



การทำโมเดลชั้นของความเข้มแสงบนระนาบภาพสำหรับการสร้างเซนเซอร์  
ระดับไมครอน : การตรวจวัดคลื่นอัลตราโซนิก



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์  
วิทยาลัยวิศวกรรมชีวการแพทย์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยรังสิต

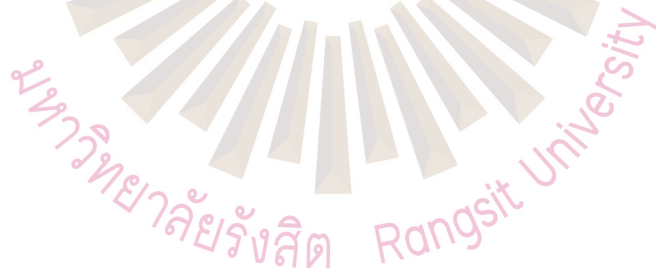
ปีการศึกษา 2564



**APPLICATION OF IMAGE PLANE INTENSITY MODULATION FOR  
MICROSCOPIC SCALE SENSOR FABRICATION:  
AN OPTICAL BASED ULTRASOIC DETECTION**

**BY**

**CHAYANISA SUKKASEM**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR  
THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING IN BIOMEDICAL ENGINEERING  
COLLEGE OF BIOMEDICAL ENGINEERING**

**GRADUATE SCHOOL, RANGSIT UNIVERSITY**

**ACADEMIC YEAR 2021**

วิทยานิพนธ์เรื่อง

การทำโมเดลชั้นของความเข้มแสงบนระนาบภาพสำหรับการสร้างเซนเซอร์ระดับไมครอน  
: การตรวจวัดคลื่นอัลตราโซนิก

โดย

ชญาณิศฯ สุขเกษม

ได้รับการพิจารณาให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์

มหาวิทยาลัยรังสิต

ปีการศึกษา 2564

ดร.ศุภนิจ พรธีระภัทร  
ประธานกรรมการสอบ

รศ.นันทชัย ทองแป้น  
กรรมการ

รศ. ดร.มนัส สัจจวิเศษ  
กรรมการ

รศ. ดร.เสด็จศักดิ์ เพ็ชรประสาน  
กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.พิชญ์สินี สุวรรณแพทย์  
กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(ผศ. ร.ต. หญิง ดร.วรรณิฯ สุขสาตร)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

21 กรกฎาคม 2564

Thesis entitled

**APPLICATION OF IMAGE PLANE INTENSITY MODULATION FOR MICROSCOPIC  
SCALE SENSOR FABRICATION: AN OPTICAL BASED ULTRASONIC DETECTION**

by

CHAYANISA SUKKASEM

was submitted in partial fulfillment of the requirements  
for the degree of Master of Engineering in Biomedical Engineering

Rangsit University  
Academic Year 2021

---

Supanit Porntheeraphat, Ph.D.  
Examination Committee Chairperson

Assoc. Prof. Nuntachai Thongpance  
Member

---

Assoc. Prof. Manus Sangworasil, Ph.D.  
Member

Assoc. Prof. Suejit Pechprasarn, Ph.D.  
Member and Advisor

---

Phitsini Suvarnaphaet, Ph.D.  
Member and Co-Advisor

Approved by Graduate School

(Asst. Prof. Plt. Off. Vannee Sooksatra, D.Eng.)

Dean of Graduate School

July 21, 2021

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้เป็นอย่างดีเนื่องมาจากได้รับความอนุเคราะห์จาก รศ. ดร. สৌจิตต์ เพ็ชรประสาร อาจารย์ที่ปรึกษา และ ดร. พิชญ์ลิณี สุวรรณแพทย์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้ความเอาใจใส่ช่วยเหลือ และคอยให้คำปรึกษาแนะนำเป็นอย่างดีมาโดยตลอด และขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) หน่วยสังเคราะห์ภาพระดับนาโน (The Center of Nanoimaging) และศูนย์นาโนโฟโตนิกส์ (Nanophononics Research Centre) มหาวิทยาลัยเซินเจิ้น ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์เพื่อการวิจัยเป็นอย่างดี รวมถึงขอขอบคุณสถาบันวิจัย มหาวิทยาลัยรังสิต สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และสำนักงานพัฒนาเศรษฐกิจจากฐานชีวภาพ (BEDO) ที่ให้ทุนสนับสนุนระหว่างการทำวิจัย

ชญาณิศา สุขเกษม

ผู้วิจัย

มหาวิทยาลัยรังสิต Rangsit University

6105647 : ชญาณิศา สุขเกษม  
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : การทำโมดูลेशनของความเข้มแสงบนระนาบภาพสำหรับการสร้าง  
 เซนเซอร์ระดับไมครอน: การตรวจวัดคลื่นอัลตราโซนิก  
 หลักสูตร : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์  
 อาจารย์ที่ปรึกษา : รศ. ดร. เต๋อจิดต์ เพ็ชรประสาน  
 อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : ดร. พิชญ์สินี สุวรรณแพทย์

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยหัวข้อเรื่อง การทำโมดูลेशनของความเข้มแสงบนระนาบภาพสำหรับการสร้าง เซนเซอร์ระดับไมครอนเพื่อใช้สำหรับการตรวจวัดคลื่นอัลตราโซนิก มีวัตถุประสงค์ในการ ออกแบบและพัฒนาระบบการฉายภาพในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีโดยการใช้อุปกรณ์กระจก ขนาดไมครอนแบบดิจิทัลและใช้วิธีการทำโมดูลेशनของความเข้มแสงบนระนาบภาพในการสร้าง ลวดลายต้นแบบเพื่อสร้างแม่พิมพ์เกรตติง ที่มีขนาดคาบและสัดส่วนของเกรตติงจากผลการศึกษา ทางทฤษฎีของการออกแบบลักษณะของเกรตติงบนพีดีเอ็มเอส ในการเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจวัด คลื่นอัลตราซาวด์ที่มีความถี่ 1 MHz จากผลการจำลองทางทฤษฎีประกอบด้วย การจำลองผลการ เปลี่ยนแปลงความหนาของพีดีเอ็มเอสเมื่อถูกกดด้วยคลื่นอัลตราซาวด์ และการจำลองผลเชิงแสงของ การตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ที่มีตัวรับรู้เป็นพีดีเอ็มเอส เมื่อนำไปวิเคราะห์และเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพกับพีดีเอ็มเอสแบบเรียบ พบว่าพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติงมีความไวในการตอบสนอง เท่ากับ  $3.46 \times 10^{-7} \text{ Pa}^{-1}$  ประสิทธิภาพสูงกว่าพีดีเอ็มเอสแบบเรียบ 4.76 เท่า มีค่าความเป็นเซนเซอร์ที่ ดี  $1.10 \times 10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$  ดีกว่าแบบเรียบ 1.17 เท่า และช่วงในการตอบสนองกว้างกว่า 3.55 เท่า เมื่อขึ้นรูป แม่พิมพ์เกรตติงบนแผ่นรองรับที่เคลือบสารไวแสงแบบฟิล์มโดยใช้การฉายแสงด้วยระบบการทำโม ดูลेशनของความเข้มแสงบนระนาบภาพ พบว่า มีความคลาดเคลื่อนของการสร้างเกรตติงมีรูปร่างและ ขนาดความถูกต้องตามต้นแบบ เท่ากับ 5.42% และมีความคลาดเคลื่อนของลวดลายที่เกิดจากการเอียง ของระบบแสงเท่ากับ 3.20% และระบบสามารถทำซ้ำในการสร้างลวดลายได้ นอกจากการสร้าง เกรตติงแล้วระบบฉายภาพสามารถนำไปออกแบบและสร้างลวดลายอื่น ๆ ได้โดยไม่ต้องสร้างมาสก์ แสง ซึ่งเป็นการประหยัดเวลาและงบประมาณในการสร้างลวดลายที่มีขนาดระดับไมครอนได้

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 117 หน้า)

คำสำคัญ: โฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสง, การตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์, การสร้างลวดลาย ระดับไมครอน

ลายมือชื่อนักศึกษา ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

6105647 : Chayanisa Sukkasem  
 Thesis Title : Application of Image Plane Intensity Modulation for Microscopic  
 Scale Sensor Fabrication: An Optical based Ultrasonic Detection  
 Program : Master of Engineering in Biomedical Engineering  
 Thesis Advisor : Assoc. Prof. Suejit Pechprasarn, Ph.D.  
 Thesis Co-Advisor : Phitsini Suvarnaphaet, Ph.D.

### Abstract

The research entitled Application of Image Plane Intensity Modulation for Microscopic Scale Sensor Fabrication: An Optical based Ultrasound Detection aims to design and implement the image plane intensity modulation system for microfabrication in photolithography process using a digital micromirror device (DMD) to project the master pattern of grating structure. The grating structure focusing on grating period and grating fill factor has been studied the theoretical framework to enhance the performance of optical ultrasonic detection using polydimethylsiloxane (PDMS) material. Herein, the simulation of the PDMS thickness changes under the ultrasound compression at 1-MHz frequency was reported and the optical ultrasonic detection that used the PDMS grating as a receptor was analyzed. The results showed that the PDMS grating provided the sensitivity of  $3.46 \times 10^{-7} \text{ Pa}^{-1}$  to detect ultrasound which was greater than conventional thin film by 4.76 times. The figure of merit was  $1.10 \times 10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$  enhanced by 1.17 times and the detectable range was wider by 3.55 times. In photolithography process, the grating patterns were fabricated in an application of image plane intensity modulation system using the negative dry film photoresist. The fabricated gratings were controlled as the theoretical design having 5.42% of error in features 3.20% of error in optical aberration. This system has been promised excellent repeatable in microfabrication without photomask and provided time-saving and cost-effective in the photolithography process.

(Total 117 pages)

Keywords: Maskless photolithography, Ultrasound detection, Microfabrication

Student's Signature ..... Thesis Advisor's Signature .....  
 Thesis Co-Advisor's Signature .....

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
<b>บทที่ 1</b>	
<b>บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	3
1.3 คำถามการวิจัย / สมมติฐานการวิจัย	4
1.4 กรอบแนวคิดการวิจัย	4
1.5 นิยามศัพท์	6
<b>บทที่ 2</b>	
<b>ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง / ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>8</b>
2.1 โฟโตลิโทกราฟี	8
2.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	23
2.3 ทฤษฎีเชิงแสง	26
2.4 การตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์	33
2.5 พอลิไดเมทิลซิลโลเซน	40
<b>บทที่ 3</b>	
<b>ระเบียบวิธีการวิจัย</b>	<b>43</b>
3.1 ตารางแผนการดำเนินงาน	43
3.2 การออกแบบและจัดเรียงทางเดินแสงของระบบการทำโมดูเลชันของ ความเข้มแสงบนระนาบภาพสำหรับการฉายภาพในกระบวนการโฟโตลิ โทกราฟี	44



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การจำลองผลเชิงทฤษฎีของการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ที่ใช้ตัวรับรู้เป็นพีดีเอ็มเอสแบบเรียบและพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติง	50
3.4 การขึ้นรูปผลลวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี	54
3.5 การวิเคราะห์คุณภาพลวดลายเกรตติงที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี	56
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัย</b>	<b>59</b>
4.1 ผลการออกแบบและจัดเรียงทางเดินแสงของระบบการทำโมดูลেশันของความเข้มแสงบนระนาบภาพสำหรับการฉายภาพในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี	59
4.2 ผลการจำลองผลเชิงทฤษฎีของการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ด้วยการใช้ตัวรับรู้พีดีเอ็มเอสแบบเรียบและพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติง	61
4.3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์โดยใช้ตัวรับรู้เป็นพีดีเอ็มเอสแบบเรียบและพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติง	70
4.4 ผลการวิเคราะห์คุณภาพลวดลายเกรตติงที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี	73
<b>บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ</b>	<b>76</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย	76
5.2 ข้อเสนอแนะ	77
<b>บรรณานุกรม</b>	<b>78</b>
<b>ภาคผนวก</b>	<b>88</b>
<b>ภาคผนวก ก</b> สิทธีบัตร กล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบต้นแบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงโดยอาศัยอุปกรณ์กระจกไมครอนดิจิทัลเพื่อสร้างลวดลายในระดับไมครอน	88

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ข	
สิทธิบัตร อุปกรณ์แสงสำหรับตรวจวัดคลื่นเสียงความถี่สูงด้วย โครงสร้างเกรตติงระดับไมครอนบนวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่น โดย อาศัยคลื่นเสียงที่ผิวและการแทรกสอดแบบเฟอร์บี-พาร์โรท์	104
ประวัติผู้วิจัย	117



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทั่วไปของสารไวแสงชนิดบวกและสารไวแสงชนิดลบ	20
3.1 แผนการดำเนินงาน	43
3.2 แสดงคุณสมบัติของอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัล	46
3.3 แสดงคุณสมบัติเลนส์ใกล้วัตถุในระบบการทำโมดูเลชันของแสงบนระนาบภาพ	47
3.4 แสดงคุณสมบัติและลักษณะของกล้องดีเอสแอลอาร์ ยี่ห้อ Canon รุ่น EOS 50D	48
3.5 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้การจำลองผลเชิงทฤษฎี	49
3.6 แสดงคุณสมบัติของสารไวแสงชนิดฟิล์ม รุ่น ETERTEC HT-115T DRY FILM PHOTORESIST	54
4.1 แสดงขนาดลวดลายที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีและฉายแสงที่เวลาต่าง ๆ	60
4.2 แสดงการเปรียบเทียบความกว้าง ความยาวและระยะช่องของลวดลายเกรตติง	74
4.3 แสดงความคลาดเคลื่อนของลวดลายที่เกิดจากการเอียงของระบบแสง	75

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	แสดงกรอบแนวคิดการวิจัย	5
2.1	แสดงลักษณะและส่วนประกอบของระบบโฟโตนิกส์	9
2.2	แสดงลักษณะของระบบโฟโตนิกส์รูปแบบต่าง ๆ	11
2.3	แสดงลักษณะการทำงานของระบบสแต็บและฉายซ้ำและระบบสแต็บและสแกน	12
2.4	แสดงการเปรียบเทียบแสงที่ฉายภาพด้วยมาสก์แสงแบบปกติและมาสก์แสงที่มีชั้นช่วยเลื่อนเฟสของแสง	14
2.5	แสดงรูปร่างของลำแสงที่ฉายในระบบโฟโตนิกส์แบบลำแสงปกติ ลำแสงที่มีลักษณะเป็นวงแหวนและลำแสงที่มีลักษณะวงกลมสี่วง	15
2.6	แสดงการเปรียบเทียบผลการฉายแสงของลำแสงปกติและลำแสงที่ถูกดัดแปลงรูปร่างในระบบโฟโตนิกส์	15
2.7	แสดงการทำงานของอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัลในโหมดเปิดและปิด	17
2.8	แสดงการบิดของผลึกเหลวเพื่อควบคุมทิศทางของแสงโพลาไรซ์เชิงเส้น	18
2.9	แสดงลักษณะของสารไวแสงชนิดบวกและสารไวแสงชนิดลบเมื่อผ่านการฉายแสงและล้างด้วยน้ำยาดีเวลลอปเปอร์	19
2.10	แสดงอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดคอเรสเตอรอลและบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาระหว่างคอเรสเตอรอลและเอนไซม์ที่ใช้ตรวจวัด	22
2.11	แสดงการสร้างเมชบนโครงสร้างที่ต้องการศึกษา	23
2.12	แสดงการเดินทางของแสงผ่านรอยต่อระหว่างตัวกลางในกรณีที่มีโพลาไรซ์แบบ TE และแสงมีโพลาไรซ์แบบ TM	26
2.13	แสดงการตกกระทบของแสงลงบนเกรตติงและการเลี้ยวเบนของแสง	29
2.14	แสดงการตกกระทบของแสงบนวัสดุที่มีโครงสร้างเกรตติง	30
2.15	แสดงการประยุกต์ใช้งานคลื่นอัลตราซาวด์ที่มีความถี่ต่าง ๆ	33

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.16	แสดงภาพถ่ายตัดขวางของหลอดเลือดแดงเออร์ตาและการโฟกัสคลื่นอัลตราซาวด์บนเนื้อเยื่ออันตราย	34
2.17	แสดงการถ่ายภาพด้วยเทคนิคการใช้คลื่นโพโตอะคูสติก	35
2.18	แสดงการเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้าเมื่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกถูกยืดและถูกกด	36
2.19	แสดงลักษณะการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ด้วยระบบที่อาศัยหลักการแทรกสอดของแสงชนิดไมเคลสันและการแทรกสอดแบบฟาบริ-เปโรต์ประเภทฟิล์มพอลิเมอร์	38
2.20	แสดงการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ด้วยไฟเบอร์ออปติก	39
2.21	แสดงลักษณะของวงแหวนสั่นพ้อง	39
2.22	แสดงลักษณะการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ด้วยระบบที่ใช้หลักการสะท้อนของเฟรสเนลและระบบเซนเซอร์ที่ใช้เทคนิคพลาสมอนบนพื้นผิว	40
2.23	แสดงโครงสร้างทางเคมีของพีดีเอ็มเอส	41
3.1	แสดงลักษณะและสเปกตรัมของหลอดไฟยูวีชนิดแอลอีดี	45
3.2	แสดงระบบส่องสว่างแบบโคเลอร์	46
3.3	แสดงลักษณะของอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัล	46
3.4	แสดงการออกแบบระบบการทำโมดูลชันของความเข้มแสงบนระนาบภาพสำหรับการฉายภาพในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี	48
3.5	แสดงภาพโครงสร้างเกรตติงบนอุปกรณ์ไอแพดและภาพฉายโครงสร้างเกรตติงบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัล	49
3.6	แสดงโครงสร้างการจำลองผลการกดของคลื่นอัลตราซาวด์	50
3.7	แสดงโครงสร้างการจำลองผลค่าความสะท้อนของแสง	51
3.8	แสดงลักษณะการวัดขนาดลวดลายเพื่อนำไปคำนวณความคลาดเคลื่อนของลวดลายเนื่องจากการเอียงของระบบแสง	58

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.1	แสดงผลการจัดเรียงทางเดินแสงระบบการทำโมดูลชั้นของความเข้มแสงบนระนาบภาพ	59
4.2	แสดงจากการฉายภาพเส้นตรงที่มีขนาด 60 $\mu\text{m}$ ลงบนสารไวแสงแบบฟิล์มชนิดลบ และลวดลายที่ขึ้นรูป ใช้เวลาฉายแสงที่ 2 นาที และ 8 นาที	60
4.3	แสดงการสะท้อนและการส่องผ่านของแสงเมื่อมุมตกกระทบน้อยกว่ามุมวิกฤต มุมตกกระทบเท่ากับมุมวิกฤต และมุมตกกระทบมากกว่ามุมวิกฤต	61
4.4	แสดงการสะท้อนและการส่องผ่านของแสงในระบบตรวจวัดอัลตราซาวด์ที่พีดีเอ็มเอสแบบเรียบเป็นตัวรับรู้ ที่มุมตกกระทบบนรอยต่อทั้งสองมีค่าน้อยกว่ามุมวิกฤต มุมตกกระทบบนรอยต่อพีดีเอ็มเอสและน้ำมีค่ามากกว่ามุมวิกฤต และมุมตกกระทบบนรอยต่อแก้วและพีดีเอ็มเอสมีค่ามากกว่ามุมวิกฤต	62
4.5	แสดงการสะท้อน การส่องผ่านของแสงและการเลี้ยวเบนของแสงเมื่อตกกระทบลงบนระบบตรวจวัดอัลตราซาวด์ที่พีดีเอ็มเอสแบบเกรตติงเป็นตัวรับรู้ที่มุมตกกระทบน้อยกว่ามุมวิกฤต	63
4.6	ผลค่าความสะท้อนของแสงของพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติงที่มีความหนา 35 $\mu\text{m}$ ที่มีขนาดคาบอยู่ในช่วง 0 ถึง 300 $\mu\text{m}$ และมีค่าสัดส่วนของร่องตั้งแต่ 0 ถึง 1 ที่มุมตกกระทบเท่ากับ 1.332 ที่ลำดับการเลี้ยวเบนที่ -1 0 และ 1	64
4.7	แสดงค่าความสะท้อนของแสงที่มุมตกกระทบที่มีขนาด 1.25 ถึง 1.45 ของแสงโพลาไรซ์แบบ TE บนพีดีเอ็มเอสแบบเรียบ แสงโพลาไรซ์แบบ TM บนพีดีเอ็มเอสแบบเรียบ แสงโพลาไรซ์แบบ TM บนพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติง และแสงโพลาไรซ์แบบ TM บนพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติง	65

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.8	แสดงผลการจำลองผลการเปลี่ยนแปลงความหนาของพีดีเอ็มเอสและความดันในตัวของพีดีเอ็มเอสแบบเรียบและพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติง และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาเริ่มต้นของพีดีเอ็มเอสกับความหนาที่เปลี่ยนแปลงและความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติงที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาเมื่อปล่อยคลื่นอัลตราซาวด์ที่มีความถี่ 1 MHz และมีความดันอยู่ที่ 100 kPa	67
4.9	แสดงผลค่าความสะท้อนของแสงเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาของพีดีเอ็มเอสแบบเรียบและพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติง ที่มุมตกกระทบตั้งแต่ 1.25 ถึง 1.45 และภาพขยายเปรียบเทียบแถบมืดกับตำแหน่งของโหมดฟารี-เปโรต์ ของพีดีเอ็มเอสแบบเรียบ และพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติง	69
4.10	แสดงผลค่าความสะท้อนของแสงก่อนการปรับปรุงสัญญาณและหลังการปรับปรุงสัญญาณ ในการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์โดยใช้ตัวรับรู้เป็นพีดีเอ็มเอสแบบเรียบและพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติง	71
4.11	การเปรียบเทียบผลประสิทธิภาพการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์โดยใช้ตัวรับรู้เป็นพีดีเอ็มเอสแบบเรียบและพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติง	72
4.12	แสดงภาพฉายเกรตติงที่ถ่ายผ่านระบบการทำโมเดลชั้นของความเข้มแสงบนระนาบภาพ และแสดงลวดลายเกรตติงที่ขึ้นรูป ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบมาโครซูม	73
4.13	แสดงตำแหน่งในการคำนวณความคลาดเคลื่อนลวดลายที่เกิดจากการเอียงของระบบแสงบนลวดลายเกรตติง	75



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โฟโตลิโทกราฟีหรือออปติคอลลิโทกราฟี (Optical Lithography) คือ กระบวนการสำหรับการสร้างลวดลายที่มีลักษณะเป็นร่องขุด ซึ่งลวดลายที่สร้างได้มีขนาดเล็กมาก ๆ ตั้งแต่ในระดับ นาโนเมตรจนถึงไมครอน โฟโตลิโทกราฟีเป็นเทคนิคการใช้แสงที่มีความยาวคลื่นในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet : UV) หรือแสงยูวีฉายผ่านมาสก์แสง (Photomask) ที่ใช้เป็นต้นแบบลวดลายไปยังแผ่นรองรับ (Substrate) หรือวัสดุที่ใช้ในการสร้างลวดลาย ซึ่งวัสดุแผ่นรองรับถูกเคลือบด้วยสารไวแสง (Photoresist) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับแสงยูวีได้ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ สารไวแสงชนิดลบ (Negative Photoresist) ที่สามารถแข็งตัวเมื่อถูกฉายด้วยแสงยูวีและสารไวแสงชนิดบวก (Positive Photoresist) ที่สามารถละลายโครงสร้างเมื่อถูกฉายด้วยแสงยูวีและถูกล้างได้ด้วยน้ำยาดีเวลลอปเปอร์ (Developer) เนื่องจากข้อจำกัดของระบบโฟโตลิโทกราฟีที่มีความจำกัดของแสงในเรื่องของขนาดลวดลายที่สร้าง ทำให้เกิดการพัฒนาระบบที่ใช้แหล่งกำเนิดแบบต่าง ๆ เช่น ระบบโฟโตลิโทกราฟีที่ใช้รังสีเอกซ์เรย์และระบบโฟโตลิโทกราฟีที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอน (Electron Beam Lithography : EBL) เป็นระบบที่พัฒนามาจากกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ทำให้ก้าวข้ามในเรื่องของข้อจำกัดของแสงที่ส่งผลกระทบต่อขนาดลวดลายที่สร้างขึ้น นอกจากนี้ข้อจำกัดในเรื่องขนาดลวดลายที่สร้างได้ระบบโฟโตลิโทกราฟียังมีข้อจำกัดในส่วนของมาสก์แสง หนึ่งมาสก์แสงสามารถสร้างลวดลายได้เพียงรูปแบบเดียวทำให้ไม่สะดวกต่อการทำวิจัย กระบวนการผลิตมาสก์ใหม่ทุกครั้งมีการสร้างลวดลายใหม่ ๆ นำไปสู่ระยะเวลาในการทำงานและงบประมาณที่สูงขึ้น (Deng, Wang, Gao, Zhou, He & Hu, 2017) ทำให้มีการพัฒนาระบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์ (Thomson, Willson & Bowden, 1983) โดยการใช้เทคโนโลยีและอุปกรณ์ฉายภาพ เช่น อุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัล (Digital Micro-Mirror device : DMD) และจอผลึกเหลว (Liquid Crystal Display : LCD) แทนการใช้มาสก์แสง โฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์สามารถทำให้ประหยัดงบประมาณในการออกแบบและการออกแบบลวดลายมีความยืดหยุ่นมากยิ่งขึ้น (Deng et al., 2017) โดยการออกแบบและสร้างมาสก์แสงผ่านคอมพิวเตอร์ เทคนิคการสร้างลวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีเป็นที่นิยมในกระบวนการ



สร้างลายวงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการอุตสาหกรรม สร้างลวดลายสำหรับผลิตเซนเซอร์และช่องทางไหลระดับจุลภาค (Microfluidic Channel) ในด้านการวิจัย เช่น การสร้างช่องทางไหลจุลภาคสำหรับเซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจจับและวัดปริมาณคอเลสเตอรอลโดยการใช้เทคนิคซอฟต์แวร์โฟโตลิโทกราฟี (Soft photolithography) (Ali et al., 2013) ซึ่งเป็นการใช้กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีในการสร้างลวดลายเพื่อให้เป็นแม่พิมพ์ (Mold) สำหรับการสร้างลวดลายบนพอลิเมอร์ อีกทั้งยังมีการสร้างช่องทางไหลจุลภาคสำหรับแยกองค์ประกอบของเลือดในทางการแพทย์ (Nivedita & Papautsky, 2013) รวมถึงการพัฒนาเซนเซอร์แสงโดยการสร้างลวดลายเกรตติงในการเพิ่มความสามารถในการตรวจจับของระบบการสั่นพ้องของพลาสมอนพื้นผิว (Indutnyi et al., 2016) เป็นต้น

เซนเซอร์แสงเป็นเซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณต่าง ๆ จากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่าง ๆ ของแสง เช่น ความเข้มแสง เฟสของแสง การเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัม เป็นต้น เซนเซอร์แสงเป็นอุปกรณ์ตรวจจับที่ให้ความแม่นยำ (Accuracy) และมีความไวในการตอบสนอง (Sensitivity) สูง เช่น การใช้เทคนิคการสั่นพ้องของพลาสมอนพื้นผิวในการตรวจวัดปริมาณสารความเข้มเข้มข้นต่ำ ๆ โดยการใช้หลักการที่วัสดุหรือสารต่าง ๆ มีค่าดัชนีหักเห (Refractive index :  $n$ ) ที่ไม่เท่ากัน นอกจากเซนเซอร์แสงถูกนำมาใช้ในการวัดปริมาณทางเคมีหรือทางชีวภาพ เซนเซอร์แสงก็ยังสามารถวัดปริมาณในเชิงกลได้อีกด้วย เช่น การตรวจวัดการเคลื่อนที่และตำแหน่งของพื้นผิว (Wang, Chiu, Chen, Kao, & Chang, 2009) และการตรวจวัดความดัน (Wang et al., 2014) ซึ่งมีเทคนิคในการวัดด้วยเซนเซอร์แสงหลายวิธี เช่น จากการเคลื่อนที่ของแผ่นไดอะแฟรมหรือการใช้การแทรกสอดของแสงแบบฟาบริ-เปโรต์ (Fabry -Perot) เป็นต้น นอกจากเซนเซอร์แสงสามารถวัดความดันได้แล้วยังสามารถนำมาหาค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับความดันได้ เช่น การวัดอัตราการไหลของสารหรืออากาศหรือแม้กระทั่งสามารถตรวจวัดความดันจากคลื่นอัลตราซาวด์ เซนเซอร์แสงสามารถนำมาใช้ตรวจคลื่นอัลตราซาวด์ในการถ่ายภาพด้วยเทคนิคการใช้คลื่นอะคูสติก (Photoacoustic Imaging) ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคนิคที่ใช้แสงเลเซอร์ในการกระตุ้นเซลล์หรือเนื้อเยื่อเพื่อให้เกิดการหดและขยาย ทำให้เกิดคลื่นอัลตราซาวด์ และสามารถสร้างภาพเนื้อเยื่อที่ถ่ายจากคลื่นอัลตราซาวด์ที่เกิดขึ้นได้ โดยทั่วไปการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ในกระบวนการนี้จะใช้อุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) (Wissmeyer, Pleitez, Rosenthal, & Ntziachristos, 2018) แต่เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องของความไวในการตรวจวัดทำให้เซนเซอร์แสงในรูปแบบต่าง ๆ ถูกนำมาประยุกต์ใช้ เช่น หลักการการแทรกสอดของแสงของมาร์ช เซนเดอร์ (Mach-Zehnder Interferometer) (Paltauf, Nuster, Haltmeier, & Burgholzer, 2007) การใช้ไฟเบอร์ออปติก (Fiber Optics) หรือแม้แต่เทคนิค พลาสมอนบนพื้นผิวเองก็ถูกนำมาใช้ในการตรวจจับคลื่นอัลตราซาวด์

โดยการวัดค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่เปลี่ยนแปลงจากการถูกรบกวนด้วยความดันจากคลื่นอัลตราซาวด์ (Sangworasil et al., 2016) อีกวิธีที่มีการนำมาใช้ ได้แก่ ฟาบริ-เปโรต์ ใช้หลักการการที่คลื่นอัลตราซาวด์ทำให้ความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ความเข้มของแสงเปลี่ยนแปลง (Beard, Pérennès, & Mills, 1999) เมื่อไม่นานมานี้ได้มีงานวิจัยที่มีความนำพอลิเมอร์ชนิดพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (Polydimethylsiloxane: PDMS) หรือพีดีเอ็มเอส มาใช้ในการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์จากการเปลี่ยนแปลงความหนาของพอลิเมอร์เมื่อถูกกดด้วยความดันจากคลื่นอัลตราซาวด์ ทำให้สามารถตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ที่เกิดขึ้นได้ (Larkthanakhachon, Pechprasarn, & Somekh, 2018)

ในการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการสร้างแม่พิมพ์ลวดลายเกรตติงจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีด้วยการใช้อุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัลในการสร้างลวดลายต้นแบบแทนการใช้มาสก์แสง ลวดลายที่สร้างได้สามารถนำไปต่อยอดและนำไปใช้เป็นแม่พิมพ์ในการสร้างลวดลายบนพีดีเอ็มเอส ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้เป็นตัวรับรู้ (Receptor) ในการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์เพื่อเพิ่มความสามารถในการเปลี่ยนแปลงเชิงความหนาโดยศึกษาผลจากแบบจำลองเชิงกลโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method : FEM) และผลการจำลองเชิงแสงโดยใช้หลักการของเฟรสเนล (Fresnel principle) และการวิเคราะห์คลื่นควบคู่อย่างเคร่งครัด (Rigorous Coupled-wave Analysis : RCWA) การสร้างลวดลายโครงสร้างเกรตติงเพื่อใช้ในกระบวนการสร้างลวดลายบนพีดีเอ็มเอสช่วยให้การตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์มีความไวในการตอบสนองมากยิ่งขึ้น ซึ่งการสร้างเซนเซอร์แสงสำหรับตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการถ่ายภาพด้วยเทคนิคการใช้คลื่นอัลตราซาวด์รวมถึงยังเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของการสร้างลวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงอีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและสร้างระบบการทำโมดูลেশันของความเข้มแสงบนระนาบภาพสำหรับการฉายภาพในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี โดยการใช้อุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัลในการสร้างลวดลายต้นแบบ

1.2.2 เพื่อศึกษาเชิงทฤษฎีเพื่อออกแบบโครงสร้างเกรตติงบนพีดีเอ็มเอสที่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ที่มีความถี่ 1 MHz

1.2.3 เพื่อศึกษาและสร้างแม่พิมพ์สำหรับสร้างลวดลายบนพีดีเอ็มเอสด้วยระบบการทำโมดูเลชันของความเข้มแสงบนระนาบภาพสำหรับการฉายภาพในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

### 1.3 สมมติฐานการวิจัย

1.3.1 อุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัลสามารถนำมาใช้ในการสร้างลวดลายต้นแบบที่ต้องการสร้างแทนการใช้มาสก์แสงในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีได้

1.3.2 ในศึกษาเชิงทฤษฎีและการจำลองผลของระบบเซนเซอร์ตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ที่ใช้พีดีเอ็มเอสแบบเกรตติงเป็นตัวรับรู้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ที่มีความถี่ 1 MHz ได้เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเซนเซอร์ตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ที่ใช้พีดีเอ็มเอสแบบเรียบเป็นตัวรับรู้

1.3.3 ระบบโฟโตลิโทกราฟีที่มีการใช้การทำโมดูเลชันของความเข้มแสงบนระนาบภาพในการสร้างลวดลายแทนการใช้มาสก์แสงสามารถสร้างแม่พิมพ์เกรตติงที่มีขนาดถูกต้องตามที่ต้องการแบบและสามารถทำซ้ำได้

### 1.4 กรอบแนวคิดการวิจัย





รูปที่ 1.1 แสดงกรอบแนวคิดการวิจัย

## 1.5 นิยามศัพท์

**โฟโตลิโทกราฟี (Photolithography)** เป็นหนึ่งในวิธีการพิมพ์หรือสร้างลวดลายที่มีลักษณะเป็นร่อง โดยการใช้แสงยูวีฉายผ่านมาสก์แสงที่เป็นต้นแบบของลวดลายไปยังแผ่นรองรับที่ถูกเคลือบด้วยสารไวแสง

**รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet : UV) หรือแสงยูวี** เป็นแสงที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 100 nm ถึง 400 nm

**มาสก์แสง (Photomask)** แผ่นบางที่บที่ถูกเจาะรูเป็นลวดลายต่าง ๆ สามารถให้แสงผ่านและใช้เป็นต้นแบบในการสร้างลวดลายในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

**แผ่นรองรับ (Substrate)** วัสดุแผ่นเรียบที่ถูกเคลือบด้วยสารไวแสง สำหรับการสร้างลวดลายในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ แผ่นกระจกปิดสไลด์ (Cover Slip)

**สารไวแสง (Photoresist)** พอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติแข็งตัวหรือละลายตัวเมื่อผ่านการฉายด้วยแสงยูวี และถูกล้างด้วยน้ำยาดีเวลลอปเปอร์

**แม่พิมพ์ (Mold)** ลวดลายที่สร้างบนสารไวแสงด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีสำหรับนำมาสแตมป์บนพีดีเอ็มเอส (PDMS Stamping)

**เกรตติง (Grating)** ลวดลายที่มีลักษณะเป็นช่องเล็ก ๆ ขนานกันและมีระยะระหว่างช่องเท่ากัน

**เซนเซอร์แสง (Optical Sensor)** ตัวรับรู้ที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณต่าง ๆ จากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่าง ๆ ของแสง

