุดท้ายคือเทคนิคการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางเกรตติง

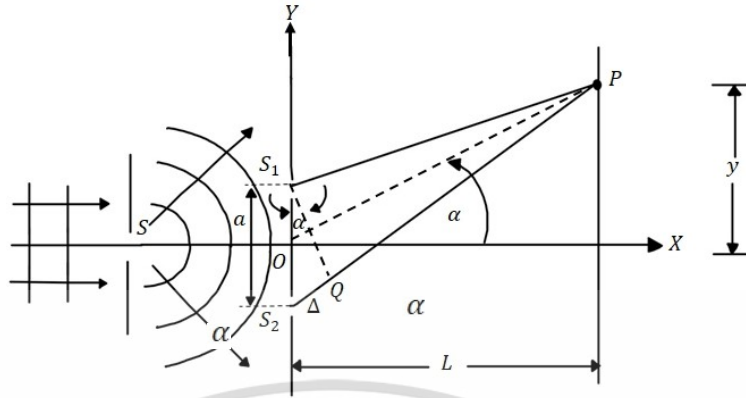
#### 2.1 การแทรกสอดของลำแสงสองลำ [2-3]

การแทรกสอด เป็นสมบัติอีกประการหนึ่งของคลื่น เกิดจากการรวมคลื่นตั้งแต่สองคลื่นที่จุดเดียวกัน โดยเป็นไปตามหลักการซ้อนทับกันของคลื่น จะได้เป็นคลื่นลัพธ์ การแทรกสอดที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสงที่ให้ความยาวคลื่นหลายค่า นั้นจะสังเกตเห็นได้ยากกว่าคลื่นกลเพราะความยาวคลื่นค่อนข้างสั้นทำให้สังเกตเห็นการแทรกสอดของคลื่นได้ง่าย เมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นเป็นแสงอาพันธ์ ซึ่งคลื่นแต่ละขบวนจะเคลื่อนที่โดยมีเฟสตรงกันมีค่าความยาวคลื่นเดียว

แสงสีขาวถือเป็นแหล่งกำเนิดแสงทั่วไป ให้ความยาวคลื่นหลายค่า การแทรกสอดของคลื่นเกิดจากการรวมคลื่นแบบหักล้างกันหรือเสริมกันจะมองเห็นได้ไม่ชัดเจน เนื่องจากเฟสของคลื่นไม่คงที่ โดยการแทรกสอดของคลื่นที่จุด ๆ หนึ่งจะเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเกิดขึ้นให้เห็นเป็นเวลาน้อยกว่า  $10^{-8}$  วินาที ทำให้ประสาทตาของมนุษย์ไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงนี้ได้

##### 2.1.1 การแทรกสอดของคลื่นแสง [3]

ในปี ค.ศ. 1802 โทมัส ยัง (Thomas Young) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษได้ทดลองที่แสดงให้เห็นว่าคลื่นแสงสามารถแทรกสอดกันได้ เมื่อให้แสงเอกรงค์ผ่านช่องแคบที่เล็กมาก ๆ เพื่อจะเป็นแหล่งกำเนิดแบบจุด  $S$  คลื่นแสงนั้นจะแผ่กว้างออกมาเป็นคลื่นทรงกลม โดยเป็นไปตามหลักการของฮอยเกนส์ (Huygen's principle) เมื่อแสงตกกระทบบยังช่องแคบคู่  $S_1$  และ  $S_2$  ที่อยู่ใกล้กัน โดยที่ช่องแคบคู่เป็นแหล่งกำเนิดอาพันธ์ของแสง ซึ่งแสงเกิดการแทรกสอดกันบนฉากเป็นแถบมืดและแถบสว่างสลับกัน โดยตำแหน่งที่คลื่นแสงสองคลื่นนั้นมีเฟสตรงกันจะเกิดการแทรกสอดแบบเสริม ปรากฏให้เห็นเป็นแถบสว่างบนฉาก ถ้ามีเฟสต่างกันจะเกิดการแทรกสอดแบบหักล้าง ปรากฏให้เห็นเป็นแถบมืดบนฉาก



รูปที่ 2.1 การทดลองของยังแสดงวิถีของแสงเมื่อผ่านช่องแคบคู่

ดังรูปที่ 2.1 จากการทดลองของยัง เมื่อเขียนการแทรกสอดของแสงเพื่อหาผลต่างของทางเดินแสง (path difference) แทนด้วย  $\Delta$

### 2.1.2 รูปแบบการแทรกสอดของแสง [3]

จากการทดลองของยังให้  $S_1$  และ  $S_2$  แทนช่องแคบคู่ เมื่อพิจารณาจุด  $P$  บนฉาก ซึ่งอยู่ห่างเป็นระยะ  $L$  จากช่องแคบคู่ ค่าความต่างเฟส  $\delta$  ระหว่างคลื่นทั้งสองที่มาถึงจุด  $P$  จะเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ ถ้าคลื่นทั้งสองเคลื่อนที่มาถึงจุด  $P$  โดยมีเฟสตรงกัน จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน

$$S_2P - S_1P = \Delta = m\lambda \cong asin\alpha \quad (2.1)$$

ถ้าคลื่นทั้งสองเคลื่อนที่มาถึงจุด  $P$  โดยมีเฟสตรงข้ามกัน จะเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกัน

$$S_2P - S_1P = \Delta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \cong asin\alpha \quad (2.2)$$

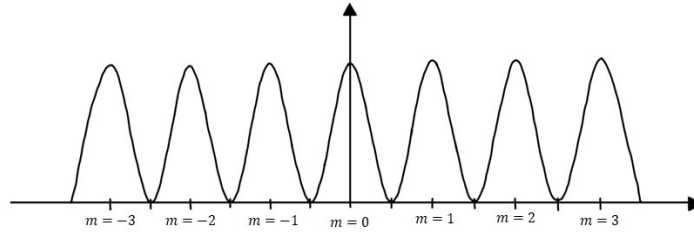
พิจารณาที่จุด  $P$  อยู่ใกล้กับแกนเชิงแสงนั่นคือ  $y \ll L$  เราจะประมาณ  $sin\alpha \cong tan\alpha \cong \frac{y}{L}$  เนื่องจาก  $\alpha$  เป็นมุมเล็กๆจะได้ว่า

$$y_m = \left(\frac{L}{a}\right)m\lambda \quad (2.3)$$

ระยะห่างระหว่างแถบสว่างที่อยู่ติดกันแทนด้วย  $\Delta y$  หาได้จาก

$$\Delta y = \frac{\lambda L}{a} \quad (2.4)$$

โดยแถบมืดจะอยู่กึ่งกลางระหว่างแถบสว่าง ดังแสดงรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความเข้มของลวดลายการแทรกสอดของช่องเล็กยาวคู่

จากสมการ (2.1) เป็นสมการที่แสดงจุดกึ่งกลางของแถบสว่าง โดยมีความเข้มแสงสูงสุดเมื่อ

$$a \frac{\sin \alpha}{\lambda} = m \quad (2.5)$$

จากสมการ (2.2) เป็นสมการที่แสดงจุดกึ่งกลางของแถบมืด และมีความเข้มแสงต่ำสุดเมื่อ

$$\left( \frac{a \sin \alpha}{\lambda^2} - \frac{1}{2} \right) \lambda = m \quad (2.6)$$

### 2.1.3 การกระจายความเข้มแสง

การแทรกสอดของคลื่นระนาบ  $E_1$  และ  $E_2$  ที่มีความถี่เท่ากัน โดยพิจารณาจากสมบัติเชิงเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้า ดังนั้นสมการของคลื่นสองขบวนจะได้เป็น

$$E_1 = E_{01} \cos(k_1 \cdot i - \omega t + \phi_1) \quad (2.7)$$

$$E_2 = E_{02} \cos(k_2 \cdot i - \omega t + \phi_2) \quad (2.8)$$

เมื่อ  $k_1$  และ  $k_2$  คือ เวกเตอร์คลื่น

$i$  คือ เวกเตอร์ตำแหน่งของจุดใด ๆ ในสนามไฟฟ้า

$\omega$  คือ ความถี่เชิงมุม

$\phi_1$  และ  $\phi_2$  คือ เฟสเริ่มต้นของคลื่นจากแหล่งกำเนิด

$$E_1 = E_{01} \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} \cdot i \cdot S_1 P - \omega t \right) \quad (2.9)$$

$$E_2 = E_{02} \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} \cdot i \cdot S_2 P - \omega t \right) \quad (2.10)$$

เมื่อคลื่นสองขบวนพบกันที่จุด  $P$  เกิดการซ้อนทับกัน ซึ่งเป็นไปตามหลักการซ้อนทับของคลื่น ดังนั้น สนามไฟฟ้าที่จุด  $P$  จะได้เป็น

$$E_p = E_1 + E_2 \quad (2.11)$$

$$E_p = \left[ E_{01} \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} \cdot i \cdot S_1 P - \omega t \right) + E_{02} \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} \cdot i \cdot S_2 P - \omega t \right) \right] \quad (2.12)$$

พิจารณาค่าความเข้มของแสงที่จุด  $P$  จะได้

$$I = \varepsilon_0 c \langle E_p^2 \rangle \quad (2.13)$$

$$I = \varepsilon_0 c \langle E_p \cdot E_p \rangle \quad (2.14)$$

$$I = \varepsilon_0 c \langle (E_1 + E_2) \cdot (E_1 + E_2) \rangle \quad (2.15)$$

$$I = \varepsilon_0 c \langle E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 \cdot E_2 \rangle \quad (2.16)$$

$$I = \varepsilon_0 c \left[ E_{01}^2 \cos^2 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \cdot i \cdot S_1 P - \omega t \right) + E_{02}^2 \cos^2 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \cdot i \cdot S_2 P - \omega t \right) + E_{01} E_{02} \left\{ \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda} (S_2 P - S_1 P) \right] + \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda} (S_2 P - S_1 P) \right] \right\} \right] \quad (2.17)$$

จากสมการ (2.14) เมื่อสมการ (2.16) ให้เทอมที่หนึ่งและเทอมที่สองเป็นความเข้มแสงของคลื่น  $I_1$  และ  $I_2$  และเทอมสุดท้ายเป็นการแทรกสอด  $I_{12}$  ดังนั้นจะได้เป็น

$$I = I_1 + I_2 + I_{12} \quad (2.18)$$

พิจารณาเทอมการแทรกสอดได้เป็น

$$I_{12} = 2\varepsilon_0 c \langle E_1 \cdot E_2 \rangle \quad (2.19)$$

เมื่อ

$$E_1 \cdot E_2 = E_{01} \cdot E_{02} \cos(k_1 \cdot i - \omega t + \phi_1) \cos(k_2 \cdot i - \omega t + \phi_2) \quad (2.20)$$

กำหนดให้  $\gamma = k_1 \cdot i + \phi_1$  และ  $\beta = k_2 \cdot i + \phi_2$  จะได้

$$E_1 \cdot E_2 = E_{01} \cdot E_{02} \cos(\gamma - \omega t) \cos(\beta - \omega t) \quad (2.21)$$

พิจารณาการกระจายเทอมของโคไซน์ในสมการ (2.22) จะได้

$$E_1 \cdot E_2 = E_{01} \cdot E_{02} [\cos \gamma \cos \beta \cos^2 \omega t + \sin \gamma \sin \beta \sin^2 \omega t + (\cos \gamma \sin \beta + \sin \gamma \cos \beta) (\sin \omega t \cos \omega t)] \quad (2.22)$$

เนื่องจากค่ากำลังสองเฉลี่ยของฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ คือ

$$\langle \cos^2 \omega t \rangle = \langle \sin^2 \omega t \rangle = \frac{1}{2} \quad (2.23)$$

และ

$$\langle \sin \omega t \cos \omega t \rangle = 0 \quad (2.24)$$

เนื่องจากเอกลักษณ์ตรีโกณมิติ  $\cos(\gamma - \beta) = \cos \gamma \cos \beta + \sin \gamma \sin \beta$  ดังนั้น

$$\langle E_1 \cdot E_2 \rangle = \frac{1}{2} E_{01} \cdot E_{02} \cos[(k_1 - k_2) \cdot i + (\phi_1 - \phi_2)] \quad (2.25)$$

ความต่างเฟสระหว่าง  $E_1$  และ  $E_2$  เป็นผลมาจากความยาววิถีเชิงแสงและความต่างของมุมเฟสเริ่มต้น  
จะได้เป็น

$$\delta = (k_1 - k_2) \cdot i + (\phi_1 - \phi_2) \quad (2.26)$$

จะได้เป็น

$$I_{12} = \epsilon_0 c E_{01} \cdot E_{02} \cos \delta \quad (2.27)$$

พิจารณาความเข้ม  $I_1$  และ  $I_2$  เขียนได้เป็น

$$I_1 = \frac{1}{2} \epsilon_0 c \langle E_{01}^2 \rangle \quad (2.28)$$

และ

$$I_2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 c \langle E_{02}^2 \rangle \quad (2.29)$$

พิจารณากรณีที่  $E_{01} \parallel E_{02}$  ผลคูณสเกลาร์ในสมการ (2.27) จะเท่ากับผลคูณของขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า จะได้

$$I_{12} = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (2.30)$$

จะได้เป็น

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (2.31)$$

ค่าความเข้มแสง  $I$  กับเฟส  $\delta$  เมื่อ  $\cos \delta = +1$  จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน มีค่าความเข้มมากที่สุด  
คือ

$$I_{max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (2.32)$$

เมื่อความต่างเฟส  $\delta = 2m\pi$  โดย  $m = 0, 1, 2, \dots$

และ เมื่อ  $\cos\delta = -1$  จะเกิดการแทรกสอดแบบหักล้าง มีค่าความเข้มน้อยที่สุด คือ

$$I_{min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (2.33)$$

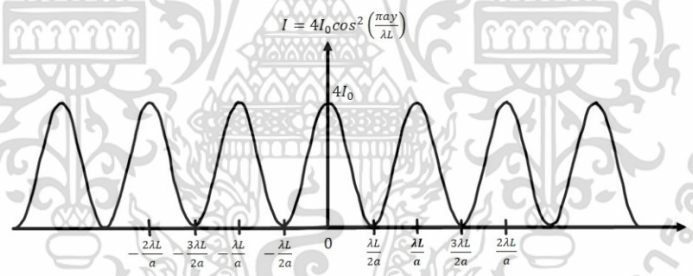
เมื่อความต่างเฟส  $\delta = (2m + 1)\pi$

การแทรกสอดแบบหักล้างอย่างสมบูรณ์จะเกิดขึ้นเมื่อ  $I_1 = I_2 = I_0$  จะได้กราฟแสดงดังรูปที่ 2.3 ค่าความเข้มมากที่สุดเป็น

$$I_{max} = 4I_0 \quad (2.34)$$

และค่าความเข้มน้อยที่สุดเป็น

$$I_{min} = 0 \quad (2.35)$$



รูปที่ 2.3 การทดลองของยังแสดงการกระจายความเข้มแสงของการแทรกสอด

ในกรณีของลำแสงที่เกิดการแทรกสอดกันมีแอมพลิจูดเท่ากัน ความเข้มจะได้เป็น

$$I = 2I_0(1 + \cos\delta) \quad (2.36)$$

ดังนั้น ความเข้มแสงของการแทรกสอด จะได้เป็น

$$I = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (2.37)$$

เมื่อ  $\alpha$  เป็นมุมเล็กๆ  $\frac{\delta}{2} = \frac{\pi a y}{\lambda L}$  จะได้

$$I = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\pi a y}{\lambda L}\right) \quad (2.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 เกรตติงเลี้ยวเบน [1]

เกรตติงเลี้ยวเบนหรือเกรตติง เป็นอุปกรณ์ทางแสงที่ใช้ในการตรวจสอบสเปกตรัมของแสง โดยอาศัยคุณสมบัติของแสงที่ตกกระทบมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะซ้ำ ๆ เสมอทำให้แสงที่ส่องผ่านหรือสะท้อนเกิดการเลี้ยวเบนแล้วไปแทรกสอดกัน เกรตติงชนิดพื้นฐานที่สุดประกอบด้วยแถบโปร่งแสงและทึบแสงสลับกันไปซึ่งมีความกว้างของแถบเท่ากันตลอด โดยทั่วไปเกรตติงมีจำนวนหลายพันช่องต่อเซนติเมตร

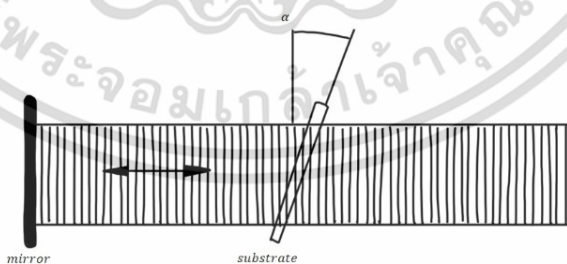
เกรตติงแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันตามลักษณะโครงสร้างของร่อง แสงที่กระเจิงประสิทธิภาพ และรูปร่างของวัสดุรองรับ คุณสมบัติดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับวิธีการสร้างเกรตติงสามารถแบ่งเป็นประเภทต่าง ๆ โดยจำแนกตามวิธีการสร้างได้เป็น 3 ประเภท คือ เกรตติงแบบขีด เกรตติงถอดแบบ และโฮโลกราฟฟิกเกรตติง โดยในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาโฮโลกราฟฟิกเกรตติง

### 2.2.1 โฮโลกราฟฟิกเกรตติง

โฮโลกราฟฟิกเกรตติง เป็นเกรตติงที่ถูกสร้างขึ้นโดยการอาศัยหลักการแทรกสอดของแสงเอกรงค์จากแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ และทำการบันทึกผลของการแทรกสอดลงบนแผ่นโฟโตรีซิสแถบสว่างเหมือนกับร่องเล็ก ๆ ที่แสงสามารถผ่านไปได้ และแถบมืดคือบริเวณที่แสงไม่สามารถผ่านไปได้ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

#### 1) การแทรกสอดของลำแสงเดียว

การแทรกสอดเกิดจากลำแสงอาพันธ์ของคลื่นระนาบ ซึ่งเป็นแสงเอกรงค์ให้ลำแสงขนานเคลื่อนเข้ามาผ่านแผ่นโปร่งใสซึ่งเป็นแผ่นโฟโตรีซิส และสะท้อนไปที่กระจกราบทำให้เกิดเป็นคลื่นนิ่ง ตัดกันเป็นรูปแบบความเข้มสูงสุด ระยะห่างระหว่างร่องของเกรตติง  $d$  ขึ้นอยู่กับมุม  $\alpha$  ระหว่างพื้นผิวของฐานกระจกและแผ่นโปร่งใสระนาบ



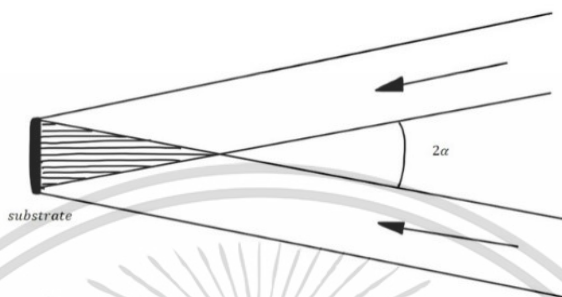
รูปที่ 2.4 การแทรกสอดของลำแสงเดียว

#### 2) การแทรกสอดของสองลำแสง

การแทรกสอดของสองลำแสงเกิดจากลำแสงอาพันธ์ของคลื่นระนาบสองลำแสงที่มีความยาวคลื่นเท่ากันมาตัดกันและทำมุมต่อกัน  $2\alpha$  ในแนวระนาบ การแทรกสอดของลำแสงที่หนึ่งกับลำแสงที่สองจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

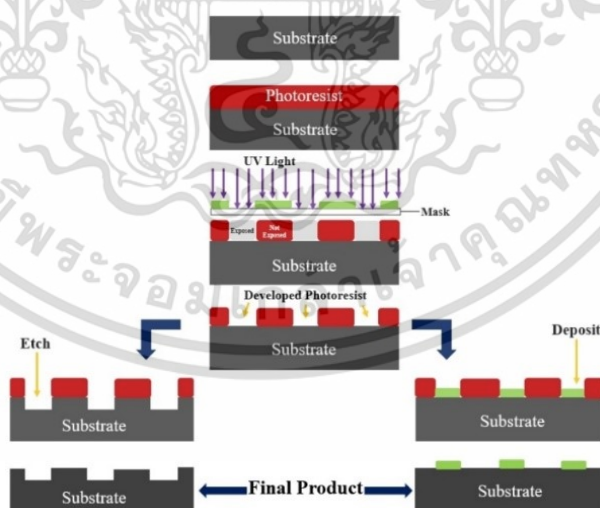
เสริมกันหรือหักล้างกันขึ้นอยู่กับผลต่างของทางเดินแสง การแทรกสอดแบบเสริมกันจะเกิดขึ้นเมื่อผลต่างของทางเดินแสงเป็นเลขจำนวนเต็มเท่าของความยาวคลื่นได้เป็นแถบสว่าง และการแทรกสอดแบบหักล้างกันจะเกิดขึ้น เมื่อผลต่างของทางเดินแสงเป็นจำนวนครึ่งหนึ่งของจำนวนเต็มเท่าของความยาวคลื่น ได้เป็นแถบมืด



รูปที่ 2.5 การแทรกสอดของสองลำแสง

### 2.3 โฟโตลิโทกราฟี [14]

โฟโตลิโทกราฟีเรียกอีกอย่างว่าการพิมพ์ด้วยแสง เป็นกระบวนการที่ใช้ในการผลิตไมโครเพื่อสร้างลวดลายขึ้นส่วนบนฟิล์มบางหรือวัสดุพิมพ์จำนวนมาก เรียกอีกอย่างว่าเวเฟอร์ ใช้แสงในการถ่ายโอนรูปแบบทางเรขาคณิตจากโฟโตมาสก์ จากนั้นจะสลักรูปแบบการเปิดรับแสงลงในวัสดุหรือทำให้เกิดการสะสมของวัสดุใหม่ในรูปแบบที่ต้องการบนวัสดุที่อยู่ใต้เครื่องรับแสงแสดงดังรูปที่ 2.6 ในวงจรรวมที่ซับซ้อนเวเฟอร์ CMOS อาจผ่านวงจรโฟโตลิโทกราฟีได้มากถึง 50 ครั้ง



รูปที่ 2.6 ขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

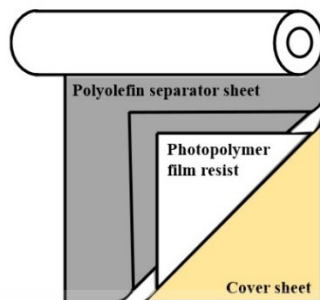
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 โฟโตรีซิส [15]

โฟโตรีซิส เป็นวัสดุไวแสงที่ใช้ในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์เพื่อสร้างการเคลือบที่มีลวดลายบนพื้นผิวของวัสดุฐาน รูปแบบจะถูกถ่ายโอนจากโฟโตมาสก์ไปยังเวเฟอร์โดยใช้กระบวนการที่เรียกว่า โฟโตลิโทกราฟี ในขั้นตอนนี้โฟโตรีซิสจะเคลือบแผ่นเวเฟอร์ และเปิดรับแสงผ่านหน้ากากลไกิริยาโฟโตเคมีเกิดขึ้นในบริเวณที่ถูกเปิดของตัวต้านทาน ซึ่งจากนั้นจะละลายได้ง่ายในสารละลายสำหรับการพัฒนา รูปแบบการต้านทานขึ้นอยู่กับรูปแบบโฟโตมาสก์และข้อของความต้านทาน โฟโตรีซิสเชิงลบตอบสนองต่อแสงในลักษณะที่ทำให้บริเวณที่เปิดรับแสงละลายเร็วขึ้นในระหว่างกระบวนการพัฒนา กล่าวอีกนัยหนึ่งคือพื้นที่ที่ถูกปิดจะยังคงไม่เปลี่ยนแปลง โฟโตรีซิสเชิงลบตอบสนองต่อแสงในลักษณะตรงกันข้ามโดยที่บริเวณที่ไม่ได้รับแสงของตัวต้านทานจะละลายในสารละลายของขั้นตอนการพัฒนา ขณะที่บริเวณที่เปิดรับแสงจะยังคงสภาพ [16]

### 2.4.1 โฟโตรีซิสแบบฟิล์มแข็ง

ความต้านทานฟิล์มแข็งได้รับการพัฒนาขึ้นเมื่อ 30 ปีที่แล้วสำหรับการผลิตแผงวงจรพิมพ์ แม้ว่าการใช้งานสำหรับการผลิตระบบเครื่องกลไฟฟ้าขนาดเล็กเป็นเรื่องผิดปกติ แต่มีรายงานว่าโฟโตรีซิสแบบฟิล์มแข็งมีประโยชน์สำหรับการผลิตแม่พิมพ์ชุบด้วยไฟฟ้า สำหรับการปิดช่องของเหลว และใช้เป็นหน้ากากล้าสำหรับการพ่นสีฝุ่นของช่องไมโคร ในปัจจุบันโฟโตรีซิสแบบฟิล์มแข็งมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาอุปกรณ์ โดยทั่วไปโฟโตรีซิสแบบฟิล์มแข็งจะเป็นโครงสร้างสามชั้น ชั้นแรกเยื่อหุ้มฐานรองรับโพลีเอสเตอร์เป็นชั้นต้านทานซึ่งมีความหนาแตกต่างกันระหว่างประมาณ 15 ถึง 75 ไมโครเมตร ขึ้นอยู่กับการใช้งานที่ต้องการ ชั้นที่สองตัวต้านทานจะถูกเคลือบบนฐานรองรับโพลีเอสเตอร์จากสารละลายแล้วตากให้แห้ง และชั้นที่สามหุ้มด้วยพอลิเอทิลีน ก่อนที่จะม้วนฟิล์มแบบแข็งที่มีความยาวหลายร้อยเมตร โพลีเอทิลีนเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อป้องกันไม่ให้ตัวต้านทานเกาะติดกับโพลีเอสเตอร์ของหน้าตัดก่อนหน้าในระหว่างการม้วนตัว โฟโตรีซิสแบบแข็งใช้การเคลือบแบบแห้ง โดยที่โฟโตรีซิสจะถูกฉีดอย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นผิวของแผ่นเวเฟอร์ด้วยระดับความดันและอุณหภูมิที่ควบคุมได้แสดงดังรูปที่ 2.7 ในระหว่างการเคลือบโพลีเอทิลีนจะถูกกลบออกก่อนในขณะที่ตัวต้านทานยังคงอยู่ที่ส่วนรองรับโพลีเอสเตอร์ หลังจากการเคลือบและการเปิดรับแสงแล้ว โพลีเอสเตอร์จะต้องลอกออกโดยไม่ทำให้ตัวต้านทานหลุดออกจากพื้นผิว กระบวนการเคลือบม้วนร้อน มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างการสัมผัสที่แห้งสนิทระหว่างพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์และโฟโตพอลิเมอร์ การยึดเกาะโดยปกติไม่มีปัญหาเกี่ยวกับฟิล์มไวแสงชนิดแห้ง

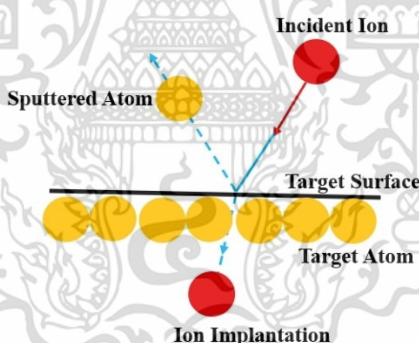


รูปที่ 2.7 โครงสร้างโฟโตรีซิสแบบฟิล์มแห้ง

## 2.5 การสปัตเตอริง

วิธีการเคลือบฟิล์มบางมีด้วยกันอยู่หลายวิธีการ โดยหนึ่งในวิธีการที่น่าสนใจคือ วิธีการสปัตเตอริง เป็นวิธีการทางด้านฟิสิกส์ที่มีความสำคัญมากวิธีการหนึ่งในการเคลือบฟิล์มบางภายใต้ระบบสุญญากาศ ซึ่งเป็นวิธีการที่อาศัยหลักการพื้นฐานทางด้านฟิสิกส์ของพลาสมา โดยเป็นการปลูกฟิล์มที่เป็นโลหะวัสดุสารกึ่งตัวนำหรือฉนวนก็ได้

### 2.5.1. หลักการเบื้องต้นทางฟิสิกส์ของสปัตเตอริง



รูปที่ 2.8 การเกิดสปัตเตอริงที่ผิวเป้า

อนุภาคที่วิ่งเข้าชนเป้าซึ่งเป็นสารเคลือบอาจเป็นกลางทางไฟฟ้า เช่น นิวตรอนหรือมีประจุไฟฟ้า อิเล็กตรอนหรือไอออนก็ได้แต่ต้องมีพลังงานสูง การทำให้อนุภาคประจุไฟฟ้ามีพลังงานสูงนั้นง่ายกว่าอนุภาคที่เป็นกลางไฟฟ้า อิเล็กตรอนก็มีมวลน้อยเกินไปจึงไม่มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทโมเมนตัม ดังนั้นโดยทั่วไปจะใช้ไอออนเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงตามที่ต้องการ ซึ่งการชนของไอออนกับอะตอมของสารเคลือบคิดตามหลักการคงที่ของโมเมนตัม อนุภาคประจุไฟฟ้าพลังงานสูงต้องผลิตอย่างต่อเนื่องขณะเคลือบฟิล์มบางเพื่อให้การเคลือบฟิล์มบางเป็นไปอย่างสม่ำเสมอและมีความหนาตามต้องการ

อนุภาคดังกล่าวอาจมาจากปิ่นไอออน แต่มีราคาค่อนข้างสูง หรือจากขบวนการโกลว์ ดิสชาร์จ (glow discharge) ซึ่งนิยมใช้ในทางอุตสาหกรรม

### 2.5.2. ดีซีหรืออาร์เอฟสปัตเตอริง [19]

องค์ประกอบของระบบคือ คู่ขั้วไฟฟ้า โดยขั้วไฟฟ้าหนึ่งจะเป็นขั้วแคโทดและอีกขั้วหนึ่งจะเป็นแอโนด โดยขั้วแคโทดจะอยู่หลังเป้า ส่วนขั้วแอโนดจะอยู่กับผิวรองรับซึ่งได้ผิวรองรับจะมีอุปกรณ์ทำความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับผิวรองรับในขณะที่เคลือบฟิล์ม ในการเคลือบก่อนอื่นจะต้องทำการดูดอากาศออกจากห้องเคลือบเพื่อทำให้เป็นห้องสุญญากาศนั้นได้ความดันที่ต้องการ อยู่ในช่วง  $10^{-5}$ -  $10^{-6}$  Tor จากนั้นทำการปรับแรงดันระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนด แล้วทำการปรับความดันของก๊าซเฉื่อย มักใช้ก๊าซอาร์กอนเพราะเป็นธาตุที่มีน้ำหนักอะตอมมาก จึงเหมาะกับการใช้ระดมยิงเป้า จากนั้นก๊าซอาร์กอนจะแตกตัวเป็นไอออนบวกพุ่งชนเป้าเนื่องจากสนามไฟฟ้ามีค่าสูงที่กระทำต่อเป้าเป็นผลให้อะตอมของเป้าหลุดเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิไปสู่ชิ้นงาน และก่อตัวเป็นฟิล์มบางบนชิ้นงาน ในระบบดีซีสปัตเตอริง เป้าที่ใช้จะต้องเป็นโลหะเนื่องจากการไหลของกระแสจะต้องอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้า ส่วนเป้าที่ใช้เป็นฉนวนในระบบดีซีสปัตเตอริงการไหลของกระแสจะไม่สามารถควบคุมได้เนื่องจากเกิดการสร้างประจุบวกบริเวณหน้าเป้าฉนวน ดังนั้นจึงต้องใช้แหล่งกำเนิดอาร์เอฟกับเป้าที่เป็นฉนวน

### 2.5.3. แมกนีตรอนสปัตเตอริง [19]

แมกนีตรอนสปัตเตอริง เป็นการนำแม่เหล็กถาวรหรือขดลวดมาเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไว้หลังเป้าทำให้สนามแม่เหล็กขนานกับหน้าเป้า เมื่อทำการสปัตเตอริง สนามไฟฟ้าเร่งอิเล็กตรอนให้เข้าชนอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปัตเตอริงให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวก โดยไอออนบวกจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมที่ผิวเป้าให้หลุดออกมา และมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมา ภายหลังจากการชนของไอออนบวกที่ผิวเป้า ดังนั้นถ้าสามารถกักเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่หน้าผิวเป้า และเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้เพิ่มขึ้นก็จะเป็นการเพิ่มโอกาสในการชนกับอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปัตเตอริงให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกมากขึ้น และถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่เข้าชนเป้ามามากขึ้น ผลคือทำให้อัตราการสปัตเตอริงสูงขึ้น ทั้งนี้การกักเก็บอิเล็กตรอน และการเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้เพิ่มขึ้นนั้นสามารถทำได้โดยการป้อนสนามแม่เหล็กในทิศทางที่เหมาะสมให้กับระบบ

## 2.6 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบของฟิล์มบาง

ในงานวิจัยครั้งนี้มีการใช้เทคนิคการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของฟิล์มบาง คือกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

### 2.6.1 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

เป็นกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงรูปแบบหนึ่งที่ใช้แสงเป็นตัวช่วยในการทำให้มองเห็นภาพ โดยแสงจะวิ่งผ่านระบบเลนส์ต่างๆ ประกอบด้วยเลนส์ 2 ชุด ได้แก่ เลนส์ใกล้วัตถุ และเลนส์ใกล้ตา กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงจะมีกระจกเงา 2 ด้าน เพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสง ช่วยรวบรวมแสงให้สะท้อนเข้าที่ตรงกลางของแท่นวางวัตถุ กล้องรุ่นใหม่หรือกล้องในปัจจุบันใช้หลอดไฟแทนกระจกเงาบางรุ่นมีเลนส์รวมแสงเพื่อปรับความเข้มของแสง และคัดเลือกแสงที่มีคุณภาพทำให้มองเห็นวัตถุได้ชัดเจนขึ้น

### 2.6.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

หลักการพื้นฐานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะขึ้นอยู่กับปริมาณของพลังงานจลน์ และพลังงานนี้จะกระจายออกเป็นสัญญาณที่แตกต่างกัน หลังจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับตัวอย่าง เมื่ออิเล็กตรอนตกกระทบตัวอย่างจะกระจายพลังงานสู่ตัวอย่าง โดยสัญญาณที่ได้จะประกอบไปด้วยอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดจากกระบวนการซึ่งจะใช้ในเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด อิเล็กตรอนที่สะท้อนกลับจากปฏิกิริยา การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนที่สะท้อนกลับจากปฏิกิริยา พลังงานแสงรังสีเอ็กซ์ แสงในย่านตามองเห็น ซึ่งจะถูกใช้วิเคราะห์การวางแสงและความร้อน โดยภาพของผลที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเกิดจากการวิเคราะห์อิเล็กตรอนทุติยภูมิและอิเล็กตรอนที่สะท้อนกลับจากปฏิกิริยา โดยสัญญาณที่ได้ส่วนมากนั้นมาจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ซึ่งจะแสดงถึงลักษณะทางสัณฐานวิทยาและสภาพของพื้นผิวตัวอย่าง ส่วนสัญญาณที่มาจากอิเล็กตรอนที่สะท้อนกลับจากปฏิกิริยาจะแสดงถึงความแตกต่างขององค์ประกอบ การเรียงตัวและการบิดตัวของโครงสร้างที่หลากหลายในตัวอย่าง รังสีเอ็กซ์ที่เกิดขึ้นมาจากปฏิกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนที่เกิดจากการชนกันของอิเล็กตรอนทำให้เกิดพลังงานและการคายพลังงานของอิเล็กตรอนผ่านชั้นพลังงานที่มีค่าไม่ต่อเนื่องนั้น ทำให้เกิดพลังงานในรูปรังสีเกิดเป็นรังสีเอ็กซ์ โดยมีค่าความยาวคลื่นที่คงที่แน่นอน ด้วยเหตุนี้จึงสรุปได้ว่า เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นเทคนิคการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย และตัวอย่างยังสามารถนำไปใช้ซ้ำได้อีกด้วย

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 ในปี ค.ศ. 2013 Shaoxiang Li และ Zhenwei Wang ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสร้างโฮโลกราฟีเฟกเรตติงโดยใช้วิธีการโฟโตลิโทกราฟีฟิล์มบนวัสดุรองรับแก้ว เคลือบด้วยชั้นโครเมียมและสารไวแสง ตามลำดับ ซึ่งรูปแบบหน้ากากของเกรตติงได้สร้างจากคอมพิวเตอร์ จากการทดลองพบว่าโฮโลกราฟีเฟกที่สร้างขึ้น มีความหนาแน่นของร่องประมาณ 100 เส้นต่อมิลลิเมตร ร่องมีความละเอียดสูงและเรียบ [6]

2.7.2 ในปี ค.ศ. 2015 Yuhan Yao และคณะ ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสร้างเกรตติงโดยใช้วิธีการนาโนอิมพริ้นลิโทกราฟีฟิล์มบนวัสดุรองรับซิลิกอน เคลือบด้วยชั้นโครเมียมและสารไวแสง ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าเกรตติงที่สร้างขึ้น มีคาบเกรตติง 300 นาโนเมตร สามารถปรับความกว้างของเส้นเกรตติงได้ และลดความหยابของผิวเกรตติงได้ โดยการควบคุมเวลาในการกีดสารเคมีซึ่งสามารถให้ผลการปรับแต่งรูปแบบเกรตติงที่รวดเร็วและแม่นยำ [8]

2.7.3 ในปี ค.ศ. 2008 Yung-Pin Chen และคณะได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสร้างเกรตติงบนแผ่นเวเฟอร์ซิลิกอนที่เคลือบด้วยสารไวแสงโดยใช้วิธีการนาโนอิมพริ้นลิโทกราฟี จากการทดลองพบว่าเกรตติงที่สร้างขึ้นสามารถโค้งงอได้ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพื้นที่ของเกรตติงเป็น 20 มิลลิเมตร และมีคาบเกรตติง 1.2 ไมครอน [9]

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการสร้างโฮโลกราฟีเฟกเรตติง

No.	Research group	Fabrication	Technique	Grating period
1	Shaoxiang Li. et al. (2013)	Holographic grating	Photolithography	10 $\mu\text{m}$
2	Yuhan Yao. et al. (2015)	Periodical grating	Nanoimprint lithography	300 nm
3	Yung-Pin Chen. et al. (2008)	Concave grating	Nanoimprint lithography	1.2 $\mu\text{m}$

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการออกแบบ สร้าง และทดสอบสมบัติทางแสงของโฮโลกราฟฟิกเกรตติงแบบฟิล์มบางไวแสงชนิดแห้ง โดยงานวิจัยนี้ได้มีการแบ่งขั้นตอนการทำงานออกเป็นหกส่วน ดังนี้ ส่วนที่หนึ่งคือ การออกแบบรูปแบบการแทรกสอดของหน้ากากด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้การแทรกสอดของคลื่นระนาบสองลำด้วยมุมแทรกสอดต่าง ๆ เพื่อให้ได้หน้ากากที่มีความกว้างหรือคาบของเกรตติงที่มีความแตกต่างกันตามมุมแทรกสอดต่าง ๆ หน้ากากจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างด้วยคอมพิวเตอร์นี้จะถูกพิมพ์ลงบนแผ่นฟิล์มพลาสติก ซึ่งนั่นก็คือหน้ากากโฮโลกราฟฟิกเกรตติง ส่วนที่สองคือ การถ่ายโอนรูปแบบหน้ากากลงบนฟิล์มบางไวแสงชนิดแห้งด้วยวิธีการพิมพ์ด้วยแสง เราจะใช้ฟิล์มใสโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลตเป็นวัสดุฐานรองรับและเคลือบด้วยฟิล์มไวแสงชนิดแห้ง จากนั้นหน้ากากโฮโลกราฟฟิกเกรตติงจะถูกวางติดอยู่บนฟิล์มไวแสงชนิดแห้ง เมื่อถูกส่องสว่างด้วยแสงยูวี รูปแบบการแทรกสอดที่อยู่บนหน้ากากจะถูกถ่ายโอนลงบนฟิล์มไวแสงชนิดแห้งทำให้เกิดเป็นเนกาทีฟเกรตติงปรากฏอยู่บนฟิล์มไวแสงชนิดแห้ง ส่วนที่สามคือ ยืนยันคาบของเนกาทีฟเกรตติงที่อยู่บนฟิล์มบางไวแสงชนิดแห้งว่ามีขนาดถูกต้องสมบูรณ์หรือไม่ โดยการสังเกตด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ส่วนที่สี่คือการเคลือบโฮโลกราฟฟิกเกรตติงด้วยวิธีการอาร์เอฟแมกนีตรอนสเปตเตอริง เพื่อให้ได้โฮโลกราฟฟิกเกรตติงที่ติดทนอยู่บนฟิล์มบาง สารโลหะที่ใช้ในการเคลือบคือ วาเนเดียม 99.5% ด้วยกำลังของแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ 100 วัตต์ และระยะเวลาในการเคลือบฟิล์มคือ 30 นาที ส่วนที่ห้าคือ ยืนยันคาบของโฮโลกราฟฟิกเกรตติงหลังจากถูกเคลือบด้วยสารโลหะวาเนเดียมว่ามีขนาดถูกต้องสมบูรณ์หรือไม่ โดยการสังเกตด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สุดท้ายส่วนที่หกคือ การวัดคาบของโฮโลกราฟฟิกเกรตติงและวิเคราะห์สมบัติการเลี้ยวเบนของแสงผ่านโฮโลกราฟฟิกเกรตติงด้วยวิธีการฉายแสงเลเซอร์ เมื่อฉายแสงเลเซอร์ผ่านโฮโลกราฟฟิกเกรตติงจะปรากฏรูปแบบการเลี้ยวเบนของแสงบนฉาก คาบของโฮโลกราฟฟิกเกรตติงสามารถคำนวณได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของแสงอันดับที่หนึ่ง

วิธีการดำเนินงานวิจัยมีขั้นตอน ดังนี้

- 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย
- 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย
- 3.3 การวัดคาบของโฮโลกราฟฟิกเกรตติงและวิเคราะห์สมบัติการเลี้ยวเบนของแสงผ่านโฮโลกราฟฟิกเกรตติง

### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

#### 3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการสร้างโฮโลกราฟฟิเคเรตติงแบบฟิล์มบางไวแสงชนิดแห้ง ประกอบด้วย

1) ฟิล์มไวแสงชนิดแห้ง คือฟิล์มที่ไวต่อแสงยูวี ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการถ่ายแบบลวดลายลงบนวัสดุฐานรองรับ เมื่อทำการฉายแสงยูวีลงบนฟิล์มไวแสงชนิดแห้งนี้จะทำให้ส่วนที่สัมผัสกับแสงยูวีมีความเหนียวติดไปกับผิวหน้าของวัสดุฐานรองรับ

2) ฟิล์มใสโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET film) ใช้สำหรับเป็นวัสดุฐานรองในกระบวนการพิมพ์แสง ฟิล์มมีลักษณะพื้นผิวเรียบ มีความใส ทนทานต่อการฉีกขาดหรือการกัดกร่อนแตก รักษารูปทรงได้ดีในอุณหภูมิระดับต่าง ๆ ทนความร้อนสูง ทนทานต่อความชื้น ทนสารเคมีและตัวทำละลายได้หลากหลายประเภท และสามารถป้องกันการซึมผ่านของก๊าซต่าง ๆ ได้ดี

3) หลอดไฟแสงยูวี 10 วัตต์ ทำหน้าที่ในการผลิตแสงยูวีหรือแสงอัลตราไวโอเล็ตในการสร้างปฏิกิริยากับแผ่นฟิล์มไวแสง

4) โซเดียมคาร์บอเนต ใช้สำหรับกระบวนการสร้างภาพและคงสภาพภาพบนแผ่นฟิล์มหลังจากการฉายแสง

5) ถาดพลาสติก ใช้สำหรับใส่น้ำยาเพื่อล้างฟิล์ม

6) ที่คีบ เป็นอุปกรณ์ใช้จับแผ่นฟิล์มระหว่างทำการล้างฟิล์ม



(ก)



(ข)



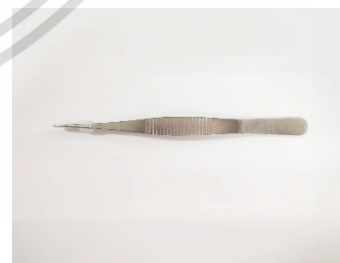
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการสร้างเกรตติง (ก) ฟิล์มไวแสงชนิดแห้ง (ข) ฟิล์ม PET (ค) หลอดไฟแสงยูวี (ง) โซเดียมคาร์บอเนต (จ) ถาดพลาสติก (ฉ) ที่คีบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในเคลือบโฮโลกราฟฟิกเกรดติงโดยวิธีการอาร์เอฟแมกนีตรอน สปีดเตอริง ประกอบด้วย

- 1) โฮโลกราฟฟิกเกรดติงที่สร้างขึ้นด้วยวิธีการพิมพ์แสง
- 2) อะซีโตน ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ )
- 3) เมทานอล ( $\text{CH}_3\text{OH}$ )
- 4) น้ำปลอดประจุ (DI water)
- 5) อ่างอัลตราโซนิก
- 6) ถังมือยาง
- 7) ผ้าสำหรับเช็ดทำความสะอาด
- 8) อะลูมิเนียมฟอยล์
- 9) เป้าวานเดียม 99.5%



รูปที่ 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการสร้างเกรตติง (ก) อะซีโตน (ข) เมทานอล (ค) น้ำปลอดประจุ (ง) อ่างอัลตราโซนิก (จ) ผ้าสำหรับเช็ดทำความสะอาด (ฉ) เป้าวานเดียม 99.5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยการออกแบบ สร้าง และทดสอบสมบัติทางแสงของโฮโลกราฟฟิกเกรตติงแบบฟิล์มบางไวแสงชนิดแห้งสามารถแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้