**คลื่นอัลตราซาวด์ (Ultrasonic Wave)** คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 kHz

**ค่าความสะท้อนของแสง (Reflectance: R)** ค่าความเข้มของแสงที่สะท้อนออกจากระบบ  
เซนเซอร์ตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์

**ตัวรับรู้ (Receptor)** เป็นตัวรับรู้การเปลี่ยนแปลงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระบบ  
ตรวจวัด ในงานวิจัยนี้เป็นการตรวจวัดความดันของคลื่นอัลตราซาวด์ที่มีความถี่ 1 MHz

**โมดูเลชัน (Modulation)** เป็นการปรับแอมพลิจูดหรือความเข้มของแสงให้มีลักษณะตรง  
ตามที่ต้องการ โดยการใช้อุปกรณ์ที่มีชื่อว่าอุปกรณ์การทำโมดูเลชันของแสงเชิงพื้นที่ (Spatial Light  
Modulator : SLM)





## บทที่ 2

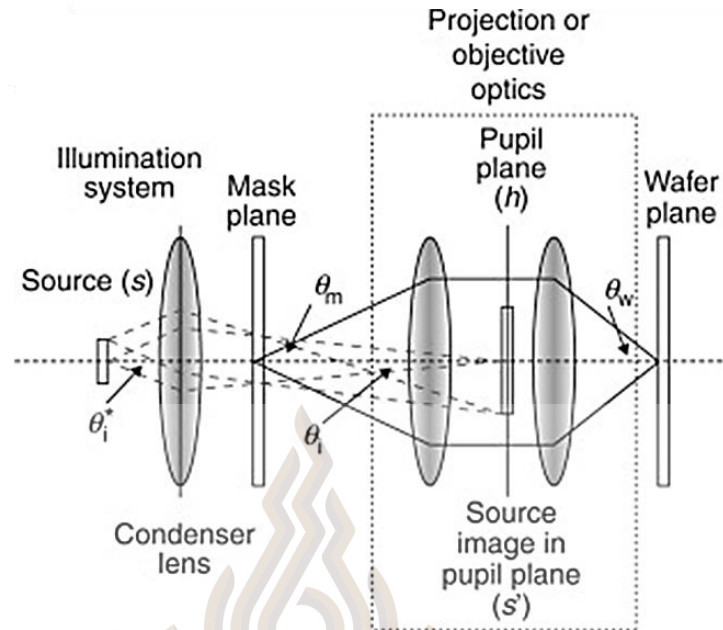
### บททวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง / ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 โฟโตลิโทกราฟี (Photolithography)

โฟโตลิโทกราฟี เป็นหนึ่งในเทคนิคที่ใช้ในการสร้างลวดลายที่มีลักษณะเป็นร่องขูดขนาดเล็กมากตั้งแต่ระดับนาโนเมตรจนถึงระดับไมครอน ซึ่งถือเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ที่มีการออกแบบ พัฒนา และสร้างวงจรรไฟฟ้าที่มีขนาดเล็ก อีกทั้งโฟโตลิโทกราฟีเป็นกระบวนการผลิตที่คุ้มค่า ต้นทุนที่ใช้ในการผลิตมีราคาไม่สูงทำให้เทคโนโลยีดังกล่าวเป็นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวาง และใช้สร้างลวดลายได้หลากหลายด้วยการออกแบบมาสก์แสงที่เป็นต้นแบบของลวดลาย ทำให้โฟโตลิโทกราฟีถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ทั้งในการสร้างวงจรรและอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น ใช้สร้างลวดลายในการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดหรือไบโอเซนเซอร์ เนื่องจากการสร้างชุดอุปกรณ์ตรวจวัดที่มีขนาดเล็กทำให้สามารถลดปริมาณสารที่นำมาตรวจวัดและประหยัดการใช้สารตรวจวัดหรือเอนไซม์ที่มีราคาสูง และในทางการแพทย์มีการนำกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีมาใช้ในการสร้างช่องทางไหลจุลภาคสำหรับการแยกสารที่มีขนาดแตกต่างกันหรือสร้างช่องสำหรับเพาะเลี้ยงเซลล์ เป็นต้น

##### 2.2.1 หลักการของโฟโตลิโทกราฟี

กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีเป็นการฉายแสงนำพาลวดลายต้นแบบจากมาสก์แสงไปยังแผ่นรองรับที่เคลือบด้วยสารไวแสง ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถแข็งตัว (สารไวแสงชนิดลบ) และสามารถถูกล้างทำลาย (สารไวแสงชนิดบวก) ได้ด้วยน้ำยาดีเวลลอปเปอร์ เมื่อถูกฉายด้วยแสงยูวี ระบบโฟโตลิโทกราฟีในปัจจุบันนิยมใช้เป็นระบบฉายภาพ (Optical Projection Lithography) โดยการใช้เลนส์ฉายภาพ (Projection Lens) วางไว้ระหว่างมาสก์แสงและแผ่นรองรับ ดังรูปที่ 2.1 โดยทั่วไปโฟโตลิโทกราฟีเป็นกระบวนการที่บทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมโลหะกึ่งตัวนำ โดยเฉพาะกระบวนการการพิมพ์ลายวงจรร โฟโตลิโทกราฟีเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่สามารถทำให้เกิดการพัฒนาในเรื่องของขนาดของส่วนประกอบต่าง ๆ ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากในอดีตที่มีขนาด 50  $\mu\text{m}$  จนปัจจุบันเหลือเพียง 7 nm (Al-Hadeethi et al., 2021)



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของระบบโฟโตลิโทกราฟี

ที่มา: Smith, 2014

ตัวแปรที่ส่งผลต่อความสามารถของความละเอียดในการสร้างลวดลาย (Resolution :  $Res$ ) หรือความสามารถในการสร้างลวดลายที่เล็กที่สุด ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของแสงจากแหล่งกำเนิด ( $\lambda$ ) ค่าความสามารถในการเก็บรวบรวมแสง (Numerical Aperture :  $N.A.$ ) ของเลนส์ฉายภาพ ซึ่งนิยามไว้ด้วยสมการที่ 2-1 และสมการที่ 2-2 และค่าปัจจัยในกระบวนการผลิต (Process Dependent Adjustment factor :  $k_1$ ) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.4 ถึง 0.9 ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ค่าความคลาดของเลนส์ (Lens Aberration) คุณภาพของสารไวแสงและการควบคุมเครื่องมือและอุปกรณ์ในกระบวนการผลิต เป็นต้น

$$N.A. = n \sin \theta \quad (2-1)$$

$$N.A. = n \sin \left[ \arctan \left( \frac{D}{2f} \right) \right] \quad (2-2)$$

โดยที่  $N.A.$  คือ ค่าความสามารถในการเก็บรวบรวมแสงของเลนส์  
 $n$  คือ ค่าดัชนีหักเหของแสงของตัวกลาง อากาศมีค่าเท่ากับ 1  
 $D$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเลนส์ (m)



$f$  คือ ความยาวโฟกัสของเลนส์ (m)

ปัจจัยต่าง ๆ ที่กล่าวมาเป็นไปตามสมการของเรย์ลี (Rayleigh Equation) (Ronse, 2006) ดังสมการที่ 2-3

$$Res = k_1 \cdot \frac{\lambda}{N.A.} \quad (2-3)$$

การเพิ่มความสามารถในการสร้างลวดลายที่มีขนาดเล็กลงทำได้โดยการใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นลง ใช้เลนส์ฉายภาพที่มีค่าความสามารถในการเก็บรวมรวมแสงมากขึ้น และการควบคุมกระบวนการผลิตให้มีข้อผิดพลาดน้อยลง นอกจากความสามารถของความละเอียดในการสร้างลวดลายแล้ว อีกตัวแปรที่สำคัญในการสร้างลวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ได้แก่ ความลึกของระยะโฟกัส (Depth of Focus : DOF) (Mack, 2004) เป็นค่าที่บ่งบอกระยะโฟกัสที่ทำให้ภาพลวดลายที่ถูกต้องและทำให้สารไวแสงสามารถเปลี่ยนสภาพได้เมื่อถูกฉาย ซึ่งหลักการของเรย์ลียังคงถูกนำมาใช้ในการคำนวณ แสดงในสมการที่ 2-4

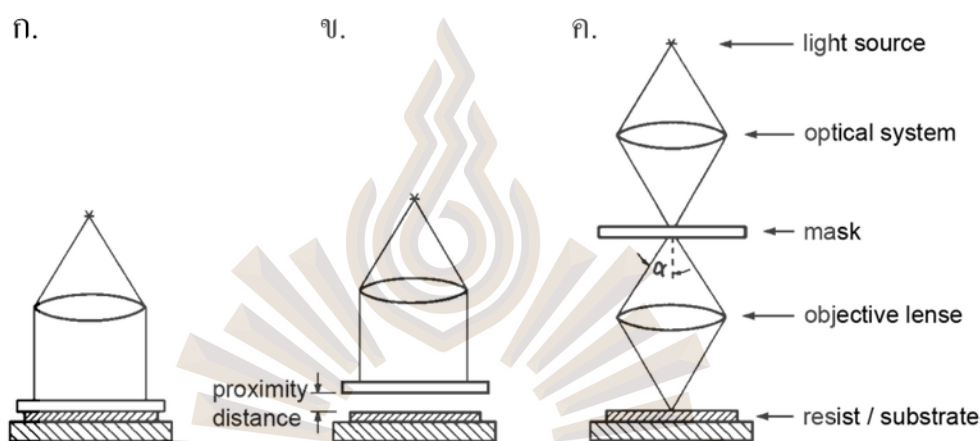
$$DOF = k_2 \cdot \frac{\lambda}{N.A.^2} \quad (2-4)$$

โดยที่  $k_2$  คือ ค่าปัจจัยในกระบวนการผลิต มีค่าอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 1

### 2.1.2 วิวัฒนาการของระบบโฟโตลิโทกราฟี

โฟโตลิโทกราฟีเป็นเทคโนโลยีที่ถูกคิดค้นและถูกนำมาใช้อย่างยาวนานและเป็นเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนามาตลอด โดยเริ่มแรกในช่วงปีคริสต์ศักราช 1970 ถึง 1980 โฟโตลิโทกราฟีระบบแรกๆ ที่เริ่มมีการใช้ คือ การพิมพ์แบบคอนแทค (Contact Printer) เป็นระบบที่ใช้การฉายแสงไปยังบนมาสก์ที่ถูกกดลงไปสัมผัสกับสารไวแสงที่ถูกเคลือบไวบนซิลิคอนเวเฟอร์ (Silicon Wafer) หรือแผ่นรองรับ ดังรูปที่ 2.2 ก. ข้อดีของระบบนี้คือสามารถสร้างรูปร่างและลวดลายที่มีขนาดเล็กโดยใช้อุปกรณ์ที่มีราคาไม่แพง แต่มีข้อเสียคือเป็นระบบที่อาจจะทำให้เกิดการปนเปื้อนของสารเคมี ทำให้ต้องมีการทำความสะอาดมาสก์หลังการฉายแสงลงบนแผ่นรองรับ ระบบนี้จะมีสามารถสร้างรูปร่างที่มีขนาดเดียวกับมาสก์แสง เนื่องด้วยปัญหาการปนเปื้อนทำให้มีการพัฒนาระบบการพิมพ์แบบพร็อกซิมีตี (Proximity Printer) เป็นระบบที่มีช่องว่างเล็ก ๆ ระหว่างมาสก์แสงและแผ่นรองรับ ดังรูปที่ 2.2 ข. แต่ระบบนี้มีข้อเสียคือทำให้ความละเอียดของรูปร่างที่ได้ลดลงเพราะการเลี้ยวเบนของ

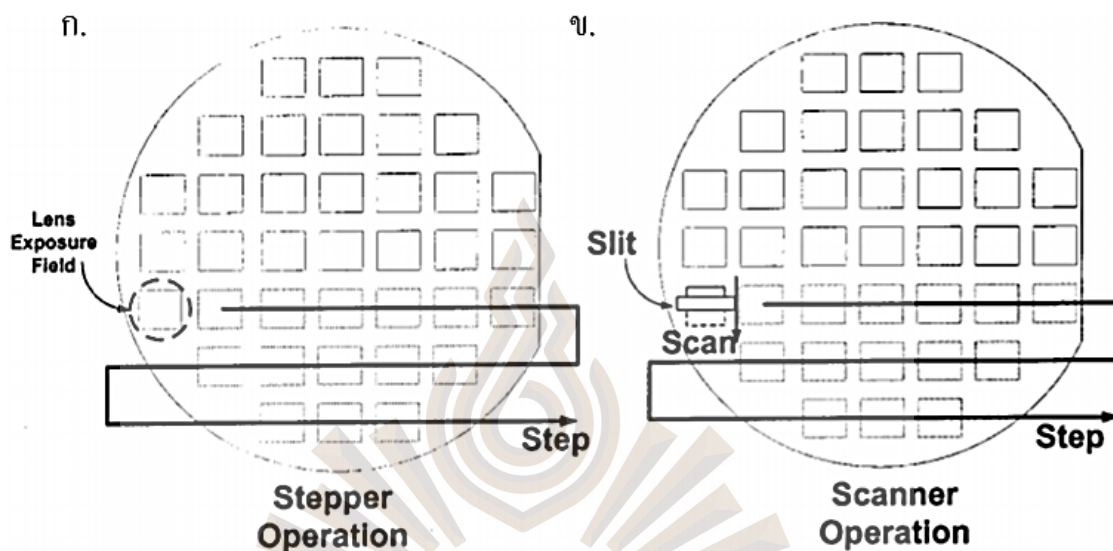
แสงที่ผ่านมาสีกและตกกระทบบนแผ่นรองรับ ต่อมาในช่วงปีคริสต์ศักราช 1980 ถึง 1990 มีระบบที่เรียกว่า ระบบโฟโตลิโทกราฟีแบบฉายภาพ (Projection Aligner) เป็นระบบที่ระยะห่างระหว่างมาสีกและแผ่นรองรับมีขนาดมากขึ้นและเป็นการแก้ไขในเรื่องของความละเอียดของระบบระบบการพิมพ์แบบพรีอักษิมิตีโดยไม่ต้องเกิดการสัมผัสระหว่างมาสีกแสงและแผ่นรองรับ โดยการ ใช้ระบบเลนส์มาช่วยในการฉายภาพลงบนแผ่นรองรับทำให้ลวดลายที่สร้างได้มีขนาดเล็กกว่ามาสีกแสง มีความคมชัดและมีระยะห่างของมาสีกแสงและสารไวแสง (Ronse, 2006) ดังรูปที่ 2.2 ก.



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะของระบบโฟโตลิโทกราฟี ก. ระบบการพิมพ์แบบคอนแทค  
ข. ระบบการพิมพ์แบบพรีอักษิมิตี และ ค. ระบบโฟโตลิโทกราฟีแบบฉายภาพ  
ที่มา: Wiese, 2019

หลังจากปีคริสต์ศักราช 1990 ระบบที่มีการถูกพัฒนา คือ ระบบสแต็ปและทำซ้ำ (Step and Repeat System) หรือเรียกว่าสแต็ปเปอร์ (Stepper) เป็นการสร้างลวดลายบนแผ่นรองรับที่มีขนาดใหญ่ เป็นระบบที่มีการออกแบบให้แผ่นรองรับสามารถเคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่งได้ สามารถสร้างลวดลายที่ฉายให้มีขนาดใหญ่ขึ้นได้จากการฉายหลายๆ ครั้ง โดยใช้ระบบเลนส์เพียง 1 ชุด โดยมาสีกแสงที่ใช้มีลวดลายรูปแบบเดียว ลวดลายที่ฉายจะเหมือนกันทุกครั้ง หลักการของระบบหลังจากฉายภาพลงบนแผ่นรองรับแล้ว แผ่นรองรับจะขยับเปลี่ยนตำแหน่ง ตำแหน่งที่ถูกฉายภาพจะเปลี่ยนไป แผ่นรองรับจะขยับจนกระทั่งสร้างรูปร่างบนแผ่นรองรับจนครบทั้งหมด โดยความกว้างของรูปร่างที่ถูกฉายแต่ละตำแหน่งจะขึ้นอยู่กับขอบเขตของเลนส์ อีกทั้งระบบนี้มีการพัฒนาระบบเลนส์ที่ใช้ในการฉายภาพลงบนแผ่นรองรับให้มีการลดขนาดภาพลงจากมาสีกประมาณ 4 ถึง 5 เท่า และต่อมาได้พัฒนาเป็นที่มีชื่อว่าระบบสแต็ปและสแกน (Step and Scan System) หรือเรียกว่าสแกนเนอร์ (Scanner) โดยแผ่นรองรับจะมีการสแกนระหว่างการฉายแสงจากแหล่งกำเนิดแสง มี

การทำงานร่วมกันระหว่างส่วนที่ฉายภาพและส่วนของการสแกนลวดลายบนแผ่นรองรับ ทำให้สามารถลดขนาดขอบเขตการฉายภาพของเลนส์ได้และการสร้างลวดลายมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น (Ronse, 2006)



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการทำงานของ ก. ระบบสเต็ปและฉายซ้ำ และ ข. ระบบสเต็ปและสแกน

ที่มา: Das & Sandstrom, 2002

### 2.1.3 การปรับปรุงและพัฒนากระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

#### 2.1.3.1 การปรับปรุงและพัฒนาแหล่งกำเนิดเพื่อให้ได้ลวดลายที่มีขนาดเล็ก

เทคโนโลยีการสร้างลวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีมีข้อจำกัดในด้านของความละเอียดของลวดลายที่สามารถสร้างได้จากความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดในช่วงของแสงยูวี ทำให้ระบบในการฉายภาพจากแหล่งกำเนิดชนิดอื่น ๆ ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อก้าวข้ามขีดจำกัดในการสร้างภาพขนาดเล็กด้วยแสง ได้แก่ ระบบลิโทกราฟีที่ใช้แสงความยาวคลื่นยูวีช่วงสั้น (Extreme Ultraviolet Lithography : EUV) ระบบลิโทกราฟีที่ใช้รังสีเอกซ์เรย์ (Proximity X-ray Lithography) ระบบลิโทกราฟีที่ใช้ลำอิเล็กตรอนและระบบลิโทกราฟีที่ใช้ลำไอออน (Ion-projection Lithography) เป็นต้น

1) ระบบลิโทกราฟีที่ใช้ความยาวคลื่นยูวีช่วงสั้นหรืออียูวีลิโทกราฟีเป็นกระบวนการที่ใช้ในการย้ายรูปแบบที่ถูกออกแบบบนมาสก์ไปยังฟิล์มพอลิเมอร์โดยการใช้

แหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงแสงยูวีช่วงสั้นในช่วงความยาวคลื่น 10 nm ถึง 14 nm (Bjorkholm, 1998) ส่องผ่านมาสก์ไปยังแผ่นรองรับ

2) ระบบลิโทกราฟีที่ใช้รังสีเอกซ์เรย์ ในห้องปฏิบัติการหลาย ๆ ที่ ได้มีการแทนที่ระบบโฟโตลิโทกราฟีที่ใช้ความยาวคลื่นสั้นด้วยระบบโฟโตลิโทกราฟีที่ใช้รังสีเอกซ์เรย์ เป็นระบบที่ใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่นในช่วงน้อยกว่าน้อยกว่า 0.6 Å (Sheu, Chiang, & Su, 1998) ในการฉายแสงให้กับระบบ วิธีนี้สามารถสร้างรูปร่างที่มีขนาดเล็กถึง 20 nm และเป็นระบบที่มีราคาสูง

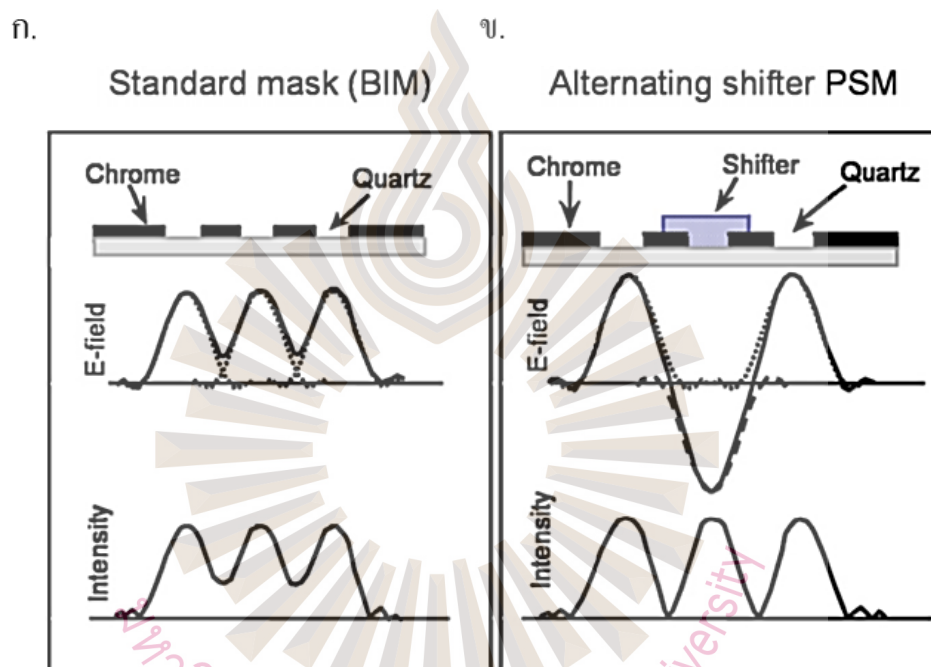
3) ระบบลิโทกราฟีที่ใช้ลำอิเล็กตรอน เป็นระบบที่มีการพัฒนามาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ใช้หลักการสร้างลวดลายโดยการโฟกัสลำแสงของอิเล็กตรอนลงบนสารไวแสงที่ทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอน ระบบลิโทกราฟีที่ใช้ลำอิเล็กตรอนเป็นระบบที่มีราคาสูงมาก นิยมนำมาใช้ในการสร้างมาสก์แสง วิธีนี้สามารถสร้างลวดลายที่มีขนาดเล็กถึง 10 nm (Liu et al., 2002)

4) ระบบลิโทกราฟีที่ใช้ลำไอออน ระบบจะมีความคล้ายคลึงกับระบบลิโทกราฟีที่ใช้ลำอิเล็กตรอนแต่แตกต่างกันที่แหล่งกำเนิดแสงของระบบ วิธีนี้เป็นการโฟกัสลำแสงไอออนลงบนสารไวแสง โดยไอออนที่ใช้ คือ  $H^+$  และ  $He^+$  (Melngailis, Mondelli, Berry iii, & Mohondro, 1998) ระบบนี้เมื่อเปรียบเทียบกับระบบลิโทกราฟีที่ใช้ลำอิเล็กตรอนจะให้ความละเอียดที่สูงกว่า ระบบนี้สร้างลวดลายได้มีขนาดเล็กถึง 4 nm (Li, Wu, & Williams, 2012)

### 2.1.3.2 การพัฒนาระบบให้ค่าปัจจัยในกระบวนการผลิตมีค่าลดลง

การพัฒนาระบบโฟโตลิโทกราฟีเพื่อให้ได้ความละเอียดในการฉายภาพมากขึ้นด้วยการเปลี่ยนแหล่งกำเนิดเป็นวิธีที่ทางอุตสาหกรรมการผลิตมักเลือกใช้เป็นวิธีสุดท้าย เพราะการเปลี่ยนแหล่งกำเนิดจะตามมาด้วยการแก้ไขส่วนอื่นในระบบ เช่น การเปลี่ยนเลนส์ฉายภาพให้เหมาะสมกับแหล่งกำเนิด รวมไปถึงสารไวแสงที่ใช้ ในส่วนการปรับปรุงระบบด้วยการเปลี่ยนเลนส์ฉายภาพให้มีค่าความสามารถในการเก็บรวบรวมแสงให้มากขึ้น วิธีนี้จะส่งผลทำให้ความลึกของระยะโฟกัสในการฉายภาพลดลง อ้างอิงจากสมการที่ 2.3 อีกทางเลือกที่ทำให้ไม่ต้องเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ในระบบ สามารถใช้อุปกรณ์เดิมได้ คือ การลดค่าปัจจัยในกระบวนการผลิตสามารถทำได้ด้วยการพัฒนาในส่วนของกระบวนการของสารไวแสงหรือมีการใช้เทคนิคบางอย่างเข้ามาช่วย เช่น การออกแบบมาสก์ให้สามารถเลื่อนเฟสของแสง (Phase Shifting Masks) การตัดแปลงรูปร่างของลำแสงในระบบ (Off-axis Illumination) (Ronse, 2006) เป็นต้น

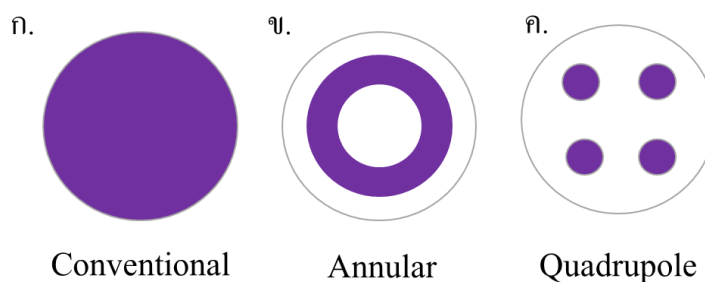
1) การออกแบบมาสก์ให้สามารถเลื่อนเฟสของแสง โดยการเพิ่มชั้นที่ช่วยในการเลื่อนเฟสของแสงบนมาสก์แสง ดังรูปที่ 2.4 ข. แสงที่ตกกระทบบนบริเวณที่มีชั้นที่ช่วยเลื่อนเฟสจะมีเฟสตรงข้ามกับบริเวณที่ไม่มีชั้นดังกล่าว การที่เฟสของแสงถูกเปลี่ยนเป็นตรงข้ามจะช่วยเพิ่มความคมชัด (Contrast) ของภาพที่ฉาย ช่วยให้สามารถสร้างลวดลายที่มีละเอียดมากยิ่งขึ้น และเพิ่มระยะความลึกของโฟกัสได้ ดังภาพการเปรียบเทียบความเข้มของแสงที่ผ่านมาสก์แบบปกติและมาสก์ที่มีชั้นช่วยเลื่อนเฟสของแสง (Ronse, 2006) ดังรูปที่ 2.4



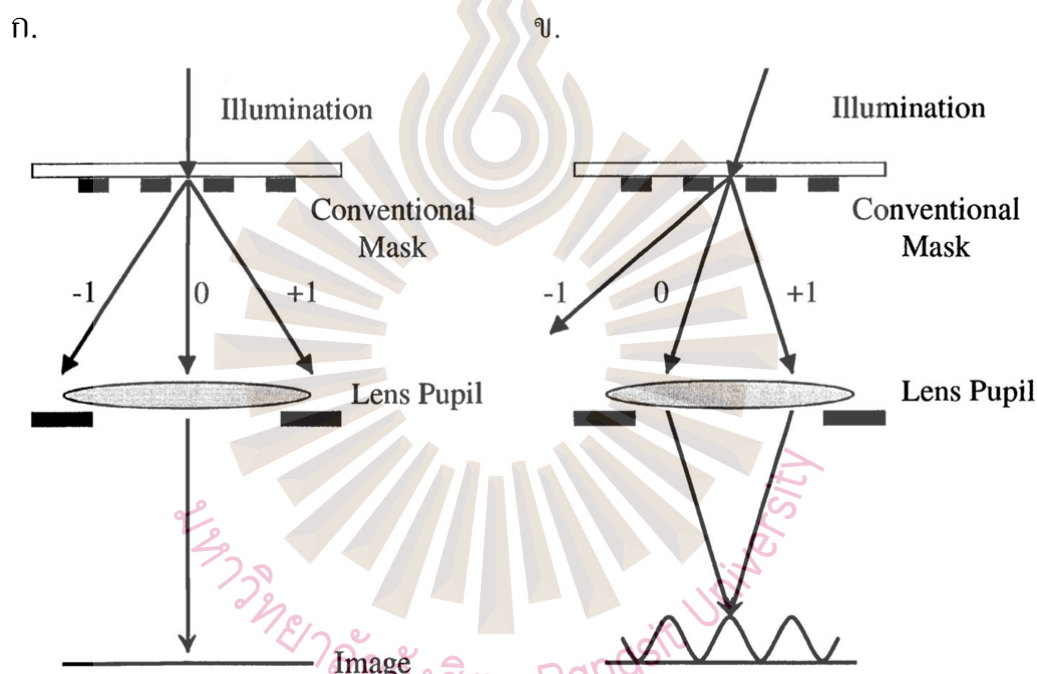
รูปที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบแสงที่ฉายภาพ ก. มาสก์แสงแบบปกติ และ ข. มาสก์แสงที่มีชั้นช่วยเลื่อนเฟสของแสง

ที่มา: Ronse, 2006

2) การดัดแปลงรูปร่างของลำแสงในระบบ วิธีนี้สามารถเพิ่มความละเอียดของลวดลายที่สร้างได้โดยการแก้ไขรูปร่างของลำแสงที่ตกกระทบบนมาสก์แสง ตัวอย่างรูปร่างของลำแสงที่ใช้ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ก. รูปลำแสงปกติเต็มวง รูปที่ 2.5 ข. รูปลำแสงที่มีลักษณะเป็นวงแหวน (Annular Illumination) และรูปที่ 2.5 ค. ลักษณะวงกลมสี่วง (Quadrupole Illumination)



รูปที่ 2.5 แสดงการเปรียบเทียบรูปร่างของลำแสงที่ฉายในระบบโฟโตลิโทกราฟีด้วย ก. ลำแสงปกติ  
 ข. ลำแสงที่มีลักษณะเป็นวงแหวน และ ค. ลำแสงที่มีลักษณะวงกลมสี่วง



รูปที่ 2.6 แสดงการเปรียบเทียบปรากฏการณ์เมื่อ ก. ลำแสงปกติ และ ข. ลำแสงที่ถูกดัดแปลงรูปร่าง  
 ก่อนเข้าสู่ระบบโฟโตลิโทกราฟี

ที่มา: Fuller, 2017

หลักการของวิธีนี้คือการทำให้แสงที่ตกกระทบบนมาสก์แสงถูกปรับให้เอียง ไม่เกิดมุมกระทบแบบตั้งฉากกับมาสก์แสง (Normal Incidence) โดยปกติเมื่อแสงตกกระทบบนมาสก์จะเกิดการเลี้ยวเบนของแสงไปยังลำดับการเลี้ยวเบนต่างๆ ดังรูปที่ 2.6 ก. แต่เมื่อแสงที่ถูกกระทบถูกปรับให้เอียง ทำให้แสงที่เลี้ยวเบนผ่านมาสก์ถูกปรับให้เอียง เสน่ห์ฉายภาพที่เก็บรวบรวมแสงจะเก็บแสงได้มากขึ้น ดังรูปที่ 2.6 ข. ข้อดีของวิธีนี้คือไม่ต้องแก้ไขในส่วนของมาสก์

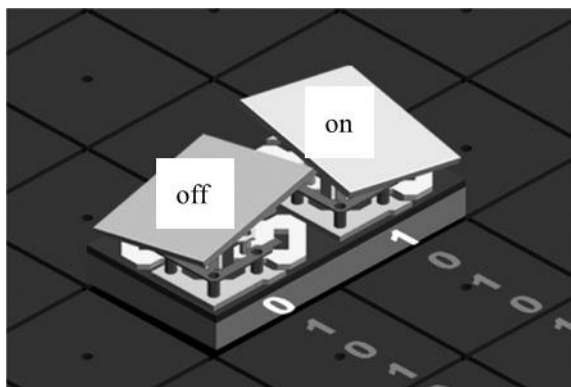


แสง แต่ข้อเสีย คือ ระบบจะสูญเสียพลังงานจากการที่แสงบางส่วนถูกบังไว้โดยเฉพาะบริเวณตรงกลางและวิธีนี้ใช้ได้กับมาสก์แสงที่มีรูปแบบเฉพาะเท่านั้น (Ronse, 2006)

### 2.1.3.3 โฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์ (Maskless Photolithography )

นอกจากความท้าทายที่จำกัดในด้านของขนาดลวดลายที่ทำให้เกิดการพัฒนาระบบลิโทกราฟีที่มีการใช้แหล่งกำเนิดต่าง ๆ แทนการใช้แสงที่มีความยาวคลื่นในช่วงแสงยูวีแล้ว ยังมีการพัฒนาระบบที่ใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ แทนการใช้มาสก์แสง เนื่องจากปัญหาในด้านของต้นทุนในการผลิต ระยะเวลาที่ใช้ในการผลิตและการขาดความยืดหยุ่นในการใช้งานเพราะมาสก์แสงแต่ละชิ้นจะมีลวดลายต้นแบบที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ทั้งในด้านของลวดลายและขนาด ระบบโฟโตลิโทกราฟีที่ไม่ใช้มาสก์แสงถูกพัฒนาขึ้นโดยการใช้อุปกรณ์สำหรับการทำโมดูเลชันของคุณสมบัติของแสงเชิงพื้นที่ ยกตัวอย่าง อุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัล และจอภาพผลึกเหลว เป็นต้น

1) อุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัล เป็นอุปกรณ์ปรับแสงเชิงพื้นที่จากระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค (Micro-electromechanical System : MEMS) อุปกรณ์ปรับแสงเชิงพื้นที่จากระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค มีลักษณะเป็นการเรียงตัวของพิกเซลของซิลิคอนหรืออะลูมิเนียมที่สามารถปรับเอียงได้ตามกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไป โครงสร้างอาร์เรย์ของซิลิคอนตอบสนองต่อสัญญาณแอนะล็อกที่ป้อนเข้าไปในแต่ละพิกเซล การปรับเอียงของพิกเซลจะเป็นในลักษณะคือ เปิดและปิด ต่อมาได้มีการพัฒนาให้สามารถสร้างภาพที่มีระดับสีเทาโดยการใช้หลักการสร้างสัญญาณแอนะล็อกด้วยการเขียนสัญญาณดิจิทัลขึ้นมา (Pulse with Modulation) โดยทั่วไปอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัลจะประกอบไปด้วยกระจกอะลูมิเนียมที่มีขนาดในระดับไมครอนที่สามารถสะท้อนแสงไปได้ในสองทิศทาง โดยทิศทางการสะท้อนของแสงขึ้นอยู่กับการควบคุมผ่านวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ทิศทางในการสะท้อนของแสงควบคุมโดยการเอียงของกระจกอะลูมิเนียมไปยังองศาที่กำหนดไว้ โดยทั่วไปอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัลถูกใช้ในเครื่องฉายภาพ ทำงานร่วมกับแหล่งกำเนิดแสงและเลนส์สำหรับฉายภาพ กระจกอะลูมิเนียมจะบิดเอียงเพื่อให้แสงที่ตกกระทบจากแหล่งกำเนิดแสงสะท้อนเข้าสู่หรือออกไปจากเลนส์ฉายภาพ โดยปกติเมื่อกระจกไม่เกิดการบิด ถือว่าเป็นสถานะเปิด คือแสงจะถูกสะท้อนเข้าสู่เลนส์ฉายภาพ เกิดแสงที่ปลายทางของเลนส์ และเมื่อกระจกบิดจะถือว่าอยู่ในสถานะปิด แสงจะถูกสะท้อนออกไป ไม่เข้าสู่เลนส์ฉายภาพปลายทางของเลนส์ฉายภาพจะไม่มีแสงหรือเกิดบริเวณมืด (Dudley, Duncan, & Slaughter, 2003)



รูปที่ 2.7 แสดงการทำงานของอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัลในโหมดเปิดและปิด

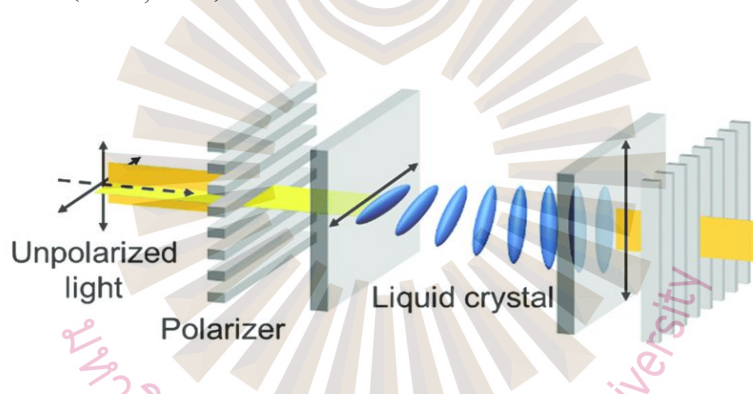
ที่มา: Gong & Hogan, 2014

ในปี 2010 อุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัลได้ถูกนำมาใช้ใน ระบบโฟโตลิโทกราฟี โดยมีแหล่งกำเนิดแสงในระบบเป็นหลอดไฟฮาโลเจนที่มีกำลัง 250 W และ เลือกใช้ความยาวคลื่นจากหลอดฮาโลเจนในช่วง 450 nm ฉายผ่านระบบเลนส์ที่ออกแบบและ ประกอบขึ้นเองจากเลนส์จำนวน 8 ชิ้น ระบบนี้สามารถสร้างรูปร่างบนแผ่นรองรับให้ความละเอียด ถึง 4  $\mu\text{m}$  (Lee, 2010) และในปีคริสต์ศักราช 2013 Ding และคณะ พัฒนาระบบโฟโตลิโทกราฟีแบบ ไม่ใช้มาสก์ โดยการใช้อุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัลแต่มีการดัดแปลงแหล่งกำเนิดแสง จากการใช้หลอดไฟเป็นการใช้ลำแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 365 nm และระบบเลนส์ฉายภาพลง บนแผ่นรองรับมีการประยุกต์ใช้เลนส์ใกล้วัตถุของกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 10 เท่าในการย่อ ขนาดภาพ ระบบนี้มีส่วนเพิ่มเติมคือแหล่งกำเนิดแสงหลังแผ่นรองรับ ในการวิจัยนี้ใช้แผ่นรองรับ เป็นเรซิน ที่มีลักษณะโปร่งใสและมีเซนเซอร์รับภาพ ทำหน้าที่รับภาพรูปแบบแสงจากแหล่งกำเนิด ผ่านเลนส์ใกล้วัตถุ จุดมุ่งหมายของระบบนี้คือศึกษาลักษณะทวิคูณที่เกิดขึ้นในการใช้ลำแสงรูปแบบ ต่าง ๆ พบว่าการใช้อุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัลทำให้มีความยืดหยุ่นในการสร้าง ทวิคูณและมีความแม่นยำในการสร้างทวิคูณทั้งใน 2 และ 3 มิติ (Ding, Ren, & Lu, 2013)

2) อุปกรณ์ผลึกเหลวเป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นทั้งของแข็งและ ของเหลว สามารถปรับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของแสงได้ มักนิยมใช้ในการสร้างอุปกรณ์จอภาพใช้กับ แสงในช่วงที่ตามนุษย์สามารถมองเห็น นอกจากนี้อุปกรณ์จอผลึกเหลวถูกนำมาศึกษาและพัฒนา สำหรับการนำไปใช้งานด้านอื่น ๆ เช่น การประมวลผลข้อมูลด้วยแสง (Optical Data Processing) เทคโนโลยีระบบปรับสภาพตามแสง (Adaptive Optics) สำหรับใช้กับกล้องโทรทรรศน์ เป็นต้น การ ใช้อุปกรณ์ผลึกเหลวสามารถส่งข้อมูลไปยังลำแสงได้ทั้งโหมดส่องผ่านและโหมดสะท้อน



โดยทั่วไปผลึกเหลว (Liquid Crystals) มีลักษณะแบบโครงสร้างที่แตกต่างของกันไปตามทิศทางของการวัดทำให้มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (Permittivity :  $\epsilon$ ) และคุณสมบัติของแสงที่ไม่เท่ากันในแต่ละทิศทางที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านแผ่นอิเล็กโทรด โครงสร้างของผลึกเหลวมีรูปร่าง 3 ลักษณะ ได้แก่ ผลึกเหลวมีการเรียงตัวตั้งฉากกับแผ่นอิเล็กโทรด (Homeotropic Configuration) ผลึกเหลวมีการเรียงตัวขนานกับแผ่นอิเล็กโทรด (Planar Configuration) และผลึกเหลวมีการบิดองศาต่าง ๆ กับแผ่นอิเล็กโทรด (Twist Configuration) การเรียงตัวของผลึกเหลวส่งผลทำให้ลำแสงเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น การเปลี่ยนคุณสมบัติของความเป็นโพลาไรซ์ (Polarization) ของแสงจะเปลี่ยนแปลงตามทิศทางที่การเรียงตัวที่เกิดการบิดตัวของผลึกเหลว ซึ่งเกิดจากในแต่ละชั้นที่แตกต่างกันเกิดจากการเติมสารไครัล (Chiral Agent) ทำให้องศาการบิดตัวของผลึกเหลวในแต่ละระนาบแตกต่างกัน การเรียงตัวและการบิดของผลึกเหลวจึงมีลักษณะคล้ายกับเกลียว ดังรูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงของผลึกเหลวทำให้สามารถทำการ โมดูเลชันหรือเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของแสงที่ส่องผ่านเข้ามาได้ (Efron, 2001)



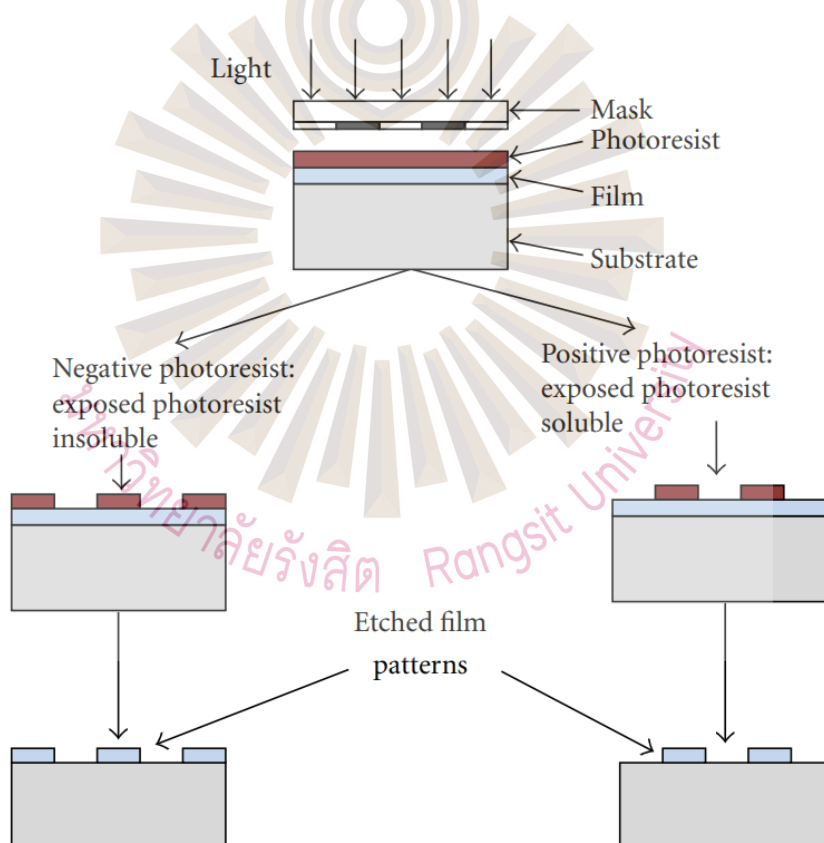
รูปที่ 2.8 แสดงการการบิดของผลึกเหลวเพื่อควบคุมทิศทางของแสงโพลาไรซ์เชิงเส้น  
ที่มา: Yoon et al., 2019

ในปีคริสตศักราช 2001 Jain ได้จดสิทธิบัตรสิ่งประดิษฐ์ระบบโฟโตนิกโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์ โดยการแทนที่มาสก์ด้วยอุปกรณ์สำหรับการทำ โมดูเลชันของคุณสมบัติของแสงเชิงพื้นที่ระบบของ Jain จะใช้เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงและให้แสงเป็นพัลส์ (Pulse) อุปกรณ์สำหรับการทำ โมดูเลชันของคุณสมบัติของแสงเชิงพื้นที่ที่ใช้คือ วาล์วแสงที่เปลี่ยนตามผลึกเหลว (Liquid Crystal Light Valve : LCLV) ที่สามารถเลือกแสงที่ตกกระทบลงบนแต่ละพิกเซลและเลือกแสงที่สะท้อนไปยังเลนส์ฉายภาพที่สามารถย่อขนาดแสงจากแต่ละพิกเซลให้เล็กลงก่อนฉายลงบนแผ่นรองรับได้ (Jain, 2001)

#### 2.1.3.4 การพัฒนาในรูปแบบอื่นๆ

ในปีคริสต์ศักราช 2001 มีการดัดแปลงกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงส่องผ่านให้เป็นระบบโฟโตลิโทกราฟี โดยการออกแบบแหล่งกำเนิดแสงด้วยหลอดไอปรอท (Mercury-vapor Lamp) กำลัง 80 W ถึง 100 W ฉายแสงผ่านมาสก์และผ่านเลนส์ใกล้วัตถุเพื่อสร้างลวดลายบนแผ่นรองรับที่อยู่บนแท่นวางสไลด์ เลนส์ใกล้วัตถุที่ใช้ในระบบดังกล่าวเป็นเลนส์ที่ต้องหยดน้ำมันระหว่างหัวเลนส์และกระจกปิดสไลด์ มีกำลังขยาย 100 เท่า และมีค่าความสามารถในการเก็บรวบรวมแสงเท่ากับ 1.2 ระบบนี้สามารถสร้างรูปร่างที่มีความละเอียดได้สูงถึง  $0.6 \mu\text{m}$  (Love, Wolfe, Jacobs, & Whitesides, 2001)

#### 2.1.4 สารไวแสงที่ใช้ในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะของสารไวแสงชนิดบวกและสารไวแสงชนิดลบเมื่อผ่านการฉายแสงและล้างด้วยน้ำยาดีเวลลอปเปอร์

ที่มา: Bellah, Christensen, & Iqbal, 2012

สารไวแสง เป็นหนึ่งในวัสดุที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมสาร โลหะกึ่งตัวนำ สารไวแสงเป็นพอลิเมอร์ สามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท ได้แก่ สารไวแสงชนิดลบและสารไวแสงชนิดบวก สารไวแสง 2 ชนิดดังกล่าวแตกต่างกันที่สภาพหลังการฉายแสง สารไวแสงชนิดลบบริเวณที่สัมผัสกับแสงจะแข็งตัวและไม่ถูกทำให้ละลายตัวไปหลังจากกระบวนการใช้น้ำยาดีเวลลอปเปอร์ ในทางตรงกันข้ามสารไวแสงชนิดบวกบริเวณที่ถูกฉายแสง จะถูกทำให้ละลายในตัวน้ำยาดีเวลลอปเปอร์ ในขณะที่บริเวณที่ไม่ถูกแสงจะคงอยู่แม้ว่าจะถูกชะล้างด้วยสารเคมี ดังรูปที่ 2.9 สารไวแสงทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดบวกและชนิดลบมีคุณลักษณะและข้อดีข้อเสียแตกต่างกันดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทั่วไปของสารไวแสงชนิดบวกและสารไวแสงชนิดลบ

คุณลักษณะ	สารไวแสงชนิดบวก	สารไวแสงชนิดลบ
การจับตัวกับซิลิคอน	ไม่ดี	ดีมาก
ราคา	มีราคาสูง	ราคาไม่สูง
ชนิดน้ำยาดีเวลลอปเปอร์	สารที่ละลายในน้ำ	ออร์แกนิก
สิ่งที่ละลายในน้ำยาดีเวลลอปเปอร์	บริเวณที่ถูกฉาย	บริเวณที่ไม่ถูกฉาย
ขนาดเล็กที่สุดที่สร้างได้	0.5 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$
ความต้านทานการสึกกร่อนทางเคมี	ต่ำ	สูง

ที่มา: Madou, 2002

สารไวแสง นอกจากจะถูกแบ่งประเภทตามลักษณะหลังการฉายแล้ว ยังมีการแบ่งตามโครงสร้างทางเคมี สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ สารไวแสงชนิดโฟโตพอลิเมอร์ (Photopolymer Photoresist) สารไวแสงชนิดที่ละลายตัวด้วยแสง (Photo-decomposing Photoresist) และสารไวแสงที่มีโครงสร้างเป็นร่างแหได้ด้วยแสง (Photocrosslinking Photoresist)

2.1.4.1 โฟโตพอลิเมอร์ มักเป็นสารประเภทแอลิล มอนอเมอร์ (Allyl Monomer) เมื่อถูกฉายแสงจะกลายเป็นสารที่เป็นอนุโมลอิสระ คือ อะตอมหรือโมเลกุลที่มีอิเล็กตรอนเดี่ยวในชั้นนอกสุดสามารถจับหรือสร้างพันธะกับสารอื่นได้อย่างรวดเร็ว โฟโตพอลิเมอร์นิยมนำมาใช้เป็นสารไวแสงชนิดลบ เช่น เมทิลเมทาคริเลต (Methyl Methacrylate : MMA) (Nakamura, 2014)

2.1.4.2 สารไวแสงชนิดที่ละลายตัวด้วยแสง เป็นสารไวแสงที่จะกลายเป็นสารที่สามารถละลายในน้ำ (Hydrophilic) นิยมนำมาใช้เป็นสารไวแสงชนิดบวก (Lin, 2007)

2.1.4.3 สารไวแสงที่มีโครงสร้างเป็นร่างแหได้ด้วยแสง เป็นสารไวแสงที่สามารถเกิดการเกาะตัวเป็นร่างแหที่ไม่ละลายได้ เมื่อผ่านการฉายแสง สารไวแสงที่มีโครงสร้างเป็นร่างแหได้ด้วยแสง นำมาใช้เป็นสารไวแสงชนิดลบ (Ding et al., 2019)

ในส่วนของสารไวแสงชนิดต่าง ๆ นั้น นอกจากในรูปของของเหลวแล้ว ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาให้อยู่ในรูปของพอลิเมอร์ที่มีลักษณะคล้ายแผ่นฟิล์ม (Dry-film photoresist) เช่น สารไวแสง รุ่น ETERTEC HT-115T DRY FILM PHOTORESIST เป็นสารไวแสงชนิดลบ สามารถล้างบริเวณที่ไม่ต้องการได้ด้วยวิธีการกัดด้วยสารเคมี จุดเด่นของสารไวแสงชนิดนี้ คือ ใช้การได้ดีกับการเคลือบบนผิวของโลหะและสามารถสร้างลวดลายด้วยความละเอียดสูง รวมถึงใช้เวลาในการสร้างลวดลายไม่นาน นิยมนำมาใช้ในการผลิตแผ่นวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์เป็นหลักแต่มีงานวิจัยที่นำสารไวแสงแบบฟิล์มมาใช้ในการสร้างแม่พิมพ์สำหรับสร้างช่องทางไหลจุลภาคที่มีขนาด  $100\ \mu\text{m}$  อีกด้วย (Zhang & Songjing, 2018)

### 2.1.5 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานลวดลายต่าง ๆ ที่สร้างจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

นอกจากการถูกนำมาใช้สร้างลวดลายในวงจรอิเล็กทรอนิกส์แล้วโฟโตลิโทกราฟียังถูกนำมาใช้ในการสร้างลวดลายเพื่อจุดประสงค์ต่าง ๆ เช่น การสร้างช่องทางไหลจุลภาค การสร้างลวดลายบนไบโอเซนเซอร์ และเทคโนโลยีที่รวมช่องทางไหลจุลภาคและไบโอเซนเซอร์เข้าด้วยกันในรูปแบบของห้องปฏิบัติการบนชิป เป็นต้น

#### 2.1.5.1 ช่องทางไหลจุลภาค

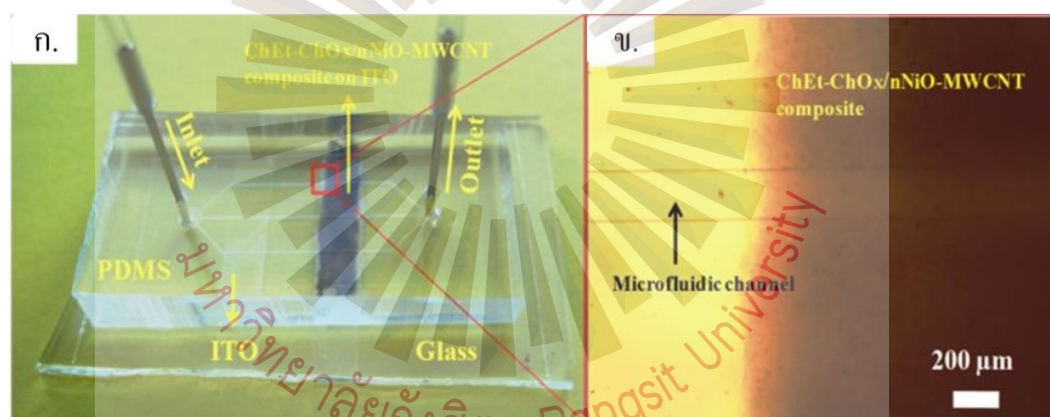
ช่องทางไหลจุลภาคเป็นช่องทางไหลที่มีขนาดเล็กระดับไมครอน ใช้สำหรับเป็นทางไหลของของเหลวหรือแก๊ส ช่องทางไหลจุลภาคสามารถนำมาใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลของสาร ใช้ในการขนส่งสารที่เป็นของเหลว รวมถึงการควบคุมการไหลของสารที่มีปริมาตรในระดับไมโครลิตรได้ ช่องทางไหลจุลภาคนิยมถูกสร้างและใช้ในทางชีววิทยา ทางเคมี รวมถึงทางการแพทย์ เป็นต้น ตัวอย่างการใช้งานช่องทางไหลจุลภาค ได้แก่ การออกแบบและสร้างช่องทางไหลจุลภาคสำหรับการแยกสารที่มีขนาดต่างกัน เช่น ในทางการแพทย์ ได้มีการแบบช่องทางไหลจุลภาคที่ใช้สำหรับการคัดแยกองค์ประกอบต่าง ๆ ภายในเลือด (Yang, Ündar, & Zahn, 2006) รวมถึงการสร้างช่องสำหรับการเพาะเลี้ยงเซลล์ (Xiong et al., 2014) เป็นต้น

#### 2.1.5.2 ไบโอเซนเซอร์

ไบโอเซนเซอร์หรือตัวตรวจวัดทางชีวภาพ เป็นการวิเคราะห์สารต่าง ๆ ทางชีวภาพ โดยการใช้เทคนิคต่าง ๆ ในการตรวจวัดไม่ว่าจะเป็นทางด้านเคมีโดยการใช้เอนไซม์ (Enzyme) หรือใช้แสงในการตรวจวัดคุณสมบัติของสาร เป็นต้น ยกตัวอย่างการใช้กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีในไบโอเซนเซอร์ เช่น การสร้างลวดลายของอิเล็กทรอนิกส์บนอุปกรณ์ไบโอเซนเซอร์ (Hsu et al., 2016) เป็นต้น

### 2.1.5.3 เทคโนโลยีห้องปฏิบัติการบนชิป (Lap-on-a-chip : LOC)

เทคโนโลยีห้องปฏิบัติการบนชิป เป็นเทคโนโลยีที่รวมช่องทางไหล จุลภาคและไบโอเซนเซอร์เข้าด้วยกัน เพื่อรวมองค์ประกอบทางเคมีและชีววิทยาเข้าด้วยกันเป็นชิ้นเดียวกัน เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ไบโอเซนเซอร์ให้มีขนาดเล็ก พกพาได้ สามารถตรวจวัดได้แบบเรียลไทม์ (Realtime) สามารถวิเคราะห์ห้องค์ประกอบสารหลาย ๆ ชนิดได้ด้วยอุปกรณ์ชิ้นเดียว รวมถึงสามารถใช้แล้วทิ้งได้ ยกตัวอย่าง ช่องทางไหลจุลภาคจะช่วยให้การคัดแยกสารหรือผสมสารเข้าด้วยกันขึ้นอยู่กับกรอกแบบลวดลาย ห้องปฏิบัติการบนชิปที่มีการใช้กระบวนการโฟโวลิตोगราฟีในการสร้างลวดลายในส่วนของช่องทางไหลสาร เช่น การสร้างอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดคอเลสเตอรอลโดยการใชเอมไซม์ 2 ชนิดได้แก่ คอเลสเตอรอลออกซิเดส (Cholesterol Oxidase : ChOx) และ คอเลสเตอรอลเอสเทอร์เรส (Cholesterol Esterase) และวัดปริมาณของคอเลสเตอรอลด้วยเทคนิคโครโนแอมเพอโรเมทรี (Chronoamperometry) เป็นการวัดกระแสที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของสารที่นำมาทดสอบและเอมไซม์ ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดง ก. อุปกรณ์สำหรับตรวจวัดคอเรสเตอรอล และ ข. บริเวณที่เกิดปฏิกิริยาระหว่างคอเลสเตอรอลและเอมไซม์ที่ใช้ในการตรวจวัด

ที่มา: Ali et al., 2013

### 2.1.5.4 โครงสร้างเกรตติง

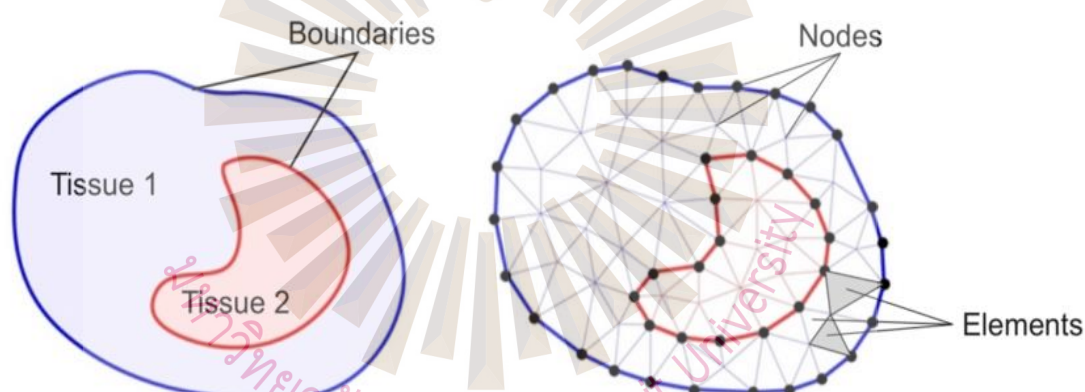
เกรตติงเป็นหนึ่งในอุปกรณ์ทางด้านแสงที่สามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนของแสงเมื่อแสงเดินทางไปตกกระทบ ในทางการตรวจวัดปริมาณต่าง ๆ เกรตติงได้ถูกนำมาใช้ในการเพิ่มความสามารถในการตรวจวัดด้วยเซนเซอร์แสงโดยการเพิ่มโครงสร้างเกรตติงเข้าไปในส่วนของตัวรับรู้ของระบบ เช่น การตรวจวัดด้วยคลื่นผิวพลาสมอนเป็น



เทคนิคในการตรวจวัดปริมาณสารจากการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเห ได้มีงานวิจัยที่นำเสนอผลการจำลองในการนำโครงสร้างเกรตติงมาช่วยเพิ่มความไวในการตอบสนองและค่าความเป็นเซนเซอร์ที่ดีในการตรวจวัดอีกด้วย (Sasivimolkul, Pechprasarn, & Somekh, 2021)

## 2.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นหนึ่งในวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่นิยมนำไปใช้ในการหาคำตอบหรือการแก้ปัญหาต่าง ๆ ในทางวิศวกรรม หลักการของระเบียบวิธีนี้ คือ การใช้สมการอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equation) มาใช้ในการคำตอบเพื่อลดความซับซ้อนของโครงสร้างที่ต้องการศึกษา โดยการแบ่งโครงสร้างของสิ่งที่ต้องการศึกษา (Problem Domain) ให้เป็นหลายๆ องค์ประกอบย่อย (Element) เรียกว่า การสร้างเมช (Meshing) โดยในแต่ละองค์ประกอบย่อยจะมี โหนด (Node) ซึ่งเป็นจุดที่มีการคำนวณเพื่อหาผลลัพธ์หรือคำตอบที่ต้องการศึกษา ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงการสร้างเมชบนโครงสร้างที่ต้องการศึกษา

ที่มา: Zanin et al., 2020

ข้อดีของการแก้ปัญหาคือการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ วิธีนี้สามารถนำมาใช้ในการแก้ไขปัญหาที่มีความซับซ้อนมาก ๆ รวมถึงการศึกษาโครงสร้างวัสดุที่มีความซับซ้อนหรือวัสดุที่มีลักษณะที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันในแต่ละทิศทาง เรียกว่า แอนไอโซโทรปี (Anisotropic Material) เช่น วัสดุที่เป็นแบบออร์โทโทรปิก (Orthotropic Material) คือ วัสดุที่มีคุณสมบัติเชิงกลและความร้อนไม่สม่ำเสมอในแต่ละทิศทาง เป็นต้น รวมถึงวิธีนี้สามารถคำนวณผลลัพธ์ทั้งใน 1 มิติ 2 มิติ และ 3 มิติ แต่วิธีนี้ยังมีข้อเสียคือในแต่ละจุดที่มีการคำนวณจะมีค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ของจุดนั้น ๆ อยู่ เมื่อรวมผลลัพธ์ในแต่ละจุดจะทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนสะสมได้และ

การคำนวณผลลัพธ์ด้วยวิธีนี้ต้องการอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะที่ค่อนข้างสูง (พิมสาร, 2564)

### 2.2.1 การศึกษาผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างคลื่นเสียงและวัสดุของแข็งโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในโดเมนความถี่

การศึกษาผลการปฏิสัมพันธ์ระหว่างคลื่นเสียงและวัสดุของแข็งระนาบที่เกี่ยวข้องกับความถี่เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความดันเสียง (Acoustic Pressure) ที่เดินทางผ่านโดเมนของเหลว (Fluid Domain) และตกลงบนรอยต่อระหว่างของเหลวและวัสดุของแข็ง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในวัสดุที่เป็นของแข็ง เช่น ค่าความเค้น (Strain) ที่เปลี่ยนแปลงบนวัสดุหรือรูปร่างที่เปลี่ยนแปลง (Displacement) ของวัสดุได้ ผลการปฏิสัมพันธ์ระหว่างคลื่นเสียงและวัสดุของแข็งสามารถนำไปใช้แก้ปัญหา เช่น การหาค่าความส่องผ่าน (Transmittance : T) ของคลื่นเสียงผ่านวัสดุยืดหยุ่นหรือการสั่นของลำโพงที่เกิดจากคลื่นเสียง เป็นต้น ในการศึกษาปฏิสัมพันธ์นี้ประกอบด้วยวิธีการคำนวณ 2 ส่วน คือ การคำนวณของความดันคลื่นเสียงในบริเวณ โดเมนของเหลวที่คลื่นเสียงเดินทาง และการคำนวณเชิงกลศาสตร์ในส่วนของ โครงสร้างที่เป็น โดเมนของแข็ง (Solid Domain)

2.2.1.1 การศึกษาความดันคลื่นเสียงด้วยโดเมนความถี่ (Frequency Domain) เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความดันคลื่นเสียงใน โดเมนของเหลว ซึ่งเป็นตัวกลางในการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง หลักการฟิสิกส์ที่ถูกนำมาใช้ในการศึกษาปัญหานี้ คือ สมการของเฮล์มโฮลทซ์ (Helmholtz Equation) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณฮาร์มอนิกของคลื่นเสียงในสนามความดัน (Harmonic Sound Pressure Field) ในฟังก์ชันความถี่เชิงมุม ( $\omega$ ) มีหน่วยเป็นเรเดียน (rad) (COMSOL Inc., 2018)

$$\nabla \cdot \left( -\frac{1}{\rho_c} (\nabla_{p_t - q_d}) \right) - \frac{k_{eq}^2 p_t}{\rho_c} = Q_m \quad (2-5)$$

โดยที่  $p_t = p + p_b$  และ  $k_{eq}^2 = \left( \frac{\omega}{c_c} \right)^2 - k_z^2$

$p$  คือ ความดันคลื่นเสียงที่ใส่เข้าไป (Pa)

$p_b$  คือ ความดันคลื่นเสียงพื้นหลัง (Background pressure) (Pa)

$p_t$  คือ ความดันคลื่นเสียงรวมทั้งระบบ (Total pressure) (Pa)

$\rho_c$  คือ ค่าความหนาแน่นของตัวกลาง (Density) ( $\text{kg/m}^3$ )

$k_z$  คือ เวกเตอร์ของคลื่นเสียง (Wavevector) ( $m^{-1}$ )

$c_c$  คือ ค่าความเร็วที่คลื่นเสียงเดินทางผ่านตัวกลาง (m/s)

และความถี่ของคลื่นเสียง ( $f$ ) มีสัมพันธ์กับความถี่เชิงมุม  $f = \frac{\omega}{2\pi}$

2.2.1.2 การคำนวณเชิงกลศาสตร์ในส่วนของโครงสร้างที่เป็น โดเมนของแข็ง เป็นการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างของแข็งที่เกิดจากการตกกระทบของคลื่นเสียง ที่เดินทางผ่าน โดเมนของเหลว เช่น การเปลี่ยนแปลงของรูปร่างหรือความหนา ความเค้นและความเครียดในวัสดุ เป็นต้น โดยการใช้สมการของนาเวียร์ (Navier's Equation) ในการคำนวณผลลัพธ์ (COMSOL Inc., 2017) ดังสมการที่ 2-6

$$f = n \cdot \left\{ -pI + (\mu(\nabla u_{\text{fluid}} + (\nabla u_{\text{fluid}})^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot u_{\text{fluid}})I) \right\} \quad (2-6)$$

โดยที่  $p$  คือ ความดัน

$\mu$  คือ ค่าความหนืดพลวัต (Dynamic Viscosity)

$n$  คือ เวกเตอร์ตั้งฉากกับรอยต่อรอยต่อ โดเมนของเหลวและ โดเมนของแข็ง

$I$  คือ เมทริกซ์เอกลักษณ์

และ  $u_{\text{fluid}}$  คือ เวกเตอร์ของคลื่นเสียงในโดเมนของเหลว

จากสมการที่ 2-6 สามารถคำนวณหาแรง (Force : F) โดยคำนวณผลที่ละองค์ประกอบย่อย (Frame) ได้จากสมการที่ 2-7

$$F = f \cdot \frac{dv}{dV} \quad (2-7)$$

โดยที่  $dv$  คือ ค่าสเกลของเอลิเมนต์ขององค์ประกอบย่อย (Spatial frame)

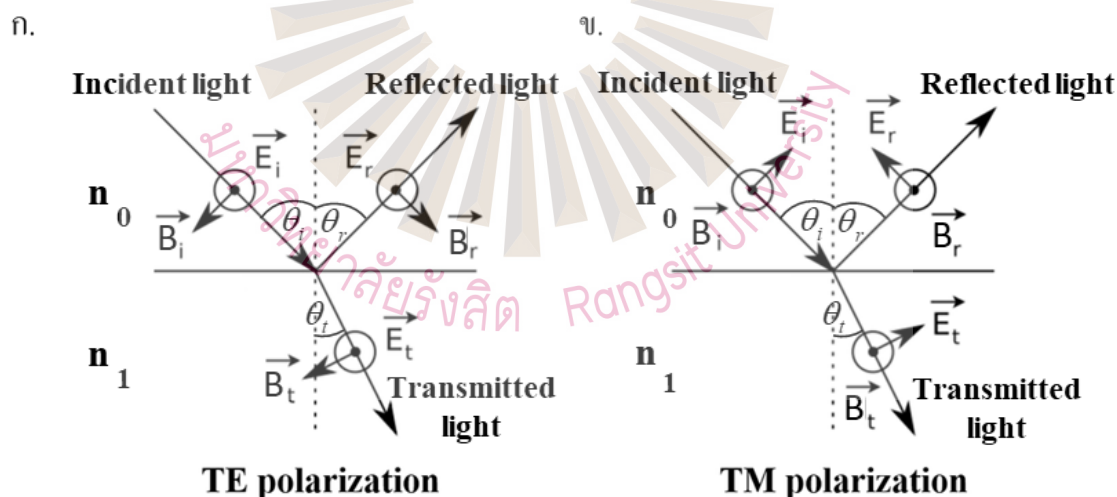
และ  $dV$  คือ ค่าสเกลของเอลิเมนต์ของวัสดุ (Material frame)



## 2.3 ทฤษฎีเชิงแสง

### 2.3.1 หลักการของเฟรสเนล (Fresnel principle)

สมการของเฟรสเนลเป็นสมการที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ของแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อเดินทางผ่านรอยต่อระหว่าง 2 ตัวกลางซึ่งเป็นตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหแตกต่างกัน เมื่อแสงเดินทางผ่านรอยต่อของตัวกลาง แสงบางส่วนจะถูกสะท้อนกลับไปยังตัวกลางเดิมหรือตัวกลางที่ 1 และแสงบางส่วนจะเกิดการส่งผ่านไปยังตัวกลางที่ 2 ดังรูปที่ 2.12 โดยทั่วไปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field :  $\vec{B}$ ) และสนามไฟฟ้า (Electric Field :  $\vec{E}$ ) ตั้งฉากกันและตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นแสง ทิศทางของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้ามีผลต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ทำให้มีการศึกษาผลลัพธ์ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กดังกล่าว โดยแบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่สนามไฟฟ้าตั้งฉากกับระนาบตกกระทบ (Transverse Electric Polarization : TE) หรือมีอีกชื่อว่า แสงมีโพลาไรซ์แบบเอส (S-polarization) ดังรูปที่ 2.12 ก. และกรณีที่สนามแม่เหล็กตั้งฉากกับระนาบตกกระทบ (Transverse Magnetic Polarization : TM) หรือมีอีกชื่อว่า แสงมีโพลาไรซ์แบบพี (P-polarization)



รูปที่ 2.12 แสดงการเดินทางของแสงผ่านรอยต่อระหว่างตัวกลางในกรณีที่ ก. แสงมีโพลาไรซ์แบบ TE และ ข. แสงมีโพลาไรซ์แบบ TM

ที่มา: ดัดแปลงมาจาก Mohamad, 2020

จากรูปที่ 2.12 เห็นได้ว่าแสงที่ตกกระทบทำมุม  $\theta_i$  กับแกนตั้งฉาก แสงที่สะท้อนทำมุม  $\theta_r$  กับแกนตั้งฉากและแสงที่ส่องผ่านรอยต่อจะเกิดการหักเหและทำมุม  $\theta_t$  กับแกนตั้งฉาก จากกฎของการหักเหของสเนล (Snell's Law) (Vandergriff & McLean, 2021)

$$\theta_i = \theta_r \quad (2-8)$$

$$n_r \sin \theta_r = n_t \sin \theta_t \quad (2-9)$$

จากเงื่อนไขสำหรับแสงโพลาไรซ์แบบ TE

$$E_i + E_r = E_t \quad (2-10)$$

หรือ

$$B_i \cos \theta_i - B_r \cos \theta_r = B_t \cos \theta_t \quad (2-11)$$

จากเงื่อนไขสำหรับแสงโพลาไรซ์แบบ TM

$$-B_i + B_r = -B_t \quad (2-12)$$

หรือ

$$E_i \cos \theta_i - E_r \cos \theta_r = E_t \cos \theta_t \quad (2-13)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าจากสมการของแมกเวลล์ (Maxwell's equation)

$$E = \left( \frac{c}{n} \right) B \quad (2-14)$$

โดยที่  $c$  คือ อัตราเร็วของแสงเดินทางในสุญญากาศ (m/s)