### 3.2.1 ออกแบบหน้ากากโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างด้วยคอมพิวเตอร์

ทำการออกแบบหน้ากากด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างด้วยคอมพิวเตอร์ รูปแบบการแทรกสอดของหน้ากากด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้การแทรกสอดของคลื่นระนาบสองลำด้วยมุมแทรกสอดต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การแทรกสอดของคลื่นระนาบสองลำที่มุมแทรกสอดต่าง ๆ

พิจารณารูปแบบการแทรกสอดของคลื่นระนาบสองคลื่นของไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ด้วยสนามไฟฟ้าทั้งสอง  $E_1$  และ  $E_2$  ซึ่งเป็นคลื่นระนาบที่แพร่กระจายไปตามทิศทาง  $z$  ที่ความถี่เดียวกัน [21] แทนด้วยสมการ (3.1) และ (3.2)

$$E_1 = E_0 \exp(ikz + 2ik\Delta d - \omega t) \quad (3.1)$$

$$E_2 = E_0 \exp(ikz \cos \theta + ikx \sin \theta - \omega t) \quad (3.2)$$

โดยที่  $k$  คือค่าคงตัวการแพร่กระจาย  $\Delta d$  คือระยะห่างระหว่างกระจกสองบาน  $\theta$  คือมุมแทรกสอดต่าง ๆ โดยที่มีมุมแทรกสอดเป็น  $0.80^\circ$ ,  $0.70^\circ$ ,  $0.60^\circ$ ,  $0.50^\circ$  และ  $0.45^\circ$  ซึ่งก็คือตัวอย่าง 1 ถึงตัวอย่างที่ 5 ตามลำดับ

รูปแบบการแทรกสอดของสนามไฟฟ้าทั้งสองที่จุด  $P$  กำหนดโดยหลักการซ้อนทับของคลื่น

$$E = E_1 + E_2 \quad (3.3)$$

แอมพลิจูดเชิงซ้อนแต่ละจุดของโฮโลแกรมคือ ผลรวมของแอมพลิจูดของคลื่นทั้งสอง

$$E = E_0 \exp(-i\omega t)[\exp(ikz + 2ik\Delta d) + \exp(ikz\cos\theta + ikx\sin\theta)] \quad (3.4)$$

$$E = E_0 \exp(-i\omega t)[\cos(kz + 2k\Delta d) + \cos(kz\cos\theta + kx\sin\theta)] + iE_0 \exp(-i\omega t)[\sin(kz + 2k\Delta d) + \sin(kz\cos\theta + kx\sin\theta)] \quad (3.5)$$

ดังนั้น ความเข้มแสงจะได้เป็น

$$I = (E_1 + E_2)^2 \quad (3.6)$$

$$I = (E_1)^2 + (E_2)^2 + E_1^*E_2 + E_1E_2^* \quad (3.7)$$

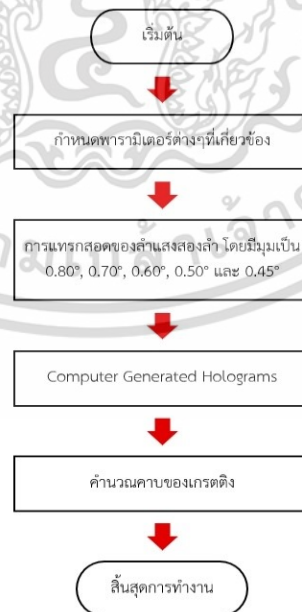
ในสมการ (3.7) เทอมที่หนึ่งและเทอมที่สองสอดคล้องกับค่าความเข้มที่เกี่ยวข้องกับฟังก์ชันแอมพลิจูดของคลื่นแต่ละคลื่น เทอมที่สามและเทอมที่สี่เรียกว่าเทอมการแทรกสอดหรือเทอมโฮโลแกรม ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความต่างของเฟสระหว่างคลื่นแต่ละคลื่น

$$I = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \quad (3.8)$$

ดังนั้น การกระจายความเข้ม สามารถเขียนได้เป็น

$$I = 4E_0^2 + \cos^2(kz\sin^2(\theta/2) + k\Delta d) - (kx/2)\sin\theta \quad (3.9)$$

ลำดับการทำงานของโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 3.4



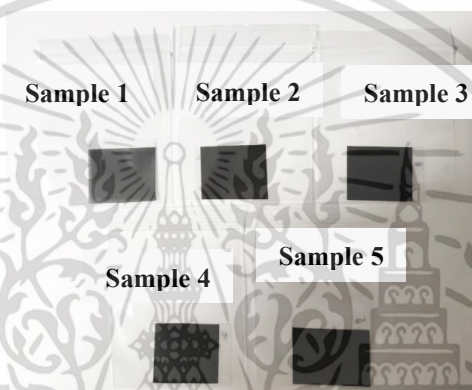
รูปที่ 3.4 แผนผังการทำงานของโปรแกรมในการจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยการแทรกสอดของลำแสงสองลำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การถ่ายโอนรูปแบบการแทรกสอดที่อยู่บนหน้ากากกลางบนฟิล์มบางไวแสงชนิดแห้งด้วยวิธีการพิมพ์ด้วยแสง สามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

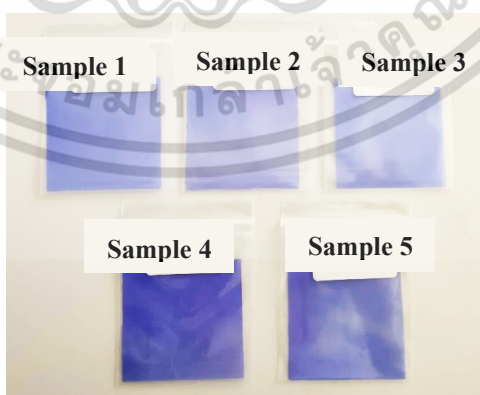
### 3.2.2.1 วิธีการพิมพ์ด้วยแสงในการถ่ายโอนรูปแบบการแทรกสอดที่อยู่บนหน้ากาก

1) พิมพ์รูปแบบการแทรกสอดของหน้ากากที่ออกแบบจากการจำลองทางคณิตศาสตร์ลงบนแผ่นฟิล์มพลาสติก โดยหน้ากากคือตัวอย่าง 1 ถึง 5 ที่มีมุมแทรกสอดต่าง ๆ ในการออกแบบเป็น  $0.80^\circ$ ,  $0.70^\circ$ ,  $0.60^\circ$ ,  $0.50^\circ$  และ  $0.45^\circ$  ตามลำดับ โดยที่ความคมชัดของรูปแบบรีวิการแทรกสอดนี้ขึ้นอยู่กับมุมการแทรกสอดและความละเอียดของเครื่องปริ้นเตอร์ และมีขนาด  $2 \times 2$  ตารางเซนติเมตร ดังรูปที่ 3.5



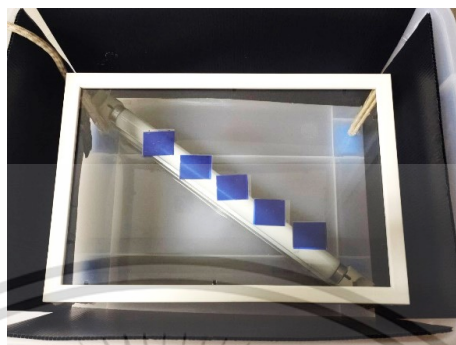
รูปที่ 3.5 หน้ากากโฮโลกราฟฟิกเกรดดี

2) ตัดแผ่นฟิล์มใสโพลีเอทิลีนเทรฟทาเลต ซึ่งใช้เป็นวัสดุฐานรองและแผ่นฟิล์มไวแสงชนิดแห้งให้มีขนาด  $2 \times 2$  ตารางเซนติเมตร เช่นเดียวกับแผ่นหน้ากากโฮโลกราฟฟิกเกรดดี โดยก่อนเคลื่อนให้ลอกพลาสติกชั้นแรกของฟิล์มไวแสงชนิดแห้งออก จึงค่อยทำการเคลื่อนด้วยเครื่องเคลื่อนให้ฟิล์มไวแสงชนิดแห้งติดไปกับแผ่นฟิล์มใส PET ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เคลือบฟิล์มไวแสงชนิดแห้งลงบนแผ่นฟิล์มใส PET

3) นำหน้ากากโฮโลกราฟฟิกเกรตติงไปประกบติดกับแผ่นฟิล์มไวแสงชนิดแห้ง ดังรูปที่ 3.7 จากนั้นทำการฉายแสงด้วยแสงยูวี ซึ่งระยะเวลาที่เหมาะสมในการสัมผัสแสงคือ 10 นาที ดังรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9

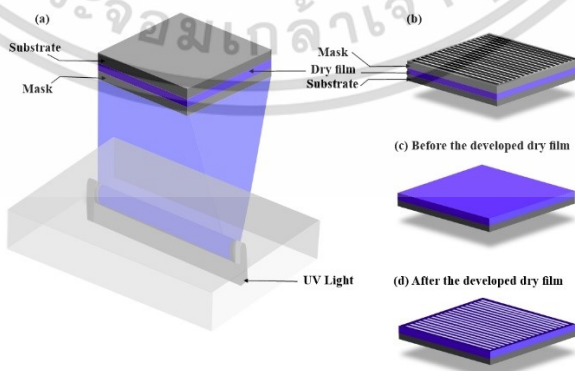


รูปที่ 3.7 การประกบแผ่นหน้ากากโฮโลกราฟฟิกเกรตติงกับแผ่นฟิล์มไวแสงชนิดแห้ง

- 4) รูปแบบการแทรกสอดที่อยู่บนหน้ากากจะถูกถ่ายโอนลงบนฟิล์มไวแสงชนิดแห้ง โดยบริเวณที่โดนแสงยูวีสัมผัสและไม่มีหน้ากากโฮโลกราฟฟิกเกรตติงบังไว้จะเกิดเป็นแถบมืดขึ้น
- 5) นำแผ่นฟิล์มไปเข้ากระบวนการทางเคมีในการตรึงและกัดส่วนเกินออกก็จะได้ในกาทิฟเกรตติง
- 6) ทำวิธีการ 2) – 5) ซ้ำกับแผ่นตัวอย่างที่ 2 – 5



รูปที่ 3.8 การฉายแสงด้วยยูวี

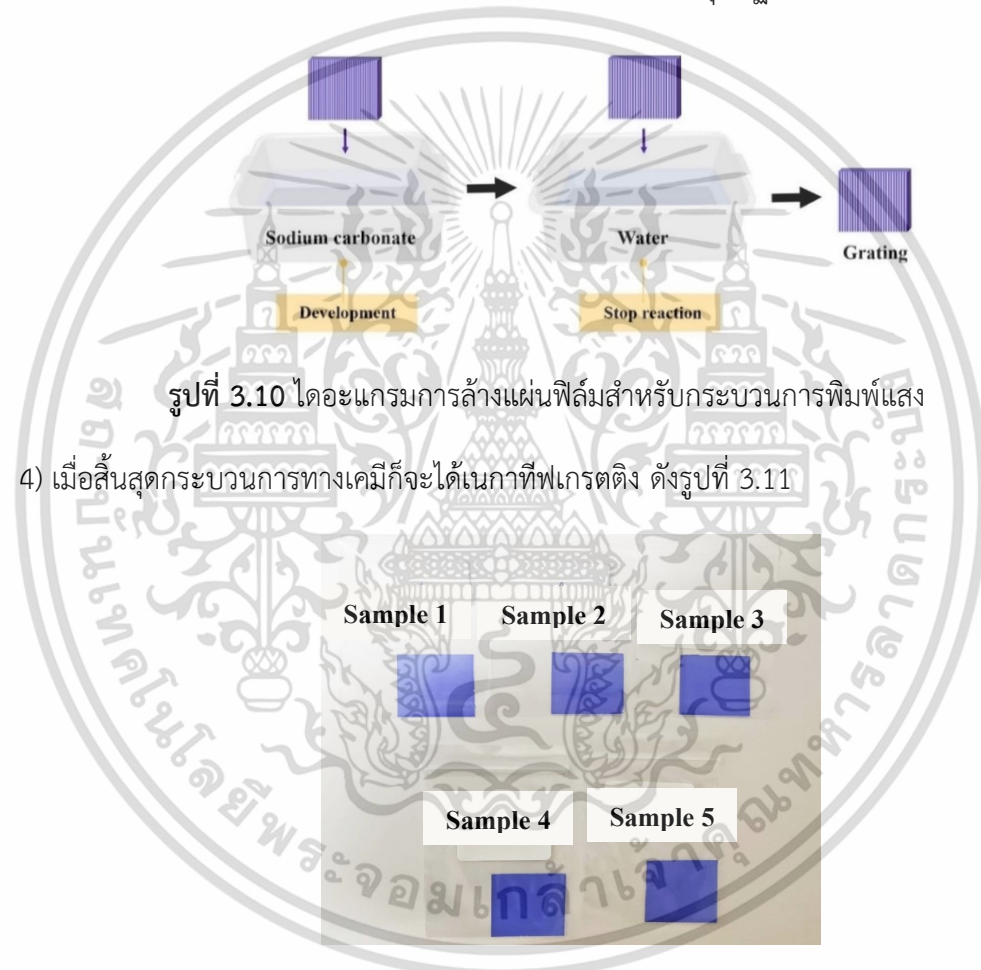


รูปที่ 3.9 ไดอะแกรมการตั้งค่าการทดลองสำหรับการสร้างโฮโลกราฟฟิกเกรตติงด้วยกระบวนการพิมพ์แสง

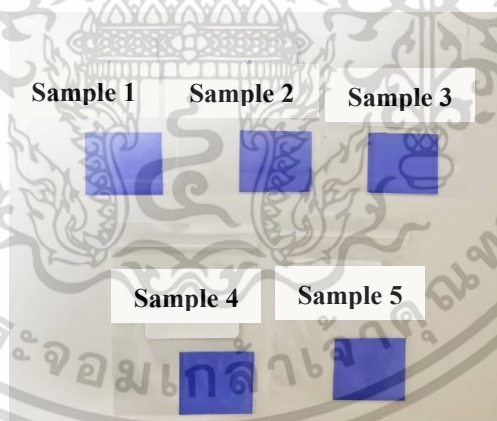
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2.2 การล้างแผ่นฟิล์มสำหรับกระบวนการพิมพ์แสง

- 1) นำแผ่นฟิล์มที่ถูกบันทึกแล้วด้วยแสงยูวีมาลอกพลาสติกชั้นแรกของฟิล์มไวแสงชนิดแห้งออก
- 2) ในกระบวนการสร้างภาพและคงสภาพภาพ แผ่นฟิล์มจะถูกแช่เรื่อยๆ ในโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความเข้มข้น 0.09 โมลาร์ เป็นเวลา 3 นาที จะสังเกตเห็นว่าบริเวณฟิล์มที่ไม่ถูกแสงสัมผัสจะถูกล้างออกไป ดังรูปที่ 3.10
- 3) จากนั้นนำแผ่นฟิล์มไปล้างน้ำสะอาดเป็นเวลา 2 นาที เพื่อหยุดปฏิกิริยาเคมี



- 4) เมื่อสิ้นสุดกระบวนการทางเคมีก็จะได้นอกที่ฟเกรดติง ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 เนกาทีฟเกรดติง

### 3.2.3 การยืนยันคาบของเนกาทีฟเกรดติงด้วยวิธีการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงมีกำลังขยาย 4 -100 เท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างพื้นผิวขนาดเล็กในระดับไมโครเมตรได้ นำเนกาทีฟเกรดติงไปส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงเป็นจำนวน 5 ตัวอย่าง การส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงมีจุดประสงค์เพื่อยืนยันคาบของเนกาทีฟเกรดติงที่อยู่บนฟิล์มไวแสงชนิดแห้งว่ามีขนาดถูกต้องสมบูรณ์หรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.4 การเคลือบไฮโดรกราฟฟิเคเรตติงด้วยวิธีการอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริง

เพื่อที่จะให้ได้ไฮโดรกราฟฟิเคเรตติงที่ติดคงทนอยู่บนฟิล์มโวลแสงชนิดแห้งจึงทำการเคลือบฟิล์มโวลแสงชนิดแห้งด้วยสารโลหะวานาเดียม ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1) การทำความสะอาดอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริง

1.1) ล้างทำความสะอาด ประแจหกเหลี่ยม สกรู น็อตต่างๆ ด้วยอะซิโตนในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นล้างด้วยเมทานอลในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 20 นาที และล้างด้วยน้ำปอดประจุในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 20 นาที

1.2) นำประแจหกเหลี่ยม สกรู น็อตต่าง ๆ ไปเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนความบริสุทธิ์สูง

1.3) ทำความสะอาดตัวคูลิ่ง และเปลี่ยนน้ำสะอาดใหม่

1.4) ถอดและทำความสะอาดตัวกรอง

1.5) นำเป่าวานาเดียมมาขัดให้สะอาดด้วยกระดาษทราย สังกะสีให้แน่ใจว่าไม่มีคราบใด ๆ ติดอยู่ที่เป่า

1.6) จากนั้นนำเป่าวานาเดียมไปล้างด้วยเมทานอลในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 20 นาที และล้างด้วยน้ำปอดประจุในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 20 นาที และพักไว้ให้แห้ง

2) การเตรียมระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริง

2.1) นำชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ติดตั้งอยู่ในแชมเบอร์สุญญากาศออกมาขัดทำความสะอาดคราบที่ติดอยู่ในระบบเพื่อป้องกันการปนเปื้อนสารต่าง ๆ ที่ปนอยู่ในระบบ

2.2) ห่ออุปกรณ์ทุกชิ้นด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ทำความสะอาดและห่ออลูมิเนียมฟอยล์กับชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ติดตั้งอยู่ในแชมเบอร์สุญญากาศ

2.3) เช็ดทำความสะอาดแชมเบอร์สุญญากาศด้วยผ้าไร้ฝุ่นชุบด้วยอะซิโตน และเช็ดด้วยเมทานอลอีกครั้งเพื่อขจัดคราบที่อาจติดอยู่ตามผนังแชมเบอร์

2.4) หุ้มแชมเบอร์สุญญากาศด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์ เพื่อป้องกันไม่ให้สารไปติดตามผนังแชมเบอร์โดยตรง

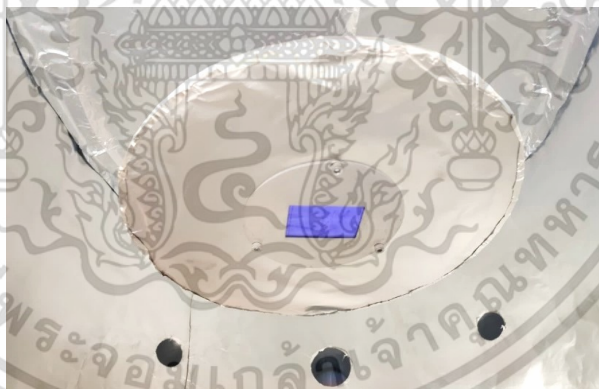
2.5) ติดตั้งอุปกรณ์เข้าไปในแชมเบอร์สุญญากาศให้เรียบร้อย ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ติดตั้งอยู่ในแชมเบอร์สุญญากาศ

3) การเคลือบไฮโดรกราฟฟิเคเรตติงด้วยวานเนเดียม

3.1) ติดตั้งแผ่นไฮโดรกราฟฟิเคเรตติงบนแผ่นยึดจับแผ่นฐานรอง ซึ่งอยู่ภายในแชมเบอร์สุญญากาศ ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ติดตั้งแผ่นไฮโดรกราฟฟิเคเรตติงบนแผ่นยึดจับแผ่นฐานรอง

3.2) ติดตั้งเป้าวานเนเดียม โดยระยะห่างระหว่างเป้าและground shield ห่างกัน 160 มิลลิเมตร ให้เท่ากันหมดทุกด้าน เพื่อป้องกันการช้อตกัน ดังรูปที่ 3.15

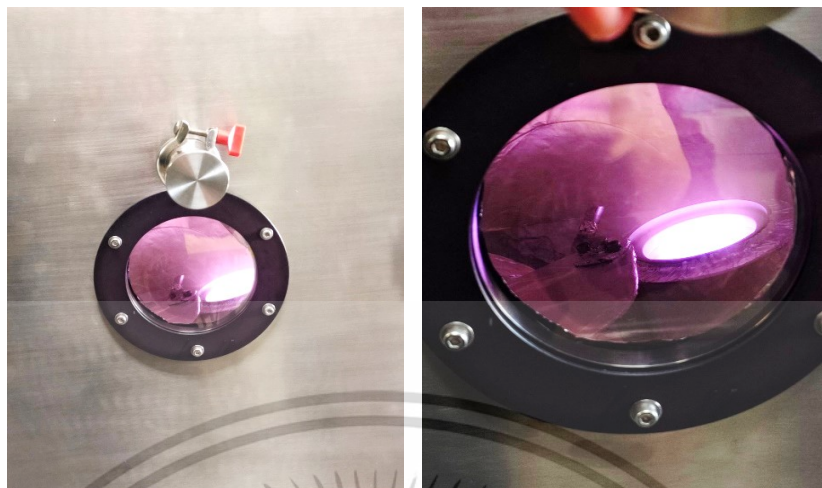


(ก)

(ข)

### รูปที่ 3.15 ติดตั้งเป่าวาเนเดียม

- 3.3) เปิดปั๊มสุญญากาศ ทำการลดความดันภายในระบบให้อยู่ในระดับ  $5 \times 10^{-6}$  มิลลิบาร์ เพื่อที่จะให้พร้อมสำหรับการเคลือบฟิล์มวาเนเดียม
- 3.4) เปิดเครื่องโรตารีปั๊ม เมื่อความดันตัวที่หนึ่งลดลง ให้ทำการหมุนวาล์วไปที่ roughing
- 3.5) เมื่อความดันตัวที่สองลดลงถึง  $3 \times 10^{-2}$  มิลลิบาร์ ให้หมุนวาล์วไปที่ blacking
- 3.6) จากนั้นเมื่อความดันตัวที่หนึ่งลดลงต่ำกว่า  $3 \times 10^{-2}$  มิลลิบาร์ ให้เปิดปั๊มน้ำหล่อเย็น รอจนถึงด้านล่างเย็น
- 3.7) เปิดตัวทำความร้อน รอ 20 นาที ขั้นตอนนี้อาจต้องอยู่ที่ blacking ตลอด
- 3.8) จากนั้นเมื่อความดันตัวที่หนึ่งสูงไม่เกิน  $3 \times 10^{-2}$  มิลลิบาร์ ให้เปลี่ยนวาล์วไปที่ roughing
- 3.9) รอจนกว่าความดันตัวที่สอง จะได้  $5 \times 10^{-2}$  มิลลิบาร์ ให้หมุนวาล์วไปที่ blacking เปิดวาล์ว butterfly และเปิดความดันช่องที่สาม รอจนกว่าจะได้  $1 \times 10^{-6}$  มิลลิบาร์
- 3.10) เปิดเครื่องป้อนก๊าซอาร์กอนที่มีความบริสุทธิ์สูงเข้าไปในระบบ 50 sccm รอ 20 นาที
- 3.11) เปิดเครื่องอาร์เอฟ และเปิดตัวคลูลิ่ง ทำการ pre-sputter 150 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที จะสังเกตเห็นว่าภายในแชมเบอร์จะเกิดแสงสีม่วง
- 3.12) ลดปริมาณการป้อนก๊าซอาร์กอน ลดก๊าซที่ละ 5 sccm ให้ลดลงเหลือ 25 sccm เริ่มขั้นตอนการเคลือบฟิล์ม เปิดตัวชัตเตอร์ เป็นเวลา 30 นาที ดังรูปที่ 3.16
- 3.13) เมื่อกระบวนการเคลือบเสร็จสิ้น ให้ทำการปิดเครื่องอาร์เอฟ ป้อนก๊าซอาร์กอน 20 sccm เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 3.14) จากนั้น ปิดวาล์ว butterfly และปิดเครื่องทำความร้อน