$n$  คือ ค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง

จากสมการที่ 2-9 และ 2-10 แสงโพลาไรซ์แบบ TE สามารถจัดรูปได้เป็น

$$E_i + E_r = E_t \quad (2-15)$$

หรือ

$$n_0 E_i \cos \theta_i - n_0 E_r \cos \theta_r = n_1 E_t \cos \theta_t \quad (2-16)$$

และแสงโพลาไรซ์แบบ TM สามารถจัดรูปได้เป็น

$$-n_0 E_i + n_0 E_r = -n_1 E_t \quad (2-16)$$

หรือ

$$E_i \cos \theta_i - E_r \cos \theta_r = E_t \cos \theta_t \quad (2-17)$$

เราสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านได้ สำหรับแสงโพลาไรซ์แบบ TE (Mohammed, 2019) ดังนี้

$$r_s = \frac{E_{r,s}}{E_{i,s}} = \frac{n_0 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_0 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \quad (2-18)$$

$$t_s = \frac{E_{t,s}}{E_{i,s}} = \frac{2n_0 \cos \theta_i}{n_0 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \quad (2-19)$$

สำหรับแสงโพลาไรซ์แบบ TM (Mohammed, 2019) ดังนี้

$$r_p = \frac{E_{r,p}}{E_{i,p}} = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_0 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_0 \cos \theta_t} \quad (2-20)$$

$$t_p = \frac{E_{t,p}}{E_{i,p}} = \frac{2n_0 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_0 \cos \theta_t} \quad (2-21)$$

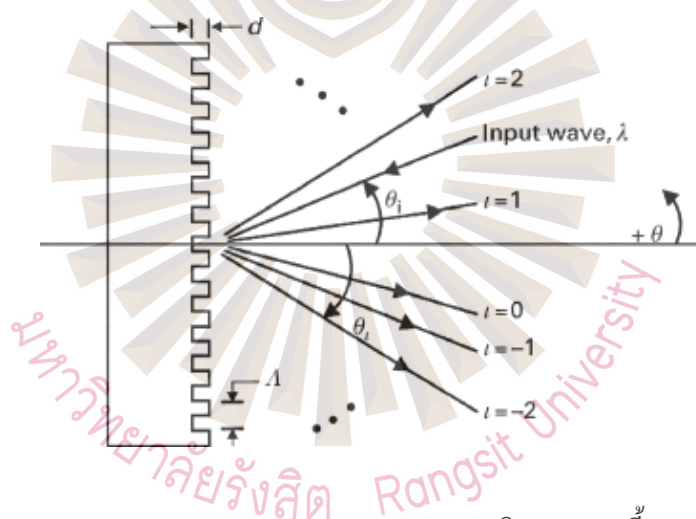
และค่าความสะท้อนของแสงและความส่องผ่านสามารถคำนวณได้จาก

$$R = |r|^2 \quad (2-22)$$

$$T = |t|^2 \quad (2-23)$$

### 2.3.2 การวิเคราะห์เชิงแสงด้วยทฤษฎีคลื่นควมคู่อย่างเคร่งครัด

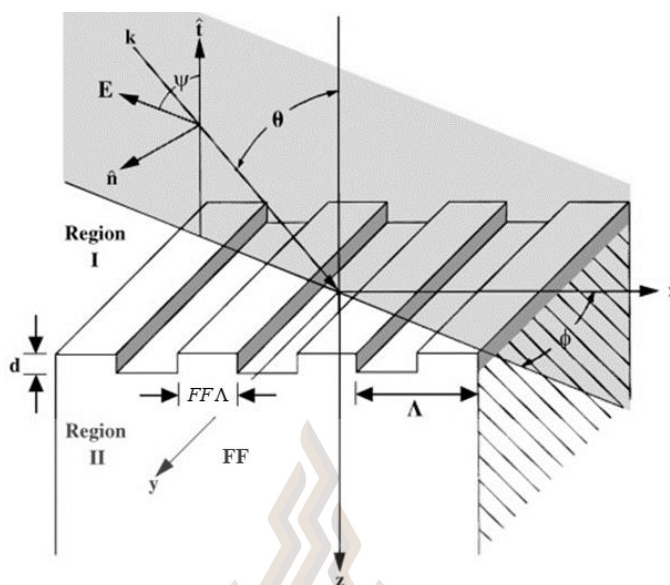
เมื่อแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อตกกระทบลงบนรอยต่อระหว่าง 2 ตัวกลางที่มีลักษณะ โครงสร้างเป็นคาบ เช่น เกรตติง เป็นต้น ทำให้เกิดปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนของแสงไปยังลำดับการเลี้ยวเบนต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.13 แสดงการตกกระทบของแสงลงบนเกรตติงที่มีความหนา (Thickness :  $d$ ) และขนาดคาบ (Period :  $\Lambda$ ) และแสงเกิดการเลี้ยวเบนลำดับที่ -2 -1 0 1 และ 2



รูปที่ 2.13 แสดงการตกกระทบของแสงลงบนเกรตติงและการเลี้ยวเบนของแสง

ที่มา: Magnusson, 2017

ทฤษฎีคลื่นควมคู่อย่างเคร่งครัดเป็นทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายหรือทำนายปรากฏการณ์การสะท้อนและการส่องผ่านของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ ทั้งกรณีที่มีโพลาไรซ์แบบ TM และ TE เช่นเดียวกับหลักการของเฟรสเนลโดยใช้สมการของแม็กเวลล์มาทำนายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ทฤษฎีคลื่นควมคู่อย่างเคร่งครัดนั้น มีความซับซ้อนมากกว่าหลักการของเฟรสเนลเนื่องจากวัสดุที่แสงเดินทางผ่านมีความซับซ้อนมากกว่า (Moharam, Grann, Pommet, & Gaylord, 1995)



รูปที่ 2.14 แสดงการตกกระทบของแสงบนวัสดุที่มีโครงสร้างเกรตติง  
ที่มา: ดัดแปลงมาจาก Moharam, Grann, Pommet, & Gaylord, 1995

จากรูปที่ 2.14 แสดงการตกกระทบของแสงบนรอยต่อระหว่างตัวกลางที่ I และตัวกลางที่ II ที่มีโครงสร้างเกรตติงความหนาเท่ากับ  $d$  คาบของเกรตติงเท่ากับ  $\Lambda$  และมีค่าสัดส่วนของเกรตติง (Fill Factor :  $FF$ ) เท่ากับ  $FF$  แสงที่ตกกระทบทำมุม  $\theta$  กับแกนตั้งฉาก ทิศทางของสนามไฟฟ้าทำมุม  $\psi$  กับแกน  $z$  และระนาบตกกระทบทำมุม  $\phi$  กับแกน  $x$  สมการที่ใช้ในการคำนวณ ดังสมการที่ 2-24 แสดงสมการสำหรับคำนวณค่าประสิทธิภาพการเลี้ยวเบน (Diffraction Efficiency :  $DE$ ) ในกรณีแสงโพลาไรซ์แบบ TE ของแสงสะท้อน

$$DE_{ri} = R_i R_i^* \operatorname{Re} \left( \frac{k_{l,zi}}{k_0 n_1 \cos \theta} \right) \quad (2-24)$$

โดยที่  $i$  คือ อันดับการเลี้ยวเบน

$n_1$  คือ ค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง I

$k_0$  คือ เวกเตอร์ของคลื่นแสง สามารถคำนวณได้จาก  $k_0 = 2\pi / \lambda_0$

$\lambda_0$  คือ ความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบ

$k_{l,zi}$  คือ เวกเตอร์ของแสงในตัวกลาง คำนวณจากสมการที่ 2-25

$$k_{l,zi} = \begin{cases} k_{l,zi} = \{+k_0 [n_l^2 - (k_{xi}/k_0)^2]\}^{1/2} & k_0 n_l > k_{xi}, \\ k_{l,zi} = \{+jk_0 [(k_{xi}/k_0) - n_l^2]\}^{1/2} & k_{xi} > k_0 n_l \end{cases} \quad l = \text{I, II} \quad (2-25)$$

สามารถคำนวณ  $R_i$  ได้จากการแก้สมการที่ 2-26 และ 2-27

$$\delta_{i0} + R_i = \sum_{m=1}^n w_{i,m} [c_m^+ + c_m^- \exp(-k_0 q_m d)] \quad (2-26)$$

$$j[n_l \cos \theta \delta_{i0} - (k_{l,zi}/k_0) R_i] = \sum_{m=1}^n v_{i,m} [c_m^+ + c_m^- \exp(-k_0 q_m d)] \quad (2-27)$$

โดยที่  $w_{i,m}$  คือ เมทริกซ์ของเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ (Eigenvector)

$q_m$  คือ the รากที่สองเป็นบวกของค่าเฉพาะ (Eigenvalue) ของเมทริกซ์ A โดยเมทริกซ์

A สามารถคำนวณจากสมการที่ 2-28

$$A = K_x^2 - E \quad (2-28)$$

โดยที่  $E$  คือ เมทริกซ์ของฮามอนิกของสภาพยอมไฟฟ้า

และ  $K_x$  คือ เมทริกซ์ที่แยงมุม (Diagonal matrix)

$c_m^+$  และ  $c_m^-$  ค่าคงที่ที่กำหนดจากเงื่อนไขขอบเขต

$d$  คือ ความหนาของเกรตติง

$v_{i,m}$  คือ ผลคูณของ  $w_{i,m}$  และ  $q_m$

และ  $m$  คือ เอลิเมนต์ของเมทริกซ์

สมการที่ 2-29 แสดงสมการสำหรับคำนวณค่าประสิทธิภาพการเลี้ยวเบนในกรณีแสงโพลาไรซ์แบบ TE ของแสงที่ส่องผ่าน

$$DE_{ii} = T_i T_i^* \operatorname{Re} \left( \frac{k_{II,zi}}{k_0 n_1 \cos \theta} \right) \quad (2-29)$$

และค่า  $T_i$  สามารถคำนวณได้จากการแก้สมการที่ 2-30 และ 2-31

$$\sum_{m=1}^n w_{i,m} [c_m^+ \exp(-k_0 q_m d) + c_m^-] = T_i \quad (2-30)$$

$$\sum_{m=1}^n v_{i,m} [c_m^+ \exp(-k_0 q_m d) + c_m^-] = j(k_{\parallel,zi} / k_0) T_i \quad (2-31)$$

สมการสำหรับคำนวณค่าประสิทธิภาพการเลี้ยวเบนในกรณีแสงโพลาไรซ์แบบ TM ของแสงสะท้อน

$$DE_{ri} = R_i R_i^* \operatorname{Re}(k_{1,zi} / k_0 n_1 \cos \theta) \quad (2-32)$$

สามารถคำนวณ  $R_i$  ได้จากการแก้สมการที่ 2-33 และ 2-34

$$\delta_{i0} + R_i = \sum_{m=1}^n w_{i,m} [c_m^+ + c_m^- \exp(-k_0 q_m d)] \quad (2-33)$$

$$j \left[ \left( \frac{\cos \theta}{n_1} \right) \delta_{i0} - \left( \frac{k_{1,zi}}{k_0 n_1^2} \right) R_i \right] = \sum_{m=1}^n v_{i,m} [c_m^+ - c_m^- \exp(-k_0 q_m d)] \quad (2-34)$$

สมการที่ 2-35 แสดงสมการสำหรับคำนวณค่าประสิทธิภาพการเลี้ยวเบนในกรณีแสงโพลาไรซ์แบบ TE ของแสงส่องผ่าน

$$DE_{ti} = T_i T_i^* \operatorname{Re} \left( \frac{k_{\parallel,zi}}{n_2^2} \right) / \left( \frac{k_0 \cos \theta}{n_1} \right) \quad (2-35)$$

และค่า  $T_i$  สามารถคำนวณได้จากการแก้สมการที่ 2-36 และ 2-37

$$\sum_{m=1}^n w_{i,m} [c_m^+ \exp(-k_0 q_m d) + c_m^-] = T_i \quad (2-36)$$



$$\sum_{m=1}^n v_{i,m} [c_m^+ \exp(-k_0 q_m d) + c_m^-] = j \left( \frac{k_{I,zi}}{k_0 n_{II}^2} \right) T_i \quad (2-37)$$

## 2.4 การตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์

### 2.2.1 คลื่นอัลตราซาวด์ (Ultrasound wave)

คลื่นอัลตราซาวด์เป็นคลื่นกลมีลักษณะเป็นคลื่นของความดันเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีความถี่มากกว่า 20 kHz หรือเรียกว่าความถี่ที่สูงกว่าหูมนุษย์ได้ยินขึ้นไปจนถึง 1 GHz คลื่นอัลตราซาวด์มีลักษณะเป็นคลื่นตามยาว (Longitudinal Wave) อนุภาคในตัวกลางที่เสียงเดินทางผ่านเคลื่อนที่ขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น คลื่นอัลตราซาวด์ในช่วงความถี่ต่าง ๆ ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานหลากหลายรูปแบบ ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงการประยุกต์ใช้งานคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ต่าง ๆ

ที่มา: Elmesery, Mao, & Abomohra, 2019

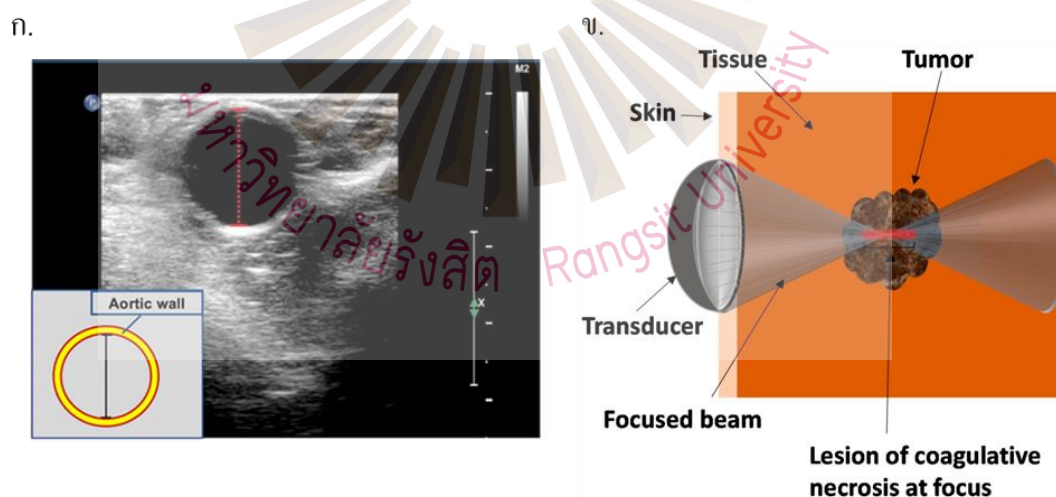
### 2.2.2 การใช้ประโยชน์คลื่นอัลตราซาวด์

#### 2.2.2.1 การใช้ประโยชน์ของคลื่นอัลตราซาวด์ในทางการแพทย์

1) การสร้างภาพทางการแพทย์ เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและยาวนาน ตั้งแต่คริสต์ทศวรรษ 1960 คลื่นอัลตราซาวด์สามารถใช้ในการสร้างภาพเนื้อเยื่อหรืออวัยวะต่าง ๆ ภายในร่างกายโดยหลักการ คือ การปล่อยคลื่นอัลตราซาวด์ที่มีความถี่ในช่วง 1 MHz ถึง 10 MHz ไปบนผิว คลื่นอัลตราซาวด์เดินทางผ่านไปยังเนื้อเยื่อและเกิดการสะท้อนกลับมายังตัวตรวจวัด เมื่อเสียงเดินทางผ่านตัวกลางที่มีค่าความต้านทานเสียง (Acoustic Impedance) ที่แตกต่างกัน คลื่นอัล

ตราชาวด์ที่วัดได้สามารถแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าและแสดงผลเป็นภาพตัดขวางของเนื้อเยื่อได้ (Rantanen & Ewing III, 1981) ดังรูปที่ 2.16 ก. แสดงภาพตัดขวางของหลอดเลือดแดงใหญ่เอออร์ตา (Aorta) นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาการเทคนิคสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราชาวด์ที่สามารถช่วยในการวินิจฉัยโรคบางชนิดได้ เช่น อีลาสโตกราฟี (Elastography) เป็นการถ่ายภาพที่สามารถแสดงความคุณสมบัติความยืดหยุ่น (Elastic) และความแข็ง (Stiffness) ของเนื้อเยื่อเพื่อการวินิจฉัยทางการแพทย์ เช่น เนื้อเยื่อที่มีมะเร็งจะมีความแข็งมากกว่าเนื้อเยื่อปกติ และการถ่ายภาพความละเอียดสูง (Super Resolution Imaging) เป็นการใช้คลื่นอัลตราชาวด์ในการติดตามไมโครบับเบิล (Microbubbles) ที่เกิดขึ้นในเส้นเลือดจากการกระเจิงของคลื่นอัลตราชาวด์ เป็นต้น (Seo & Kim, 2017)

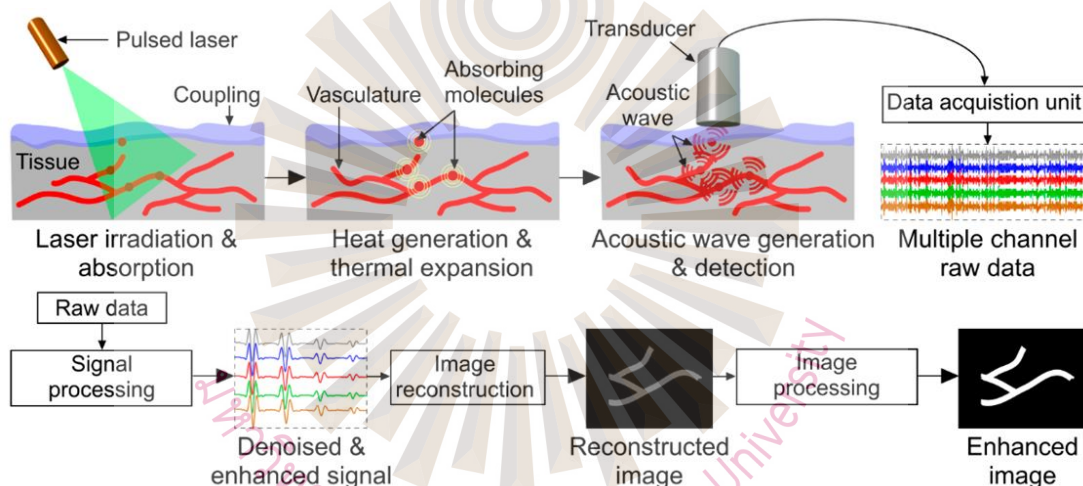
2) การรักษาในทางการแพทย์ นอกจากถูกนำมาใช้ในการสร้างภาพแล้วคลื่นอัลตราชาวด์ที่มีความเข้มสูง (High Intensity Focused Ultrasound : HIFU) สามารถนำมาใช้ในการรักษามะเร็งในช่องท้องและรักษาโรคทางสมองโดยไม่ต้องทำการผ่าตัด (Seo & Kim, 2017) หลักการของการรักษาคือการใช้คลื่นอัลตราชาวด์ที่มีความเข้มสูงโฟกัสบนเนื้อเยื่ออันตรายเพื่อสร้างความร้อนเพื่อทำลายเนื้อเยื่อบริเวณดังกล่าว (Izadifar, Izadifar, Chapman, & Babyn, 2020) ดังรูปที่ 2.16 ข.



รูปที่ 2.16 ก. แสดงภาพถ่ายตัดขวางของหลอดเลือดแดงเอออร์ตา และ ข. แสดงการโฟกัสคลื่นอัลตราชาวด์บนเนื้อเยื่ออันตราย ที่มา: Takano et al., 2021; Izadifar, Izadifar, Chapman, & Babyn, 2020

#### 2.2.2.2 การถ่ายภาพด้วยเทคนิคการใช้คลื่นโฟโตอะคูสติก

การถ่ายภาพด้วยเทคนิคการใช้คลื่นอะคูสติกเป็นการประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราซาวด์ในการวิจัย วิธีนี้สามารถสร้างภาพของตัวอย่างที่มีขนาดเล็ก เช่น เซลล์เดี่ยว (Single cell) (Strohm, Moore, & Kolios, 2016) หรือสมองของหนูทดลอง (Yao et al., 2015) เป็นต้น หลักการของการถ่ายภาพอัลตราซาวด์ด้วยคลื่นอะคูสติก คือ การสร้างคลื่นโฟโตอะคูสติก โดยการฉายแสงเลเซอร์ที่มีลักษณะพัลส์ที่มีความถี่มากกว่า 1 kHz กระตุ้นเซลล์หรือเนื้อเยื่อทำให้อุณหภูมิของเซลล์หรือเนื้อเยื่อสูงขึ้นและเกิดการหดและขยายตัว ทำให้เกิดคลื่นความดัน (Pressure Wave) ในเนื้อเยื่อในรูปแบบของคลื่นเสียงความถี่สูงและสามารถตรวจวัดได้บริเวณภายนอกของเนื้อเยื่อ (Wang & Yao, 2016) เมื่อนำสัญญาณที่วัดได้มาผ่านกระบวนการปรับปรุงสัญญาณ (Signal Processing) การประกอบภาพขึ้นมาจากสัญญาณที่ได้ (Image Reconstruction) และการประมวลผลภาพ (Image Processing) ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงการถ่ายภาพด้วยเทคนิคการใช้คลื่นโฟโตอะคูสติก

ที่มา: Manwar, Zafar, & Xu, 2021

### 2.2.2.3 การใช้ประโยชน์ของคลื่นอัลตราซาวด์ในอุตสาหกรรมอาหาร

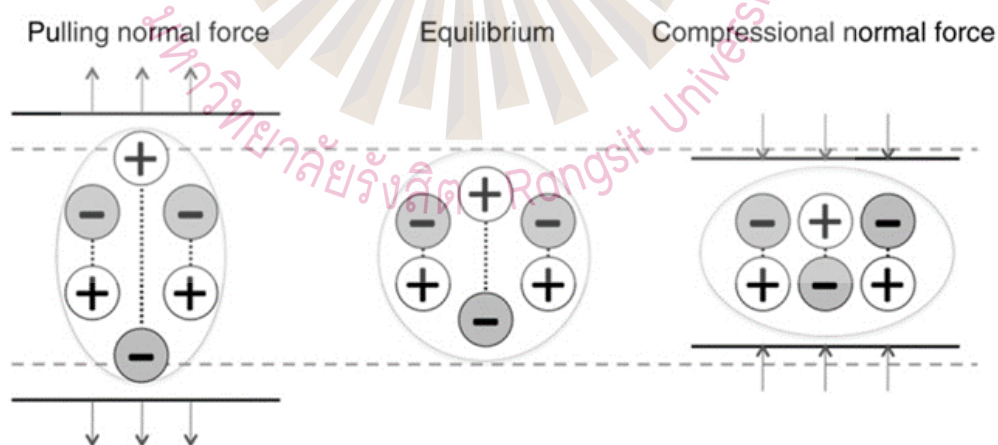
1) การใช้ประโยชน์ของคลื่นอัลตราซาวด์ความเข้มต่ำ (Low-intensity Ultrasound) มักใช้สำหรับการตรวจวัดและการตรวจหาข้อมูลทางเคมีฟิสิกส์ (Physicochemical Characteristics) ของอาหาร เช่น โครงสร้างและความแน่นเนื้อ (Firmness) เป็นต้น หลักการของการตรวจวัด คือ การวัดสัมประสิทธิ์การลดทอน (Attenuation Coefficient) ของอัลตราซาวด์ที่เกิดทางผ่านผลิตภัณฑ์อาหาร ทำให้สามารถตรวจวัดองค์ประกอบที่เปลี่ยนแปลงไปได้ (Bermúdez-

Aguirre, Mobbs, & Barbosa-Cánovas, 2011) นอกจากนี้คลื่นอัลตราซาวด์ที่มีความถี่สูงถูกนำไปใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหาร (Food Processing) เช่น การใช้คลื่นอัลตราซาวด์ในเครื่องเพิ่มความชื้น (Humidifier) เพื่อเพิ่มความชุ่มชื้นของผลไม้และผัก รวมถึงในระบบทำความชื้นให้เป็นเนื้อสัตว์ในห้องเย็นเพื่อเพิ่มคุณภาพของอาหารและลดการที่เนื้อสัตว์มีน้ำหนักลดลงในระหว่างการเก็บรักษา (Mohammed & Alhajhoj, 2019)

2) การใช้ประโยชน์ของคลื่นอัลตราซาวด์ความเข้มสูง (High-intensity Ultrasound) ใช้ในการเปลี่ยนคุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมีของอาหาร คลื่นอัลตราซาวด์ที่มีความเข้มสูง แต่ความถี่ต่ำสามารถใช้ในกระบวนการทำความสะอาด การทำให้เกิดอิมัลชัน (Emulsification) และการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการใช้คลื่นอัลตราซาวด์ในการแปรรูปอาหาร เช่น ในกระบวนการอบแห้งผลไม้ การใช้คลื่นอัลตราซาวด์ความเข้มสูงที่อุณหภูมิต่ำ จะช่วยในการกำจัดน้ำออกจากอาหาร ซึ่งวิธีนี้สามารถลดระยะเวลาในการแปรรูปได้อีกด้วย (Mohammed & Alhajhoj, 2019)

### 2.2.3 เทคนิคหรือกระบวนการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์

#### 2.2.3.1 การตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ด้วยปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก



รูปที่ 2.18 แสดงการเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้าเมื่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกถูกยืดและถูกกด

ที่มา: Manbachi & Cobbold, 2011

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีคุณสมบัติในการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล รวมถึงแปลงกลับจากพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ เรียกว่า ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Effect) วัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีหลากหลายชนิดและสามารถพบเจอได้ในธรรมชาติ เช่น คริสตัลควอตซ์ (Crystal Quartz) โทแพซ (Topaz) รวมถึงอวัยวะในร่างกายของเรา เช่น เอ็น (Tendon) หรือ กระดูก (Bone) ก็มีคุณสมบัติที่น่าสนใจเช่นกัน หลักการของปรากฏการณ์นี้คือ โดยปกติการวัสดุนี้มีสภาพไฟฟ้าแบบไดโพลโมเมนต์ (Dipole Moment) บริเวณที่มีการกระตุ้นตัวของอิเล็กตรอนอย่างหนาแน่นจะมีลักษณะเป็นขั้วลบ และบริเวณที่มีการกระจายตัวของอิเล็กตรอนจะมีลักษณะเป็นขั้วบวก หรือมีความเป็นขั้วลบน้อยกว่า และเมื่อมีแรงกลหรือคลื่นอัลตราซาวด์ที่มีลักษณะเป็นคลื่นกลกดลงบนวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ทำให้เกิดการเรียงตัวใหม่ของอิเล็กตรอน ดังรูปที่ 2.18 และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าบนผิว (Surface Charge Density) และความดันไฟฟ้า (Voltage) (Manbachi & Cobbold, 2011)

ในปัจจุบันวัสดุเพียโซอิเล็กทริกถูกนำมาใช้เป็นทรานสดิวเซอร์ (Transducer) ใช้ทั่วไปในการตรวจวัดและสร้างคลื่นอัลตราซาวด์ โดยเฉพาะในทางการแพทย์ทั้งในด้านการรักษาและการวินิจฉัย ในการรักษาเช่น การใช้คลื่นอัลตราซาวด์การรักษามะเร็ง (Wood & Sehgal, 2015) ในการวินิจฉัยโดยการนำมาใช้ในการสร้างภาพทางการแพทย์เพื่อดูความผิดปกติของอวัยวะต่าง ๆ ภายในร่างกาย (Wells, 2006) เป็นต้น

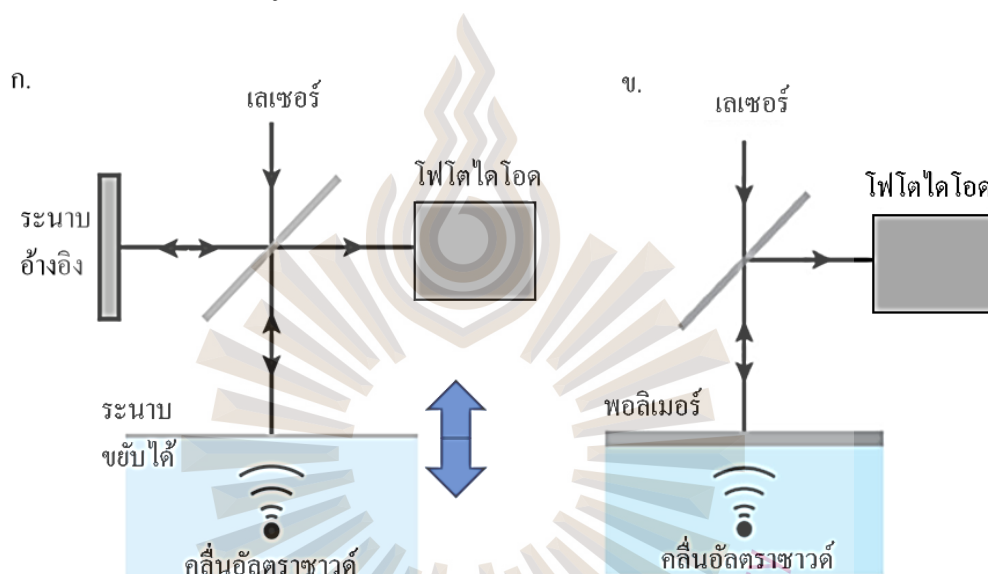
### 2.2.3.2 การตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ด้วยแสง

ในการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ด้วยเซนเซอร์แสงได้มีการถูกนำมาใช้เนื่องจากเซนเซอร์แสงเป็นเซนเซอร์ที่ให้ความไวในการตรวจจับที่สูง มีความแม่นยำ รวมถึงตัวระบบมีขนาดไม่ใหญ่มากทำให้เป็นที่นิยมนำมาใช้ในการตรวจวัด ระบบเซนเซอร์แสงรูปแบบต่าง ๆ ได้ถูกนำมาออกแบบและใช้ในการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ ได้แก่

1) การวัดคลื่นอัลตราซาวด์ด้วยฟรีสเปซออปติก (Free Space Optics Based Ultrasound Detection) เป็นการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงอันเกิดจากคลื่นอัลตราซาวด์ เช่น การขยับหรือเปลี่ยนตำแหน่ง การเปลี่ยนแปลงความเร็วที่ระนาบ หรือการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหของแสง เป็นต้น ตัวอย่างระบบแบบฟรีสเปซออปติก ได้แก่ ระบบที่ใช้หลักการการแทรกสอดของแสงชนิดไมเคิลสัน (Michelson Interferometry) โดยใช้ประยุกต์ใช้หลักการของการแทรกสอดของแสงที่สะท้อนจากระนาบอ้างอิงและระนาบที่เคลื่อนที่จากการถูกกดด้วยคลื่นอัลตราซาวด์ ทำให้



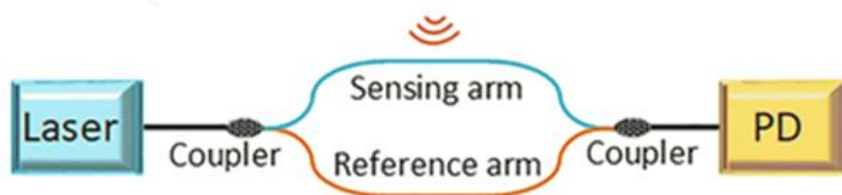
สามารถตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ได้ ดังรูปที่ 2.19 ก. (Abu-Taha & Jabr, 2014) และการประยุกต์ใช้ ฟาบริ-เปโรต์ประเภทฟิล์มพอลิเมอร์ที่เคลือบด้วยอะลูมิเนียมที่มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ไม่เท่ากัน โดยด้านหนึ่งแสงสะท้อนได้บางส่วนและอีกด้านหนึ่งแสงสะท้อนได้ทั้งหมด ฟาบริ-เปโรต์ประเภทฟิล์มพอลิเมอร์จะใช้หลักการการที่คลื่นอัลตราซาวด์ทำให้ความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลง ส่งผลให้เฟสของแสงที่สะท้อนกลับมาจากกระจกอะลูมิเนียมทั้ง 2 ด้านของฟิล์มพอลิเมอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงและความเข้มแสงเกิดการเปลี่ยนแปลงจากการแทรกสอดของแสง (Beard, Perennes, & Mills, 1999) ดังรูปที่ 2.19 ข.



รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ ก. ระบบที่อาศัยหลักการการแทรกสอดของแสงชนิดไมเคลสัน และ ข. การแทรกสอดแบบฟาบริ-เปโรต์ประเภทฟิล์มพอลิเมอร์  
ที่มา: คัดแปลงมาจาก Dong, Sun, & Zhang, 2017

2) การวัดคลื่นอัลตราซาวด์ด้วยการใช้ไฟเบอร์ออปติก (Fiber Optics Based Ultrasound Detection) ข้อดีของการใช้ไฟเบอร์ออปติกคือต้นทุนไม่สูง หลักการในการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์มีลักษณะคล้ายกับแบบพริสแมออปติกคือเป็นการวัดเฟสที่เปลี่ยนแปลงของแสงจากการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหของไฟเบอร์ออปติกที่เกิดจากคลื่นอัลตราซาวด์ ดังรูปที่ 2.20 แสงจะเดินทางผ่านไฟเบอร์ออปติกด้านล่างที่เป็นเส้นทางที่ค่าดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงด้วยคลื่นอัลตราซาวด์และเส้นทางด้านบนคือเส้นทางอ้างอิง แสงจากสองเส้นทางเกิดการแทรกสอด ทำให้สามารถวัดคลื่นอัลตราซาวด์ได้ (Lan, Zhou, & Xie, 2018) เป็นต้น

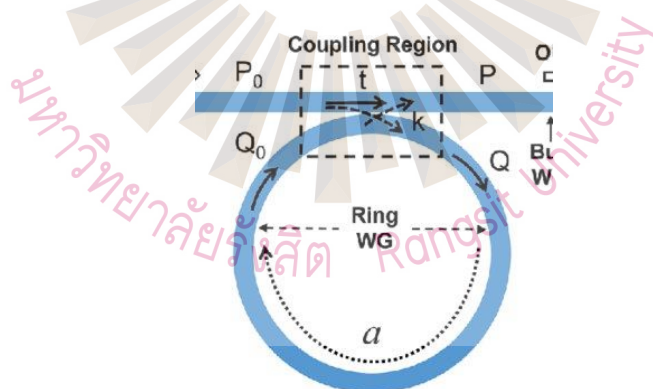




รูปที่ 2.20 แสดงการตรวจคลื่นอัลตราซาวด์ด้วยไฟเบอร์ออปติก

ที่มา: Ma et al., 2021

3) การวัดคลื่นอัลตราซาวด์วงแหวนสั่นพ้องขนาดไมครอน (Optical Ring Resonator) โดยปกติวงแหวนสั่นพ้องถูกนำมาใช้อย่างหลากหลาย เช่น ใช้ในการกรองความยาวคลื่นของแสง ใช้ในการตรวจวัดความดัน เป็นต้น หลักการของวงแหวนสั่นพ้องคือการเคลื่อนที่ของแสงผ่านตัวกลางนำแสงที่มีลักษณะเป็นวงวน (Loop) เมื่อขนาดของวงวนมีความเหมาะสมทำให้แสงเกิดการสั่นพ้องภายในวงวนนั้นได้ ดังรูปที่ 2.21 แสงที่ออกมาจากวงวนจะแทรกสอดกับแสงที่ผ่านตัวกลางนำแสง ด้วยวิธีนี้สามารถใช้วัดคลื่นอัลตราซาวด์โดยการปล่อยคลื่นอัลตราซาวด์ลงบนวงแหวนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหของวงแหวนและรูปร่างของวงแหวน ทำให้แสงที่เดินทางเข้าสู่วงแหวนเกิดการเปลี่ยนแปลง

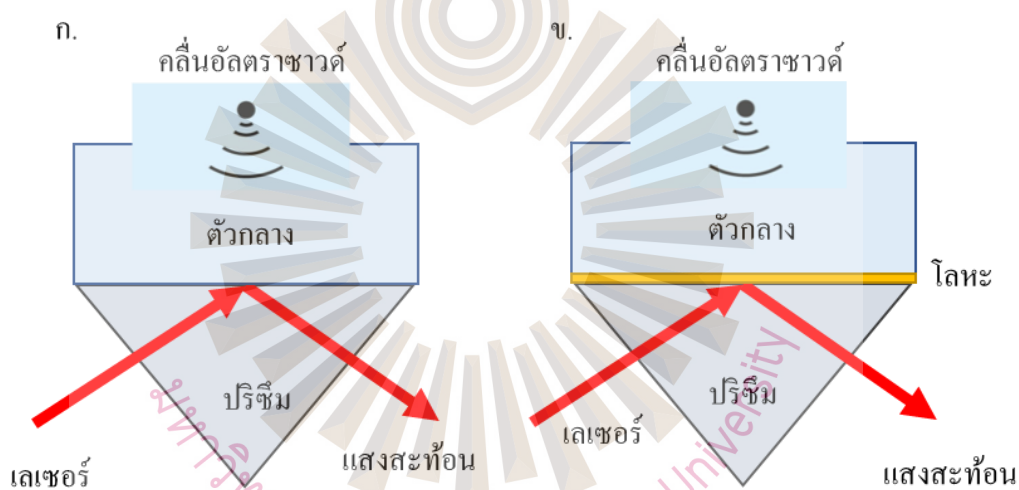


รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะของวงแหวนสั่นพ้อง

ที่มา: Ahmed et al., 2016

4) การวัดคลื่นอัลตราซาวด์ด้วยการหลักการการอินเทอร์เฟซของแสง (Ultrasound Detection via Optical Interface) เป็นการเปลี่ยนแปลงความดันที่เกิดจากคลื่นอัลตราซาวด์ที่ผิวของอินเทอร์เฟซ เช่น ระบบที่ใช้หลักการสะท้อนของเฟรสเนล (Fresnel Reflection) เป็น

วิธีที่ถือว่าง่ายที่สุดในการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ ด้วยการใช้อินเตอร์เฟซของแก้วและของเหลวที่เป็นตัวกลางของคลื่นอัลตราซาวด์ ความดันจากอัลตราซาวด์จะทำให้ความหนาแน่นของตัวกลางทั้งสองเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ค่าดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เมื่อวัดแสงที่สะท้อนออกมาจากระบบดังรูปที่ 2.22 ก. จะทำให้สามารถตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ได้ อีกระบบหนึ่งที่มีการนำมาใช้ในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่เปลี่ยนแปลง คือ ระบบเซนเซอร์ที่ใช้เทคนิคพลาสมอนบนพื้นผิวดังรูปที่ 2.22 ข. หลักการของเซนเซอร์ชนิดนี้คือ ปริซึมหรือแก้วจะถูกเคลือบด้วยโลหะมีตระกูล (Novel Metal) เช่น ทอง เงิน ทองแดง และ แพลทินัม เมื่อแสงตกกระทบลงบนแก้วที่มุมพลาสมอนจะทำให้เกิดคลื่นอีวาเนสเซนซ์ (Evanescent Field) ส่งผลให้แสงเกิดการสูญเสียพลังงาน เกิดเป็นแถบมืด (Dark Band) เมื่อค่าดัชนีหักเหของตัวกลางเปลี่ยนแปลงทำให้ตำแหน่งของแถบมืดเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย



รูปที่ 2.22 แสดงลักษณะการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ด้วย ก. ระบบที่ใช้หลักการสะท้อนของเฟรสเนล และ ข. ระบบเซนเซอร์ที่ใช้เทคนิคพลาสมอนบนพื้นผิว

ที่มา: ผู้วิจัย, 2564

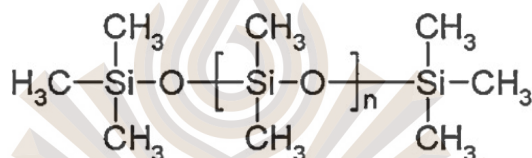
## 2.5 พอลิไดเมทิลซิลิโคนที่หรือพีดีเอ็มเอส

พีดีเอ็มเอสเป็นพอลิเมอร์ที่อยู่ในกลุ่มของซิลิโคนอีลาสโตเมอร์ (Silicone Elastomer) มีความยืดหยุ่นสูง (Hyperelastic Material) การสังเคราะห์พีดีเอ็มเอสเกิดขึ้นครั้งแรกในปีคริสตศักราช 1950 (Victor, Ribeiro, & Araújo, 2019) ในช่วงแรก พีดีเอ็มเอสถูกใช้ในการห่อหุ้มอุปกรณ์

อิเล็กทรอนิกส์เพื่อการยึดอายุการใช้งานของชิป (Chip) แต่หลังจากมีการศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ แล้ว พดีเอ็มเอสจึงถูกนำมาใช้ในเทคโนโลยีที่มีขนาดระดับไมโครและนาโนเมตร

### 2.5.1 โครงสร้างของพดีเอ็มเอส

พดีเอ็มเอสอยู่ในกลุ่มของซิล็อกเซน (Siloxane) เป็นกลุ่มฟังก์ชันที่เชื่อมโยงกันด้วยพันธะของซิลิคอนและออกซิเจน (Si-O-Si) หลักการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดนี้คือการเชื่อมซิลิคอน ออกซิเจนและหมู่เมทิล (Kuncova-Kallio & Kallio, 2006) ดังรูปที่ 2.23 อีกทั้งกลุ่มเมทิลสามารถแทนที่ด้วยหมู่อื่นๆ เช่น หมู่ฟีนิล หรือ หมู่ไวนิล รวมถึงกลุ่มของสารอนินทรีย์ (Inorganic) เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่แตกต่างออกไป



รูปที่ 2.23 แสดง โครงสร้างทางเคมีของพดีเอ็มเอส

ที่มา: Guevara, Jones, Mullner, & Jankowski, 2020

### 2.5.1 คุณสมบัติทั่วไปของพดีเอ็มเอส

พดีเอ็มเอสมีคุณสมบัติที่ดีในการเป็นโครงสร้างที่มีขนาดในระดับไมครอน สามารถผลิตได้ง่ายและมีราคาไม่แพง รวมถึงพดีเอ็มเอสมีเสถียรภาพทางความร้อน มีความโปร่งแสง มีความเป็นฉนวนไฟฟ้าและความร้อน ในทางเคมีพดีเอ็มเอสเป็นวัสดุที่มีความเสถียรทางเคมี และสามารถเสื่อมสภาพหรือสลายได้เร็วเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ตัวอื่น ในส่วนของข้อเสียนั้น ผิวของพดีเอ็มเอสมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เนื่องจากหมู่เมทิล พดีเอ็มเอสเป็นวัสดุที่มีสภาพซึมผ่านได้ (Permeability) ยอมให้แก๊สสามารถแพร่เข้าไปได้และมีความยืดหยุ่นสูง เนื่องจากโครงสร้างของซิลิคอนและออกซิเจน พดีเอ็มเอสสามารถเปลี่ยนรูปร่างได้ดีเมื่อมีแรงกระทำ และสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้เมื่อเอาแรงที่มากกระทำออกไป (Victor, Ribeiro & Araújo, 2019)

### 2.5.2 ความเข้ากันได้ทางชีวภาพกับร่างกายมนุษย์

หนึ่งในคุณสมบัติที่สำคัญของพดีเอ็มเอส คือ ความเข้ากันได้ทางชีวภาพกับเนื้อเยื่อต่าง ๆ ได้ดี โดยปกติเมื่อมีการฝัง (Implant) อุปกรณ์หรืออวัยวะเทียมลงในร่างกายมนุษย์ ทำให้เกิดการอักเสบขึ้นได้ เนื่องจากปฏิกิริยาของระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย ด้วยสาเหตุนี้ทำให้ต้องมี

การหาวัสดุที่ส่งผลกระทบต่อเนื้อเยื่อต่าง ๆ น้อยที่สุด และพีดีเอ็มเอสเป็นพอลิเมอร์ที่ถูกศึกษาว่าสามารถเข้ากับเนื้อเยื่อได้ และได้มีการใช้พีดีเอ็มเอสเคลือบลงบนอุปกรณ์ที่ต้องการทำการฝังลงในร่างกายของมนุษย์และสัตว์ (Hassler, Boretius, & Stieglitz, 2011)



### บทที่ 3

#### ระเบียบวิธีการวิจัย

##### 3.1 ตารางแผนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงานของงานวิจัยการทำโมเดลชั้นของความเข้มแสงบนระนาบภาพ สำหรับการสร้างเซนเซอร์ระดับไมครอนเพื่อใช้ตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน

ขั้นตอน	เดือน 1-3	เดือน 2-6	เดือน 7-9	เดือน 10-12	เดือน 13-15	เดือน 16-18	เดือน 19-21	เดือน 22-24
1. การรวบรวมและศึกษาข้อมูลเบื้องต้น	■		■	■	■	■	■	
2. การออกแบบและพัฒนา ระบบทางเดินแสงระบบการ ทำโมเดลชั้นของความเข้มแสงบนระนาบภาพสำหรับการฉายภาพ	■	■						
4. จำลองผลลัพธ์ของการ ตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ ด้วยพีดีเอ็มเอสแบบเรียบ และพีดีเอ็มเอสแบบขีดยุ่น	■	■	■					
5. การสร้างและขึ้นรูป ลวดลายสำหรับใช้เป็น แม่พิมพ์ของโครงสร้างเกรตติงที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์				■	■	■		

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน (ต่อ)

ขั้นตอน	เดือน	เดือน	เดือน	เดือน	เดือน	เดือน	เดือน	เดือน
	1-3	2-6	7-9	10-12	13-15	16-18	19-21	22-24
5. การวิเคราะห์ลวดลายของแม่พิมพ์ที่สร้างด้วยระบบการทำโมดูเลชันของความเข้มแสงบนระนาบภาพสำหรับการฉายภาพในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี								
6. เขียนบทความวิจัยและตีพิมพ์ผลงานวิจัย								
7. จัดทำวิทยานิพนธ์								

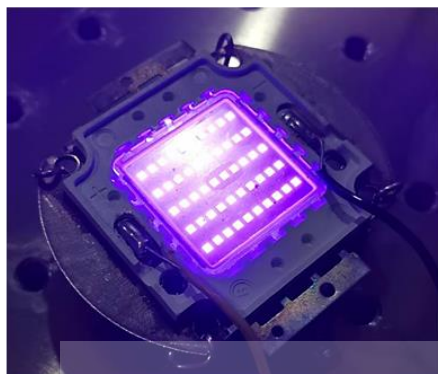
### 3.2 การออกแบบและจัดเรียงทางเดินแสง (Optical alignment) ของระบบการทำโมดูเลชันของความเข้มแสงบนระนาบภาพสำหรับการฉายภาพในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

#### 3.2.1 อุปกรณ์และส่วนประกอบของทางเดินแสงของระบบที่มีการทำโมดูเลชันของความเข้มแสงบนระนาบภาพสำหรับกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

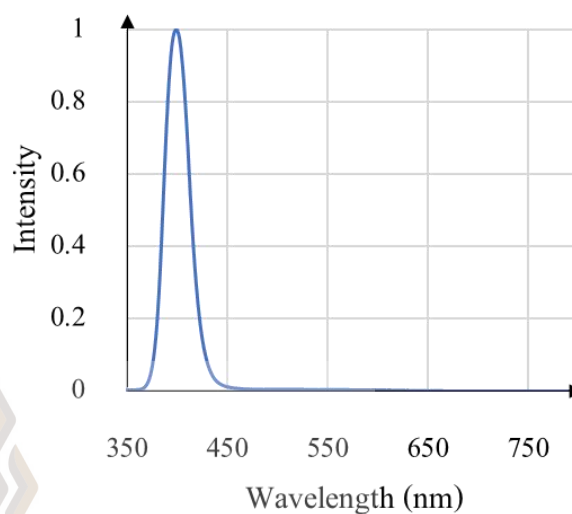
3.2.1.1 แหล่งกำเนิดแสงใช้หลอดไฟประเภทแอลอีดี (Light Emitting Diode: LED) กำลังไฟฟ้า 50 W หลอดไฟใช้แรงดันไฟฟ้า 30 V และมีขนาดเส้นทแยงมุมเท่ากับ 30 mm ดังรูปที่ 3.1 ก. แสดงลักษณะของหลอดไฟยูวีแอลอีดี และจากการวัดการวัดสเปกตรัมของแสงจากหลอดไฟที่วัดด้วยเครื่องออฟติคอลลสเปกโตรมิเตอร์ (Optical Spectrometer) ยี่ห้อ AVANTES พบว่าหลอดไฟยูวีแอลอีดีให้แสงที่มีช่วงความยาวคลื่น 350 nm ถึง 450 nm ดังรูปที่ 3.1 ข.



ก.



ข.

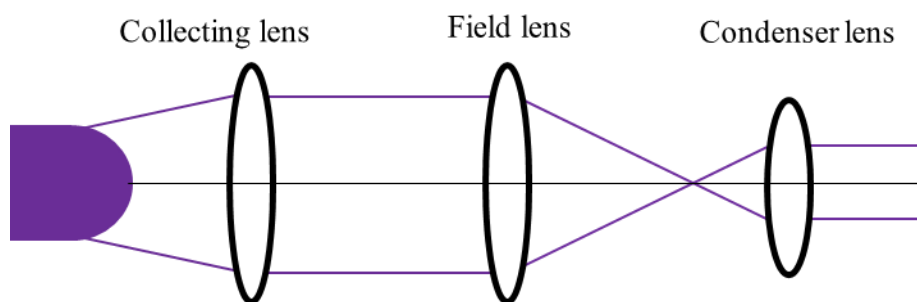


รูปที่ 3.1 ก. แสดงลักษณะของหลอดไฟยูวีชนิดแอลอีดี และ  
ข. สเปกตรัมของหลอดไฟยูวีชนิดแอลอีดี

3.2.1.2 ระบบส่องสว่างแบบโคเลอร์ (Köhler Illumination) ถูกออกแบบสำหรับใช้ในการรวมแสงจากหลอดไฟให้เป็นลำแสงสม่ำเสมอ (Uniform Beam) มีหน้าคลื่นเท่ากันและปรับลำแสงให้มีขนาดใกล้เคียงกับอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัล ก่อนฉายไปบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัล ประกอบไปด้วยเลนส์นูนสองด้านจำนวน 3 ชั้น ได้แก่ เลนส์เก็บรวบรวมแสง (Collecting Lens) เลนส์สนาม (Field Lens) และเลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser Lens) ดังรูปที่ 3.2 หลักในการเลือกเลนส์ที่จะนำมาประกอบในส่วนนี้ได้แก่ ขนาดของเลนส์ ระยะโฟกัสของเลนส์ และค่าความสามารถในการเก็บรวบรวมแสงของเลนส์ คำนวณได้จากสมการที่ 2.2 เลนส์สนามและเลนส์คอนเดนเซอร์ทำหน้าที่ปรับขนาดของลำแสงให้พอดีหรือใกล้เคียงกับขนาดของอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัล โดยคำนวณจากระยะโฟกัสของเลนส์ทั้งสองชั้น ดังสมการที่ 3.1

$$\text{กำลังขยาย} = \frac{f_2}{f_1} \quad (3-1)$$

โดยที่  $f_1$  คือ ระยะโฟกัสของเลนส์ตัวหน้า  
 $f_2$  คือ ระยะโฟกัสของเลนส์ตัวหลัง



รูปที่ 3.2 แสดงระบบส่องสว่างแบบโคเลอร์

3.2.1.3 อุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัลเป็นหนึ่งในอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำโมดูลชั้นของแสงเชิงพื้นที่ อุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัลที่เลือกใช้เป็นรุ่น DLP2010 ของบริษัท Texas Instrument ที่ประกอบอยู่กับอุปกรณ์ฉายภาพประเภทดีแอลพี (Digital light Processing Projector : DLP) ซึ่งมีรายละเอียด ดังตารางที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 แสดงลักษณะของอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัล

ตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติของอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัล

รายละเอียด	คุณสมบัติ
ชื่อรุ่น	DLP2010
ขนาดของจอ (เส้นทแยงมุม)	7.34 mm
อัตราส่วน	16:9
ขนาดอาร์เรย์	$854 \times 480 \text{ pixels}^2$
มุมในการปรับของกระจก	$17^\circ$



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะของอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัล

3.2.1.4 เลนส์ใกล้วัตถุ จะทำหน้าที่ในการรับภาพบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัลและฉายลงบนแผ่นรองรับที่เคลือบด้วยสารไวแสง การเลือกเลนส์ในส่วนนี้เลือกจากกำลังขยายหรือกำลังในการย่อภาพที่ต้องการฉายจากภาพบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัลลงบนแผ่นรองรับและความละเอียดของเลนส์ในการเก็บและฉายภาพที่เล็กที่สุด สามารถคำนวณจากสมการที่ 2-3 โดยทั่วไปเลนส์ใกล้วัตถุจะมีกำลังขยายภาพและค่าความสามารถในการเก็บรวบรวมแสงต่างกันไป ในงานนี้ได้เลือกใช้เลนส์ใกล้วัตถุที่มีกำลังขยาย 4 เท่าและมีค่าความสามารถในการเก็บรวบรวมแสงเท่ากับ 0.1

ตารางที่ 3.3 แสดงคุณสมบัติเลนส์ใกล้วัตถุในระบบการทำโมเดลชันของแสงบนระนาบภาพ

ประเภทเลนส์ใกล้วัตถุ	สัญลักษณ์ (Finite conjugated lens)
กำลังขยาย	4 เท่า
NA	0.1
ระยะโฟกัส	160 mm

3.2.1.5 แผ่นรองรับ ใช้เป็นแผ่นกระจกปิดสไลด์ (Cover Slip) ที่มีความหนา 0.17 mm มีความกว้าง 18 mm และยาว 18 mm ในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีแผ่นรองรับจะถูกเคลือบด้วยสารไวแสงเพื่อสร้างลวดลาย

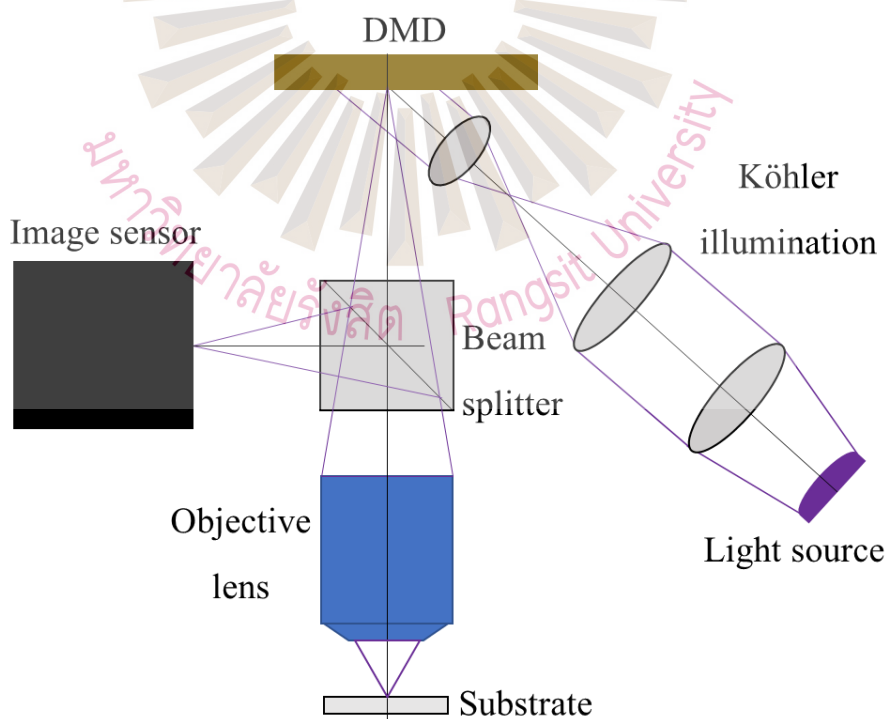
3.2.1.6 ตัวแยกแสง (Beam Splitter) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแบ่งแยกแสงที่เข้ามาออกเป็น 2 ทิศทาง ได้แก่ ทิศทางของการส่องผ่านและทิศทางของการสะท้อนตามแนวกระจกซึ่งอยู่ตรงกลางของตัวแยกแสง ปริมาณของแสงที่สะท้อนและส่องผ่านจะถูกแบ่งไปในแต่ละทิศทางจะขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ตามที่กำหนดไว้

3.2.1.7 อุปกรณ์บันทึกภาพ ในส่วนระบบบันทึกภาพออกสำหรับการตรวจสอบความคมชัดของภาพลวดลายจากอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัลที่ถูกฉายลงบนแผ่นรองรับ อุปกรณ์บันทึกภาพที่ใช้ในระบบเป็นเซนเซอร์รับภาพของกล้องดีเอสแอลอาร์ (Digital Single-lens Reflex : DSLR) รุ่น E50 ของ Canon โดยในอุปกรณ์กล้องตัวนี้จะมีเซนเซอร์รับภาพขนาดและรายละเอียด ตารางที่ 3.4 ผลการรับภาพจะถูกสามารถดูได้จากการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์บันทึกภาพกับคอมพิวเตอร์ผ่านสายยูเอสบี

ตารางที่ 3.4 แสดงคุณสมบัติและลักษณะของกล้องดิจิตอลอาร์ยี่ห้อ Canon รุ่น EOS 50D

ประเภทเซนเซอร์	CMOS
ความละเอียดภาพสูงสุด	4752 x 3168 (15.1 MPixel)
ขนาดเซนเซอร์รับภาพ	22.3×14.9 mm <sup>2</sup>
อัตราส่วนขนาด	3:2
ความหนาแน่นของพิกเซล	4.5 MPixel /cm <sup>2</sup>
ขนาดของพิกเซลแต่ละพิกเซล	4.99 μm
ระบบกรองสี	RGB
ประเภทไฟล์	JPEG, RAW (14-bit, Canon original), sRAW, RAW+JPEG

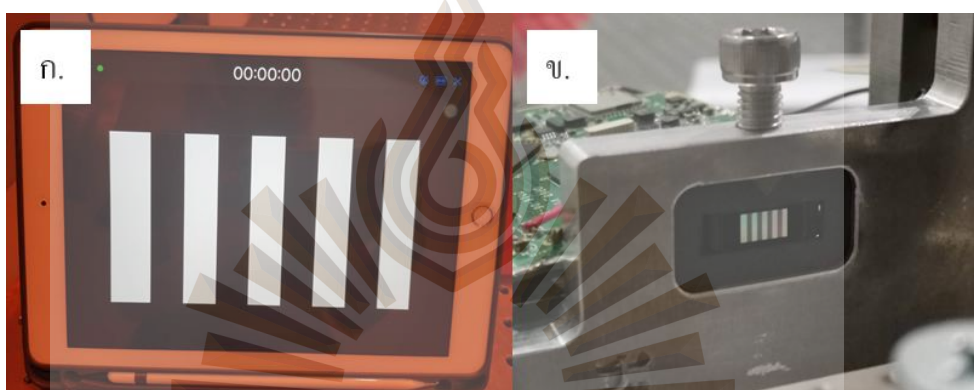
ระบบทางเดินแสงระบบการทำโมดูเลชันของความเข้มแสงบนระนาบภาพ สำหรับการถ่ายภาพในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ด้วยการใช้อุปกรณ์กระจกขนาดไมรอนแบบดิจิทัล ในการสร้างต้นแบบลวดลายที่ฉายลงบนแผ่นรองรับมีลักษณะดังรูปที่ 3.4 เส้นสีม่วงแสดงการเดินทางของแสงยูวี



รูปที่ 3.4 แสดงการออกแบบระบบการทำโมดูเลชันของความเข้มแสงบนระนาบภาพ สำหรับการถ่ายภาพในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

### 3.2.2 การควบคุมการฉายภาพของอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัล

อุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัลสามารถควบคุมได้ด้วยการใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มาพร้อมกันในตัวอุปกรณ์ฉายภาพ ซึ่งทำให้สามารถเชื่อมต่อแบบไร้สาย (Wireless) กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เช่น โทรศัพท์มือถือหรือ ไอแพด (iPad) ลวดลายที่ต้องการฉายสามารถออกแบบได้บนอุปกรณ์ดังกล่าวและเชื่อมต่อกับอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัลเมื่อต้องการฉายภาพ เมื่อเราออกแบบลวดลายที่ต้องการและเปิดลวดลายให้ปรากฏขึ้นบนจอ ภาพลวดลายจะไปปรากฏบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัล ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ก. แสดงภาพโครงสร้างเกรตติงบนอุปกรณ์ไอแพดและ ข. แสดงภาพฉายโครงสร้างเกรตติงบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัล

ในงานวิจัยนี้จะสร้างลวดลายที่ต้องการบนแอปพลิเคชันที่มีชื่อว่า Keynote ซึ่งเป็นแอปพลิเคชันสำหรับนำเสนองาน สามารถสร้างลวดลายต่างๆ ได้หลากหลาย หน่วยของขนาดลวดลายที่สร้างบนแอปพลิเคชันเป็นหน่วยพ้อยท์ (Point: pt) และเมื่อต้องการฉายภาพเต็มจอของอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัลที่มีขนาดกว้าง 6.4 mm และยาว 3.6 mm ต้องฉายภาพลวดลายที่มีขนาดกว้าง 1925 pt และสูง 1085 pt บนแอปพลิเคชัน จากความสัมพันธ์สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดลวดลายบนแอปพลิเคชันกับลวดลายที่ปรากฏบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัลได้ดังสมการที่ 3-2

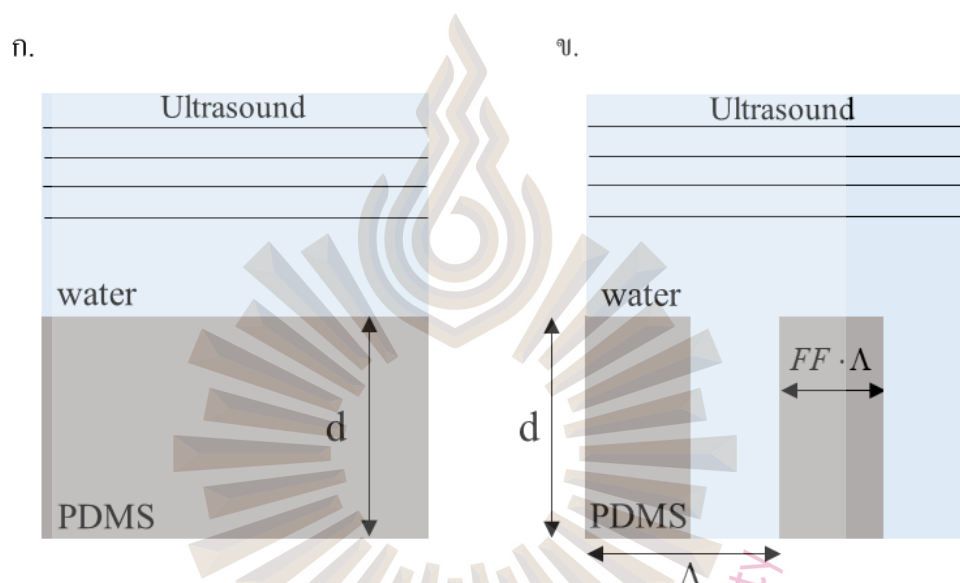
$$S_{ipad} = 300.78 \times S_{DMD} \quad (3-2)$$

โดยที่  $S_{ipad}$  คือ ขนาดของลวดลายที่ปรากฏบนไอแพด

$S_{DMD}$  คือ ขนาดของลวดลายที่ปรากฏบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัล

### 3.3 การจำลองผลเชิงทฤษฎีของการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ที่ใช้ตัวรับรู้เป็นพีดีเอ็มเอสแบบเรียบและพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติง

3.3.1 การจำลองผลการเปลี่ยนแปลงความหนาของพีดีเอ็มเอสแบบเรียบและพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติงจากการถูกกดด้วยความดันของคลื่นอัลตราซาวด์ที่มีความถี่ 1 MHz ด้วยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์บนโปรแกรม COMSOL Multiphysics 5.3a



รูปที่ 3.6 ก. แสดง โครงสร้างการจำลองผลการกดของคลื่นอัลตราซาวด์

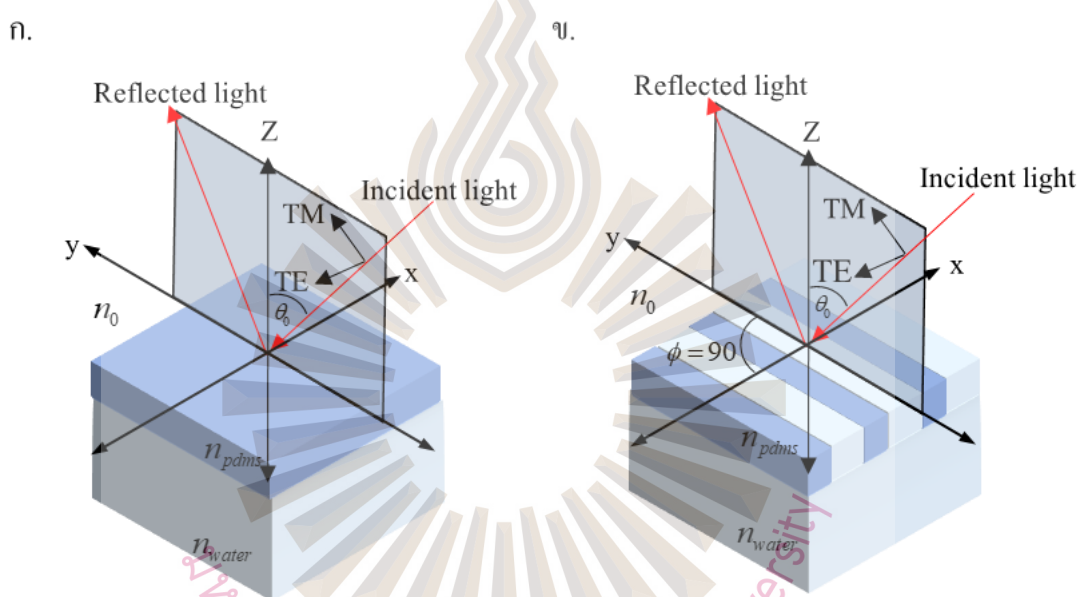
ก. บนพีดีเอ็มเอสแบบเรียบ และ ข. บนพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติง

ศึกษาการจำลองผลการกดของคลื่นอัลตราซาวด์ที่มีความถี่ 1 MHz บนโครงสร้างแบบ 2 มิติ ดังรูปที่ 3.5 โดยคลื่นอัลตราซาวด์ที่ถูกปล่อยอย่างต่อเนื่องจะเดินทางผ่านน้ำที่เป็นตัวกลาง โดยความเร็วที่คลื่นเสียงเดินทางผ่านน้ำมีค่าเท่ากับ 1,484 m/s (Dogru, Aksoy, Bayraktar, & Alaca, 2018) ไปตกกระทบลงบนโครงสร้างพีดีเอ็มเอสที่มีค่ามอดุลัสของยัง (Young's Modulus) เท่ากับ 123.4 MPa (Learkthanakhachon, Pechprasarn & Somekh, 2018) และมีค่าอัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.43 (Chávez, Sosa, & Tsumura, 1985) ทั้งแบบเรียบ ดังรูปที่ 3.6 ก. และแบบโครงสร้างเกรตติง ดังรูปที่ 3.6 ข. ขอบด้านซ้ายและขวาของแบบจำลองถูกออกแบบให้มีค่าซ้ำ ๆ อย่างต่อเนื่องหรือเป็นลักษณะคาบ (Periodic Boundary) สำหรับผลแบบจำลองการยุบตัวของพีดีเอ็มเอสแบบเรียบภายใต้คลื่นอัลตราซาวด์ถูกศึกษาเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลของแบบจำลองการ



ขุดตัวของพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติง แบบจำลองการขุดตัวของพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติง ได้มีการศึกษา (1) ขนาดคาบ ( $\Lambda$ ) (2) สัดส่วนของร่องเกรตติง ( $FF$ ) และ (3) ความสูงของโครงสร้าง ( $d$ ) ที่ส่งผลต่อการขุดตัวของโครงสร้างพีดีเอ็มเอสเกรตติงภายใต้คลื่นอัลตราซาวด์ที่มีความถี่ 1 MHz ขนาดเมซในการจำลองนี้มีขนาด 15 nm ถึง 300 nm

### 3.3.2 การจำลองผลเชิงแสงของระบบตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ที่มีการใช้พีดีเอ็มเอสแบบเรียบและพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติงเป็นตัวรับรู้



รูปที่ 3.7 แสดงโครงสร้างการจำลองผลค่าความสะท้อนของแสงของ ก. พีดีเอ็มเอสแบบเรียบ และ ข. พีดีเอ็มเอสแบบเกรตติง

ขั้นตอนนี้เป็นการจำลองผลค่าความสะท้อนของแสงที่สะท้อนออกจากระบบตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ที่มีการใช้พีดีเอ็มเอสแบบเรียบและพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติงเป็นตัวรับรู้ ลักษณะระบบที่ทำการจำลองดังรูปที่ 3.7 โดยที่รูปที่ 3.7 ก. เป็นโครงสร้างการจำลองผลของพีดีเอ็มเอสแบบเรียบและรูปที่ 3.7 ข. โครงสร้างการจำลองผลของพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติง ทั้งสองโครงสร้างใช้แหล่งกำเนิดของระบบตรวจวัด คือ แสงสีแดงที่มีความยาวคลื่น 633 nm แสงจะเดินทางผ่านแก้วที่มีค่าดัชนีหักเห ( $n_0$ ) เท่ากับ 1.515 ตกกระทบทำมุม  $\theta_0$  กับแกนตั้งฉากบนรอยต่อระหว่างแก้วและพีดีเอ็มเอส ค่าดัชนีหักเหของพีดีเอ็มเอส ( $n_{pdms}$ ) เท่ากับ 1.4298 เมื่อผ่านรอยต่อแสงที่ส่องผ่านเข้าไปยังพีดีเอ็มเอสจะตกกระทบบนรอยต่อระหว่างพีดีเอ็มเอสกับน้ำ ซึ่งน้ำมีค่าดัชนี

หักเห ( $n_{water}$ ) เท่ากับ 1.3317 งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของแสงที่มีโพลาไรซ์ทั้งแบบ TE และ TM ในการจำลองผลค่าความสะท้อนของแสง ในกรณีของพีดีเอ็มเอสแบบเรียบจะใช้หลักการของเฟรสเนลในการคำนวณและกรณีของพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติงจะใช้ทฤษฎีคลื่นควบคู่อย่างเคร่งครัด โดยทั้ง 2 วิธีจะถูกคำนวณบนโปรแกรม MATLAB 2019 สำหรับการจำลองผลของเกรตติงงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเฉพาะผลของกรณีที่ระนาบตกกระทบขนานกับระนาบของเกรตติง ดังรูปที่ 3.7 ข. และคำนวณผลของลำดับการเลี้ยวเบนจำนวน 131 ลำดับ ในขั้นตอนนี้ยังรวมถึงจำลองการเปลี่ยนแปลงของค่าความสะท้อนของแสงเมื่อพีดีเอ็มเอสแบบเรียบและพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติงเปลี่ยนแปลงความหนาอันเนื่องมาจากความดันของคลื่นอัลตราซาวด์ที่มีความถี่ 1 MHz อีกด้วย