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.16 การเคลือบฟิล์ม

3.15) รอให้ความดันตัวที่สองเพิ่มขึ้นถึง  $1 \times 10^1$  มิลลิบาร์ ใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง

3.16) เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการทั้งหมดให้ปิดเครื่องได้ จะได้แผ่นโฮโลกราฟฟิกเกรตติงแบบฟิล์มไวแสงชนิดแห้งที่ถูกเคลือบด้วยสารโลหะวานเดียม แสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 โฮโลกราฟฟิกเกรตติงที่ได้รับการเคลือบด้วยสารโลหะวานเดียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขสำหรับการเคลือบโพลีกราฟฟิเคเรตติงด้วยสารโลหะวานเนเดียม

พารามิเตอร์	เงื่อนไข
เป่าสารเคลือบ	วานเนเดียม 99.5%
แผ่นรองรับ	แผ่นโพลีกราฟฟิเคเรตติง
ระยะห่างระหว่างเป่าสารเคลือบกับแผ่นรองรับ	160 มิลลิเมตร
ความดันก่อนทำการปลุก	$3.8 \times 10^{-6}$ มิลลิบาร์
ความดันก่อนเปิดแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ	$3.6 \times 10^{-3}$ มิลลิบาร์
กำลังของแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ	100 วัตต์
ความดันขณะทำการปลุกฟิล์ม	$3.5 \times 10^{-3}$ มิลลิบาร์
อัตราการไหลรวมของก๊าซ	25 sccm
ระยะเวลาที่ใช้ในการปลุกฟิล์ม	30 นาที

### 3.2.5 การยืนยันคาบของโพลีกราฟฟิเคเรตติงด้วยวิธีการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยาย 40 - 150,000 เท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างพื้นผิวขนาดเล็กในระดับไมโครเมตรได้ นำแผ่นโพลีกราฟฟิเคเรตติงไปสังเกตด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นจำนวน 5 ตัวอย่าง

การส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีจุดประสงค์เพื่อยืนยันคาบของโพลีกราฟฟิเคเรตติงหลังจากถูกเคลือบด้วยสารโลหะวานเนเดียมว่ามีขนาดถูกต้องสมบูรณ์หรือไม่

### 3.3 การวัดคาบของโพลีกราฟฟิเคเรตติงและวิเคราะห์สมบัติการเลี้ยวเบนของแสงผ่านโพลีกราฟฟิเคเรตติง

#### 3.3.1 การวัดคาบของโพลีกราฟฟิเคเรตติงด้วยวิธีการฉายแสงเลเซอร์

1) ฉายแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนผ่านโพลีกราฟฟิเคเรตติง โดยที่ระยะห่างระหว่างตำแหน่งของโพลีกราฟฟิเคเรตติงถึงฉากรับมีระยะเป็น 1 เมตร

2) เมื่อฉายแสงเลเซอร์ผ่านโฮโลกราฟีฟิเกรตติงจะปรากฏรูปแบบการเลี้ยวเบนของแสงบนฉากรับ ดังรูปที่ 3.18

3) วัดระยะห่างของแสงที่เกิดการเลี้ยวเบนในอันดับที่หนึ่งบนฉากรับซ้ายและขวา

4) คำนวณคาบของโฮโลกราฟีฟิเกรตติงจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของแสงอันดับที่หนึ่ง ดังสมการที่ 3.10

$$d = \frac{\lambda}{\sin\theta_m} \quad (3.10)$$

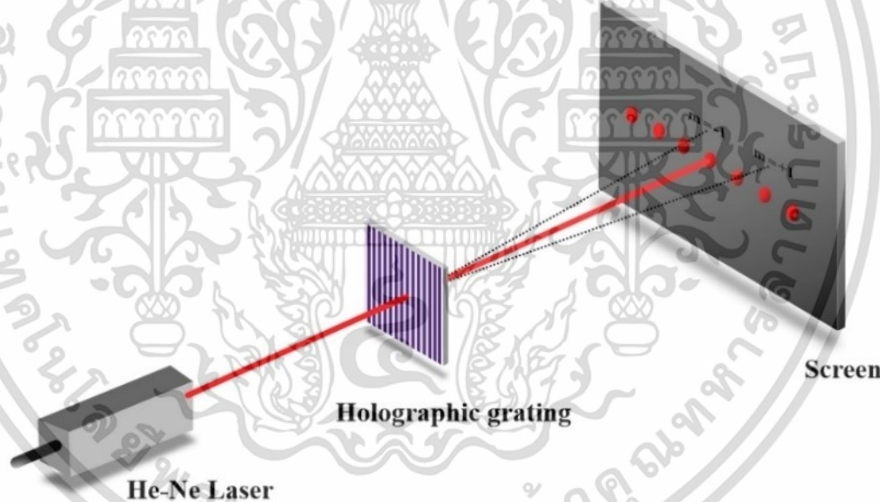
โดยที่  $d$  คือคาบของโฮโลกราฟีฟิเกรตติง

$\lambda$  คือความยาวคลื่นของเลเซอร์ He-Ne มีค่าเท่ากับ 632.8 นาโนเมตร

$\theta_m$  คือมุมของรูปแบบการเลี้ยวเบน สามารถหาได้จาก  $\theta_m = \tan^{-1}(x/L)$

$x$  คือระยะห่างระหว่างรูปแบบการเลี้ยวเบนอันดับที่ศูนย์กับรูปแบบการเลี้ยวเบนอันดับที่หนึ่ง

$L$  คือระยะห่างระหว่างเกรตติงถึงฉากรับ



รูปที่ 3.18 ไดอะแกรมรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ปรากฏบนฉากรับได้จากการฉายแสงเลเซอร์ผ่านโฮโลกราฟีฟิเกรตติงแบบส่องผ่าน

5) เปลี่ยนแผ่นโฮโลกราฟีฟิเกรตติงอีก 4 แผ่น คือ ตัวอย่างที่ 2 ถึงตัวอย่างที่ 5 ตามลำดับ และ คำนวณคาบของโฮโลกราฟีฟิเกรตติงตามลำดับ

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการตรวจสอบความถูกต้อง

โฮโลกราฟฟิเกรตติงแบบฟิล์มไวแสงชนิดแห้งสามารถได้รับการยืนยันจากวิธีการ ดังนี้

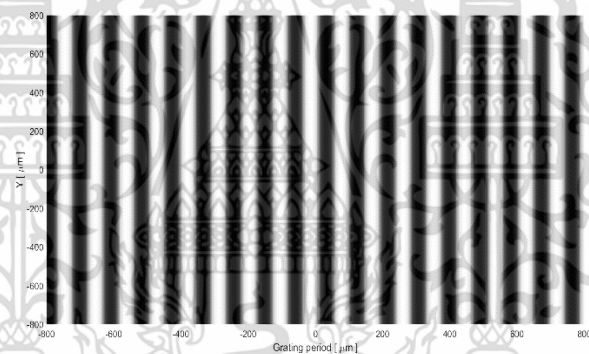
4.1.1 ผลการออกแบบหน้ากากโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างด้วยคอมพิวเตอร์

4.1.2 ผลการสังเกตคาบของเนกาทีฟเกรตติงด้วยวิธีการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

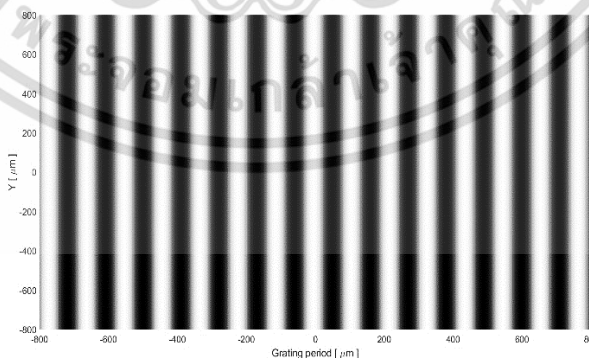
4.1.3 ผลการสังเกตคาบของโฮโลกราฟฟิเกรตติงด้วยวิธีการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

4.1.4 ผลการวัดคาบของโฮโลกราฟฟิเกรตติงด้วยวิธีการฉายแสงเลเซอร์

4.1.1 ผลการออกแบบหน้ากากโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างด้วยคอมพิวเตอร์

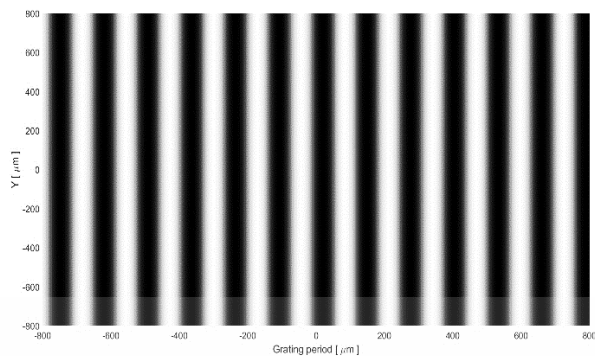


รูปที่ 4.1 แบบจำลองเกรตติงทางคณิตศาสตร์ของ Sample 1

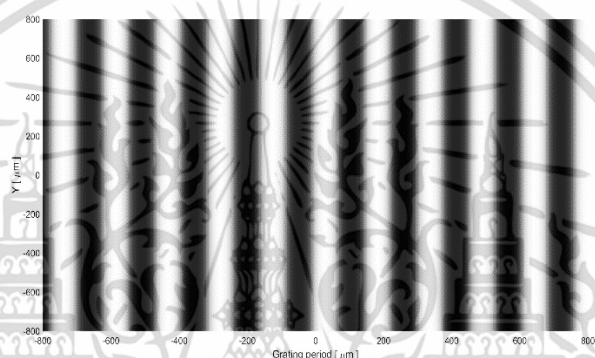


รูปที่ 4.2 แบบจำลองเกรตติงทางคณิตศาสตร์ของ Sample 2

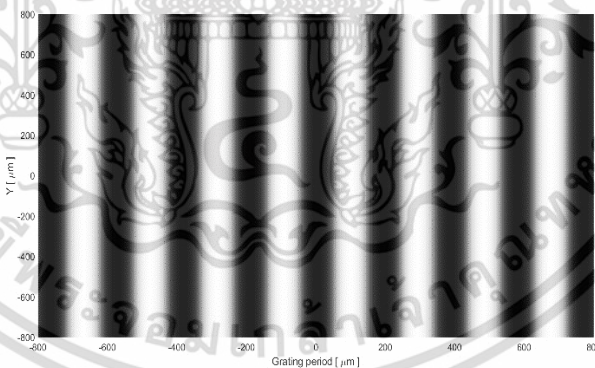
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แบบจำลองเกรตติงทางคณิตศาสตร์ของ Sample 3



รูปที่ 4.4 แบบจำลองเกรตติงทางคณิตศาสตร์ของ Sample 4



รูปที่ 4.5 แบบจำลองเกรตติงทางคณิตศาสตร์ของ Sample 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

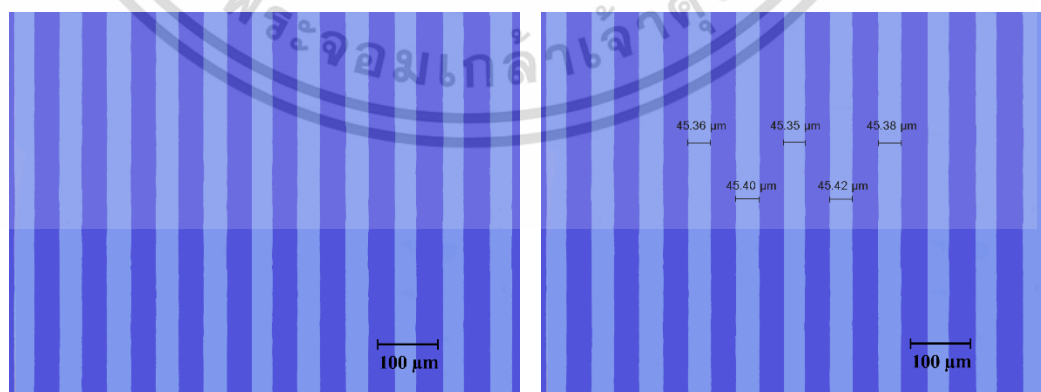
**ตารางที่ 4.1** คำนวณคาบของเกรตติงจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างด้วยคอมพิวเตอร์ของหน้ากาก

Sample	Grating period ( $\mu\text{m}$ )	Grooves density (line/cm)
1	45.00	222.00
2	51.00	196.00
3	63.00	158.00
4	72.00	138.00
5	82.00	121.00

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นคาบของเกรตติงตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหน้ากากที่สร้างด้วยคอมพิวเตอร์ พบว่าระยะห่างของริ้วแทรกสอดขึ้นอยู่กับมุมแทรกสอดต่าง ๆ เมื่อมุมแทรกสอดมีค่าลดลงคือ  $0.80^\circ$ ,  $0.70^\circ$ ,  $0.60^\circ$ ,  $0.50^\circ$  และ  $0.45^\circ$  ซึ่งก็คือตัวอย่าง 1 ถึง 5 ตามลำดับ ส่งผลให้คาบของเกรตติงมีค่าเพิ่มขึ้น และความหนาแน่นของร่องมีค่าลดลง

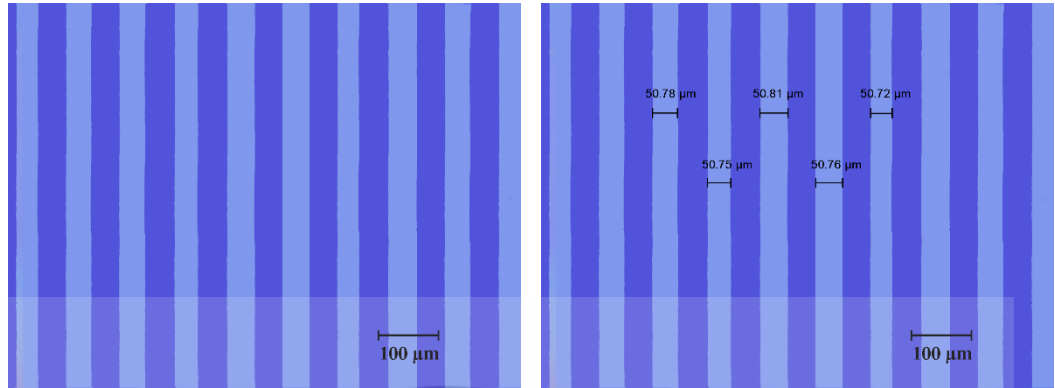
#### 4.1.2 ผลการสังเกตคาบของเนกาทีฟเกรตติงด้วยวิธีการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

การส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง มีจุดประสงค์เพื่อยืนยันคาบของเนกาทีฟเกรตติงที่อยู่บนฟิล์มไวแสงชนิดแห้งว่ามีขนาดถูกต้องสมบูรณ์หรือไม่ ซึ่งเนกาทีฟเกรตติงมีความละเอียดในระดับไมโครเมตร และกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงมีกำลังขยาย 4 -100 เท่า ทำให้สามารถสังเกตความกว้างของช่องว่างบนเนกาทีฟเกรตติงได้ แสดงค่าดังตารางที่ 4.2

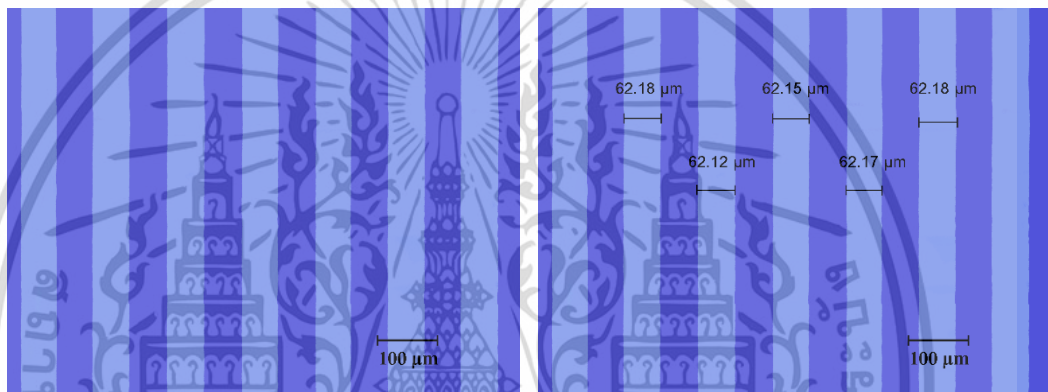


**รูปที่ 4.6** ภาพการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของ Sample 1

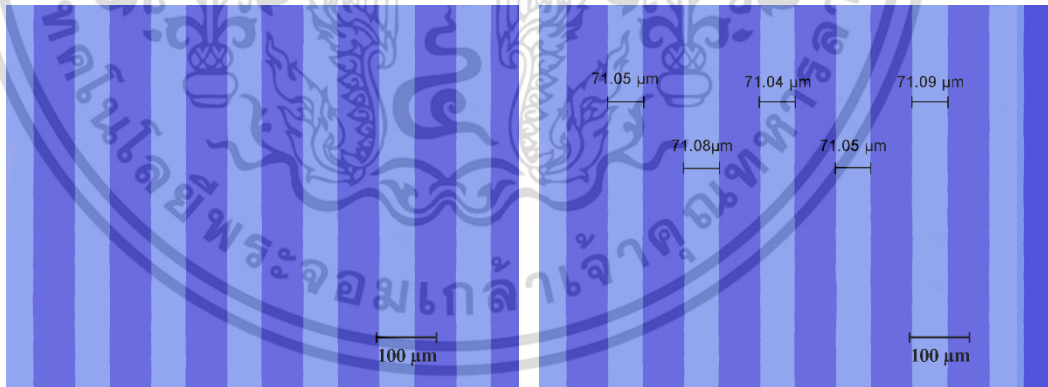
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ภาพการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของ Sample 2

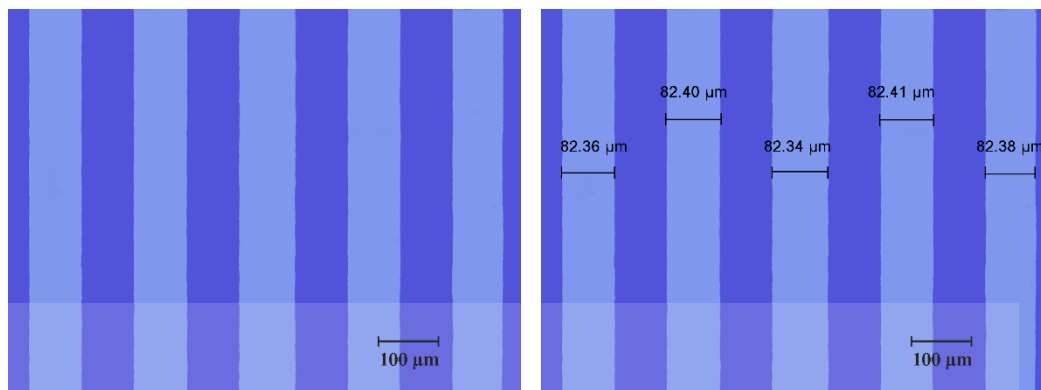


รูปที่ 4.8 ภาพการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของ Sample 3



รูปที่ 4.9 ภาพการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของ Sample 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ภาพการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของ Sample 5

ตารางที่ 4.2 การส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงในการสังเกตคาบของเนกาทีฟเกรตติง

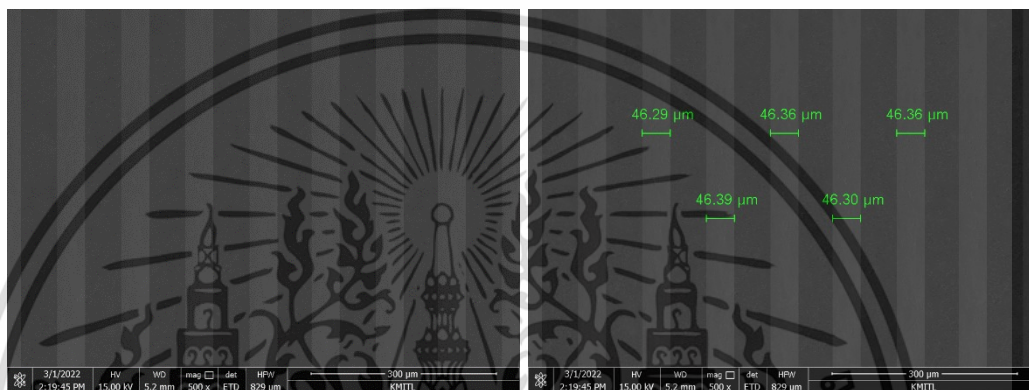
The period of negative grating ( $\mu\text{m}$ ) of the sample					
Line No.	1	2	3	4	5
1	45.36	50.72	62.18	71.05	82.36
2	45.40	50.78	62.12	71.08	82.40
3	45.35	50.81	62.15	71.04	82.34
4	45.42	50.75	62.18	71.05	82.38
5	45.38	50.76	62.17	71.09	82.41
Average	45.38	50.76	62.16	71.06	82.38
Grooves density (line/cm)	220.00	197.00	160.00	140.00	121.00

จากตารางที่ 4.2 การส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงในการสังเกตคาบของเนกาทีฟเกรตติง แสดงให้เห็นว่าคาบของเนกาทีฟเกรตติงมีค่าอยู่ในช่วง 45.38 – 82.38  $\mu\text{m}$  และความหนาแน่นของร่องเนกาทีฟเกรตติงอยู่ในช่วง 220.00 – 121.00 line/cm เมื่อมุมแทรกสอดมีค่าลดลงส่งผลให้คาบของเนกาทีฟเกรตติงมีค่าเพิ่มขึ้นและความหนาแน่นของร่องเนกาทีฟเกรตติงมีค่าลดลง และเพื่อเป็นการยืนยันรูปแบบการแทรกสอดที่ถ่ายโอนลงบนฟิล์มไวแสงชนิดแห้ง พบว่ามีขนาดถูกต้องสมบูรณ์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และมีช่วงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดอยู่ที่ 0.46 – 0.84 % ดังตารางที่ 4.4