3.3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผลการเปลี่ยนแปลงความหนาและรูปร่างของพีดีเอ็มเอส จากการถูกกดด้วยความดันของคลื่นอัลตราซาวด์ความถี่ 1 MHz และการจำลองผลเชิงแสงของพีดีเอ็มเอสแบบเรียบและพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติง

ตารางที่ 3.5 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้การจำลองผลเชิงทฤษฎี

พารามิเตอร์	อ้างอิง	
การจำลองผลการเปลี่ยนแปลงความหนาและรูปร่างของพีดีเอ็มเอส		
ค่ามอดุลัสของยังของพีดีเอ็มเอส	123.4 MPa	(Learkthanakhachon et al., 2018)
อัตราส่วนปัวซอง	0.43	(Dogru et al., 2018)
ค่าความเร็วในการเดินทางของคลื่นอัลตราซาวด์ในน้ำ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	1484 m/s	(Chávez et al., 1985)
การจำลองผลเชิงแสง		
ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิด	633 nm	
ค่าดัชนีหักเหของแก้ว ( $n_0$ )	1.5150	(Kudo, Nagase, Kubo, Sugihara, & Nakagawa, 2011)
ค่าดัชนีหักเหของพีดีเอ็มเอส ( $n_{pdms}$ )	1.4298	(Schneider, Draheim, Kamberger, & Wallrabe, 2009)
ค่าดัชนีหักเหของน้ำ ( $n_{water}$ )	1.3317	(Hale & Querry, 1973)

### 3.3.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ด้วยพีดีเอ็มเอส แบบเรียบและพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติง

#### 3.3.4.1 การวิเคราะห์หาคถดถอยแบบพหุนามกำลังสาม (Cubic Polynomial Regression Analysis)

ในการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดหรือการจำลองผลมีความสัมพันธ์หรือการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นไม่เป็นเชิงเส้น จึงทำการวิเคราะห์สัญญาณและปรับปรุงผลลัพธ์ให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ประสิทธิภาพ โดยการหาสมการถดถอยที่อยู่ในรูปของพหุนามกำลังสามโดยมีรูปแบบสมการดังนี้

$$R_T = aR^3 + bR^2 + cR + d \quad (3-3)$$

โดยที่  $R_T$  คือ ค่าความสะท้อนของแสงหลังปรับปรุงสัญญาณ  
 $R$  คือ ค่าความสะท้อนของแสงก่อนปรับปรุงสัญญาณ  
 $a, b, c$  คือ  $d$  ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนาม

#### 3.3.4.2 การคำนวณความไวในการตอบสนอง

ความไวในการตอบสนอง คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความสะท้อนของแสงต่อปริมาณความดันของคลื่นอัลตราซาวด์ สามารถคำนวณจากสมการที่ 3-4

$$\text{Sensitivity} = \left| \frac{dR_T}{dP} \right| = \left| \frac{R_{T,UL} - R_{T,0}}{P} \right| \quad (3-4)$$

โดยที่  $R_{T,UL}$  คือ ค่าความสะท้อนของแสงขณะปล่อยคลื่นอัลตราซาวด์  
 $R_{T,0}$  คือ ค่าความสะท้อนของแสงขณะที่ไม่มีการปล่อยคลื่นอัลตราซาวด์  
 $P$  คือ ความดันของคลื่นอัลตราซาวด์ที่เข้าสู่ระบบ

#### 3.3.4.3 การคำนวณค่าความเป็นเซนเซอร์ที่ดี

ค่าความเป็นเซนเซอร์ที่ดี คือ อัตราส่วนระหว่างความไวในการตอบสนองและค่าความสะท้อนของแสงเริ่มต้นหรือก่อนปล่อยคลื่นอัลตราซาวด์ แสดงดังสมการที่

$$FoM = \left| \frac{Sensitivity}{R_{T,0}} \right| \quad (3-5)$$

#### 3.3.4.4 ช่วงของการตอบสนอง (Detectable Range)

ช่วงของการตอบสนอง คือ ช่วงที่ค่าความสะท้อนของแสงเปลี่ยนแปลงและตอบสนองเป็นเส้นตรง เมื่อปล่อยคลื่นอัลตราซาวด์เข้าสู่ระบบ

### 3.4 การขึ้นรูปลวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

#### 3.4.1 วัสดุ สารเคมีและอุปกรณ์สำหรับการสร้างลวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

3.4.1.1 แผ่นกระจกปิดสไลด์สำหรับใช้เป็นแผ่นรองรับ

3.4.1.2 สารไวแสงแบบฟิล์มชนิดลบ ยี่ห้อ Eternal รุ่น ETERTEC HT-115T

ตารางที่ 3.6 แสดงคุณสมบัติของสารไวแสงชนิดฟิล์ม รุ่น ETERTEC HT-115T DRY FILM PHOTORESIST

ประเภทสารไวแสง	สารไวแสงชนิดฟิล์ม รุ่น ETERTEC HT-115T
ความหนาของสารไวแสง	40 $\mu\text{m}$
สีของสารไวแสงก่อนการฉายแสง	เขียว
สีของสารไวแสงหลังการฉายแสง	น้ำเงิน
ความละเอียดที่สร้างได้	60 $\mu\text{m}$
เวลาในการสร้างด้วยดีเวลลอปเปอร์	39-48 s
ข้อแนะนำในการใช้	ใช้ในการเคลือบบนผิวของโลหะ
	ใช้สารเคมีในการกัดลวดลาย

ที่มา: Eternal Materials Co., 2019

3.4.1.3 อะซิโตน (Acetone)

3.4.1.4 ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl Alcohol : IPA)

3.1.1.5 บีกเกอร์สำหรับใส่สาร (Beaker)

3.4.1.6 อ่างส่งคลื่นความถี่สูง (Sonicator Bath)

3.4.1.7 แก๊สไนโตรเจน (Nitrogen Gas)

3.4.1.8 ตู้อบลมร้อน ยี่ห้อ MEMMERT รุ่น UN55

3.4.1.9 น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water : DI Water)

3.4.1.10 น้ำยาดีเวลลอปเปอร์ ได้แก่ โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium Carbonate :  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ผสมกับน้ำกลั่นในอัตราส่วน 4 g ต่อ น้ำ 200 mL

3.4.1.11 เครื่องเคลือบบัตร

3.4.1.12 ไอแพด (iPad) รุ่น 2018

#### 3.4.2 ขั้นตอนการทำความสะอาดและเตรียมแผ่นรองรับ

3.4.2.1 นำแผ่นกระจกปิดสไลด์แช่ลงในบีกเกอร์ที่ใส่อะซิโตนและนำบีกเกอร์ลงไปแช่ในอ่างส่งคลื่นความถี่สูง ใช้เวลา 5 นาที

3.4.2.2 นำแผ่นกระจกปิดสไลด์มาล้างต่อในบีกเกอร์ที่ใส่อไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์และนำไปในอ่างส่งคลื่นความถี่สูง ใช้เวลา 5 นาที

3.4.2.3 นำกระจกปิดสไลด์ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน

3.4.2.4 เป่าด้วยไนโตรเจนแล้วนำเข้าตู้อบลมร้อน ตั้งอุณหภูมิ  $75^{\circ}\text{C}$  ระยะเวลา 1 ชั่วโมง

#### 3.4.3 ขั้นตอนการสร้างลวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

การสร้างลวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มีขั้นตอนดังนี้

3.4.3.1 การออกแบบลวดลายลงบนไอแพดที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัล

3.2.3.1 การทำความสะอาดแผ่นรองรับ มีรายละเอียดดังหัวข้อที่ 3.4.2

3.4.3.2 การเคลือบสารไวแสงลงบนแผ่นรองรับที่ทำความสะอาดเรียบร้อยแล้ว นำแผ่นรองรับหรือแผ่นปิดสไลด์เคลือบด้วยสารไวแสงแบบฟิล์มชนิดลบ โดยการใช้เครื่องเคลือบ

บัตร์รีดฟิล์มให้แนบสนิทไปกับแผ่นปิดสไลด์ที่อุณหภูมิห้อง เพราะสารไวแสงจะละลายเมื่อได้รับความร้อนสูงกว่า  $120^{\circ}\text{C}$

3.4.3.3 การฉายแสง นำแผ่นรองรับที่เคลือบด้วยสารไวแสงติดตั้งลงบนระบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงและฉายแสงที่มีลวดลายตามที่ต้องการลงบนแผ่นรองรับ โดยใช้ความยาวคลื่นหรือแหล่งกำเนิดแสงเฉพาะที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่ทำให้สารไวแสงแบบฟิล์มชนิดลบแข็งตัวและไม่สามารถละลายได้ด้วยน้ำยาดิวเวลลอปเปอร์

3.4.3.4 การล้างในน้ำยาดิวเวลลอปเปอร์ นำแผ่นรองรับที่ฉายแสงแล้วไปแช่ลงในน้ำยาดิวเวลลอปเปอร์เพื่อล้างบริเวณที่ไม่ถูกแสงให้ละลายออกไป

3.4.3.5 เป่าด้วยไนโตรเจนเพื่อทำให้แผ่นรองรับแห้งก่อนนำไปวิเคราะห์

#### 3.4.4 การหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการฉายแสงและขนาดลวดลายที่สร้างจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

การหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการฉายแสงและขนาดลวดลายที่สร้างจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีเป็นการศึกษาระยะเวลาในการฉายภาพที่มีผลต่อขนาดของลวดลายที่ได้ โดยการฉายเส้นตรงขนาด  $240\ \mu\text{m}$  บนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัล เลนส์ใกล้วัตถุจะย่อภาพที่ฉายลง 4 เท่าแล้วฉายลงบนแผ่นรองรับ ทดลองฉายภาพลงบนแผ่นรองรับด้วยเวลาต่าง ๆ ได้แก่ 2 นาที 4 นาที 6 นาที และ 8 นาที เวลาละ 3 ครั้ง ถ่ายภาพลวดลายที่ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบมาโครซูม (Macro Zoom Imaging System) ยี่ห้อ Olympus รุ่น MVX10 และวัดขนาดของลวดลาย

### 3.5 การวิเคราะห์คุณภาพลวดลายเกรดดิงที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

#### 3.5.1 การวิเคราะห์ความถูกต้องของลวดลายสร้างจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีและความสามารถในการทำซ้ำที่สร้างจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

กระบวนการนี้เป็นการทดสอบความสามารถของระบบในการฉายภาพและสร้างลวดลายที่ถูกต้องตามลวดลายต้นแบบ โดยการสร้างลวดลายเกรดดิงที่ใช้เป็นแม่พิมพ์สำหรับสร้างเกรดดิงที่มีขนาดคาบและมีค่าอัตราส่วนของร่องที่ดีที่สุดในการใช้เป็นตัวรับรู้ในการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ที่มีความถี่  $1\ \text{MHz}$  บนพีดีเอ็มเอส ใช้ระยะเวลาฉายที่ดีที่สุดจากการทำการทดลองที่ 3.4.4 บันทึกภาพที่ฉายบนแผ่นรองรับและฉายลวดลายบนแผ่นรองรับที่เคลือบด้วยสารไวแสงสำหรับการสร้างลวดลายในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ทำซ้ำ 3 ครั้ง นำลวดลายที่สร้างได้ไปถ่าย



ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบมาโครซูม แล้วเปรียบเทียบความถูกต้องและความคมชัดกับภาพต้นแบบ โดยการคำนวณหาค่าเฉลี่ย (Mean,  $\bar{x}$ ) ของเกรตติง ด้วยสมการที่ 3-6 และคำนวณเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (The Percent of Error: E) เปรียบเทียบกับสไลด์ต้นแบบ ด้วยสมการที่ 3-7

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3-6)$$

โดยที่  $x_i$  คือ ขนาดของเกรตติงลำดับที่  $i$   
 $i$  คือ ลำดับของเกรตติง  
 $n$  คือ จำนวนเกรตติง

$$E = \left| \frac{(\bar{x} - X_T)}{X_T} \right| \times 100 \quad (3-7)$$

โดยที่  $X_T$  คือ ขนาดของเกรตติงที่ออกแบบตามฤษฎีและฉายลงบนแผ่นรองรับ

ในส่วนของการวิเคราะห์ความสามารถในการทำซ้ำโดยการคำนวณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation: S.D.) ของขนาดสไลด์เกรตติงที่สร้างด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ด้วยสมการที่ 3-8

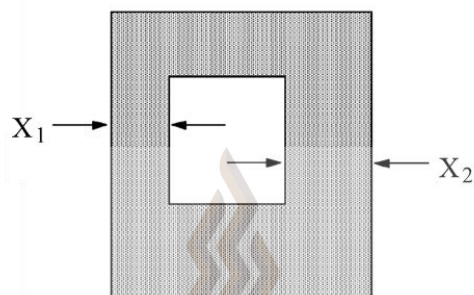
$$S.D. = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3-8)$$

### 3.5.2 การวัดความคลาดเคลื่อนสไลด์เนื่องจากการเอียงของระบบแสง

การวัดความคลาดเคลื่อนสไลด์เนื่องจากการเอียงของระบบแสงสามารถทำได้ โดยการฉายสไลด์เกรตติงบนแผ่นรองรับที่เคลือบด้วยสารไวแสงสำหรับการสร้างสไลด์ในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี นำสไลด์ที่สร้างได้ไปถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบมาโครซูมวัดขนาดเส้นของเกรตติงที่ฉายผ่านระบบแล้วเปรียบเทียบขนาดเกรตติงด้วยสมการที่ 3.9 ทำซ้ำ 3 ครั้ง

$$\Delta x = \frac{1}{2}(x_2 - x_1) \quad (3-9)$$

โดย  $x_1$  และ  $x_2$  คือ ความกว้างเส้นตรงในรูปที่ 3-9



รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะการวัดขนาดลวดลายเพื่อนำไปคำนวณความคลาดเคลื่อนลวดลายเนื่องจากการเอียงของระบบแสง

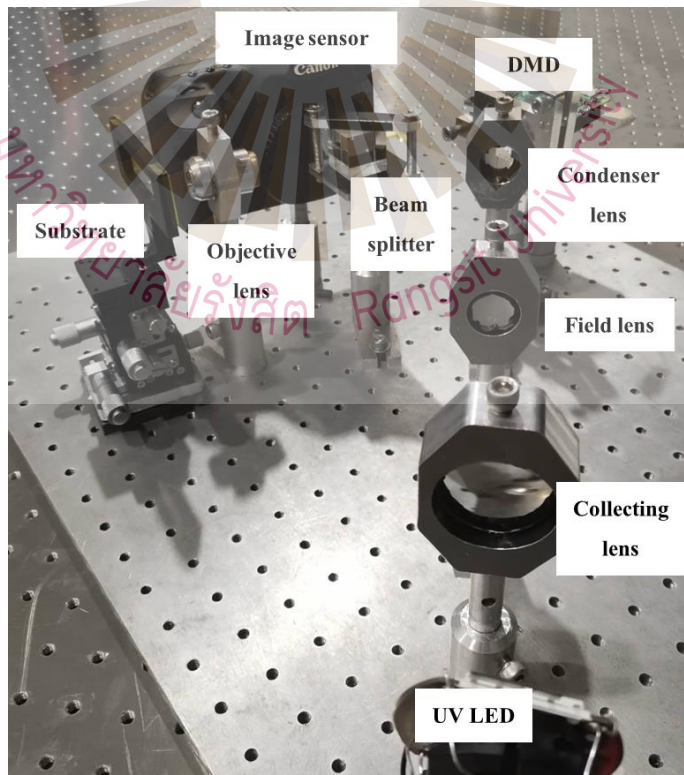


## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

#### 4.1 ผลการออกแบบและจัดเรียงทางเดินแสงของระบบการทำโมดูเลชันของความเข้มแสงบนระนาบภาพสำหรับการฉายภาพในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

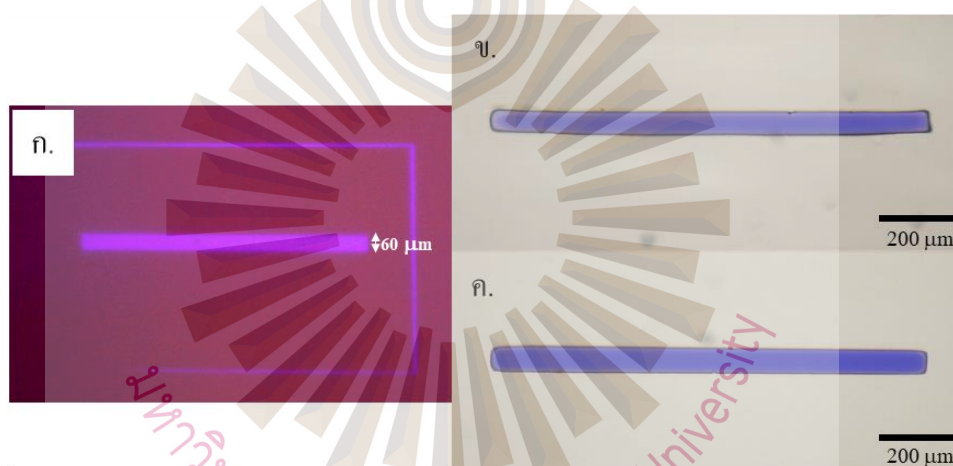
ระบบการทำโมดูเลชันของความเข้มแสงบนระนาบภาพสำหรับการฉายภาพในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ประกอบไปด้วย หลอดไฟแอลอีดีที่ให้แสงยูวี ระบบส่องสว่างแบบโคเลอรั อุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัลทำหน้าที่ฉายลวดลายต้นแบบ เลนส์ใกล้วัตถุที่มีกำลังขยาย 4 เท่า ทำหน้าที่ในการฉายภาพบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัลลงบนแผ่นรองรับ ตัวแยกแสงและเซนเซอร์รับภาพทำหน้าที่เก็บภาพลวดลายบนแผ่นรองรับ ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงผลการจัดเรียงทางเดินแสงระบบการทำโมดูเลชันของความเข้มแสงบนระนาบภาพ

#### 4.1.2 การเทียบขนาดลวดลายที่ต้องการสร้างและการศึกษาเวลาที่ฉายแสงที่มีผลต่อขนาดลวดลายที่ฉายได้

จากการฉายภาพที่มีขนาดกว้าง 240  $\mu\text{m}$  บนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัล เมื่อฉายผ่านเลนส์ใกล้วัตถุ ลวดลายมีขนาดลดลงเหลือ 60  $\mu\text{m}$  รูปที่ 4.2 ก. แสดงลวดลายที่ฉายลงบนแผ่นรองรับบันทึกผ่านกล้องในระบบการทำโมดูลชันของความเข้มแสงบนระนาบภาพ รูปที่ 4.2 ข. แสดงลวดลายเส้นตรงที่ได้จากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ใช้เวลาที่ฉายเวลา 2 นาที และรูปที่ 4.2 ค. แสดงลวดลายเส้นตรงที่ฉายด้วยเวลา 8 นาทีพบว่าเวลาที่ฉายภาพมีผลต่อขนาดลวดลายที่สร้างได้ โดยเวลาที่ฉายภาพที่ 2 นาทีจะให้ขนาดลวดลายที่เล็กกว่าลวดลายที่ฉายด้วยเวลา 8 นาที ตารางที่ 4.1 แสดงผลความกว้างของเส้นตรงที่สร้างได้จากการฉายแสงที่เวลา 2 นาที 4 นาที 6 นาที และ 8 นาที



รูปที่ 4.2 ก. แสดงจากการฉายภาพเส้นตรงที่มีขนาด 60  $\mu\text{m}$  ลงบนสารไวแสงแบบฟิล์มชนิดลบ และลวดลายที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ใช้เวลาฉายแสงที่ 2 นาที และ 8 นาที

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดลวดลายที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ฉายแสงที่เวลาต่าง ๆ

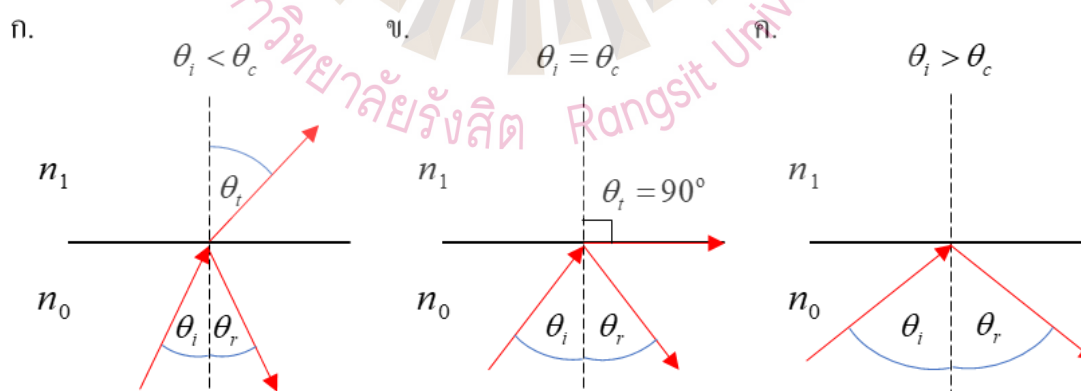
เวลาที่ฉาย (นาที)	ขนาดลวดลายที่วัดได้ ( $\mu\text{m}$ )			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
2	59.17	57.5	65.00	60.56
4	72.50	75.00	72.50	73.33
6	72.52	77.5	79.12	76.38
8	77.52	74.37	78.75	76.88

จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อเวลาในการฉายมากขึ้นจะทำให้ลวดลายที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากการที่ฉายแสงนานเกินไป (Overexposure) ทำให้สารไวแสงเกิดการจับตัวกันแน่น ไม่สามารถล้างส่วนที่อยู่รอบๆ บริเวณที่ฉายภาพได้ (Zhang & Songjing, 2018)

## 4.2 ผลการจำลองผลเชิงทฤษฎีของการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ด้วยตัวรับรู้พีดีเอ็มเอสแบบเรียบและพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติง

### 4.2.1 ผลการจำลองผลค่าความสะท้อนของระบบตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ที่มีเป็นตัวรับรู้เป็นพีดีเอ็มเอสแบบเรียบและพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติง

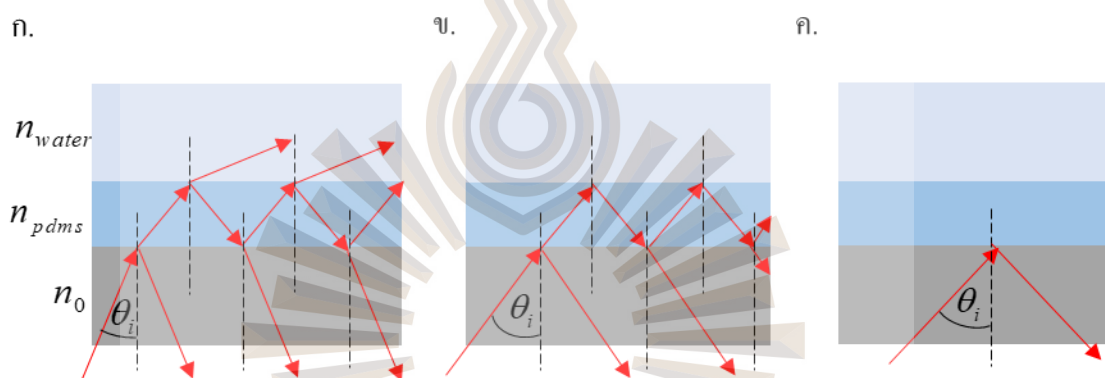
เมื่อแสงเดินทางตกกระทบบนรอยต่อระหว่างตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่างกัน เกิดปรากฏการณ์การสะท้อนและการสะท้อนของแสงบนรอยต่อ ตัวแปรที่ส่งผลต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น คือ มุมตกกระทบบนของแสง ( $\theta_i$ ) ถ้ามุมตกกระทบน้อยกว่ามุมวิกฤต (Critical Angle:  $\theta_c$ ) แสงบางส่วนจะเดินทางผ่านรอยต่อและส่องผ่านไปได้ ดังรูปที่ 4.3 ก. แต่ในกรณีที่มุมกระทบบนมากกว่ามุมวิกฤต แสงจะเกิดการสะท้อนกลับหมด (Total Internal Reflection) ดังรูปที่ 4.3 ค. และกรณีที่มุมตกกระทบบนมีค่าเท่ากับมุมวิกฤต แสงจะเดินทางไปตามรอยต่อระหว่าง 2 ตัวกลาง และมุมหักเหของแสงเท่ากับ  $90^\circ$  ดังรูปที่ 4.3 ข. มุมวิกฤตสามารถคำนวณได้ด้วยกฎของสเนล ดังสมการที่ 2.9 โดยมุมที่แสงหักเหไปยังตัวกลางที่ 2 ( $\theta_t$ ) กำหนดเป็น  $90^\circ$



รูปที่ 4.3 แสดงสะท้อนและการส่องผ่านของแสงเมื่อ ก. มุมตกกระทบน้อยกว่ามุมวิกฤต

ข. มุมตกกระทบบเท่ากับมุมวิกฤตและ ค. มุมตกกระทบบมากกว่ามุมวิกฤต

จากรูปแบบระบบที่ทำการจำลอง โดยใช้พีดีเอ็มเอสแบบเรียบ ดังรูปที่ 3.6 ก. แสงเดินทางผ่านแก้ว ตกกระทบลงบนรอยต่อของแก้วและพีดีเอ็มเอส ถ้ามุมตกกระทบมีค่าน้อยกว่ามุมวิกฤต แสงเกิดการส่องผ่านและการสะท้อน แสงที่ส่องผ่านจะเดินทางผ่านพีดีเอ็มเอสและตกกระทบลงบนรอยต่อของพีดีเอ็มเอสกับน้ำ เกิดปรากฏการณ์เช่นเดียวกัน ถ้ามุมตกกระทบน้อยกว่ามุมวิกฤตของรอยต่อพีดีเอ็มเอสกับน้ำ แสงบางส่วนจะส่องผ่านไปย้งน้ำและเดินทางออกจากระบบไป ส่วนแสงที่สะท้อนเดินทางกลับมายังพีดีเอ็มเอส ตกกระทบลงบนรอยต่อของน้ำกับพีดีเอ็มเอสอีกครั้ง แสงที่ส่องผ่านบนรอยต่อนี้สามารถแทรกสอดกับแสงที่สะท้อนบนรอยต่อแก้วกับพีดีเอ็มเอสได้ ดังรูปที่ 4.4 ก.



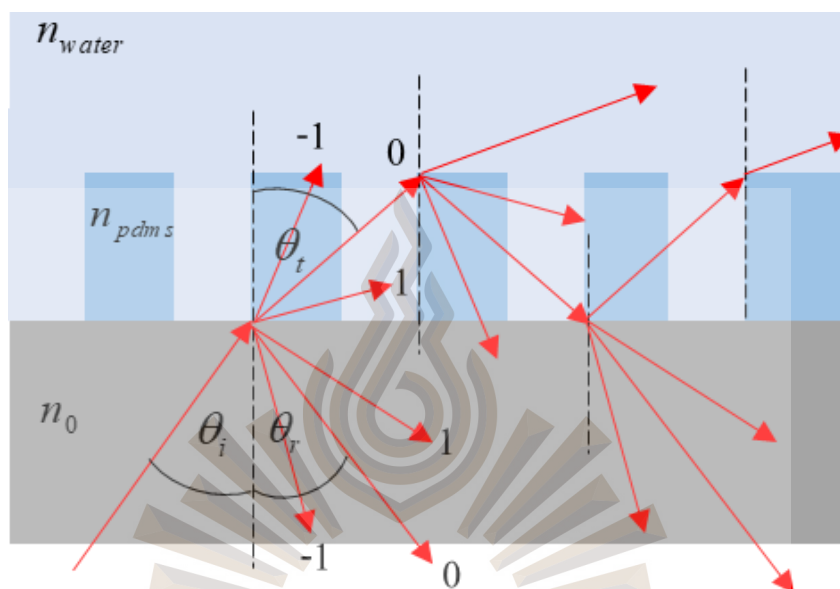
รูปที่ 4.4 แสดงสะท้อนและการส่องผ่านของแสงในระบบตรวจวัดอัตราชีวภาพที่พีดีเอ็มเอสแบบเรียบเป็นตัวรับรู้ ก. มุมตกกระทบบนรอยต่อทั้งสองมีค่าน้อยกว่ามุมวิกฤต ข. มุมตกกระทบบนรอยต่อพีดีเอ็มเอสและน้ำมีค่ามากกว่ามุมวิกฤตและ ค. มุมตกกระทบบนรอยต่อแก้วและพีดีเอ็มเอสมีค่ามากกว่ามุมวิกฤต

รูปที่ 4.4 ข. แสดงปรากฏการณ์ของกรณีที่มีมุมตกกระทบของแสงบนรอยต่อของแก้วและพีดีเอ็มเอสมีค่าน้อยกว่ามุมวิกฤต แต่มุมตกกระทบของแสงบนรอยต่อของพีดีเอ็มเอสและน้ำมีค่ามากกว่ามุมวิกฤต จะเกิดปรากฏการณ์เช่นเดียวกับกรณีของรูปที่ 4.4 ก. แต่แตกต่างกันที่แสงเกิดการสะท้อนกลับหมดบนรอยต่อของพีดีเอ็มเอสกับน้ำ และรูปที่ 4.4 ค. แสดงปรากฏการณ์ของกรณีที่มีมุมตกกระทบของแสงบนรอยต่อของแก้วและพีดีเอ็มเอสมีค่ามากกว่ามุมวิกฤต แสงเกิดการสะท้อนกลับหมดบนรอยต่อของแก้วและพีดีเอ็มเอส

รูปที่ 4.5 แสดงปรากฏการณ์ที่แสงเดินทางในระบบที่ใช้พีดีเอ็มเอสแบบเกรตติง ในกรณีที่มุมตกกระทบบนทั้งสองรอยต่อน้อยกว่ามุมวิกฤต แสงส่องผ่านและสะท้อนบนทั้งสอง

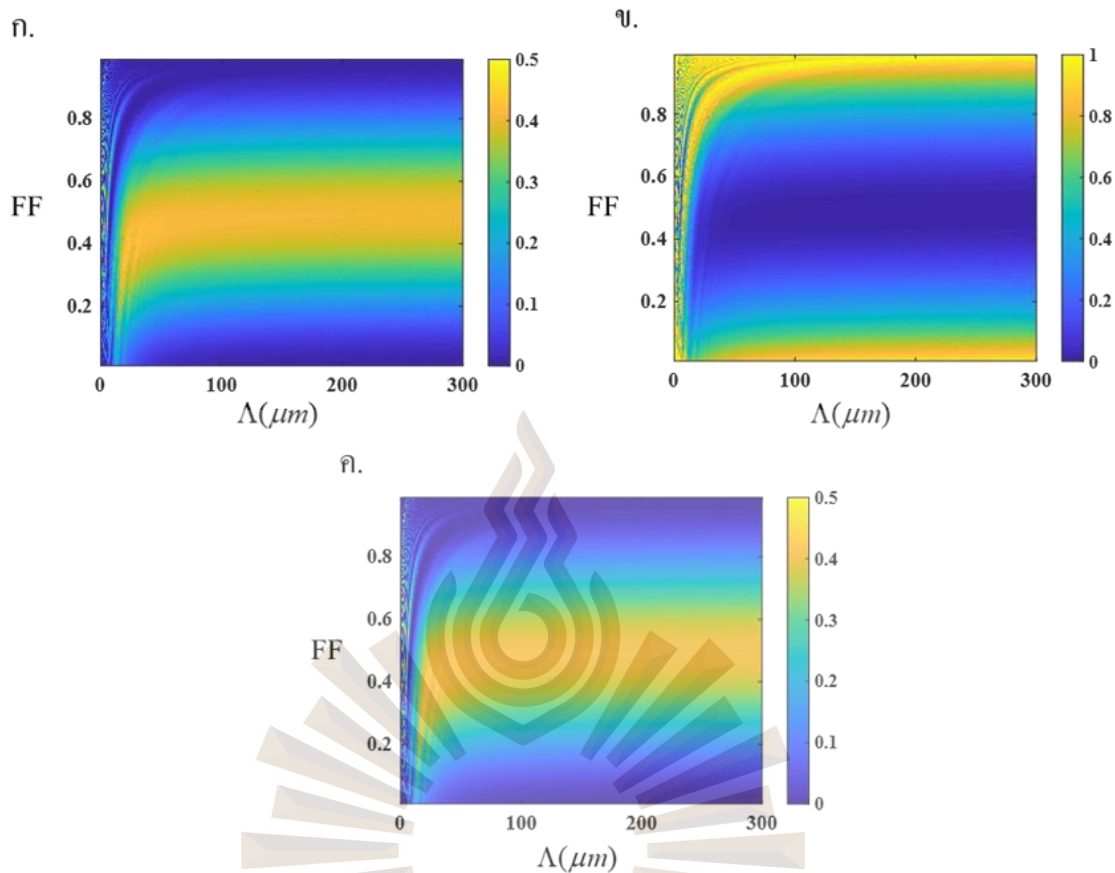


รอยต่อแบบเดียวกับกรณีของพีดีเอ็มเอสแบบเรียบ ดังรูปที่ 4.4 ก. แต่ในกรณีของพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติงจะมีปรากฏการณ์ของการเลี้ยวเบนของแสงเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยเพราะเมื่อแสงตกกระทบบนเกรตติงจะเกิดการเลี้ยวไปยังลำดับการเลี้ยวเบนต่าง ๆ



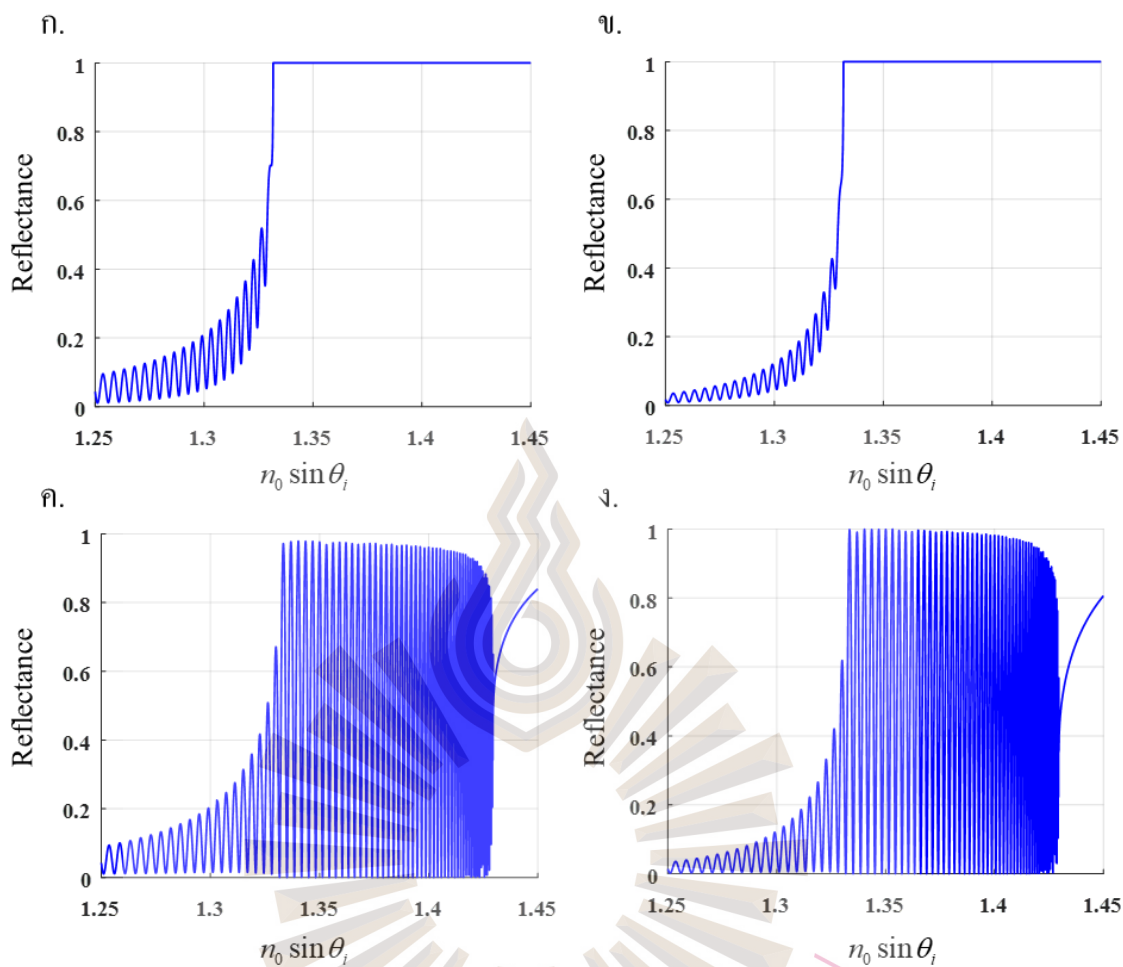
รูปที่ 4.5 แสดงการสะท้อน การส่องผ่านของแสงและการเลี้ยวเบนของแสงเมื่อตกกระทบบนระบบตรวจวัดอัลตราซาวด์ที่พีดีเอ็มเอสแบบเกรตติงเป็นตัวรับรู้ที่มุมตกกระทบน้อยกว่ามุมวิกฤต