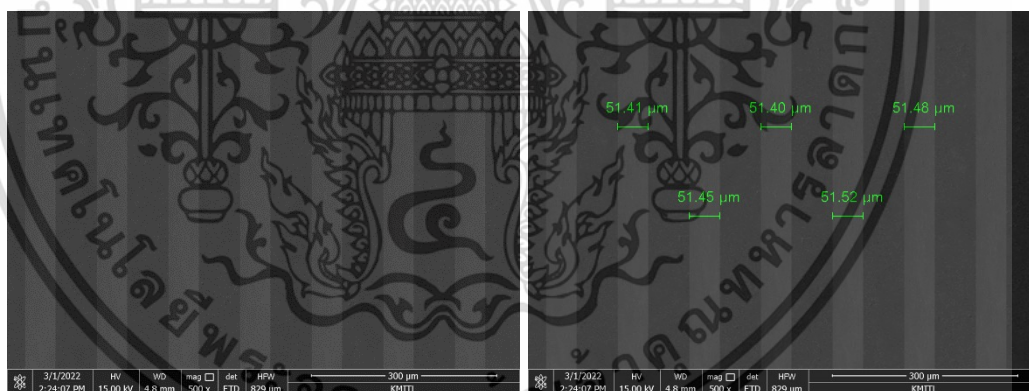
### 4.1.3 ผลการสังเกตคาบของโฮโลกราฟฟิเกเรตติงด้วยวิธีการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

#### แบบส่องกราด

การส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด มีจุดประสงค์เพื่อยืนยันคาบของโฮโลกราฟฟิเกเรตติงหลังจากถูกเคลือบด้วยสารโลหะวานเดียมว่ามีขนาดถูกต้องสมบูรณ์หรือไม่ ซึ่งโฮโลกราฟฟิเกเรตติงมีความละเอียดในระดับไมโครเมตรและมีกำลังขยายค่อนข้างสูงทำให้สามารถสังเกตความกว้างของช่องว่างบนโฮโลกราฟฟิเกเรตติงได้ แสดงค่าดังตารางที่ 4.3

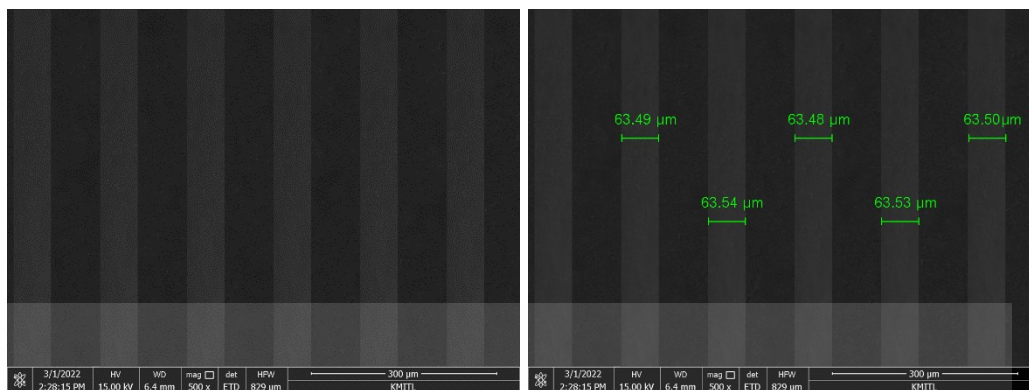


รูปที่ 4.11 ภาพการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ Sample 1



รูปที่ 4.12 ภาพการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ Sample 2

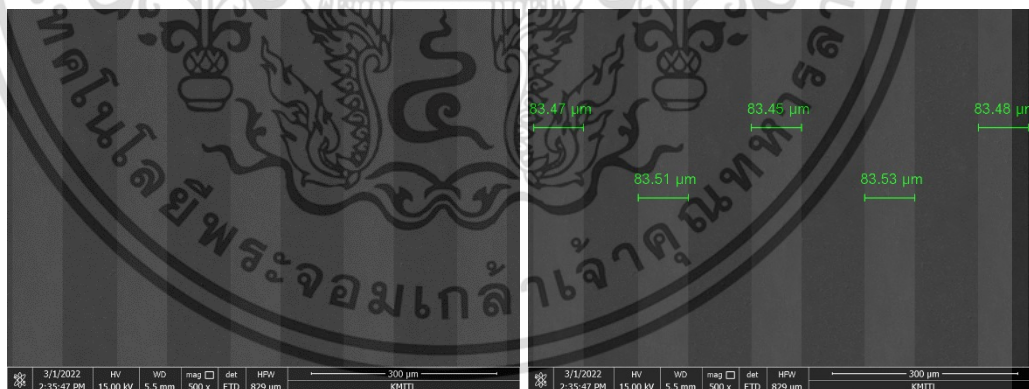
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ภาพการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ Sample 3



รูปที่ 4.14 ภาพการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ Sample 4



รูปที่ 4.15 ภาพการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ Sample 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.3** การส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในการสังเกตคาบของโฮโลกราฟฟิเกรตติง

Line No.	The period of holographic grating ( $\mu\text{m}$ ) of the sample				
	1	2	3	4	5
1	46.29	51.41	63.49	72.51	83.47
2	46.39	51.45	63.54	72.46	83.51
3	46.36	51.40	63.48	72.50	83.45
4	46.30	51.52	63.53	72.41	83.53
5	46.36	51.48	63.50	72.49	83.48
Average	46.34	51.45	63.50	72.47	83.49
Grooves density (line/cm)	215.00	194.00	157.00	137.00	119.00

จากตารางที่ 4.3 การส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในการสังเกตคาบของโฮโลกราฟฟิเกรตติง แสดงให้เห็นว่าคาบของโฮโลกราฟฟิเกรตติงมีค่าอยู่ในช่วง 46.34 – 83.49  $\mu\text{m}$  และความหนาแน่นของร่องโฮโลกราฟฟิเกรตติงอยู่ในช่วง 215.00 – 119.00 line/cm เมื่อมุมแทรกสอดมีค่าลดลง ส่งผลให้คาบของโฮโลกราฟฟิเกรตติงมีค่าเพิ่มขึ้น และความหนาแน่นของร่องโฮโลกราฟฟิเกรตติงมีค่าลดลง และเพื่อเป็นการยืนยันคาบของโฮโลกราฟฟิเกรตติงหลังจากถูกเคลือบด้วยสารโลหะวานเดียม พบว่ามีขนาดถูกต้องสมบูรณ์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และมีช่วงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดอยู่ที่ 0.50 – 0.88 % ดังตารางที่ 4.4

**ตารางที่ 4.4** เปรียบเทียบผลการสังเกตคาบของเกรตติงด้วยวิธีการต่าง ๆ

Process	The grating period ( $\mu\text{m}$ ) of the sample				
	1	2	3	4	5
CCG	45.00	51.00	63.00	72.00	82.00
Lithography observe by OM	45.38	50.76	62.16	71.06	82.38
RF sputtering observe by SEM	45.40	50.57	62.20	71.01	82.41
Percentage difference (%): Lithography	0.84	0.47	1.34	1.31	0.46
Percentage difference (%): RF sputtering	0.88	0.85	1.28	1.38	0.50

#### 4.1.4 ผลการวัดคาบของโฮโลกราฟฟิเกรตติงด้วยวิธีการฉายแสงเลเซอร์

การวัดคาบของโฮโลกราฟฟิเกรตติงและวิเคราะห์สมบัติการเลี้ยวเบนของแสงผ่านโฮโลกราฟฟิเกรตติงด้วยวิธีการฉายแสงเลเซอร์ เมื่อฉายแสงเลเซอร์ผ่านโฮโลกราฟฟิเกรตติงจะปรากฏรูปแบบการเลี้ยวเบนของแสงบนฉาก จากนั้นคาบของโฮโลกราฟฟิเกรตติงสามารถคำนวณได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของแสงอันดับที่หนึ่งโดยสมการที่ 3.10

ตารางที่ 4.5 วัดคาบของโฮโลกราฟฟิเกรตติงด้วยวิธีการฉายแสงเลเซอร์

Sample	The period of holographic grating ( $\mu\text{m}$ )	Grooves density (line/cm)
1	45.32	220.00
2	51.07	195.00
3	62.51	159.00
4	71.09	140.00
5	82.40	121.00

จากตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นการวัดคาบของเกรตติงด้วยวิธีการฉายแสงเลเซอร์ พบว่าผลการวัดคาบของเกรตติงอยู่ในช่วง 45.32 – 82.40  $\mu\text{m}$  และคำนวณความหนาแน่นของร่องเกรตติงอยู่ในช่วง 220.00 – 121.00 line/cm เมื่อมุมแทรกสอดมีค่าลดลงจะทำให้คาบของโฮโลกราฟฟิเกรตติงมีค่าเพิ่มขึ้นและความหนาแน่นของร่องมีค่าลดลง

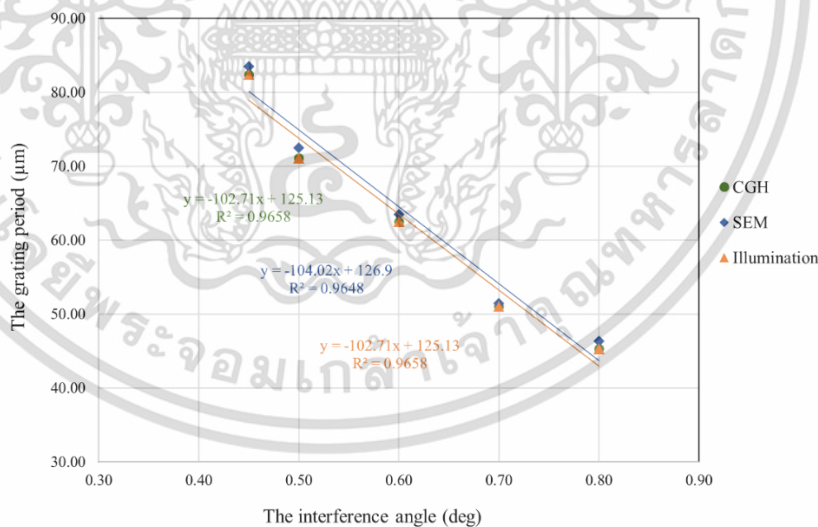
จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการตรวจสอบความถูกต้องของโฮโลกราฟฟิเกรตติงแบบฟิล์มไวแสงชนิดแห้งตามแบบจำลองหน้าฉากโดยโฮโลแกรมที่สร้างด้วย ผลปรากฏว่าคาบของโฮโลกราฟฟิเกรตติงที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างด้วยคอมพิวเตอร์และการวิธีการต่าง ๆ แตกต่างกันเล็กน้อยซึ่งได้รับการยืนยันจากการสังเกตและวัดคาบของเกรตติงด้วยวิธีการดังนี้ การสังเกตด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวัดด้วยวิธีการฉายแสงเลเซอร์ พบว่าคาบของโฮโลกราฟฟิเกรตติงและความหนาแน่นของร่องโฮโลกราฟฟิเกรตติงมีความสอดคล้องกันทั้งสามวิธีการ แสดงดังตารางที่ 4.6 และตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบผลการวัดคาบของโฮโลกราฟฟิกเกรตติงทั้งสามวิธีการ

Sample	The period of holographic grating ( $\mu\text{m}$ )		
	CGH	SEM	Illumination
1	45.00	46.34	45.32
2	51.00	51.45	51.07
3	63.00	63.50	62.51
4	72.00	72.47	71.09
5	82.00	83.49	82.40

จากตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบผลการสังเกตและการวัดคาบของโฮโลกราฟฟิกเกรตติงด้วยแบบจำลองหน้ากากโดยโฮโลแกรมที่สร้างด้วยคอมพิวเตอร์ การสังเกตด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวัดด้วยวิธีการฉายแสงเลเซอร์ แสดงให้เห็นว่าคาบของโฮโลกราฟฟิกเกรตติงมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมุมแทรกสอดมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกันทั้งสามวิธีการ

The relationships between the grating period and the interference angle



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคาบของเกรตติงและมุมการแทรกสอด

จากรูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคาบของเกรตติงและมุมการแทรกสอด แสดงให้เห็นว่าเมื่อมุมแทรกสอดมีค่าลดลง คาบของโฮโลกราฟฟิกเกรตติงจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามสมการข้างต้นนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบผลความหนาแน่นของร่องเกรตติงทั้งสามวิธีการ

Sample	Grooves density (line/cm)		
	CGH	SEM	Illumination
1	222.00	215.00	220.00
2	196.00	194.00	195.00
3	158.00	157.00	159.00
4	138.00	137.00	140.00
5	121.00	119.00	121.00

จากตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบผลการคำนวณความหนาแน่นของร่องเกรตติงด้วยแบบจำลองหน้ากากโดยโฮโลแกรมที่สร้างด้วยคอมพิวเตอร์ การสังเกตด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวัดด้วยวิธีการฉายแสงเลเซอร์ แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของร่องเกรตติงมีค่าลดลงเมื่อมุมแทรกสอดมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกันทั้งสามวิธีการ

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการสร้างโฮโลกราฟฟิกเกรตติงแบบฟิล์มไวแสงชนิดแห้งด้วยวิธีการพิมพ์ด้วยแสง โดยการออกแบบหน้ากากด้วยการจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างจากคอมพิวเตอร์ วิธีการดำเนินงานและวิเคราะห์สมบัติทางแสงของเกรตติงสามารถสรุป ดังนี้

5.1.1 การสร้างหน้ากากด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากคอมพิวเตอร์ เริ่มจากการออกแบบหน้ากากโดยการจำลองแบบรูปแบบการแทรกสอดของคลื่นระนาบสองลำด้วยมุมแทรกสอดต่าง ๆ ดังนี้  $0.80^\circ$ ,  $0.70^\circ$ ,  $0.60^\circ$ ,  $0.50^\circ$  และ  $0.45^\circ$  เพื่อให้ได้หน้ากากที่มีความกว้างหรือคาบของเกรตติงขนาดต่างกัน 5 ค่า พบว่าผลการคำนวณคาบของเกรตติงอยู่ในช่วง  $45.00 - 82.00 \mu\text{m}$  และความหนาแน่นของร่องเกรตติงอยู่ในช่วง  $222.00 - 121.00 \text{ line/cm}$  แสดงให้เห็นว่าเมื่อมุมแทรกสอดมีค่าลดลงจะทำให้คาบของเกรตติงมีค่าเพิ่มขึ้นและส่งผลให้ความหนาแน่นของร่องมีค่าลดลง

5.1.2 เมื่อได้หน้ากากจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างด้วยคอมพิวเตอร์แล้ว ได้นำหน้ากากไปถ่ายโอนลงบนแผ่นฟิล์มไวแสงชนิดแห้งด้วยวิธีการพิมพ์ด้วยแสง โดยรูปแบบการแทรกสอดที่อยู่บนหน้ากากจะถูกถ่ายโอนลงบนฟิล์มไวแสงชนิดแห้ง เมื่อถูกส่องสว่างด้วยแสงยูวี จากการทดลองพบว่าเวลาที่เหมาะสมในการฉายแสงเป็น 10 นาที จากนั้นจึงนำฟิล์มไปสังเกตด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง เพื่อยืนยันคาบของเนกาทีฟเกรตติงที่ถูกถ่ายโอนลงบนฟิล์มบางไวแสงชนิดแห้งว่ามีขนาดถูกต้องสมบูรณ์หรือไม่ โดยผลการสังเกตคาบของเนกาทีฟเกรตติงด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงอยู่ในช่วง  $45.38 - 82.38 \mu\text{m}$  และความหนาแน่นของร่องเนกาทีฟเกรตติงอยู่ในช่วง  $220.00 - 121.00 \text{ line/cm}$  พบว่าผลการวัดขนาดของคาบของเนกาทีฟเกรตติงที่ถูกถ่ายโอนลงบนฟิล์มบางไวแสงมีขนาดใกล้เคียงกับรูปแบบการแทรกสอดที่อยู่บนหน้ากาก ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และมีช่วงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดอยู่ที่  $0.46 - 0.84 \%$

5.1.3 เมื่อถ่ายโอนรูปแบบการแทรกสอดลงบนฟิล์มไวแสงชนิดแห้งแล้ว ได้ทำการเคลือบฟิล์มบางด้วยสารโลหะวานาเดียม โดยวิธีการอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริ่งด้วยกำลังของแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ 100 วัตต์ และระยะเวลาในการปลูกฟิล์ม 30 นาที เพื่อให้ได้โฮโลกราฟฟิกเกรตติงที่ติดคงทนอยู่บนฟิล์มบาง จากนั้นจึงนำฟิล์มไปสังเกตด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อยืนยันคาบของโฮโลกราฟฟิกเกรตติง หลังจากถูกเคลือบด้วยสารโลหะวานาเดียมว่ามีขนาดถูกต้องสมบูรณ์หรือไม่ โดยผลการสังเกตคาบของเกรตติงด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีค่าอยู่ในช่วง  $46.34 - 83.49 \mu\text{m}$

และความหนาแน่นของร่องเกรตติงอยู่ในช่วง 215.00 – 119.00 line/cm ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับคาบของโฮโลกราฟฟิกเกรตติงก่อนเคลือบ และมีช่วงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดอยู่ที่ 0.50 – 0.88 %

5.1.4 การวัดคาบของโฮโลกราฟฟิกเกรตติงและวิเคราะห์สมบัติการเลี้ยวเบนของแสงผ่านโฮโลกราฟฟิกเกรตติง พบว่าผลการวัดคาบของโฮโลกราฟฟิกเกรตติงด้วยวิธีการฉายแสงเลเซอร์ลงบนแผ่นโฮโลกราฟฟิกเกรตติงอยู่ในช่วง 45.32 – 82.40  $\mu\text{m}$  และคำนวณความหนาแน่นของร่องเกรตติงอยู่ในช่วง 220.00 – 121.00 line/cm แสดงให้เห็นว่าคาบของโฮโลกราฟฟิกเกรตติง และความหนาแน่นของร่องเกรตติงด้วยวิธีการฉายแสงเลเซอร์มีความสอดคล้องกันกับการสังเกตคาบของโฮโลกราฟฟิกเกรตติงด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และมีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อมุมแทรกสอดมีค่าลดลงส่งผลให้คาบของโฮโลกราฟฟิกเกรตติงมีค่าเพิ่มขึ้นและความหนาแน่นของร่องเกรตติงมีค่าลดลง

5.1.5 ผลการออกแบบเกรตติงโดยการจำลองทางคณิตศาสตร์ และการสร้างโฮโลกราฟฟิกเกรตติงแบบฟิล์มไวแสงชนิดแห้ง พบว่าคาบของเกรตติงขึ้นอยู่กับมุมแทรกสอด และระยะเวลาที่เหมาะสมในการฉายแสงของวิธีการพิมพ์ด้วยแสง ดังนั้นเราจึงสามารถควบคุมคาบของเกรตติงจากมุมแทรกสอดได้ สำหรับงานวิจัยนี้มีช่วงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดอยู่ที่ 0.50 – 0.88 % โดยที่ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดน้อยที่สุดคือ 0.50 % ซึ่งเกิดจากการสร้างโฮโลกราฟฟิกเกรตติงด้วยมุมแทรกสอด 0.80 องศา มีขนาดคาบของเกรตติงน้อยที่สุดคือ 45.32  $\mu\text{m}$

จากงานวิจัยนี้ เราสามารถประยุกต์ใช้วิธีการนี้ในการสร้างโฮโลกราฟฟิกเกรตติงที่มีขนาดที่ต้องการได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการออกแบบหน้ากากโฮโลกราฟฟิกเกรตติงด้วยคอมพิวเตอร์ คาบของเกรตติงที่เล็กที่สุดที่เป็นไปได้ถูกจำกัดด้วยมุมของการแทรกสอดที่มีค่าไม่ถึง 90 องศา อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติคาบของเกรตติงที่เล็กที่สุดนั้นขึ้นอยู่กับข้อจำกัดของความละเอียดของเครื่องปริ้นเตอร์ ซึ่งเราสามารถทำการออกแบบเกรตติงให้มีความละเอียดน้อยสุดได้เท่าที่ความละเอียดสูงสุดของเครื่องปริ้นเตอร์ที่ทำได้ ดังนั้นเราสามารถสร้างเกรตติงที่มีความละเอียดมากขึ้นได้โดยการใช้เครื่องปริ้นเตอร์ที่มีความละเอียดมากขึ้น

ในอนาคตหากเราเคลือบโฮโลกราฟฟิกเกรตติงด้วยวิธีการสปีตเตอร์ริงโดยใช้โลหะที่สะท้อนแสงได้ดี เช่น อะลูมิเนียม หรือทองคำ ก็จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเกรตติงสะท้อนแสงสำหรับงานด้านออปติคัล เซนเซอร์และสเปกโทรสโกปีได้ และสามารถนำไปวัดค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพได้ เช่น รัศมีความโค้งของวัตถุทรงกระบอก เป็นต้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Christopher Palmer. and Erwin Loewen. 2005. **Diffraction Grating Handbook**. 6<sup>th</sup> ed. New York: Newport Corporation. P.20-55
- [2] Frank. L. Pedrotti; and Leno S. Pedrotti. 1993. **Introduction to Optics**. 2<sup>nd</sup> ed. London: Prentice-Hall International. P.200-365
- [3] Ajoy Ghatak. 2010. **Optics**. 1<sup>st</sup> ed. New York: McGraw-Hill.
- [4] T. T. Chen., Dah-Min Hawang. 1977. “Grating Fabrication by Interference of Laser Beams”. Taiwan : Tsing Hua University Hsinchu. 6-9.
- [5] Inneam C., Srinuanjan K. 2021. “Fabrication of Holographic Grating by alternative setting of Michelson Interferometer”. **J. Phys. Conf. Ser.** 1719. 012087
- [6] Li S., Wang Z. 2013. “Generation of optical vortex based on computer-generated holographic gratings by photolithography”. **Appl. Phys. Lett.** 103. 141110
- [7] Zito G., Piccirillo B., Santamato E., et al. 2014. “Computer-Generated Holographic Gratings in Soft Matter”. **Mol. Cryst. Liq. Cryst.** 465, 371–378.
- [8] Yao Y., Wang Y., Liu H., Li Y., Song B., Wu W. 2015. “Line width tuning and smoothing for periodical grating fabrication in nanoimprint lithography”. **Appl. Phys. A.** 121. 399–403
- [9] Chen Y.-P., Lee Y.-P., Chang J.-H., Wang L.A. 2008 “Fabrication of concave gratings by curved surface UV-nanoimprint lithography”. **J. Vac. Sci. Technol. B.** 26. 1690.
- [10] Lin C.-H., Fong C.-H., Lin Y.-M., Lee Y.-Y. et al. 2011 “EUV interferometric lithography and structural characterization of an EUV diffraction grating with nondestructive spectroscopic ellipsometry”. **Microelectron. Eng.** 88. 2639–2643
- [11] Lin C.-H., Lin Y.-M., Liang C.-C., Lee Y.-Y., et al. 2012 “Extreme UV diffraction grating fabricated by nanoimprint lithography”. **Microelectron. Eng.** 98. 194–197
- [12] Hagouel P. I. 2003 “Blazed diffraction gratings fabricated using X-ray lithography: fabrication, modeling and simulation”. **Microelectron. Reliab.** 43. 249–258
- [13]. Deng X, Chen J., Liu J., Ma Y., Cheng X, Li T. 2015 “Replication and subdivision of chromium nano-grating in atom lithography”. **SPIE.** 9628.
- [14] Parasuraman Swaminathan. 2007. **Electronic materials devices and fabrication.** A

JOHN WILEY & SONS. INC. PUBLICATION.

- [15] Kanikella P.R. 2007. “Process development and applications of a dry film photoresist”. Masters Thesies. 6821.
- [16] Campbell, Stephen A. 1996. **The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication**. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Oxford University Press.
- [17] Moreau W.M. 1988. **Semiconductor Lithography: Principles, Practices, and Materials**. New York: Plenum Press.
- [18] Michael Quirk, Julian Serda. 2001. **Semiconductor manufacturing technology**. New Jersey: Prentice Hall.
- [19] Milton Ohring. 2002. **Materials Science of Thin Films**. 2<sup>nd</sup> ed. London: Academic Press. P.95-273
- [20] John Wiley & Sons. 1980. **Glow discharge processes: Sputtering and plasma etching**. New York: A Wiley-Interscience. P.77-106
- [21] Nikolai V. Tkachenko. 2006. **Optical Spectroscopy: Methods and Instrumentations**. Elsevier B.V. P.19-22
- [22] A. Vijayakumar Shanti Bhattacharya. 2017. **Design and Fabrication of Diffractive Optical Elements with Matlab**. Bellingham, Washington USA : SPIE Press. P.19-26
- [23] Ting-Chung Poon. and Jung-Ping Liu. 2014. **Introduction to Modern Digital Holography with Matlab**. New York : Cambridge University Press. P.11-13



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PAPER • OPEN ACCESS

## An application of reflective holographic gratings for measurement of cylindrical curvature

To cite this article: Chanikan Inneam *et al* 2021 *J. Phys.: Conf. Ser.* **2145** 012054

View the [article online](#) for updates and enhancements.



**IOP | ebooks™**

Bringing together innovative digital publishing with leading authors from the global scientific community.

Start exploring the collection—download the **first chapter of every title for free.** ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น... ัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# An application of reflective holographic gratings for measurement of cylindrical curvature

Chanikan Inneam, Keerayoot Srinuanjan\* and Witoon Yindeesuk

Department of Physics, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand.

\*E-mail: keerayoot.sr@kmitl.ac.th

**Abstract.** This paper presented an application of reflective holographic gratings for the measurement of cylindrical curvature. The surface of the fabricated holographic grating was coated with gold by the sputtering method, where it became a reflective holographic grating. The grating was attached to the surface of various radius cylindrical objects. The diffraction pattern produced by the bent grating with different radius was observed by illuminating a laser beam normal to the grating surface. The gratings constant were calculated from the observed diffraction pattern. The relationship between the grating constants and the radius of cylindrical objects was obtained. The grating constant and the reciprocal of the radius of cylindrical objects was a linear relationship, with the least R-square between 0.85-0.97. Moreover, the y-intercept of the relationship between the grating constants and the reciprocal radius was consistent with the grating constant of the non-bended grating. As the radius of the grating approach is infinite, the reciprocal of the radius approaches zero, which is a non-bend grating. We can apply this method to measure the radius of cylindrical objects.

## 1. Introduction

Curvature is an important physical parameter that needs to be monitored in engineering, bridge, machinery, architectural structure, health monitoring, biomechanics, robotics, and aerospace. Various optical fiber-based curvature sensors have been widely studied due to their distinct advantages of simple structure and high sensitivity. Researchers have proposed methods for the physical parameter based on a different structure, such as holographic optical elements (HOEs) [1], long-period grating (LPG) [2–3], fiber Bragg grating (FBG) [4–7], photonic crystal fiber (PCF) [8–9], a multicore fiber (MCF) [10–11], and in-fiber Mach–Zehnder interferometer (MZI) [12–14]. They could be well applied to the physical parameter measurement. However, the methods mentioned above have some accuracy problems and complication for setting up.

This research proposes a method for measuring the radius of cylindrical objects by applying reflective holographic gratings. The reflective holographic grating was fabricated by the method in Ref. [15]. Then, the holographic grating was coated with gold by the sputtering method. The grating was attached to the surface of various radius cylindrical objects. A diffraction pattern appears on the screen observed by illuminating a laser beam normal to the bent grating surface. The grating constant is calculated from the diffraction pattern where the grating constant corresponds to the radius. Then grating constant is confirmed by Scanning Electron Microscope (SEM). The relationship between the gratings constant and the reciprocal radius of the objects and discussed. Using this method, the radius of a cylindrical object

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



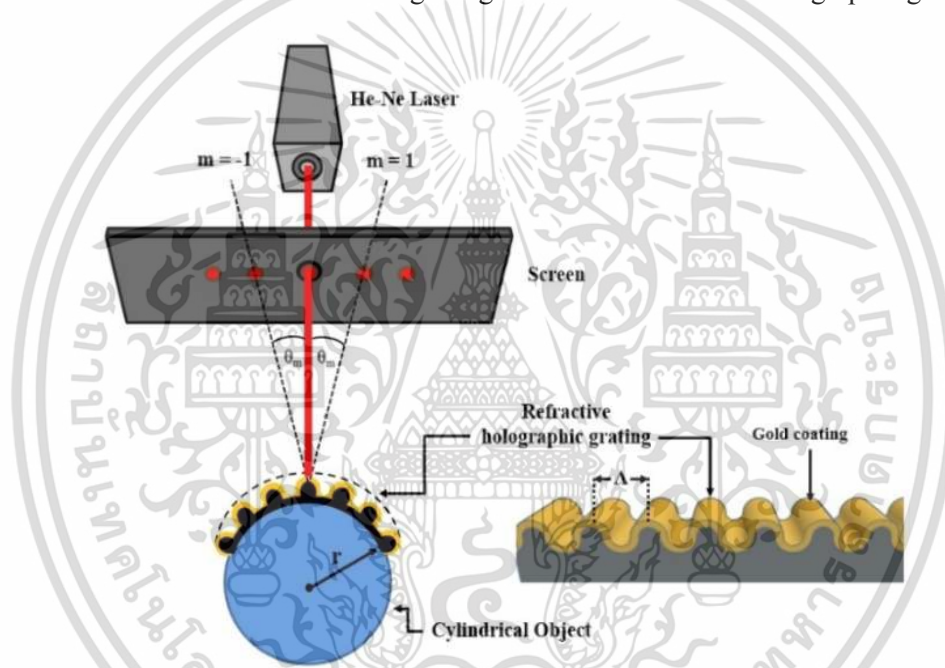
Content from this work may be used under the terms of the [Creative Commons Attribution 3.0 licence](https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/). Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.

could easily be measured, uncomplicated experiment setup and able to measure the radius in a narrow space. In the future, we may have more devices to support better measurement.

## 2. Experiment

### 2.1. Fabrication of reflective holographic grating

Transmission grating fabricated from an alternative setting of Michelson interferometer, Inneam *et al.* [15], were fabricated. By adjusting the angles between the two arms of the Michelson interferometer, cross-beam angle, we can obtain a fringe pattern that has a linear shape. The grating sample 1 to 5 have cross-beam angles ( $\beta$ )  $0.2^\circ$ ,  $0.4^\circ$ ,  $0.6^\circ$ ,  $0.8^\circ$ , and  $1.0^\circ$  respectively. The surface of the fabricated holographic grating was coated with gold by the sputtering method. The sputtering method used gold as a target material bombarded with the Argon plasma, the plasma current of 18 mA in 120 s, and the coating thickness is 408 Å. The transmission grating became the reflective holographic grating.



**Figure 1.** The schematic diagram for measuring the radius of the cylindrical object.

### 2.2. Experiment method

The experiment setup for measuring the radius of cylindrical objects is shown in figure 1. First, the reflective holographic grating was attached to the various radius of cylindrical object surfaces, where the grating is bent along the cylindrical object surface. The radius of objects are 0.0129 m, 0.0195 m, 0.0260 m, and 0.0319 m. Second, the He-Ne laser with a wavelength of 632.8 nm was used as a light source. By illuminating the laser beam normal to the bent grating surface with a different radius, a diffraction pattern was observed on the screen. Finally, the grating constant is calculated from the observed diffraction pattern. In addition, the grating constant was observed by Scanning Electron Microscope is shown in figure 2. The relationship between the grating constant and the reciprocal radius of the cylindrical objects is shown in figure 3.

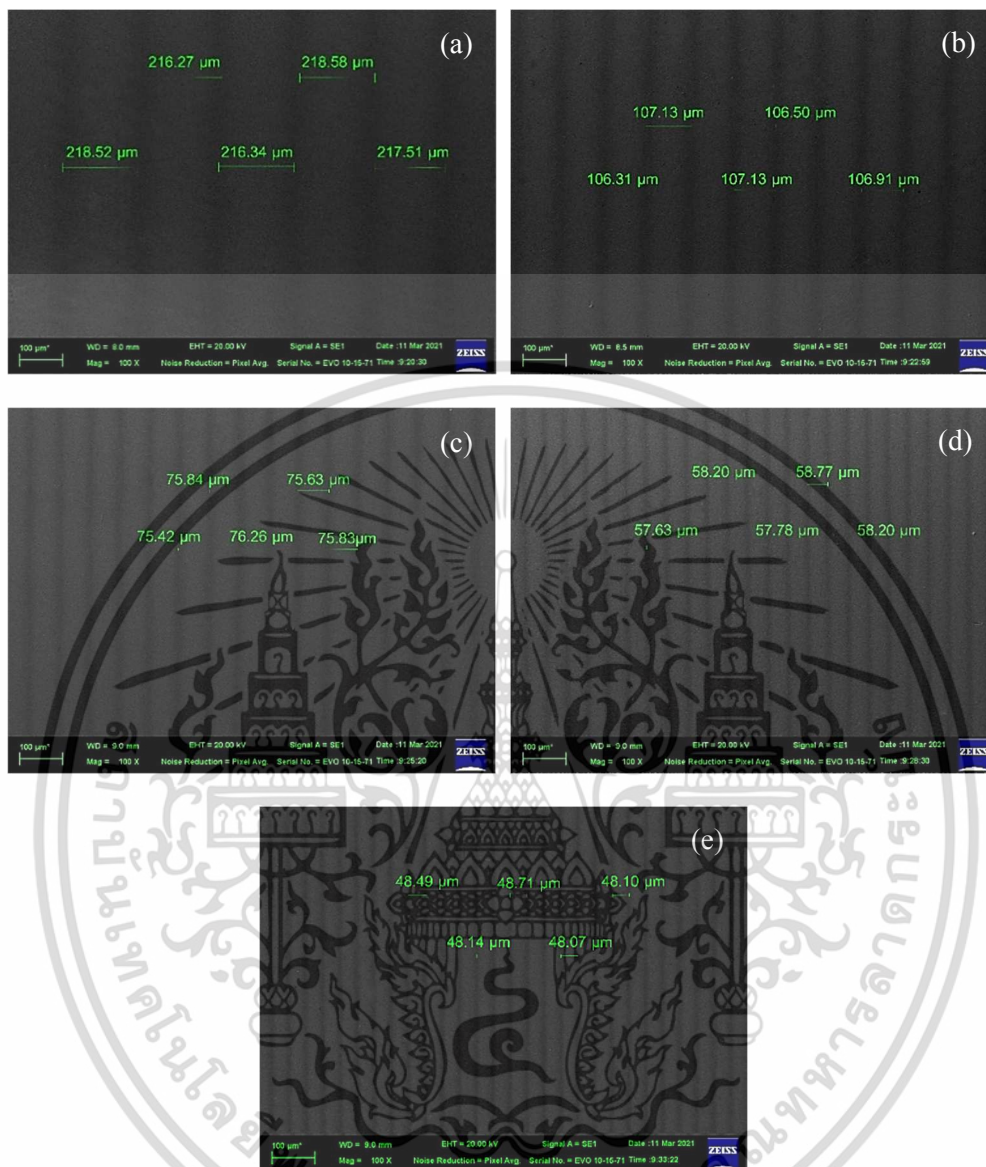
## 3. Results and discussion

### 3.1. Measurement of grating constant by Scanning Electron Microscope

The grating constant was observed by Scanning Electron Microscope (SEM). Figure 2 shows the image of the reflective holographic grating. The grating constants are shown in table 1.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**Figure 2.** Image of reflective holographic gratings obtained by SEM, where (a) Sample 1, (b) Sample 2, (c) Sample 3, (d) Sample 4, and (e) Sample 5.

### 3.2. Measurement of grating constant by illumination of the laser beam

The laser beam is normally incident the bent grating surface. The diffraction pattern caused by the bent grating with different radius appears on a screen. The diffraction angle is measured, and the grating constant  $\Lambda$  is calculated from the following equation,

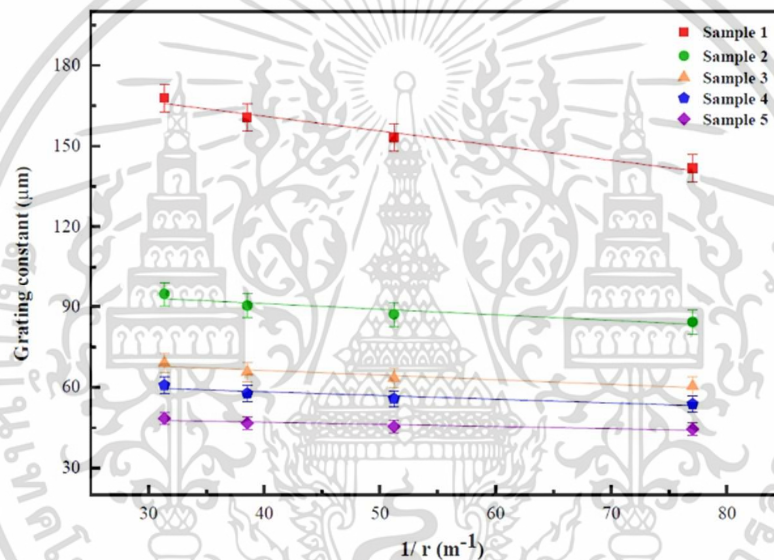
$$\Lambda = \frac{\lambda}{2\sin\theta_m} \quad (1)$$

where  $\lambda$  is the wavelength of the He-Ne laser and  $\theta_m$  is the angle of the diffraction pattern. The relationship between the grating constant ( $\Lambda$ ) and the reciprocal radius of a cylindrical object ( $1/r$ ) is shown in figure 3. The y-intercept from the graph is shown in table 2.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Table 1.** Comparison of the non-bend grating constants, measured by Scanning Electron Microscope (SEM) and measured by illumination of the laser beam.

Method	The grating constants ( $\mu\text{m}$ )				
	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5
Measured by SEM	217.44	106.79	75.80	58.12	48.30
Measured by experiment	218.77	100.35	76.11	58.99	47.27
Percentage difference (%)	0.61	6.21	0.41	1.49	2.16

**Figure 3.** The relationship between the grating constant and the reciprocal radius of the cylindrical objects.**Table 2.** The grating constants which measured by the illumination of the laser beam and y-intercept of the graph.

$1/r$ ( $\text{m}^{-1}$ )	The grating constants ( $\mu\text{m}$ )				
	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5
31.37	167.84	94.65	68.98	60.80	48.48
38.54	160.62	90.32	65.67	57.70	46.72
51.23	153.23	87.08	63.41	55.77	45.43
77.04	141.98	84.25	60.41	53.77	44.46
Y-intercept	182.94	99.35	73.16	63.87	50.22
$R^2$	0.97	0.87	0.91	0.86	0.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 3 showed that the grating constant and the reciprocal radius of cylindrical objects is a linear relationship. The R-square is in the range of 0.85-0.97. Also, it was found that the y-intercept is consistent with the non-bend grating constant.

#### 4. Conclusion

In this research, we presented the method and experimental results for measuring the radius of cylindrical objects. In the method, the grating is fixed to the surface of a cylindrical object, where the object radius is varied from 0.013 m to 0.032 m. Then the diffraction pattern was observed, and the grating constant of the bent grating of the various radius is calculated. The relationship between the grating constant and the reciprocal radius of the cylindrical object is linear, the R-square is in the range of 0.85 to 0.97, and the y-intercept corresponds to a non-bend grating constant, which is confirmed by two different methods. The non-bend grating constant measured by the illumination of the laser beam is in agreement with that obtained by the SEM imaging. From the experimental results, if the calibration graph between the grating constant and the reciprocal radius has been performed, this system will measure the curvature of an unknown radius, where the object radius is in the range 0.013 - 0.032 m with the error  $\pm 1.02\%$ . Therefore, we could apply the method to measure the radius of a cylindrical object.

#### References

- [1] Bang K, Jang C and Lee B 2019 *J. Inf. Disp.* **20** 9–23
- [2] Li Y P, Zhang W G, Wang S, Chen L, Zhang Y X, Wang B, Yan T Y, Li X Y and Hu W 2017 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **29** 224–7
- [3] Yi Y *et al.* 2020 *Infrared Phys. Technol.* **111** 103520
- [4] Zhu F, Zhang Y, Qu Y, Jiang W, Su H, Guo Y and Qi K 2020 *Opt. Fiber Technol.* **54** 102133
- [5] Kadhim S A and Resen D A 2016 *J. Nanosci. Nanotechnol.* **2** 91–3
- [6] Sun G, Hu Y, Dong M, He Y, Yu M and Zhu L 2019 *Optik* **176** 559–66
- [7] Mao L, Lu P, Lao Z, Liu D and Zhang J 2014 *Opt. Laser Technol.* **57** 39–43
- [8] Fu G, Li Y, Li Q, Yang J, Fu X and Bi W 2017 *IEEE Photon. J.* **9** 1–14
- [9] Gong H, Song H, Li X, Wang J and Dong X 2013 *Sens. Actuator A Phys.* **195** 139–41
- [10] Delgado G S, Newkirk A V, Lopez J E A, Rios M A, Schülzgen A and Correa R A 2015 *Opt. Lett.* **40** 1468
- [11] Wang So, Zhang Y X, Zhang W G, Geng P C, Yan T Y, Chen L, Li Y P and Hu W 2017 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **29** 822–5
- [12] Meng Q Q, Dong X Y, Zhou Y, Ni K, Chen Z M, Zhao C L and Jin S Z 2012 *J. Electromagn. Waves Appl.* **26** 2438–44
- [13] Wang R, Zhang J, Weng Y, Rong Q, Ma Y, Feng Z, Hu M and Qiao X 2013 *IEEE Sens. J.* **13** 1766–70
- [14] Zhang S, Zhang W, Gao S, Geng P and Xue X 2012 *Opt. Lett.* **37** 4480
- [15] Inneam C and Srinuanjan K 2021 *J. Phys.: Conf. Ser.* **1719** 012087

# PROCEEDINGS OF SPIE

[SPIDigitalLibrary.org/conference-proceedings-of-spie](https://spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie)

## Dry film holographic grating based on computer-generated mask lithography

Chanikan Inneam, S. Tipawan Khlayboonme, Mettaya Kitiwan, Witoon Yindeesuk, Keerayoot Srinuanjan

Chanikan Inneam, S. Tipawan Khlayboonme, Mettaya Kitiwan, Witoon Yindeesuk, Keerayoot Srinuanjan, "Dry film holographic grating based on computer-generated mask lithography," Proc. SPIE 12479, Optical Manipulation and Structured Materials Conference (OMC 2022), 1247904 (8 December 2022); doi: 10.1117/12.2658775

**SPIE.**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
Event: Optics and Photonics International Congress, 2022, Yokohama, Japan  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Dry film Holographic grating based on computer-generated mask Lithography

Chanikan Inneam<sup>a</sup>, S. Tipawan Khlayboonme<sup>a</sup>, Mettaya Kitiwan<sup>a</sup>, Witoon Yindeesuk<sup>\*a</sup>, Keerayoot Srinuanjan<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Department of Physics, School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand.

## Abstract

This paper presented an alternative technique for fabricating the dry film holographic grating based on a mask generated by computer simulation and experimental results. The mask was generated by a fringe pattern which is created by the mathematical model of two beams interference with various angles. Computer simulation of the fringe pattern was printed on film, i.e., the holographic grating mask. The mask was attached on dry film and then illuminated by UV light, where the lithography technique was applied. According to the lithography technique, the computer-generated holographic grating mask was transferred to dry film. After fabrication, fringe patterns obtained from the grating were observed. Then, the grating period was analyzed and confirmed by Scanning Electron Microscope (SEM). Experimental results show that the method could apply to fabricate the dry film holographic grating.

**Keywords:** computer-generated holograms, dry film holographic grating, grating period, holographic grating, lithography technique

## I Introduction

The holographic grating is an optical device of interest to researchers in which the fringe pattern of two beams interference is used to fabricate the grating [1-3] and the application of holographic grating have been presented [4-6]. One fabrication method of holographic grating the interference of two beams generated by computer programming [7-8] and transferred onto a photoresist film. Other researchers have proposed an interference lithography method that is widely used for the fabrication of holographic gratings such as Nanoimprint lithography [9-10], Extreme ultraviolet interferometric lithography (EUVIL) [11], X-ray lithography [12], and Atom lithography [13], etc. Those holographic grating can be used well to measure physical parameters.

This research proposes an alternative technique for fabricating the holographic grating based on a mask generated by computer simulation and using interference lithography. The mask was generated by a fringe pattern which is created by the mathematical model of two beams interference with various angles. Computer simulation of the fringe pattern was printed on film, i.e., the holographic grating

[\\*witoon.yi@kmitl.ac.th](mailto:witoon.yi@kmitl.ac.th)

mask. In this interference lithography technique, we use polyethylene terephthalate film as a substrate and coat with a dry film photoresist. The mask was attached on dry film. Then mask pattern was transferred to the dry film when illuminated by UV light. After fabrication, fringe patterns obtained from the grating were observed. Then, the grating period was investigated and analyzed. Moreover, Scanning Electron Microscope (SEM) is used to confirm the grating periods. Using this method, the holographic grating could be easily fabricated, uncomplicated experiment set up and the grating period can be controlled by the interference angle.

## II Experiments

### 1. Designing marks with computer simulation

The mask was generated by computer programming. The mathematical model of the fringe pattern is produced by two beams interference with various angles. Consider the interference pattern of Michelson interferometer by two electric fields  $\mathbf{E}_1$  and  $\mathbf{E}_2$  which are plane waves propagating along z-direction at the same frequency, represented by equations (1) and (2) [14].

$$\mathbf{E}_1 = \mathbf{E}_0 \exp(ikz + 2ik\Delta d - \omega t) \quad (1)$$

$$\mathbf{E}_2 = \mathbf{E}_0 \exp(ikz \cos \theta + ikx \sin \theta - \omega t) \quad (2)$$

where the propagation constant is  $k = 2\pi / \lambda$ , the distance between the mirrors is  $\Delta d = \lambda / 2$ ,  $\lambda$  is the wavelength of the light source and  $\theta$  is the angle between the interference beams where the angles is varied such as  $0.80^\circ$ ,  $0.70^\circ$ ,  $0.60^\circ$ ,  $0.50^\circ$ , and  $0.45^\circ$ , i.e., sample 1 to 5 respectively.

The interference pattern of the two electric fields at the point  $\mathbf{P}$  given by the principle of superposition,

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 \quad (3)$$

The complex amplitude at each point of the hologram is the sum of the amplitudes of the two waves.