จากปรากฏการณ์ที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อทำการจำลองผลค่าความสะท้อนของแสงของระบบตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ที่มีพีดีเอ็มเอสเกรตติงที่มีขนาดคาบตั้งแต่  $0 \mu\text{m}$  ถึง  $300 \mu\text{m}$  มีค่าสัดส่วนของร่องตั้งแต่ 0 คือ ไม่มีชั้นของพีดีเอ็มเอส ถึง 1 คือ มีชั้นพีดีเอ็มเอสแบบเรียบ และมีความหนาอยู่ที่  $35 \mu\text{m}$  โดยรูปที่ 4.6 ก. แสดงค่าความสะท้อนของแสงที่ลำดับการเลี้ยวเบนที่ -1 รูปที่ 4.6 ข. แสดงค่าความสะท้อนของแสงที่ลำดับการเลี้ยวเบนที่ 0 และรูป 4.6 ค. แสดงค่าความสะท้อนของแสงที่ลำดับการเลี้ยวเบนที่ 1 โดย 3 กรณีศึกษาที่มุมตกกระทบท่ำกับ  $1.332$  จากผลการศึกษพบว่าแสงที่หายไปบนลำดับการเลี้ยวเบนที่ 0 และไปปรากฏบนลำดับการเลี้ยวเบนที่ -1 และ 1 และรูปร่างของเกรตติงมีผลต่อประสิทธิภาพการเลี้ยวเบน แสงจะสามารถเกิดการเลี้ยวเบนได้ดี เมื่อตกกระทบบนเกรตติงที่มีค่าสัดส่วนของร่องเท่ากับ 0.5 และขนาดของคาบเกรตติงควรมีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นแสง



รูปที่ 4.6 ผลค่าความสะท้อนของแสงของฟิโอดีเอ็มเอสแบบเกรตติงที่มีความหนา 35  $\mu\text{m}$  ที่มีขนาดคาบอยู่ในช่วง 0 ถึง 300  $\mu\text{m}$  และมีค่าสัดส่วนของร่องตั้งแต่ 0 ถึง 1 ที่มุมตกกระทบเท่ากับ 1.332  
 ก. ลำดับการเลี้ยวเบนที่ -1 ข. ลำดับการเลี้ยวเบนที่ 0 และ ค. ลำดับการเลี้ยวเบนที่ 1

รูปที่ 4.7 ก. และ 4.7 ข. แสดงผลการจำลองค่าความสะท้อนของแสงในกรณีฟิโอดีเอ็มเอสแบบเรียบที่มีความหนา 35  $\mu\text{m}$  โดยที่แกนนอน คือ มุมตกกระทบที่เขียนในรูปของผลคูณระหว่างค่าดัชนีหักเหของแก้วและค่ามุมตกกระทบในรูปของฟังก์ชันไซน์ ( $n_0 \sin \theta_i$ ) และแกนตั้งคือ ค่าความความสะท้อนของแสง พบว่า มุมกระทบที่ 1.33 เป็นค่ามุมตกกระทบที่ทำให้เกิดมุมวิกฤตที่รอยต่อระหว่างฟิโอดีเอ็มเอสและน้ำ ช่วงมุมกระทบที่ต่ำกว่า 1.33 ค่าความสะท้อนของแสงมีค่าน้อย เกิดจากแสงบางส่วนส่องผ่านรอยต่อระหว่างฟิโอดีเอ็มเอสกับน้ำและเดินทางออกจากระบบไป ทำให้สามารถเห็นผลการแทรกสอดของแสงที่สะท้อนบนรอยต่อฟิโอดีเอ็มเอสกับน้ำและรอยต่อแก้วกับฟิโอดีเอ็มเอส ในกรณีในช่วงมุมตกกระทบมากกว่า 1.33 แสงเกิดการสะท้อนกลับหมดบนรอยต่อของฟิโอดีเอ็มเอสและน้ำ ค่าความสะท้อนของแสงมีค่าเท่ากับ 1 ทำให้ไม่เห็นผลการแทรกสอดของแสง



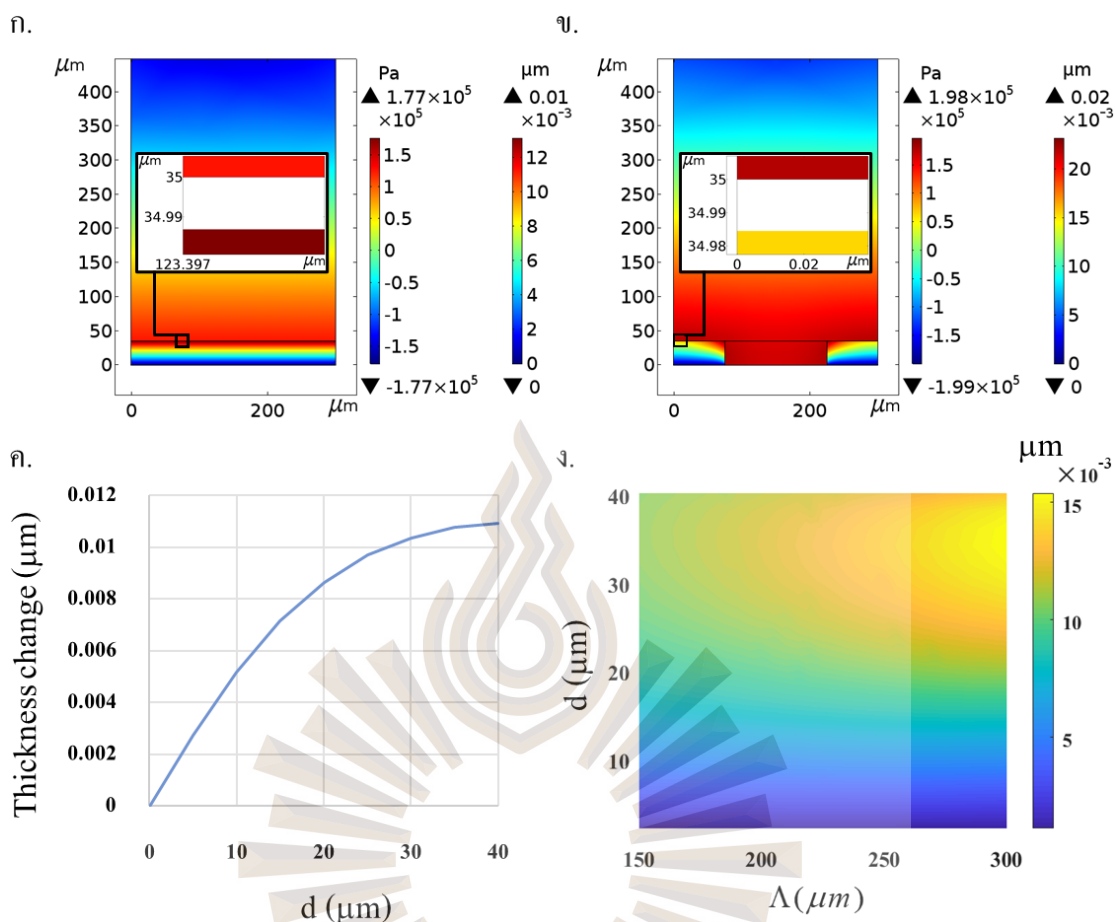
รูปที่ 4.7 แสดงค่าความสะท้อนของแสงที่มุมตกกระทบที่มีขนาด 1.25 ถึง 1.45 ของ ก. แสงโพลาไรซ์แบบ TE บนพีดีเอ็มเอสแบบเรียบ ข. แสงโพลาไรซ์แบบ TM บนพีดีเอ็มเอสแบบเรียบ ค. แสงโพลาไรซ์แบบ TM บนพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติง และ ง. แสงโพลาไรซ์แบบ TM บนพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติง

จากการเปรียบเทียบผลของแสงโพลาไรซ์แบบ TE และ TM โดยที่รูป 4.7 ก. แสดงผลการศึกษาแสงโพลาไรซ์แบบ TE และ รูป 4.7 ข. แสดงผลการศึกษาแสงโพลาไรซ์แบบ TM พบว่า กรณีที่มุมตกกระทบน้อยกว่า 1.33 แสงโพลาไรซ์แบบ TE จะมีค่าความเข้มแสงมากกว่า แสงโพลาไรซ์แบบ TM เนื่องจากแสงโพลาไรซ์แบบ TM จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่แสงส่องผ่านรอยต่อทั้งหมด เมื่อมุมตกกระทบมีค่าเท่ากับมุมบรูสเตอร์ (Brewster's Angle) ทำให้ค่าความสะท้อนของแสงจึงมีค่าน้อยกว่า

รูปที่ 4.7 ค. และ 4.7 ง. แสดงผลการจำลองค่าความสะท้อนของแสงในกรณีพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติง ที่มีความหนา 35  $\mu\text{m}$  ขนาดคาบ 300  $\mu\text{m}$  และมีค่าสัดส่วนของเกรตติงเท่ากับ 0.5 พบว่าก่อนมุมตกกระทบที่ 1.33 ค่าการสะท้อนของแสงคล้ายกับกรณีของพีดีเอ็มเอสแบบเรียบ แต่จะมีความลึกของแถบมืดหรือบริเวณที่มีค่าต่ำ ต่ำกว่าและหลังจากมุมตกกระทบ 1.33 พบว่ามีแถบมืดเกิดขึ้น ซึ่งเกิดจากปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนของแสงที่ได้อธิบายไปก่อนหน้านี้ การเพิ่มโครงสร้างเกรตติงเข้าไปทำให้เราสามารถเห็นผลการแทรกสอดของแสงที่สะท้อนออกรายต่อของพีดีเอ็มเอสกับน้ำและแก้วกับพีดีเอ็มเอสได้ ซึ่งไม่สามารถเห็นได้ในกรณีพีดีเอ็มเอสแบบเรียบ ปรากฏการณ์นี้สามารถพบจนถึงช่วงที่มุมกระทบมีค่ามากกว่า 1.4298 เมื่อมุมตกกระทบมากกว่า 1.4298 แสงที่ตกกระทบจะเกิดการสะท้อนกลับหมดบนรอยต่อของแก้วกับพีดีเอ็มเอส ไม่มีแสงส่องผ่านไปยังพีดีเอ็มเอสและไม่เกิดการแทรกสอดของแสง จากการศึกษาผลของแสงโพลาไรซ์ รูปที่ 4.7 ค. เป็นผลของแสงโพลาไรซ์แบบ TE และ รูปที่ 4.7 ค. เป็นผลของแสงโพลาไรซ์แบบ TM พบว่าแสงโพลาไรซ์แบบ TE ให้ค่าความสะท้อนแสงมากกว่าในกรณีที่มุมตกกระทบน้อยกว่า 1.33 ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เดียวกันกับกรณีของพีดีเอ็มเอสแบบเรียบ

#### 4.2.2 ผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงความหนาของพีดีเอ็มเอสแบบเรียบและพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติงจากการถูกกดด้วยความดันของคลื่นอัลตราซาวด์ที่มีความถี่ 1 MHz

รูปที่ 4.8 ก. แสดงผลความดันในตัวกลางและการยุบตัวของพีดีเอ็มเอสแบบเรียบที่มีความหนา 35  $\mu\text{m}$  และรูปที่ 4.8 ข. แสดงผลความดันในตัวกลางและการยุบตัวของพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติง มีความหนา 35  $\mu\text{m}$  ขนาดคาบเท่ากับ 300  $\mu\text{m}$  และมีค่าสัดส่วนของเกรตติงเท่ากับ 0.5 เมื่อปล่อยคลื่นอัลตราซาวด์ที่มีความถี่ 1 MHz และมีความดันอยู่ที่ 100 kPa จากการวัดการเปลี่ยนแปลงความหนา พบว่าพีดีเอ็มเอสแบบเรียบมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาอยู่ที่  $1.0756 \times 10^{-4}$  nm/Pa และพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติงมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาอยู่ที่  $1.5419 \times 10^{-4}$  nm/Pa การที่พีดีเอ็มเอสแบบเกรตติงมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาได้มากกว่าเนื่องจากโครงสร้างเกรตติงมีพื้นที่ด้านข้างให้พีดีเอ็มเอสได้ขยายตัวเมื่อถูกกดจากด้านบน จากผลของความดันในตัวกลางที่กรณีเกรตติงมีค่ามากกว่า เนื่องจากการที่คลื่นเสียงเดินทางผ่านตัวกลางที่มีค่าความต้านทานของคลื่นเสียง (Acoustic Impedance) ต่างกัน ทำให้เกิดการสะท้อนและส่องผ่านเช่นเดียวกับแสง โดยการสะท้อนและส่องผ่านขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของคลื่นเสียงของทั้งสองตัวกลาง ค่าความต้านทานของคลื่นเสียงของน้ำ พีดีเอ็มเอส และแก้ว มีค่าเท่ากับ 1.48 MRayls, 1.01 MRayls และ 12.1 MRayls ตามลำดับ (Larkthanakhachon, Pechprasarn & Somekh, 2018)



รูปที่ 4.8 แสดงผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงความหนาของพีดีเอ็มเอสและความดันในตัวกลางของ ก. พีดีเอ็มเอสแบบเรียบและ ข. พีดีเอ็มเอสแบบเกรตติง ค. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาเริ่มต้นของพีดีเอ็มเอสกับความหนาที่เปลี่ยนแปลงและ ง. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติงที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาเมื่อปล่อยคลื่นอัลตราซาวนด์ที่มีความถี่ 1 MHz และมีความดันอยู่ที่ 100 kPa

จากการคำนวณค่าความสะท้อนของเสียงระหว่างเดินทางจากน้ำไปยังพีดีเอ็มเอสและน้ำไปยังแก้วโดยสมการที่ 4-1 มีค่าเท่ากับ 0.035 และ 0.6116 ตามลำดับ กรณีที่พีดีเอ็มเอสแบบเกรตติงมีค่าความดันในน้ำที่สูงกว่ากรณีของพีดีเอ็มเอสแบบเรียบเป็นเพราะปริมาณของเสียงที่สะท้อนกลับบนรอยต่อของน้ำและแก้วมีค่ามากกว่าบนรอยต่อของน้ำและพีดีเอ็มเอส

$$R = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad (4-1)$$



โดยที่  $Z_1$  คือ ค่าความต้านทานของคลื่นเสียงของตัวกลางแรก  
และ  $Z_2$  คือ ค่าความต้านทานของคลื่นเสียงของตัวกลางที่สอง

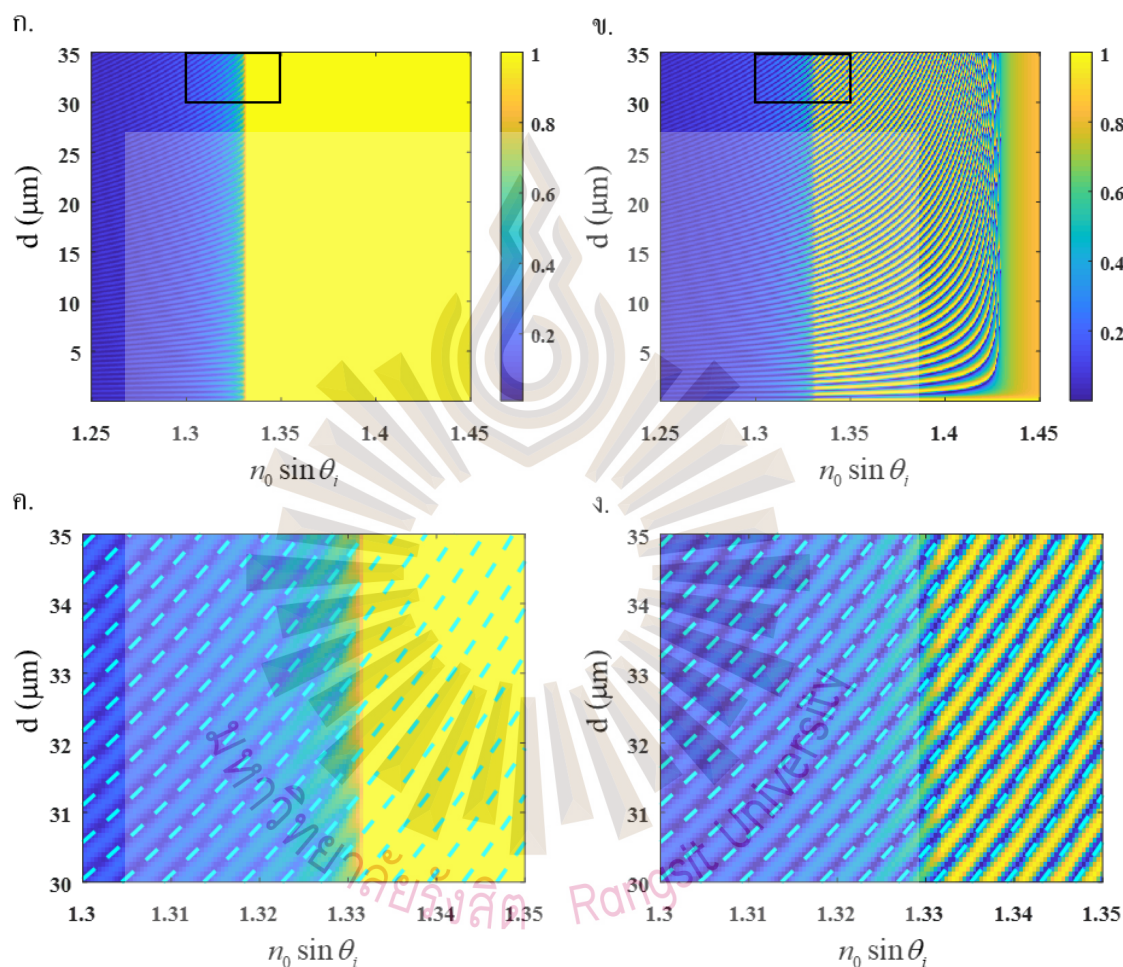
รูปที่ 4.8 ค. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาเริ่มต้นของพีดีเอ็มเอสกับความหนาที่เปลี่ยนแปลงเมื่อปล่อยคลื่นอัลตราซาวด์ที่มีความถี่ 1 MHz และมีความดันอยู่ที่ 100 kPa พบว่า ความหนาเริ่มต้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนา โดยศึกษาความหนาของพีดีเอ็มเอสตั้งแต่ 1  $\mu\text{m}$  ถึง 40  $\mu\text{m}$  พบว่าเมื่อความหนาของพีดีเอ็มเอสมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงความหนาจะมากขึ้น มีงานวิจัยที่รายงานว่าพีดีเอ็มเอสที่มีขนาดและความหนาไม่เท่ากัน ทำให้มีคุณสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกัน (Abazari, Safavi, Rezazadeh, & Villanueva, 2015) รูปที่ 4.8 ง. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างของโครงสร้างเกรตติงบนพีดีเอ็มเอสที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาเมื่อปล่อยคลื่นอัลตราซาวด์ที่มีความถี่ 1 MHz และมีความดันอยู่ที่ 100 kPa โดยรูปร่างเกรตติงที่ศึกษา คือ ช่วงของคาบตั้งแต่ 150  $\mu\text{m}$  ถึง 300  $\mu\text{m}$  และความหนาของเกรตติงตั้งแต่ 0  $\mu\text{m}$  ถึง 40  $\mu\text{m}$  พบว่าเมื่อความหนาของเกรตติงมาก การเปลี่ยนแปลงความหนาจะมากขึ้นซึ่งคล้ายกับกรณีของพีดีเอ็มเอสแบบเรียบ ในส่วนของคาบเกรตติงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนา เมื่อเกรตติงมีขนาดคาบมาก การเปลี่ยนแปลงความหนาก็จะมากขึ้น ค่าสัดส่วนเกรตติงที่ศึกษามีค่าเท่ากับ 0.5 เนื่องจากเป็นค่าที่ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนได้ดีที่สุด ดังรูปที่ 4.6

#### 4.2.3 ผลการจำลองค่าความสะท้อนของแสงเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาของพีดีเอ็มเอสแบบเรียบและพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติง

รูปที่ 4.9 ก. และ รูปที่ 4.9 ข. แสดงผลการจำลองค่าความสะท้อนของแสง ของพีดีเอ็มเอสแบบเรียบและพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติงที่มีขนาดคาบเท่ากับ 300  $\mu\text{m}$  และมีค่าสัดส่วนเกรตติงเท่ากับ 0.5 เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาตั้งแต่ 0  $\mu\text{m}$  ถึง 35  $\mu\text{m}$  พบว่า เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาค่าความสะท้อนของแสงจะเปลี่ยนแปลงไปด้วยเป็นลักษณะแทบมืดและแทบสว่างแบบฟังก์ชันไซน์ ซึ่งในกรณีของพีดีเอ็มเอสแบบเรียบจะสามารถเห็นปรากฏการณ์นี้ได้เฉพาะที่มุมตกกระทบน้อยกว่า 1.33 ส่วนในกรณีของพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติงจะสามารถเห็นปรากฏการณ์นี้ได้จนถึงมุมตกกระทบเท่ากับ 1.4289 เนื่องจากการเลี้ยวเบนของแสง ซึ่งอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1 โดยค่าความสะท้อนที่เปลี่ยนแปลงนี้เกิดจากการแทรกสอดของแสงที่สะท้อนจากรอยต่อของแก้วกับพีดีเอ็มเอสและพีดีเอ็มเอสกับน้ำ เมื่อความหนาของพีดีเอ็มเอสเปลี่ยนแปลง ระยะทางที่แสงเดินทาง (Optical Path Length) ในพีดีเอ็มเอสเปลี่ยนแปลงไปด้วย ความหนาของพีดีเอ็มเอสที่มีค่าความสะท้อนของ



แสงมาก คือ ความหนาที่ทำให้เฟสของแสงที่สะท้อนจากทั้งสองรอยต่อเกิดการแทรกสอดกันแบบเสริมกัน ความหนามีค่าความสะท้อนของแสงต่ำ คือ ความหนาที่ทำให้เฟสของแสงเกิดการหักล้างกัน ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น เรียกว่า การแทรกสอดแบบฟารี-เปโรต์ ซึ่งเราสามารถคำนวณตำแหน่งของโหมดได้ (Pechprasarn et al., 2016) ดังสมการที่ 4-2



รูปที่ 4.9 แสดงผลค่าความสะท้อนของแสงเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาของ ก. พีดีเอ็มเอสแบบเรียบและ ข. พีดีเอ็มเอสแบบเกรตติง ที่มุมตกกระทบตั้งแต่ 1.25 ถึง 1.45 และภาพขยายของ ก. และ ข. เปรียบเทียบแถบมืดกับตำแหน่งของโหมดฟารี-เปโรต์ (เส้นประ) ของ ก.พีดีเอ็มเอสแบบเรียบ และ ง. พีดีเอ็มเอสแบบเกรตติง

$$2k_{z,pdms}d + \phi_{upper} + \phi_{lower} = 2\pi M \quad (4-2)$$

โดยที่  $k_{z,pdms}$  คือเวกเตอร์คลื่นในพีดีเอ็มเอส สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 4-3

$$k_{z,pdms} = \sqrt{\left(\frac{2\pi n_{pdms}}{\lambda_0}\right)^2 - \left(\frac{2\pi n_0 \sin \theta}{\lambda_0}\right)^2} \quad (4-3)$$

$\phi_{upper}$  และ  $\phi_{lower}$  คือ เฟสของแสงที่สะท้อนออกจากรอยต่อระหว่างพีดี้เอ็มเอสกับน้ำและรอยต่อพีดี้เอ็มเอสกับแก้ว

และ  $M$  คือ ลำดับของโหมดฟาบรี-เปโรต์

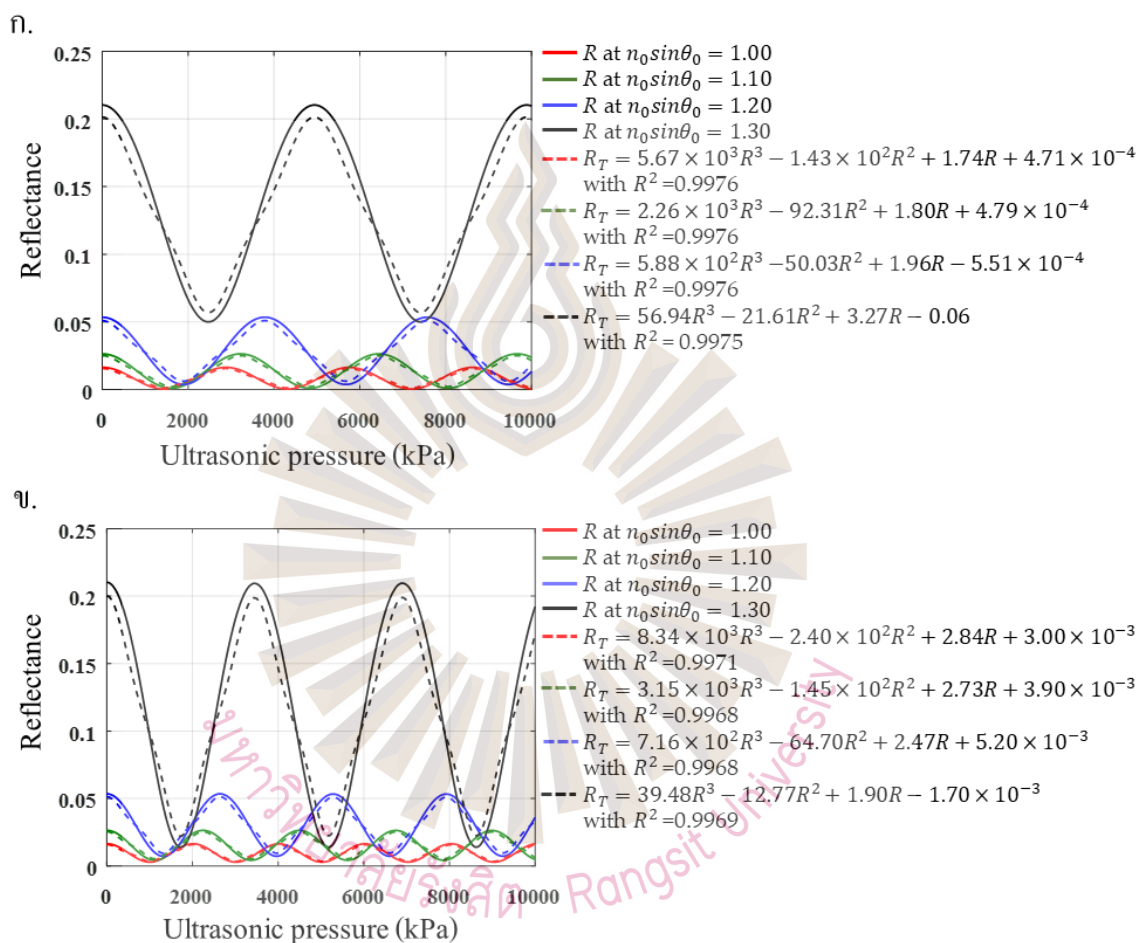
รูปที่ 4.9 ก. และ 4.9 ง. แสดงการเปรียบเทียบแถบมืดที่เกิดขึ้นกับลำดับโหมดของฟาบรี-เปโรต์ โดยรูปที่ 4.9 ก. แสดงผลค่าความสะท้อนของแสงของพีดี้เอ็มเอสแบบเรียบและรูปที่ 4.9 ง. แสดงผลค่าความสะท้อนของแสงของพีดี้เอ็มเอสแบบเกรตติงในช่วงความหนา 30  $\mu\text{m}$  ถึง 35  $\mu\text{m}$  และมุมตกกระทบในช่วง 1.3 ถึง 1.35 โดยเส้นประสีฟ้า คือ ลำดับของการเกิดโหมดฟาบรี-เปโรต์ ตั้งแต่ลำดับที่ 45 ถึง 66 จากพบการเปรียบเทียบพบว่าตำแหน่งโหมดของฟาบรี-เปโรต์ เกิดตรงกับแถบมืดพอดี ทั้งในกรณีของพีดี้เอ็มเอสแบบเรียบและพีดี้เอ็มเอสแบบเกรตติง สามารถสรุปได้ว่าปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเกิดจากการแทรกสอดแบบฟาบรี-เปโรต์ เกรตติงช่วยให้แสงเลี้ยวและทำให้เห็นผลการแทรกสอดของแสง เมื่อมุมตกกระทบมากกว่า 1.33

### 4.3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์โดยใช้ตัวรับรู้เป็นพีดี้เอ็มเอสแบบเรียบและพีดี้เอ็มเอสแบบเกรตติง

#### 4.3.1 ผลการปรับปรุงสัญญาณให้มีความเป็นเส้นตรงสำหรับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์โดยใช้ตัวรับรู้เป็นพีดี้เอ็มเอสแบบเรียบและพีดี้เอ็มเอสแบบเกรตติง

จากผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงความหนาของพีดี้เอ็มเอสเมื่อถูกกดด้วยคลื่นอัลตราซาวด์ที่มีความถี่ 1 MHz และผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงของค่าความสะท้อนของแสงเมื่อความหนาของพีดี้เอ็มเอสเปลี่ยนแปลง ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความสะท้อนของแสงได้ ดังรูปที่ 4.10 ก. และ 4.10 ข. แสดงค่าความสะท้อนของแสงก่อนและหลังการปรับปรุงสัญญาณภายใต้คลื่นอัลตราซาวด์ที่มีความถี่ตั้งแต่ 0 ถึง 10,000 kPa ที่มุมตกกระทบ 1.00 1.10 1.20 และ 1.30 ของพีดี้เอ็มเอสแบบเรียบและพีดี้เอ็มเอสแบบเกรตติงด้วยสมการถดถอยแบบพหุนามกำลังสาม พบว่าค่าความสะท้อนของ

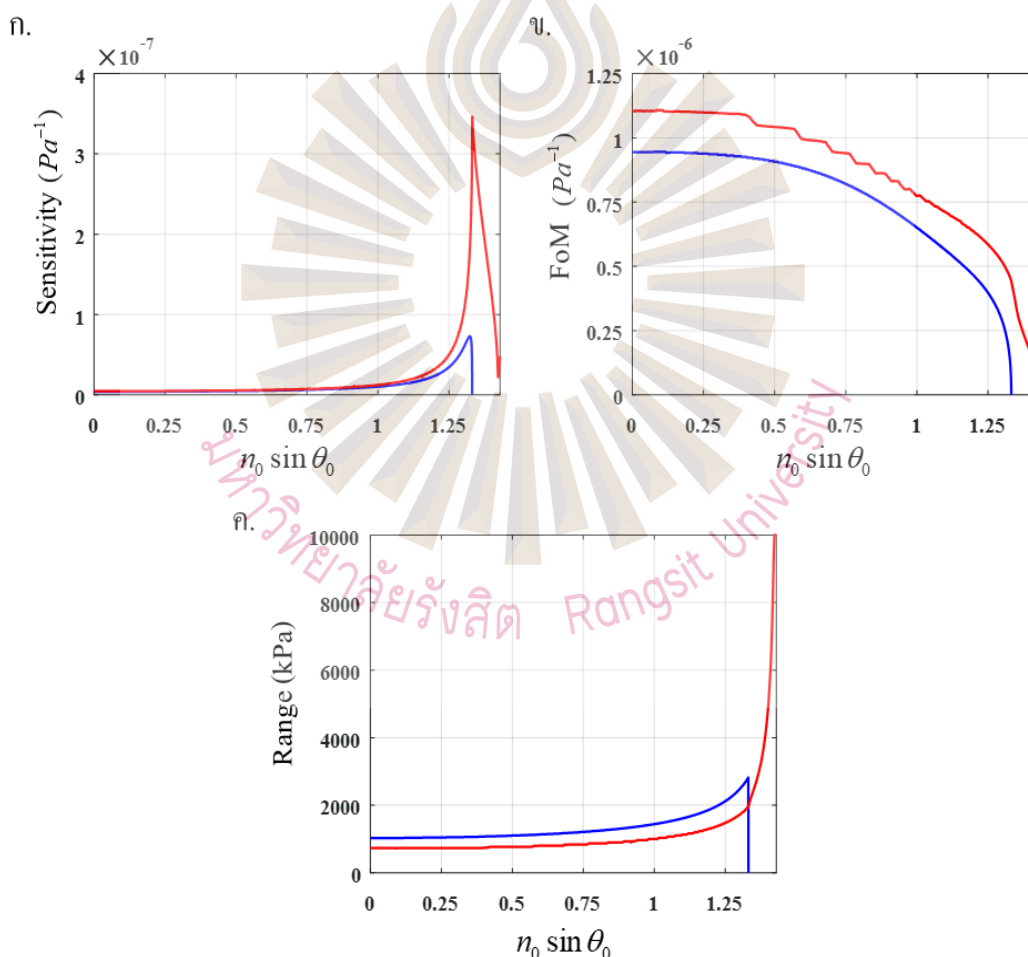
แสงที่ผ่านการปรับปรุงสัญญาณมีความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นมากขึ้นและมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความสะท้อนคงที่เมื่อความดันเปลี่ยนแปลง การปรับปรุงสัญญาณด้วยสมการถดถอยแบบพหุนามกำลังสามให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (The Coefficient of Determination :  $R^2$ ) มากกว่า 0.99 ในทุกค่ามุมตกกระทบ



รูปที่ 4.10 แสดงค่าความสะท้อนของแสงก่อนการปรับปรุงสัญญาณ (เส้นทึบ) และหลังการปรับปรุงสัญญาณ (เส้นประ) ของ ก. ค่าความสะท้อนของแสงตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์โดยใช้ตัวรับรู้เป็นพีดีเอ็มเอสแบบเรียบ และ ข. ค่าความสะท้อนของแสงตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์โดยใช้ตัวรับรู้เป็นพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติง

4.3.2 ผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพผลการจำลองการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์โดยใช้ตัวรับรู้เป็นพีดีเอ็มเอสแบบเรียบและพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติง