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp(-i\omega t) \left[ \begin{array}{l} \exp(ikz + 2ik\Delta d) \\ + \exp(ikz \cos \theta + ikx \sin \theta) \end{array} \right] \quad (4)$$

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp(-i\omega t) \left[ \begin{array}{l} \cos(kz + 2k\Delta d) \\ + \cos(kz \cos \theta + kx \sin \theta) \end{array} \right] \quad (5)$$

$$+ i \mathbf{E}_0 \exp(-i\omega t) \left[ \begin{array}{l} \sin(kz + 2k\Delta d) \\ + \sin(kz \cos \theta + kx \sin \theta) \end{array} \right]$$

Therefore, the light intensity will be

$$\mathbf{I} = \langle \mathbf{E}^2 \rangle \quad (6)$$

$$\mathbf{I} = (\mathbf{E}_1)^2 + (\mathbf{E}_2)^2 + \mathbf{E}_1^* \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_1 \mathbf{E}_2^* \quad (7)$$

In Equation (7), the first and the second terms correspond to the intensity of each wave. The third and the fourth terms have represented the interference or the holographic term, which is a function of the phase difference between the individual waves.

Thus, the intensity distribution can be written as equation below,

$$\mathbf{I} = 4(\mathbf{E}_0)^2 + \cos^2(kz \sin^2(\theta/2) + k\Delta d) - (kx/2(\sin \theta)) \quad (8)$$

The fringe pattern will be strictly straight lines with fringe width.

## 2. Fabrication of dry film holographic grating

The fabricated schematic diagram of dry film holographic grating based on the lithography technique is shown in figure 1. The mask generated by computer simulation was selected. The mask which is the fringe

pattern generated by computer simulation was printed on plastic film where the sharpness of the pattern depends on the interference angle and resolution of the printer. Based on lithography technique, the mask was attached on dry film and illuminated by 10 W UV source, exposure is 10 minutes. Consequently, the grating pattern was transferred to the dry film.

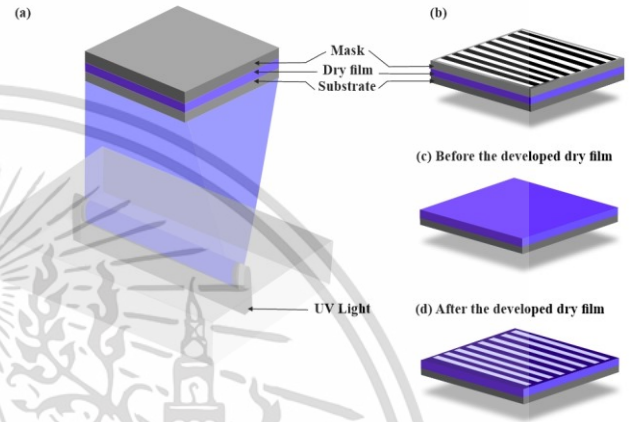


Figure 1. The schematic diagram for fabrication of holographic grating, (a) The system is illuminated by UV light, (b) The mask was attached on dry film, (c) Before the developed dry film, (d) After the developed dry film.

Afterward, the film is developed and removed with a 0.09 molar solution of Sodium Carbonate ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) in water. The area exposed to light solidifies and insoluble in the developer and remover chemical process is appeared the dark band. While the area not exposed to light weakens and dissolves is appeared the bright band. Finally, the dry film holographic grating is durability captured on the film. Repeat the experiment in steps by varying the mask to sample 2, 3, 4, and 5 respectively.

## III Results and Discussion

### 1. Simulation results of the masks

Figure 2 shows the mask, grating period, generated by computer simulation and the grating periods are shown in table 1.

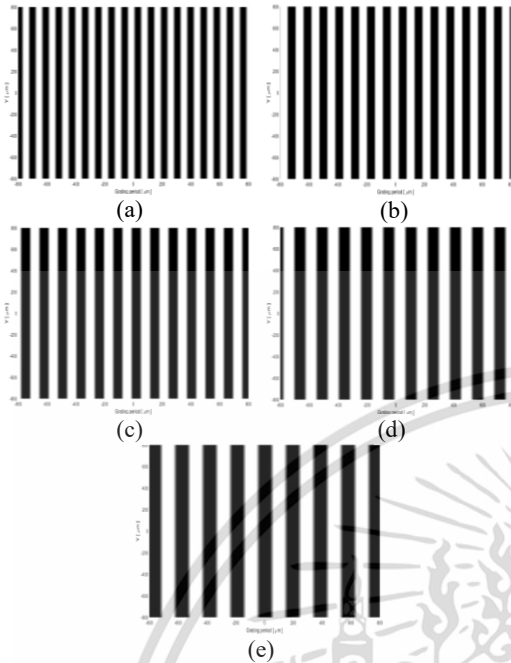


Figure 2. Image of the mask generated by computer simulation, (a) Sample 1, (b) Sample 2, (c) Sample 3, (d) Sample 4, and (e) Sample 5.

Table 1. The grating periods generated by computer simulation.

Sample	Angle (deg.)	The grating period ( $\mu\text{m}$ )
1	0.80	45.00
2	0.70	51.00
3	0.60	63.00
4	0.50	72.00
5	0.45	82.00

## 2. Observation of grating period by the light source

The schematic diagram for observation of grating period by the light source is shown in figure 3. The grating surface is illuminated by the He-Ne laser after that diffraction pattern appears on the screen. From equation (9) the grating period ( $d$ ) is calculated based on diffraction angle  $\theta_m$  expressed as,

$$d = \lambda / \sin \theta_m \quad (9)$$

where  $\lambda$  is the wavelength of the light source and  $\theta_m$  is the diffraction angle. The grating periods are shown in table 2.

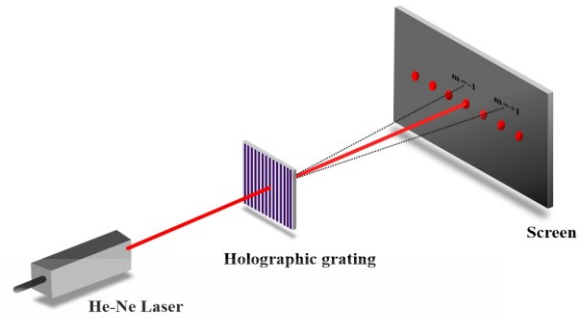


Figure 3. The schematic diagram for observation of grating period.

## 3. Observation of grating period by Scanning Electron Microscope

The grating periods were also observed and confirmed by Scanning Electron Microscope (SEM). Figure 4 (a-e) shows the image of the dry film holographic grating and the grating periods are shown in table 2.

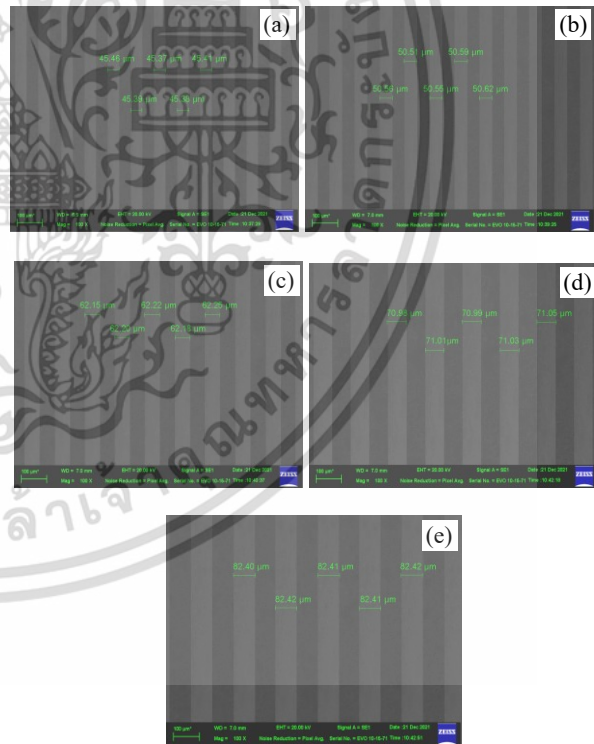


Figure 4. Image of dry film holographic gratings obtained by SEM, where (a) Sample 1, (b) Sample 2, (c) Sample 3, (d) Sample 4, and (e) Sample 5.

Table 2. The grating periods of the dry film holographic grating.

Method	The grating period ( $\mu\text{m}$ ) of the sample				
	1	2	3	4	5
Experiment	45.32	51.07	62.51	71.09	82.40
SEM	45.40	50.57	62.20	71.01	82.41
Percentage difference (%)	0.18	0.98	0.50	0.11	0.01

#### IV Conclusion

In this research, an alternative technique and fabrication results for the fabrication of dry film holographic grating based on the computer-generated mask are presented. Based on the lithography technique, the mask is transferred to a dry film photoresist and the dry film holographic grating is obtained. Afterward fabrication, the grating was investigated and analyzed. The grating period was observed and confirmed. The result shows that the grating periods obtained from computer simulation and experiment are slightly different. The grating periods obtained from SEM, for sample 1 to sample 5 with various interference angles between  $0.80^\circ$  to  $0.45^\circ$  are in the range between  $45.40 \mu\text{m}$  and  $82.41 \mu\text{m}$ . The results show that the grating period depends on the interference angle. Thus, we could be controlled the grating period from the interference angle. From the experimental results, we could apply the technique to fabricate a dry film holographic grating and the grating could apply to be optical sensor and spectroscopy.

#### References

- [1] Chen, T. T., and Hawang, D. M., "Grating fabrication by interference of laser beams," *Chin. J. Phys.* 15, 6-9 (1997).
- [2] Koch, F., Lehr, D., and Glaser, T., "Stability requirements for two-beam interference lithography diffraction grating manufacturing," *Proc. of SPIE* 10448, 104481L-1 (2017).
- [3] Inneam, C., and Srinuanjan, K., "Fabrication of Holographic Grating by alternative setting of Michelson Interferometer," *J. Phys.: Conf. Ser.* 1719, 012087 (2021).
- [4] Sun, G., Hu, Y., Dong, M., He, Y., Yu, M., and Zhu, L., "Flexible membrane curvature sensor based on multilayer polyimide substrate and optical fiber implantation," *Optik*.176, 559-566 (2019).
- [5] Zhu, F., Zhang, Y., Qu, Y., Jiang, W., Su H., Guo, Y., and Qi, K., "Stress-insensitive vector curvature sensor based on a single fiber Bragg grating," *Opt. Fiber Technol.* 54, 102133 (2020).
- [6] Inneam, C., Srinuanjan, K., and Yindeesuk, W., "An application of reflective holographic gratings for measurement of cylindrical curvature," *J. Phys.: Conf. Ser.* 2145, 012054 (2022).
- [7] Zito, G., Piccirillo, B., Santamato, E., Marino, A., Tkachenko, V., and Abbate, G., "Computer-generated holographic gratings in soft matter," *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 465, 371-378 (2007).
- [8] Li, S., and Wang, Z., "Generation of optical vortex based on computer-generated holographic gratings by photolithography," *Appl. Phys. Lett.* 103, 141110 (2013).
- [9] Chen, Y. P., Lee, Y. P., Chang, J. H., and Wang, L. A., "Fabrication of concave gratings by curved surface UV-nanoimprint lithography," *J. Vac. Sci. Technol. B* 26, 1690 (2008).
- [10] Yao, Y., Wang, Y., Liu, H., Li, Y., Song, B., and Wu, W., "Line width tuning and smoothing for periodical grating fabrication in nanoimprint lithography," *Appl. Phys. A* 121, 399-403 (2015).
- [11] Lin, C. H., Lin, Y. M., Liang, C. C., Lee, Y. Y., Fung, H. S., Shew, B. Y. and Chen, S. H., "Extreme UV diffraction grating fabricated by nanoimprint lithography," *Microelectron. Eng.* 98, 194-197 (2012).
- [12] Hagouel, P. I., "Blazed diffraction gratings fabricated using X-ray lithography: fabrication, modeling and simulation," *Microelectron. Reliab.* 43, 249-258 (2003).
- [13] Deng, X., Chen, J., Liu, J., Ma, Y., Cheng, X., and Li, T., "Replication and subdivision of chromium nano-grating in atom lithography," *Proc. of SPIE* 9628, 96281O (2015).
- [14] Tkachenko, N. V., *Optical Spectroscopy: Methods and Instrumentations*, Elsevier B.V., 19-22 (2006).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวชนิกานต์ อินทร์เนียม
วัน เดือน ปีเกิด	15 สิงหาคม พ.ศ. 2540
ที่อยู่ปัจจุบัน	1/10 หมู่ 11 ถนนพุทธสาคร ตำบลคลองมะเดื่อ อำเภอกระทุ่มแบน จังหวัดสมุทรสาคร 74110
ประวัติการศึกษา	(2562) วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ เกรดเฉลี่ย 3.31 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนการศึกษาต่อระดับบัณฑิตศึกษา ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2563
ผลงานทางวิชาการ	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. An application of reflective holographic gratings for measurement of cylindrical curvature ระหว่างวันที่ 24-25 พฤษภาคม 2564 ณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา ประเทศไทย</li> <li>2. Dry film Holographic grating based on computer-generated mask Lithography ระหว่างวันที่ 18-22 เมษายน 2565 ณ แปซิฟิกโก โยโกฮามา ประเทศญี่ปุ่น</li> </ol>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Plagiarism Checking Report

Created on Dec 13, 2022 at 12:09 PM

## Submission Information

ID	SUBMISSION DATE	SUBMITTED BY	ORGANIZATION	FILENAME	STATUS	SIMILARITY INDEX
2875390	Dec 13, 2022 at 12:09 PM	63605028@kmitl.ac.th	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	รวม.pdf	Completed	3.33 %

## Match Overview

NO.	TITLE	AUTHOR(S)	SOURCE	SIMILARITY INDEX
1	ผลของกระแสเซอร์โคเนียมคาโทดที่มีต่อสมบัติของฟิล์มบางโครเมียมเซอร์โคเนียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยเทคนิครีแอคทีฟแมกนีตรอนโคสปีดเดอริง, Effect of Zirconium Cathode Current on Properties of Chromium Zirconium Nitride Thin Film Deposited by Reactive Magnetron Co-Sp	สรสิงห์ ไชยคุณ	มหาวิทยาลัยบูรพา	1.06 %
2	การสร้างเกรตติงเลี้ยวเบนจากฟิล์มไฮบริดไอแสงระหว่างซิลิกอนไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีการสร้างลวดลาย โดยอาศัยหลักการแทรกสอด	จลนตรี, ประสมพร	วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง	0.61 %
3	การศึกษากระบวนการสร้างและสมบัติทางไฟฟ้าของฮอลล์เซนเซอร์ 2 มิติ	อริษา สมพงษ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	0.43 %
4	การศึกษาฟิล์มบางโครเมียมออกไซด์โดยการเตรียมด้วยวิธี ดีซีรีแอคทีฟ แมกนีตรอนสปีดเดอริง	ไชยยันต์ ไอร์ส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	0.37 %
5	ลักษณะสมบัติการส่งผ่านของแสงในโพรงเส้นพ้องแบบเรซแทรคซ์ที่แทรกด้วยแบรกกเรตติง, Transmission characteristics of light in a racetrack resonator combined with bragg grating.	วีระพันธ์ ทิพาพงศ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	0.36 %
6	การวัดความยาววาฟเฟนซ์ของแสงโดยใช้ไมเซลล์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์	นันทนา เงินเลี้ยง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	0.29 %
7	เครื่องเคลือบฟิล์มบางนาโนด้วยเทคนิคระเหยสารในสุญญากาศ, Nano-Thin film coater by vacuum evaporation technique	สรสิงห์ ไชยคุณ, นิรันดร์ วิทอนันต์	มหาวิทยาลัยบูรพา	0.20 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TEXT FROM SUBMITTED DOCUMENT

จสารบัญหน้าบทคัดย่อภาษาไทยบทคัดย่อภาษาอังกฤษคติดิกรรประภาศ  
 สารบัญจสารบัญตารางณสารบัญรูปภูมิบทที่ 1 บทนำ 1 11 ความเป็นมาและ  
 ความสำคัญของปัญหา 1 12 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2 13 ขอบเขตของงาน  
 วิจัย 2 14 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3 บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง  
 4 21 การแทรกสอดของลำแสงสองลำ 4 211 การแทรกสอดของคลื่นแสง  
 Interference of light waves 4 212 รูปแบบการแทรกสอดของแสง The  
 interference

TEXT FROM SOURCE DOCUMENT(S)

นำไปเป็นแนวทางในงานวิจัยอื่นๆต่อไปจสารบัญหน้าบทคัดย่อภาษาไทยบท  
 คัดย่อภาษาอังกฤษคติดิกรรประภาศสารบัญจสารบัญตารางณสารบัญรูปภูมิบทที่ 1 บทนำ 1 11 ความเป็นมาและความ  
 สำคัญของงานวิจัย 1 12 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2 13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3  
 14 ขอบเขตของงานวิจัย 6 15 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย 7 2  
 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย 8 21 ปรากฏการณ์การแทรกสอดของแสง 8 211  
 การทดลองของยัง 8 212 การแจกแจงความเข้มของริ้วการแทรกสอด 11 22  
 ความเป็นอาพันธ์ 15 221 อาพันธ์ตามเวลา 17 222 อาพันธ์ตามตำแหน่ง 23  
 223 อาพันธ์ตามตำแหน่งและเวลา 27 224 ความยาวอาพันธ์ 27 23 ทฤษฎีพื้น  
 ฐานของไมเคลสันอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ 29 231 ส่วนประกอบและหลักการของ  
 ไมเคลสันอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ 31 232 การปรับให้กระจก M 1 และกระจก M 2  
 ตั้งฉากซึ่งกันและกัน 31 233 หลักการเกิดการแทรกสอดแบบฟรินจ์กลม 32 จ  
 234 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงของฟรินจ์กลมเมื่อปรับเลื่อนกระจก 37 235 รูป  
 แบบฟรินจ์เมื่อกระจก M 1 และกระจก M 2 ไม่ตั้งฉากกัน 38 3 วิธีดำเนินการวิจัย  
 41 31 รายชื่ออุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย 41 32 ระบบไมเคลสันอินเตอร์เฟียโร  
 มิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย 41 33 แหล่งกำเนิดแสง 42 331 คุณสมบัติของแสงจาก  
 แหล่งกำเนิดแสงทั่วไป 42 332 คุณสมบัติของแสงจากแสงเลเซอร์ 43 34 วิธี  
 การทดลอง 45 341 วิธีการทดลองการวัด

วานเดียม 43 318 ไดอะแกรมรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ปรากฏบนฉากรับได้จการ  
 กระจายแสงเลเซอร์ผ่านโฮโลกราฟฟิกเกรตติง 43 41 แบบจำลองเกรตติงทาง  
 คณิตศาสตร์ของ Sample 1 49 42 แบบจำลองเกรตติงทางคณิตศาสตร์ของ  
 Sample 2 49 43 แบบจำลองเกรตติงทางคณิตศาสตร์ของ Sample 3 50 44  
 แบบจำลองเกรตติงทางคณิตศาสตร์ของ Sample 4 50 45 แบบจำลองเกรตติง  
 ทางคณิตศาสตร์ของ Sample 5 50 46 ภาพการส่อง

ทางแสง\ก1.3.2ศึกษาหลักการของโพรงสั่นพ้องแบบเรซแทรกซ์การทาง  
 ของโพรงสั่นพ้องและการ \ก ประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ\ก1.3.3ศึกษาสมบัติ  
 ของเส้นใยแก้วชนิดแบร็กเกรตติงหลักการของเส้นใยแก้วแบบแบร็กเกรตติง \ก  
 การทำงานของเส้นใยแก้วแบบแบร็กเกรตติงและการประยุกต์ใช้ในงานด้าน  
 ต่างๆ\ก1.3.4สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโพรงสั่นพ้องแบบเรซแทรกซ์  
 ที่แทรกด้วยแบร็กเกรต \ก ดึงเพื่อหาความสัมพันธ์ของความเข้มของสนาม  
 ไฟฟ้าที่ถูกส่งออกมาที่พอร์ตเอาต์พุตผ่านโปรแกรม \ก matlab เมื่อทำการ  
 เปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ \ก1 .ความยาวของโพรงสั่นพ้องแบบเรซ  
 แทรกซ์ \ก2 .จำนวนชั้นของแบร็กเกรตติง \ก3 .ค่าดัชนีหักเหของชั้นสารไดอิ  
 เลกทริกภายในแบร็กเกรตติงที่มีค่าดัชนีหักเหต่าง \ก1.3.5วิเคราะห์ผลการ  
 ทดลองและสรุปผลการทดลองที่ได้จากรูปของแบบจำลองทาง \ก  
 คณิตศาสตร์ของโพรงสั่นพ้องแบบเรซแทรกซ์ที่แทรกด้วยแบร็กเกรต  
 ตติง\ก1.4ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจงานวิจัย\ก1.4.1ทาให้ทราบถึงหลักการ  
 พื้นฐานทางด้านของแสงหลักการซ้อนทับกันของคลื่นการแทรก \ก สอดของ  
 แสง\ก1.4.2ทาให้ทราบถึงหลักการของโพรงสั่นพ้องแบบเรซแทรกซ์การ  
 เคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้า \ก ภายในโพรงสั่นพ้องแบบเรซแทรกซ์\ก1.4.3ทาให้  
 ทราบถึงหลักการของเส้นใยแก้วชนิดแบร็กเกรตติง\ก1.4.4สามารถสร้างแบบจ  
 ลองทางคณิตศาสตร์ของโพรงสั่น

พิจารณาจากสมบัติเชิงเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าดังนั้นสมการของคลื่นสอง  
 ขบวนจะได้เป็น 1 01 1 1 28 2 02 2 2 29 เมื่อ 1 และ 2 คือเวกเตอร์คลื่นคือ  
 เวกเตอร์ตำแหน่งของจุดใดๆในสนามไฟฟ้าคือความถี่เชิงมุม 1 และ 2 คือเฟส  
 เริ่มต้นของคลื่นจากแหล่งกำเนิด 1 01 2 1 210 2 02 2 2 211

Field) เป็น \น1 \nE \n และ \n2 \nE \n นั้นการศึกษาการแทรกสอดของแสง  
 คลื่นทั้งสองมีกออกจากแหล่งกำเนิดเดียวกันและ \n เคลื่อนที่ไปในระยะทางที่  
 แตกต่างกันกล่าวคือคลื่นแสงทั้ง 2 ลาจจะต้องมีความถี่เท่ากันแต่ทิศทาง \n การ  
 แฝของเวกเตอร์คลื่น \n1 \nk และ \n2 \nk นั้นแตกต่างกันโดยสามารถเขียน  
 สมการของคลื่นทั้ง 2 ลาได้ดัง \n สมการ \n \n1 01 1 1 \ncos \nE k r t \n  
 \n \n (2.1) \n \n2 02 2 2 \ncos \nE k r t \n \n (2.2) \n เมื่อ n01 \n  
 nE และ n02 \n nE คือแอมพลิจูดของคลื่นลาที่ 1 และ 2 \n1 \nk และ \n2 \n  
 nk คือเวกเตอร์การแผ่คลื่น ( Propagation Vector ) มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อ  
 เมตร nr คือเวกเตอร์บอกตำแหน่งของจุดใดๆในสนามไฟฟ้ามีหน่วยเป็นเมตร \n  
 คือความถี่เชิงมุม ( Angular Frequency ) มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที \n1 \n  
 \n และ \n2 \n \n คือเฟสเริ่มต้นของคลื่นจากแหล่งกำเนิด \n

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเกรตติงซึ่งมีน้อยในทางปฏิบัติเพื่อที่จะใช้งานจึงได้ทำการถอดแบบเกรตติง replica ของเกรตติงต้นแบบ master grating เกรตติงถอดแบบเป็นเกรตติงที่ได้ทำการถอดแบบมาจากเกรตติงต้นแบบโดยการเทชั้นบางของสารละลายคอลลอยด์ลงบนพื้นผิวเกรตติงต้นแบบเมื่อสารละลายแข็งตัวจึงแกะฟิล์มของคอลลอยด์ออกจากพื้นผิวเกรตติงต้นแบบและนำไปติดตั้งระหว่างแผ่นแก้ว

ว่าพื้นที่บริเวณนี้จะเกิดการหลุดออกไปเนื่องจากกระบวนการล้างจนหมดทำให้เกิดเป็นริ้วของการแทรกสอดบนแผ่นฟิล์มสลับกันตามลวดลายของริ้วจากการแทรกสอดของแสงเลเซอร์จากระบบการสร้างลวดลายโดยอาศัยหลักการแทรกสอดของแสงเลเซอร์เมื่อนำค่าจากระบบการแทรกสอดที่จักแสงมาคำนวณพบว่าเกรตติงที่ได้มีค่าระยะห่างระหว่างเกรตติง dspacing 116 ไมโครเมตรแสดงโดยใช้สมการที่ 2 Period 124 m วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบังปีที่ 21 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคมมิถุนายน 2555 63 2 เมื่อคือระยะห่างระหว่างร่องของเกรตติงคือมุมของการแทรกสอดระหว่างลำเลเซอร์ทั้งสองคือความยาวคลื่นของเลเซอร์รูปที่ 7 ซึ่งจะแสดงลักษณะทางพื้นผิวของลวดลายของแผ่นเกรตติงที่สามารถบันทึกลวดลายได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงพบว่าพื้นผิวของเกรตติงเลี้ยวเบนที่ได้มีลักษณะเป็นลูกคลื่นสลับกันตามลักษณะของริ้วการแทรกสอดของแสงตามภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมทำให้เห็นถึงลวดลายของเกรตติงและความละเอียดซึ่งสามารถยืนยันกับค่าที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ 1 โดยการวัดระยะการเลี้ยวเบนของแสงที่เดินทางผ่านเกรตติงพบว่าจากระบบดังรูปที่ 8 เกิดการเลี้ยวเบนของแสงเลเซอร์ที่ฉายผ่านแผ่นเกรตติงเมื่อนำเอาค่าระยะการเลี้ยวเบนที่ได้จากการทดลองมาคำนวณเพื่อหาระยะห่างเกรตติง dspacing

24 รูปที่ 218 แผนผังกระบวนการสร้างฟิล์มบางด้วยไอทางกายภาพ 252 วิธีทางกายภาพ Physical process 19 เป็นการเคลื่อนที่อาศัยการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วฟุ้งกระจายหรือวิ่งเข้าไปจับและยึดติดกับผิวของแผ่นรองรับโดยการใช้ความร้อน thermal และระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน electron beam evaporation รวมถึงวิธีที่ใช้แสงเลเซอร์ laser ablation วิธีสปัตเตอร์ sputtering ในส่วนของวิธีทางกายภาพสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลักดังต่อไปนี้ 1 การเคลื่อน

ซึ่งจะ n ทำให้ไอระเหยของสารเคลือบมีการชนกับอนุภาคอื่นภายในสถานะสุญญากาศนอกจากนี้ไอระเหยอาจจะ n เคลื่อนที่ไปยังวัสดุรองรับในลักษณะของพลาสมาได้ n3 .การสะสมพอกพูน ( Deposition ) เป็นขั้นตอนการพอกพูนของสารเคลือบและโตขึ้นจนกลายเป็น n ชั้นของฟิล์มบางบนวัสดุรองรับขั้นตอนนี้จะขึ้นกับเงื่อนไขของวัสดุรองรับหรือการทำปฏิกิริยาของสาร n เคลือบกับวัสดุรองรับความสะอาดของผิววัสดุรองรับตลอดจนพลังงานที่ใช้ในการเคลือบ n ภาพที่ 2 - 1 ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ (Wasa & Hayakawa \, 1992 ) n 5 \ n การเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศแบ่งเป็น 2 กลุ่ม (Wasa & Hayakawa \, 1992 ) (ภาพที่ 2 - 1 ) ได้แก่ n1 .การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางเคมี ( Chemical Process ) เป็นการเคลื่อนที่อาศัย n การแตกตัวของสารเคมีในสภาพของแก๊สแล้วเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารใหม่ ( New Species ) ตกเคลือบ n บนวัสดุรองรับ เช่นวิธี Plasma CVD และวิธี Laser CVD เป็นต้น n2 .การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ ( Physical Process ) เป็นการเคลื่อนที่อาศัย n การทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วฟุ้งกระจายหรือวิ่งเข้าไปจับและยึดติดกับผิวของ n วัสดุรองรับเช่นวิธีระเหยสาร ( Evaporation ) และวิธีสปัตเตอร์ ( Sputtering ) เป็นต้น n โดยการเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์นั้นอาศัยการทำให้อะตอมสารเคลือบหลุดจากผิว n ของสารตั้งต้นแล้วฟุ้งกระจายไปยึดติดผิววัสดุรองรับแล้วพอกพูนเป็นชั้นของฟิล์มบางในที่สุดสามารถแบ่ง n ได้เป็น 2 วิธีหลักๆ (พิเศษฐลัมสุวรรณและธนัสถารัตนะ, 2547 ; Wasa & Hayakawa \, 1992 ) คือ n1 .การเคลือบด้วยวิธีระเหยสาร ( Evaporation

ฟิล์มโดยวิธีระเหยสาร evaporation เป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ทำให้ระเหยซึ่งเกิดขึ้นในสุญญากาศโดยการให้ความร้อนที่มากพอที่จะทำให้สารเคลือบกลายเป็นไอซึ่งไอสารเคลือบนี้จะฟุ้งไปกระทบกับวัสดุที่มีอุณหภูมิเหมาะสมก็จะเกิดการควบแน่นของสารเคลือบและพอกพูนเป็นชั้นของฟิล์มบางต่อไปข้อเสียของการเคลือบวิธีนี้คือแรงยึดติดระหว่างสารเคลือบและแผ่นรองรับจะไม่สูงนอกจากนี้ฟิล์มบางที่ได้อาจ

นั้นอาศัยการทำให้อะตอมสารเคลือบหลุดจากผิว n ของสารตั้งต้นแล้วฟุ้งกระจายไปยึดติดผิววัสดุรองรับแล้วพอกพูนเป็นชั้นของฟิล์มบางในที่สุดสามารถแบ่ง n ได้เป็น 2 วิธีหลักๆ (พิเศษฐลัมสุวรรณและธนัสถารัตนะ, 2547 ; Wasa & Hayakawa \, 1992 ) คือ n1 .การเคลือบด้วยวิธีระเหยสาร ( Evaporation ) เป็นการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ n ทำให้ระเหยซึ่งเกิดขึ้นในสุญญากาศทำได้โดยการให้ความร้อนที่มากพอที่จะทำให้สารเคลือบกลายเป็นไอ n ซึ่งไอของสารเคลือบนี้จะฟุ้งไปกระทบกับวัสดุรองรับที่มีอุณหภูมิเหมาะสมก็จะเกิดการควบแน่นของสาร n เคลือบและพอกพูนได้เป็นชั้นของฟิล์มบางต่อไปการให้ความร้อนในการระเหยสารเคลือบทำได้หลายวิธี n แต่วิธีที่นิยมใช้และไม่ยุ่งยากคือการให้ความร้อนแก่ภาชนะบรรจุสารเคลือบด้วยวิธีทางไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมี n วิธีอื่นเช่นการให้ความร้อนจากตัวต้านทาน ( Resistive Heating ) การระเหยแบบวาบแสง ( Flash \ nEvaporation ) การระเหยด้วยเลเซอร์ ( Laser Evaporation ) การระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน ( Electron \ nBeam Evaporation ) การระเหยด้วยการอาร์ค ( Arc Evaporation ) การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ n ( Radio Frequency Heating ) การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีนี้นิยมใช้เคลือบสารไดอิเล็กทริก ( Dielectric ) n เช่นแมกนีเซียมไดฟลูออไรด์ ( MgF2 \ n ) หรือออกไซด์ ( Oxide ) ของโลหะที่มีสมบัติโปร่งใสบนวัตถุที่ต้องการ n เคลือบเช่นเลนส์กล้องถ่ายรูปแว่นตาและกระจกเลเซอร์ ฯลฯ สำหรับข้อเสียของการเคลือบวิธีนี้คือแรงยึด n ติดระหว่างสารเคลือบและวัสดุรองรับจะไม่สูงนักจึงต้องอาศัยกระบวนการควบแน่นหรือวิธีอื่นช่วย n ให้การยึด

มีการปนเปื้อนของสารที่ใช้ทำภาชนะสารเคลือบได้ถ้าภาชนะบรรจุสารเคลือบมีจุดหลอมเหลวต่ำหรือใกล้เคียงกับสารเคลือบ 2 การเคลือบฟิล์มโดยวิธีสปัตเตอร์ sputtering เป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบจากกระบวนการสปัตเตอร์ซึ่งการเคลือบด้วยวิธีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อไอออนสารเคลือบจากกระบวนการสปัตเตอร์วิ่งชนแผ่นรองรับและมีการพอกพูนเป็นฟิล์มบางเนื่องจากไอออนที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าวิธีการ

( Dielectric ) \ n เช่นแมกนีเซียมไดฟลูออไรด์( MgF2 \ n )หรือออกไซด์( Oxide )ของโลหะที่มีสมบัติโปร่งใสในวัสดุที่ต้องการ \ n เคลือบเช่นเลนส์กล้องถ่ายรูปแว่นตาและกระจกเลเซอร์ ฯลฯ สำหรับข้อเสียของการเคลือบวิธีนี้คือแรงยึด \ n ดัดระหว่างสารเคลือบและวัสดุรองรับจะไม่สูงนักจึงต้องอาศัยกระบวนการอบด้วยความร้อนหรือวิธีอื่นช่วย \ n ให้การยึดเกาะของสารเคลือบดีขึ้นนอกจากนี้ฟิล์มบางที่ได้จากมีการปนเปื้อนของสารที่ใช้ทำภาชนะบรรจุ \ n สารเคลือบได้ถ้าภาชนะบรรจุสารเคลือบมีจุดหลอมเหลวต่ำหรือใกล้เคียงกับสารเคลือบ \ n 2 .การเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอร์ ( Sputtering )เป็นการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ได้ \ n จากกระบวนการสปัตเตอร์การเคลือบด้วยวิธีนี้จะเกิดขึ้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการ \ n สปัตเตอร์วิ่งเข้าชนวัสดุรองรับและมีการพอกพูนเป็นฟิล์มบางในที่สุดกระบวนการสปัตเตอร์คือการทำ \ n ให้อะตอมหลุดจากผิวของวัสดุโดยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัม \ n ระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิวสารเคลือบเนื่องจากไอออนที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอร์จะ \ n เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าวิธีการระเหยสารมากดังนั้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบวิ่งเข้ากระทบบนวัสดุ \ n รองรับก็จะฝังตัวแน่นลงในเนื้อวัสดุที่ต้องการเคลือบมากกว่าวิธีการระเหยสารดังนั้นการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอร์ \ n จึงจะทำให้การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบกับวัสดุรองรับดีกว่า \ n 6 \ n 2.2การก่อเกิดฟิล์มบาง \ n การเกิดฟิล์มบางจากกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ Chapman ( 1980 )ได้อธิบายไว้ดังนี้ \ n เมื่อสารเคลือบจากแหล่งกา

ระเหยสารมากดังนั้นเมื่อไอออนของสารเคลือบวิ่งเข้ากระทบบนแผ่นรองรับก็ฝังตัวแน่นลงในแผ่นรองรับวิธีระเหยสารดังนั้นการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอร์จะทำให้การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบกับแผ่นรองรับดีกว่า

เนื่องจากไอออนที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอร์จะ \ n เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าวิธีการระเหยสารมากดังนั้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบวิ่งเข้ากระทบบนแผ่น \ n วัสดุรองรับก็จะฝังตัวแน่นลงในเนื้อวัสดุที่ต้องการเคลือบมากกว่าวิธีการระเหยสาร ดังนั้นการเคลือบด้วย \ n วิธีสปัตเตอร์จะทำให้การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบกับวัสดุรองรับดีกว่า \ n ภาพที่ 2 - 2 ระบบการเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีระเหยสาร \ n ภาพที่ 2 - 3 ระบบการเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีสปัตเตอร์ \ n 7 \ n 2.2สถานะสุญญากาศกับการเคลือบ \ n การเคลือบในสุญญากาศอะตอมของสารเคลือบในกระบวนการเคลือบอาจอยู่ในลักษณะของโมเลกุล \ n อะตอมหรือกลุ่มอะตอมของสารเคลือบจากวิธีต่างๆเช่นการให้ความร้อนหรือการถ่ายเทโมเมนตัม \ n ทั้งนี้หากความดันในห้องเคลือบมีค่าสูงกรณีนี้ห้องเคลือบมีปริมาณอะตอม

ของแข็ง 5 ให้ฟิล์มบางที่มีแรงยึดเกาะสูงทำให้ฟิล์มบางมีความคงทน 6 มีอัตราการเคลือบฟิล์มสูง 262 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ 20 เมื่อไอออนพลังงานสูงวิ่งชนผิวหน้าวัสดุจะเกิดปรากฏการณ์ต่างๆดังรูปที่ 220 ดังนี้ 1 การสะท้อนที่ผิวหน้าของไอออน Reflected ions and neutrals ไอออนอาจสะท้อนกลับจากผิวหน้าซึ่งส่วนใหญ่จะสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้าอันเกิดจากการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวเป้าสารเคลือบ

สปัตเตอร์ 154 สามารถวิเคราะห์ลักษณะของการเกิดผลึกบนแผ่นฟิล์มโครเมียมออกไซด์ภายหลังจากทำการอบเพื่อให้ความร้อน Anneal Heating แก่แผ่นฟิล์มให้มีอุณหภูมิตั้งแต่ 200 600 องศาเซลเซียสด้วยเครื่อง XRD บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 21 การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอร์เมื่อผิวหน้าของวัสดุถูกระดมยิง Bombarded ด้วยอนุภาคพลังงานสูงจะทำให้เกิดการสีก้อนและเมื่ออนุภาคที่ผิวหน้าของวัสดุนั้นหลุดออกมาเนื่องจากการชนของอนุภาคพลังงานสูงกับอนุภาคที่ผิวหน้าปรากฏการณ์ที่อนุภาคผิวหน้าวัสดุหลุดออกมานี้เรียกว่าสปัตเตอร์ Sputter หรือสปัตเตอร์ Sputtering กระบวนการสปัตเตอร์นี้ถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อ 100 กว่าปีที่ผ่านมาโดย Grove ซึ่งในขณะนั้นสปัตเตอร์เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดความเสียหายกับคาโทดและกริดในหลอดดีสชาร์จ์แต่ปัจจุบันมีการนำกระบวนการนี้มาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางเช่นการทำ ความสะอาดผิวหน้า Surface Cleaning การกัดเซาะ Etching การวิเคราะห์ชั้นผิวหน้าของวัสดุ Surface Layer Analysis และการเคลือบฟิล์มบางซึ่งการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีนี้จะมีหลักการเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับวิธีสปัตเตอร์ 12 14 ดังนี้ 211 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบเมื่อไอออนพลังงานสูงวิ่งชนผิวหน้าวัสดุจะเกิดปรากฏการณ์ต่างๆดังนี้ 1 การสะท้อนที่ผิวหน้าของไอออน Reflected Ions and Neutrals ไอออนอาจสะท้อนกลับจากผิวหน้าซึ่งส่วนใหญ่จะสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้าอันเกิดจากการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวเป้าสารเคลือบ 2 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สอง Secondary Electron

27 3 การฝังตัวของไอออน Ion implantation ไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบนั้น ไอออนอาจฝังตัวลงในสารเคลือบโดยความลึกของการฝังตัวจะแปรผันโดยตรงกับพลังงานไอออนซึ่งมีค่าประมาณ 10 A พลังงานไอออน 1 keV สำหรับไอออนของก๊าซอาร์กอนที่ฝังตัวในแผ่นทองแดง 4 การเปลี่ยนโครงสร้างของผิวสารเคลือบการชนของไอออนบนผิวสารเคลือบทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวสารเคลือบใหม่และเกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึก lattice defect 5 การสปีดเดอร์การ

การปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองจากเป้าสารเคลือบถ้าไอออนนั้นมีพลังงานสูงพอ 3 .การฝังตัวของไอออน( Ion implantation )ไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบนั้น ไอออนอาจฝังตัวลงในสารเคลือบโดยความลึกของการฝังตัวจะแปรผันโดยตรงกับพลังงานไอออนซึ่งมีค่าประมาณ 10 A พลังงานไอออน 1 KeV สำหรับไอออนของก๊าซอาร์กอนที่ฝังตัวในแผ่นทองแดง 4 .การเปลี่ยนโครงสร้างของผิวสารเคลือบการชนของไอออนบนผิวสารเคลือบทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวสารเคลือบใหม่และเกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึก( Lattice defect ) 5 .การสปีดเดอร์การชนของไอออนที่ผิวหน้าเป้าอาจจะทำให้เกิดกระบวนการชนแบบต่อเนื่องอันทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมจากเป้าสารเคลือบซึ่งเรียกว่ากระบวนการสปีดเดอร์ 21 รูปที่ 2.11 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวสารเคลือบ 2.3.1.2 กระบวนการโกลวดิสชาร์จ( Glow Discharge )วิธีที่นิยมและใช้กันมากได้แก่กระบวนการโกลวดิสชาร์จซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ใช้เทคนิคนี้เช่นกันโดยในกระบวนการโกลวดิสชาร์จจะเกิดขึ้นโดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้ขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 2 ขั้วที่วางห่างกันเป็นระยะ D ภายใต้ความดันบรรยากาศที่ต่ำ(- Torr)เมื่อเริ่มต้นความต่างศักย์ไฟฟ้าผ่านน้อยกระแสไฟฟ้าจะเกิดจากอิเล็กตรอนและไอออนบวกซึ่งได้จากการแตกตัวก๊าซเนื่องจากเกิดการชนกันเองหรือถูกชนโดยรังสีคอสมิกอิเล็กตรอนจะวิ่งเข้าหาขั้วบวก( Anode )และไอออนบวกจะวิ่งเข้าหาขั้วลบ( Cathode )ซึ่งทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองแต่กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่าต่ำมากเมื่อทำการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดจนถึงแรง

311 311 โดยที่คือคาบของไฮโลกราฟฟิเคเรตติงคือความยาวคลื่นของเลเซอร์ HeNe มีค่าเท่ากับ 6328 นาโนเมตรคือมุมของรูปแบบการเลี้ยวเบนสามารถหาได้จาก 1 คือระยะห่างระหว่างรูปแบบการเลี้ยวเบนอันดับที่ศูนย์กับรูปแบบการเลี้ยวเบนอันดับที่หนึ่งคือระยะห่างระหว่างเกรตติงถึงฉากรับ

Period 124 m วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบังปีที่ 21 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม มิถุนายน 2555 63 2 เมื่อคือระยะห่างระหว่างร่องของเกรตติงคือมุมของการแทรกสอดระหว่างลำเลเซอร์ทั้งสองคือความยาวคลื่นของเลเซอร์รูปที่ 7 ซึ่งจะแสดงลักษณะทางพื้นผิวของลวดลายของแผ่นเกรตติงที่สามารถบันทึกลวดลายได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงพบว่าพื้นผิวของเกรตติงเลี้ยวเบนที่ได้มีลักษณะเป็นลูกคลื่นสลับกันตามลักษณะของรีการแทรกสอดของแสงตามภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมทำให้เห็นถึงลวดลายของเกรตติงและความละเอียดซึ่งสามารถยืนยันกับค่าที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ 1 โดยการวัดระยะการเลี้ยวเบนของแสงที่เดินทางผ่านเกรตติงพบว่าจากระบบตั้งรูปที่ 8 เกิดการเลี้ยวเบนของแสงเลเซอร์ที่ฉายผ่านแผ่นเกรตติงเมื่อนำเอาค่าระยะการเลี้ยวเบนที่ได้จากการทดลองมาคำนวณเพื่อหาระยะห่างเกรตติง dspacing ตามสมการที่ 1 พบว่าค่าระยะห่างระหว่างเกรตติงที่ได้มีค่า 124 ไมโครเมตรซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากระบบการสร้าง

57 414 ผลการวัดคาบของไฮโลกราฟฟิเคเรตติงด้วยวิธีการฉายแสงเลเซอร์ การวัดคาบของไฮโลกราฟฟิเคเรตติงและวิเคราะห์สมบัติการเลี้ยวเบนของแสงผ่านไฮโลกราฟฟิเคเรตติงด้วยวิธีการฉายแสงเลเซอร์เมื่อฉายแสงเลเซอร์ผ่านไฮโลกราฟฟิเคเรตติงจะปรากฏรูปแบบการเลี้ยวเบนของแสงบนฉากจากนั้นคาบของไฮโลกราฟฟิเคเรตติงสามารถคำนวณได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของ

คือความยาวคลื่นของเลเซอร์รูปที่ 7 ซึ่งจะแสดงลักษณะทางพื้นผิวของลวดลายของแผ่นเกรตติงที่สามารถบันทึกลวดลายได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงพบว่าพื้นผิวของเกรตติงเลี้ยวเบนที่ได้มีลักษณะเป็นลูกคลื่นสลับกันตามลักษณะของรีการแทรกสอดของแสงตามภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมทำให้เห็นถึงลวดลายของเกรตติงและความละเอียดซึ่งสามารถยืนยันกับค่าที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ 1 โดยการวัดระยะการเลี้ยวเบนของแสงที่เดินทางผ่านเกรตติงพบว่าจากระบบตั้งรูปที่ 8 เกิดการเลี้ยวเบนของแสงเลเซอร์ที่ฉายผ่านแผ่นเกรตติงเมื่อนำเอาค่าระยะการเลี้ยวเบนที่ได้จากการทดลองมาคำนวณเพื่อหาระยะห่างเกรตติง dspacing ตามสมการที่ 1 พบว่าค่าระยะห่างระหว่างเกรตติงที่ได้มีค่า 124 ไมโครเมตรซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากระบบการสร้างลวดลายแล้วนั้นค่าการเลี้ยวเบนที่ได้จากการทดสอบฉายแสงผ่านแสงเลเซอร์มีค่าการเลี้ยวเบนใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากระบบการจัดแสงเพื่อการสร้างลวดลายรูปที่ 7 ลวดลายของเกรตติงเลี้ยวเบนกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมวารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบังปีที่ 21 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคมมิถุนายน 2555 64 รูปที่ 8 การเลี้ยวเบนของแสงผ่านเกรตติงเลี้ยวเบนที่ได้จากการสร้างลวดลายโดยอาศัยหลักการแทรกสอดแสง 4 สรุปผลการทดลองเกรตติงเลี้ยวเบนแสงที่สร้าง