รูปที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบผลประสิทธิภาพการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ของพีดีเอ็มเอสแบบเรียบและพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติงที่มุมตกกระทบตั้งแต่ 0 ถึง 1.4298 โดยรูปที่ 4.11 ก. แสดงการเปรียบเทียบความไวในการตอบสนองของการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ พบว่าพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติงมีความไวในการตอบสนองมากกว่าพีดีเอ็มเอสแบบเรียบ 4.76 เท่า โดยพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติงมีความไวในการตอบสนองมากที่สุดอยู่ที่  $3.46 \times 10^{-7} \text{ Pa}^{-1}$  และพีดีเอ็มเอสแบบเรียบความไวในการตอบสนองมากที่สุดเพียง  $7.27 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$  โดยตัวรับรู้ทั้งสองชนิดจะมีลักษณะเดียวกันคือ เมื่อมุมตกกระทบมากขึ้นจะทำให้การตรวจวัดมีความไวในการตอบสนองมากขึ้น เนื่องจากเมื่อมุมตกกระทบมากขึ้นแสงที่ส่องผ่านออกไปจากระบบจะมีจำนวนน้อยลงและแสงสะท้อนกลับมากขึ้น ทำให้ค่าความสะท้อนมีค่าสูงมากกว่าบริเวณที่มีมุมตกกระทบต่ำ ๆ



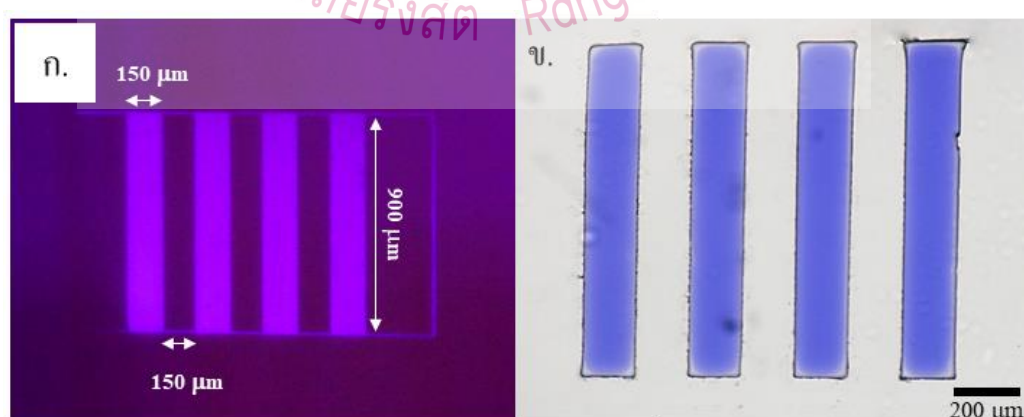
รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบผลประสิทธิภาพการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์โดยใช้ตัวรับรู้เป็นพีดีเอ็มเอสแบบเรียบ (เส้นสีน้ำเงิน) และพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติง (เส้นสีแดง) โดย ก. แสดงผลความไวในการตอบสนอง ข. ค่าความเป็นเซนเซอร์ที่ดีและ ค. ช่วงในการตอบสนอง

รูปที่ 4.11 ข. แสดงการเปรียบเทียบค่าความเป็นเซนเซอร์ที่ดีของการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ พบว่า พีดีเอ็มเอสแบบเกรตติงมีความไวในการตอบสนองมากกว่าพีดีเอ็มเอสแบบเรียบ 1.17 เท่า เป็นผลมาจากค่าความไวในการตอบสนอง โดยพีดีเอ็มเอสแบบเกรตติงมีค่าความเป็นเซนเซอร์ที่ดีมากที่สุดอยู่ที่  $1.10 \times 10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$  และพีดีเอ็มเอสแบบเรียบมีความไวในการตอบสนองมากที่สุดเพียง  $9.44 \times 10^{-7} \text{ Pa}^{-1}$  แต่ค่าความเป็นเซนเซอร์ที่ดีจะลดลงเมื่อมุมกระทบมากขึ้น เนื่องจากค่าความสะท้อนของแสงเริ่มต้นมีค่ามากขึ้นเมื่อมุมตกกระทบสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.11

รูปที่ 4.11 ค. แสดงการเปรียบเทียบช่วงในการตอบสนองของการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ พบว่าพีดีเอ็มเอสแบบเรียบมีช่วงในการตอบสนองที่มากกว่าเมื่อมุมตกกระทบน้อยกว่า 1.33 โดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 2,820 kPa ในการตรวจวัดทั่วไปมักมีช่วงในการตอบสนองที่แปรผกผันกับค่าความไวในการตอบสนอง ระบบที่มีค่าความไวในการตอบสนองที่สูงจะมีช่วงในการตอบสนองที่แคบ (Li, Lighthart, Huang, Lu, & Van Der Zwan, 2008) แต่เมื่อมุมตกกระทบมีค่ามากกว่า 1.33 พีดีเอ็มเอสแบบเกรตติงมีช่วงในการตอบสนองที่กว้างมาก สูงสุดถึง 10,000 kPa ซึ่งมากกว่าค่าสูงสุดของพีดีเอ็มเอสแบบเรียบ 3.55 เท่า

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์คุณภาพลวดลายเกรตติงจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

4.4.1 การวิเคราะห์ความถูกต้องและความสามารถในการของลวดลายที่สร้างจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี



รูปที่ 4.12 ก. แสดงภาพถ่ายเกรตติงที่ถ่ายผ่านระบบการทำโมดูเลชันของความเข้มแสงบนระนาบภาพ และ ข. แสดงลวดลายเกรตติงที่ขึ้นรูป ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบมาโครซูม



ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบความกว้าง ความยาวและระยะช่องของลวดลายเกรตติง

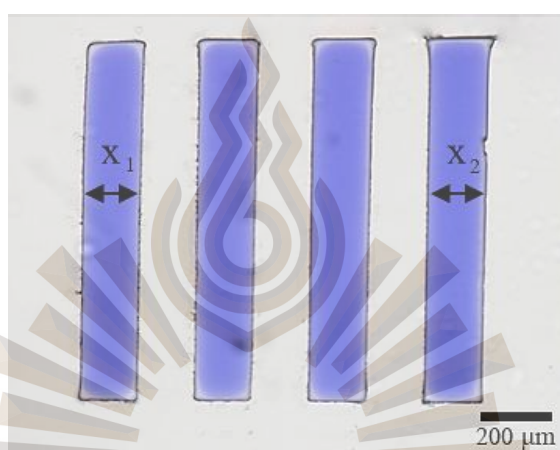
ครั้งที่	ความกว้างเกรตติง ( $\mu\text{m}$ )	ระยะร่อง ( $\mu\text{m}$ )	ความยาว ( $\mu\text{m}$ )
1	152.10	150.04	1015.25
2	156.31	151.45	1019.50
3	154.18	147.32	1021.55
$\bar{x}$	154.20	149.60	1018.76
E	2.79	0.27	13.19
S.D.	2.10	2.09	3.21

รูปที่ 4.12 ก. แสดงลวดลายที่ฉายลงบนแผ่นรองรับและบันทึกด้วยเซนเซอร์รับภาพในระบบการทำโมดูละชั้นของความเข้มแสงบนระนาบภาพ โดยขนาดลวดลายได้จากการออกแบบเกรตติงบนไอแพดด้วยสมการที่ 3-1 และภาพบนอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัลจะถูกย่อขนาดลง 4 เท่า และรูปที่ 4.12 ข. แสดงลวดลายที่สร้างจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีและฉายภาพด้วยระบบการทำโมดูละชั้นของความเข้มแสงบนระนาบภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบมาโครซูม เกรตติงที่สร้างได้มีความคมชัด ความกว้างของเกรตติงเฉลี่ยอยู่ที่ 152.10 mm ระยะร่องเฉลี่ยอยู่ที่ 150.04 mm และมีความยาวเกรตติงเฉลี่ยอยู่ที่ 1015.25 mm และตารางที่ 4.1 แสดงขนาดของเกรตติงที่ทำซ้ำ 3 ครั้ง ค่าเฉลี่ยความกว้าง ระยะร่องและความยาวของเกรตติง เท่ากับ 154.20  $\mu\text{m}$  149.60  $\mu\text{m}$  และ 1018.76  $\mu\text{m}$  จากการวิเคราะห์ความถูกต้องของลวดลายที่สร้างได้ เกรตติงมีความกว้างและระยะร่องถูกต้องตามที่ออกแบบ มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 2.79 และ 0.27 แต่ในส่วนของความยาวเกรตติงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมีค่าเท่ากับ 13.19 เนื่องจากขอบของอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัลสามารถทำให้แสงยูวีบางส่วนที่นอกเหนือจากลวดลายที่ออกแบบฉายลงมาได้ ดังรูปที่ 4.12 ก. ทำให้ความยาวของเกรตติงที่สร้างมากขึ้น วิธีนี้สามารถแก้ไขได้โดยการออกแบบลวดลายโดยไม่เต็มจอของอุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัล ในส่วนของการวิเคราะห์ความสามารถในการทำซ้ำ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความกว้างของเกรตติง ระยะร่องและความยาวของเกรตติงมีค่าเท่ากับ 2.10 2.09 และ 3.21 ตามลำดับ จากค่าที่คำนวณได้บ่งบอกว่าระบบสามารถสร้างลวดลายที่มีขนาดใกล้เคียงลวดลายเดิมได้

#### 4.4.2 การวัดความคลาดเคลื่อนลวดลายที่เกิดจากการเอียงของระบบแสง



ในการวัดความคลาดเคลื่อนลวดลายที่เกิดจากการเอียงของระบบแสง โดยการวัดขนาดความกว้างของเกรตติงที่ขีดซ้ายและขวา ดังรูปที่ 4.13 และนำค่าที่ได้คำนวณด้วยสมการที่ 3-8 ค่าที่คำนวณได้ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งจากการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนลวดลายจากเกรตติงจำนวน 3 อัน คำนวณค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.032 จากค่าความคลาดเคลื่อนลวดลายที่เกิดจากการเอียงของระบบแสงสามารถสรุปได้ว่าการจัดเรียงทางเดินแสงของระบบการทำโมดูชันของความเข้มแสงบนระนาบภาพมีความถูกต้องและไม่เอียงจนทำให้ลวดลายที่ฉายมีรูปแบบที่ไม่ถูกต้อง



รูปที่ 4.13 แสดงตำแหน่งในการคำนวณความคลาดเคลื่อนลวดลายที่เกิดจากการเอียงของระบบแสงบนลวดลายเกรตติง

ตารางที่ 4.2 แสดงความคลาดเคลื่อนของลวดลายที่เกิดจากการเอียงของระบบแสง

เกรตติง	ค่าความคลาดเคลื่อน ( $\mu\text{m}$ )
1	0.027
2	0.040
3	0.028
เฉลี่ย	0.032

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยในหัวข้อเรื่อง การทำโมเดลชั้นของความเข้มแสงบนระนาบภาพสำหรับการสร้างเซนเซอร์ระดับไมครอน : การตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ เป็นการพัฒนาระบบโฟโตนิกส์ที่มีใช้อุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัลในการสร้างลวดลายต้นแบบที่ต้องการสร้างแทนการใช้มาสก์แสงและนำระบบที่ได้มาต่อยอดในการสร้างแม่พิมพ์ที่สามารถนำไปสร้างลวดลายบนวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง ได้แก่ พิดีเอ็มเอส เพื่อให้สามารถนำไปใช้เป็นตัวรับรู้ที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ได้ ผู้วิจัยขอสรุปผลการดำเนินงาน ดังต่อไปนี้

5.1.1 ระบบการทำโมเดลชั้นของความเข้มแสงบนระนาบภาพที่ถูกพัฒนาขึ้นประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดแสงยูวี ระบบส่องสว่างแบบโคเลออร์ เลนส์ใกล้วัตถุสำหรับฉายภาพและย่อภาพให้มีขนาดในระดับไมครอน ระบบบันทึกภาพที่สามารถทำให้เห็นลวดลายที่ต้องการฉาย รวมถึงทำให้ระบบที่ถูกพัฒนาสามารถใช้งานในโหมดของกล้องจุลทรรศน์แบบสะท้อนได้ และมีการใช้อุปกรณ์กระจกขนาดไมครอนแบบดิจิทัลในการสร้างลวดลายต้นแบบ ระบบดังกล่าวสามารถสร้างลวดลายได้มีขนาดเล็กที่สุด 60 ไมครอนซึ่งเป็นความละเอียดสูงสุดที่สารไวแสงชนิดฟิล์มสามารถสร้างได้ ระบบการทำโมเดลชั้นของความเข้มแสงบนระนาบภาพทำให้การออกแบบและสร้างลวดลายมีความสะดวกมากยิ่งขึ้น รวมถึงประหยัดเวลาและงบประมาณในการผลิตมาสก์แสง

5.1.2 งานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาการจำลองผลการตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์ที่มีความถี่ 1 MHz โดยการใช้เทคนิคเชิงแสงและการใช้วัสดุยืดหยุ่นพิดีเอ็มเอสในการเป็นตัวรับรู้ การสร้างลวดลายเกรตติงบนวัสดุยืดหยุ่นทำให้การตรวจวัดคลื่นอัลตราซาวด์มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ทั้งในความไวในการตอบสนองเพิ่มขึ้นเป็นจำนวน 4.76 เท่า ค่าความเป็นเซนเซอร์ที่ดีเพิ่มขึ้นเป็นจำนวน 1.16 เท่าและมีช่วงการตอบสนองมากขึ้น 3.55 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พิดีเอ็มแบบเรียบ

5.1.3 ระบบการทำโมดูลชิ้นของความเข้มแสงบนระนาบภาพที่ถูกพัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างแม่พิมพ์สำหรับการสร้างลวดลายเกรตติง ซึ่งลวดลายที่ได้มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 5.42% ค่าเฉลี่ยของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการสร้างลวดลายมีค่าเท่ากับ 2.47 และค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอันเกิดจากการเอียงของระบบแสงมีค่าเท่ากับ 3.20% จากการวิเคราะห์ผลสามารถสรุปได้ว่าระบบการทำโมดูลชิ้นของความเข้มแสงบนระนาบภาพสามารถนำมาใช้ในการสร้างลวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีได้ดี ทั้งในส่วนของคุณภาพถูกต้องตามลวดลายต้นแบบและความสามารถในการทำซ้ำ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ระบบการทำโมดูลชิ้นของความเข้มแสงบนระนาบภาพที่ถูกพัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้ในการสร้างลวดลายสำหรับสร้างแม่พิมพ์เกรตติงได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในการสร้างลวดลายอื่นๆ ที่มีขนาดในระดับไมครอนได้อย่างหลากหลาย เช่น การสร้างช่องทางไหลจุลภาคในการตรวจวัดสารที่มีปริมาณในระดับไมโครลิตรหรือลวดลายวงจรรีเลย์ทรอนิกส์เป็นต้น รวมถึงการเลือกใช้สารไวแสงในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีชนิดอื่น ๆ โดยใช้สารไวแสงที่สามารถสร้างลวดลายที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ทำให้สามารถสร้างลวดลายที่มีขนาดเล็กลงได้

ในส่วนของการศึกษาประสิทธิภาพของการตรวจวัดของการใช้พีดีเอ็มเอสแบบเกรตติง โดยศึกษาช่วงของเกรตติงที่กว้างขึ้นหรือมีขนาดลายที่เล็กลงเพื่อหาปรากฏการณ์ที่น่าสนใจที่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจวัดได้รวมถึงต่อยอดในส่วนของการทำการทดลองจริงเพื่อศึกษาผลและเปรียบเทียบกับผลที่ทำการจำลองเชิงทฤษฎี

### บรรณานุกรม

- มนต์ศักดิ์ พิมพ์สาร.(2564). *ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์*. สืบค้นจาก  
[http://eng.sut.ac.th/me/box/2\\_54/435301/IntroductionFEM.pdf](http://eng.sut.ac.th/me/box/2_54/435301/IntroductionFEM.pdf)
- Abazari, A. M., Safavi, S. M., Rezazadeh, G., & Villanueva, L. G. (2015). Modelling the Size Effects on the Mechanical Properties of Micro/Nano Structures. *Sensors*, 15(11), 28543-28562.
- Abu-Taha, M., & Jabr, A. (2014). Photoacoustic Detection in the Michelson Interferometer Cavity. *Journal of Modern Physics*, 05. doi:10.4236/jmp.2014.59086
- Ahmed, R., Aoni, R. A., Yetisen, A., Salem, M., Yun, S.-H., & Butt, H. (2016). Optical Microring Resonator Based Corrosion Sensing. *RSC Advances*, 6, 56127–56133.  
 doi:10.1039/c6ra11538a
- Al-Hadeethi, Y., Al-Mujtabi, A., Al-Marzouki, F. M., Mahmoud, A. Y., Umar, A., Abdel-Daiem, A. M., & Ansari, M. S. (2021). Investigating the optimum parameters of a negative photoresist to prepare a V-grooved diffraction grating on Si using photolithography and reactive ion etching techniques. *Ceramics International*, 47(8), 10705-10715.  
 doi:https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.12.185
- Ali, M. A., Srivastava, S., Solanki, P., Venu, R., Agrawal, V., Kim, C., . . . Malhotra, B. (2013). Highly Efficient Bionzyme Functionalized Nanocomposite-Based Microfluidics Biosensor Platform for Biomedical Application. *Scientific Reports*, 3, 2661.  
 doi:10.1038/srep02661
- Beard, P. C., Perennes, F., & Mills, T. N. (1999). Transduction mechanisms of the Fabry-Perot polymer film sensing concept for wideband ultrasound detection. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 46(6), 1575-1582.  
 doi:10.1109/58.808883
- Bellah, M., Christensen, S., & Iqbal, S. (2012). Nanostructures for Medical Diagnostics. *Journal of Nanomaterials*, 2012. doi:10.1155/2012/486301
- Bermúdez-Aguirre, D., Mobbs, T., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2011). Ultrasound applications in food processing. *In Ultrasound technologies for food and bioprocessing*. New York :Springer.

### บรรณานุกรม (ต่อ)

- Bjorkholm, J. E. (1998). EUV lithography—the successor to optical lithography. *Intel Technology Journal*, 3, 98.
- Chávez, M., Sosa, V., & Tsumura, R. (1985). Speed of sound in saturated pure water. *Journal of The Acoustical Society of America - J ACOUST SOC AMER*, 77, 420-423.  
doi:10.1121/1.391861
- COMSOL Inc.(2017). *Structural Mechanics Module User's Guide*. Retrieved from <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.sme/StructuralMechanicsModuleUsersGuide.pdf>.
- COMSOL Inc. (2018). *Acoustics Module User's Guide*. Retrieved from <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.aco/AcousticsModuleUsersGuide.pdf>
- Das, P., & Sandstrom, R. L. (2002). Advances in excimer laser technology for sub-0.25- $\mu\text{m}$  lithography. *Proceedings of the IEEE*, 90(10), 1637-1652.  
doi:10.1109/JPROC.2002.803665
- Deng, Q., Yang, Y., Gao, H., Zhou, Y., He, Y., & Hu, S. (2017). Fabrication of Micro-Optics Elements with Arbitrary Surface Profiles Based on One-Step Maskless Grayscale Lithography. *Micromachines*, 8(10), 314. <https://doi.org/10.3390/mi8100314>
- Ding, S., Wang, C., Shi, X., Zou, J., Cheng, Q., Zhu, J., . . . Cui, Z. (2019). Directly written photo-crosslinked fluorinated polycarbonate photoresist materials for second-order nonlinear optical (NLO) applications. *Journal of Materials Chemistry C*, 7(16), 4667-4672.
- Ding, X.-Y., Ren, Y.-X., & Lu, R.-D. (2013). Maskless Microscopic Lithography through Shaping Ultraviolet Laser with Digital Micro-mirror Device. *Optics and Photonics Journal*, Vol.03No.02, 5. doi:10.4236/opj.2013.32B053
- Dogru, S., Aksoy, B., Bayraktar, H., & Alaca, B. E. (2018). Poisson's ratio of PDMS thin films. *Polymer Testing*, 69, 375-384. doi:<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.05.044>
- Dong, B., Sun, C., & Zhang, H. F. (2017). Optical Detection of Ultrasound in Photoacoustic Imaging. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 64(1), 4-15.  
doi:10.1109/TBME.2016.2605451

### บรรณานุกรม (ต่อ)

- Dudley, D., Duncan, W. M., & Slaughter, J. (2003). Emerging digital micromirror device (DMD) applications. *MOEMS display and imaging systems*, 4985, 14-25. doi: 10.1117/12.480761
- Efron, U. (2001). *Spatial light modulators: Technology and applications. Spatial Light Modulators: Technology and Applications*. Florida: CRC Press.
- Elmesery, H., Mao, H., & Abomohra, A. E.-F. (2019). Applications of Non-destructive Technologies for Agricultural and Food Products Quality Inspection. *Sensors*, 19, 846. doi:10.3390/s19040846
- Eternal Materials Co., L. (2019). *ETERTEC® HT-115 DRY FILM PHOTORESIST*. Retrieved from [https://voron.ua/files/pdf/photores/photoresist\\_film\\_ht-115.pdf](https://voron.ua/files/pdf/photores/photoresist_film_ht-115.pdf)
- Fuller, G. (2017). Future lithography technology. *Single Frequency Semiconductor Lasers*, 10321, 1032105. doi:10.1117/12.2284084
- Gong, C., & Hogan, T. (2014). CMOS Compatible Fabrication Processes for the Digital Micromirror Device. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 2(3), 27-32. doi:10.1109/JEDS.2014.2309129
- Guevara, J., Jones, M., Mullner, P., & Jankowski, E. (2020). Development of a Molecular Model for Understanding the Polymer-metal Interface in Solid State Pumps. *The Journal of Computational Science Education*, 11, 12-22. doi:10.22369/issn.2153-4136/11/2/3
- Hale, G. M., & Querry, M. R. (1973). Optical Constants of Water in the 200-nm to 200- $\mu$ m Wavelength Region. *Applied Optics*, 12(3), 555-563. doi:10.1364/AO.12.000555
- Hassler, C., Boretius, T., & Stieglitz, T. (2011). Polymers for neural implants. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 49(1), 18-33.
- Hsu, C.-W., Su, F.-C., Peng, P.-Y., Young, H.-T., Liao, S., & Wang, G.-J. (2016). Highly sensitive non-enzymatic electrochemical glucose biosensor using a photolithography fabricated micro/nano hybrid structured electrode. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 230, 559-565.



### บรรณานุกรม (ต่อ)

- Indutnyi, I., Ushenin, Y., Hegemann, D., Vandenbossche, M., Myn'ko, V., Lukaniuk, M., . . .  
 Khrystosenko, R. (2016). Enhancing Surface Plasmon Resonance Detection Using  
 Nanostructured Au Chips. *Nanoscale research letters*, 11(1), 535-535.  
 doi:10.1186/s11671-016-1760-7
- Izadifar, Z., Izadifar, Z., Chapman, D., & Babyn, P. (2020). An introduction to high intensity  
 focused ultrasound: systematic review on principles, devices, and clinical applications.  
*Journal of clinical medicine*, 9(2), 460.
- Jain, K. (2005). *U.S. Patent No. 6,870,554*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Kudo, S., Nagase, K., Kubo, S., Sugihara, O., & Nakagawa, M. (2011). Optically Transparent and  
 Refractive Index-Tunable ZrO<sub>2</sub>/Photopolymer Composites Designed for Ultraviolet  
 Nanoimprinting. *Japanese Journal of Applied Physics*, 50.  
 doi:10.1143/JJAP.50.06GK12
- Kuncova-Kallio, J., & Kallio, P. J. (2006). *PDMS and its suitability for analytical microfluidic  
 devices*. Paper presented at the 2006 International Conference of the IEEE Engineering  
 in Medicine and Biology Society.
- Lan, C., Zhou, W., & Xie, Y. (2018). Detection of Ultrasonic Stress Waves in Structures Using 3D  
 Shaped Optic Fiber Based on a Mach-Zehnder Interferometer. *Sensors*, 18(4), 1218.
- Learkthanakhachon, S., Pechprasarn, S., & Somekh, M. G. (2018). Optical detection of ultrasound  
 by lateral shearing interference of a transparent PDMS thin film. *Optics Letters*, 43(23),  
 5797-5800. doi:10.1364/OL.43.005797
- Lee, D.-H. (2010). Optical System with 4 μm Resolution for Maskless Lithography Using Digital  
 Micromirror Device. *Journal of the Optical Society of Korea*, 14(3), 266-276.
- Li, W.-D., Wu, W., & Stanley Williams, R. (2012). Combined helium ion beam and nanoimprint  
 lithography attains 4 nm half-pitch dense patterns. *Journal of Vacuum Science &  
 Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing,  
 Measurement, and Phenomena*, 30(6), 06F304.

### บรรณานุกรม (ต่อ)

- Li, Z., Ligthart, L., Huang, P., Lu, W., & Van Der Zwan, W. (2008). Trade-off between sensitivity and dynamic range in designing digital radar receivers. Paper presented at the 2008 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology.
- Lin, Q. (2007). Properties of photoresist polymers. In J.E. Mark, *Physical Properties of Polymers Handbook* (pp. 965-979). New Yoke, NY: Springer.
- Liu, K., Avouris, P., Bucchignano, J., Martel, R., Sun, S., & Michl, J. (2002). Simple fabrication scheme for sub-10 nm electrode gaps using electron-beam lithography. *Applied Physics Letters*, 80(5), 865-867.
- Love, J. C., Wolfe, D. B., Jacobs, H. O., & Whitesides, G. M. (2001). Microscope Projection Photolithography for Rapid Prototyping of Masters with Micron-Scale Features for Use in Soft Lithography. *Langmuir*, 17(19), 6005-6012. doi:10.1021/la010655t
- Ma, G., Wang, Y., Qin, W., Zhou, H., Yan, C., Jiang, J., & Ju, Y. (2020). *Optical sensors for power transformer monitoring: A review*. Retrieved from <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1049/hve2.12021>
- Mack, C. A. (2004). *The Rayleigh depth of focus*. Retrieved from [http://w.lithoguru.com/scientist/litho\\_tutor/Tutor44%20\(Feb%2004\).pdf](http://w.lithoguru.com/scientist/litho_tutor/Tutor44%20(Feb%2004).pdf)
- Madou, M. (2002). *Fundamentals of Microfabrication: The Science of Miniaturization* (2<sup>nd</sup> ed.). Florida: CRC Press.
- Magnusson, R. (2017). Light Sources and Optics. In J. C. Lindon, G. E. Tranter, & D. W. Koppenaal (Eds.), *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry* (3<sup>rd</sup> ed.) (pp. 586-594). Oxford: Academic Press.
- Manbachi, A., & Cobbold, R. S. C. (2011). Development and Application of Piezoelectric Materials for Ultrasound Generation and Detection. *Ultrasound*, 19(4), 187-196. doi:10.1258/ult.2011.011027
- Manwar, R., Zafar, M., & Xu, Q. (2021). Signal and Image Processing in Biomedical Photoacoustic Imaging: A Review. *Optics*, 2(1), 1-24.

### บรรณานุกรม (ต่อ)

- Melngailis, J., Mondelli, A., Berry iii, I., & Mohondro, R. (1998). A review of ion projection lithography. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 16, 927-957. doi:10.1116/1.590052
- Mohamad, H. (2020). Development of the differential method associated with the Fast Fourier Factorization for the modelization of photonic device: from complex optical diffraction grating to guided integrated optic structure. Retrieved from <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03102609>
- Mohammed, M. E., & Alhajhoj, M. R. (2019). *Importance and applications of ultrasonic technology to improve food quality*. Retrieved from <https://www.intechopen.com/books/food-processing/importance-and-applications-of-ultrasonic-technology-to-improve-food-quality>
- Mohammed, Z. H. (2019). *The Fresnel Coefficient of Thin Film Multilayer Using Transfer Matrix Method TMM*. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Moharam, M. G., Grann, E. B., Pommet, D. A., & Gaylord, T. K. (1995). Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings. *Journal of the Optical Society of America A*, 12(5), 1068-1076. doi:10.1364/JOSAA.12.001068
- Nakamura, K. (2014). *Photopolymers: Photoresist materials, processes, and applications*. Florida: CRC Press.
- Nivedita, N., & Papautsky, I. (2013). Continuous separation of blood cells in spiral microfluidic devices. *Biomicrofluidics*, 7(5), 54101-54101. doi:10.1063/1.4819275
- Paltauf, G., Nuster, R., Haltmeier, M., & Burgholzer, P. (2007). Photoacoustic tomography using a Mach-Zehnder interferometer as an acoustic line detector. *Applied Optics*, 46, 3352-3358. doi:10.1364/AO.46.003352

### บรรณานุกรม (ต่อ)

- Pechprasarn, S., Larkthanakhachon, S., Zheng, G., Shen, H., Lei, D. Y., & Somekh, M. G. (2016). Grating-coupled Otto configuration for hybridized surface phonon polariton excitation for local refractive index sensitivity enhancement. *Optics express*, 24(17), 19517-19530.
- Rantanen, N., & Ewing III, R. (1981). Principles of ultrasound application in animals. *Veterinary Radiology*, 22(5), 196-203.
- Ronse, K. (2006). Optical lithography—a historical perspective. *Comptes Rendus Physique*, 7(8), 844-857. doi:<https://doi.org/10.1016/j.crhy.2006.10.007>
- Sangworasil, M., Pechprasarn, S., Larkthanakhachon, S., Ittipornnusun, K., Suvarnaphaet, P., & Albutt, N. (2016, 7-9 Dec. 2016). *Investigation on feasibility of using surface plasmons resonance (SPR) sensor for ultrasonic detection: A novel optical detection of ultrasonic waves*. Paper presented at the 2016 9th Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON).
- Sasivimolkul, S., Pechprasarn, S., & Somekh, M. (2021). Analysis of Open Grating-Based Fabry–Pérot Resonance Structures With Potential Applications for Ultrasensitive Refractive Index Sensing. *IEEE Sensors Journal*, PP, 1-1. doi:10.1109/JSEN.2021.3063136
- Schneider, F., Draheim, J., Kamberger, R., & Wallrabe, U. (2009). Process and material properties of polydimethylsiloxane (PDMS) for Optical MEMS. *Sensors and Actuators A: Physical*, 151(2), 95-99. doi:<https://doi.org/10.1016/j.sna.2009.01.026>
- Seo, J., & Kim, Y.-s. (2017). Ultrasound imaging and beyond: recent advances in medical ultrasound. *Biomedical engineering letters*, 7(2), 57-58.
- Sheu, T., Chiang, M. H., & Su, S. (1998). Fabrication of intermediate mask for deep x-ray lithography. *Microsystem Technologies*, 4(2), 74-76. doi:10.1007/s005420050099
- Smith, B. W. (2014). 1 - Optical projection lithography. In M. Feldman (Ed.), *Nanolithography* (pp. 1-41): Woodhead Publishing.
- Strohm, E. M., Moore, M. J., & Kolios, M. C. (2016). High resolution ultrasound and photoacoustic imaging of single cells. *Photoacoustics*, 4(1), 36-42.

### บรรณานุกรม (ต่อ)

- Takano, T., Iwai-Takano, M., Tsuboko, Y., Shiraishi, Y., Yambe, T., Igarashi, T., & Yokoyama, H. (2021). Reflected wave intensity increases based on aortic diameter after endovascular aortic therapy in a goat model. *Scientific Reports*, 11. doi:10.1038/s41598-020-80920-y
- Thomson, L. F., Willson, C.G., & Bowden, M.J. (1983). *Introduction to Microlithography*. Washington DC: American Chemical Society.
- Vandergriff, L. J., & McLean, V. (2008). Nature and properties of light. in C. Roychoudhuri, *Fundamentals of Phonetics*. doi: 10.1117/3.784938
- Victor, A., Ribeiro, J., & Araújo, F. F. (2019). Study of PDMS characterization and its applications in biomedicine: A review. *Journal of Mechanical Engineering and Biomechanics*, 4(1), 1-9.
- Wang, J., Wang, M., Xu, J., Peng, L., Yang, M., Xia, M., & Jiang, D. (2014). Underwater blast wave pressure sensor based on polymer film fiber Fabry-Perot cavity. *Applied Optics*, 53(28), 6494-6502. doi:10.1364/AO.53.006494
- Wang, L. V., & Yao, J. (2016). A practical guide to photoacoustic tomography in the life sciences. *Nature methods*, 13(8), 627.
- Wang, S.-F., Chiu, M.-H., Chen, W.-W., Kao, F.-H., & Chang, R.-S. (2009). Small-displacement sensing system based on multiple total internal reflections in heterodyne interferometry. *Applied Optics*, 48(13), 2566-2573. doi:10.1364/AO.48.002566
- Wells, P. N. (2006). Ultrasound imaging. *Physics in Medicine & Biology*, 51(13), R83.
- Wiese, N. (2019). *Coupling phenomena and scalability of CoFeB/Ru/CoFeB sandwiches*. Retrieved from <https://core.ac.uk/reader/15971620>
- Wissmeyer, G., Pleitez, M. A., Rosenthal, A., & Ntziachristos, V. (2018). Looking at sound: optoacoustics with all-optical ultrasound detection. *Light: Science & Applications*, 7(1), 53. doi:10.1038/s41377-018-0036-7
- Wood, A. K. W., & Sehgal, C. M. (2015). A review of low-intensity ultrasound for cancer therapy. *Ultrasound in medicine & biology*, 41(4), 905-928. doi:10.1016/j.ultrasmedbio.2014.11.019

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- Xiong, B., Ren, K., Shu, Y., Chen, Y., Shen, B., & Wu, H. (2014). Recent developments in microfluidics for cell studies. *Advanced materials*, 26(31), 5525-5532.
- Yang, S., Üндar, A., & Zahn, J. D. (2006). A microfluidic device for continuous, real time blood plasma separation. *Lab on a Chip*, 6(7), 871-880.
- Yao, J., Wang, L., Yang, J.-M., Maslov, K. I., Wong, T. T., Li, L., . . . Wang, L. V. (2015). High-speed label-free functional photoacoustic microscopy of mouse brain in action. *Nature methods*, 12(5), 407-410.
- Yoon, W.-J., Lee, K. M., Evans, D. R., McConney, M. E., Kim, D.-Y., & Jeong, K.-U. (2019). Giant surfactants for the construction of automatic liquid crystal alignment layers. *Journal of Materials Chemistry C*, 7(28), 8500-8514. doi:10.1039/c9tc00422j
- Zanin, M., Atiya, N., Basilio, J., Baumach, J., Benis, A., Behera, C., . . . Schmidt, H. (2020). An Early Stage Researcher's Primer on Systems Medicine Terminology. *Expert Systems with Applications*. doi:10.1089/nsm.2020.0003
- Zhang, M., & Songjing, L. (2018). Low-cost and facile implementation of microfluidic colour-changing devices using dry film photoresist-based moulds. *Journal of Experimental Nanoscience*, 13, 220-229. doi:10.1080/17458080.2018.1509382



The image features a large, semi-transparent watermark of the Rangsit University logo in the background. The logo consists of a central flame-like symbol above a sunburst pattern, with the university's name in Thai and English below it.

ภาคผนวก ก

สิทธิบัตร

กล้องจุลทรรศน์สำหรับการถ่ายภาพในระบบต้นแบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไมโซ  
มาส์กแสงโดยอาศัยอุปกรณ์กระจกไมครอนดิจิทัลเพื่อสร้างลวดลายในระดับไมครอน

มหาวิทยาลัยรังสิต Rangsit University

## รายละเอียดการประดิษฐ์

### ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์

กล้องจุลทรรศน์ฉายภาพในระบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงโดยอาศัยอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโครสำหรับสร้างลวดลายบนวัสดุ

### สาขาวิทยาการที่เกี่ยวข้องกับการประดิษฐ์

จุลทรรศน์ศาสตร์ (ฟิสิกส์), แสงและทัศนูปกรณ์, โฟโตลิโทกราฟี, การพิมพ์ลายวงจรอิเล็กทรอนิกส์

### ภูมิหลังของศิลปะหรือวิทยาการที่เกี่ยวข้อง

ในอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น แผงวงจรรวม ไอซีหรือทรานซิสเตอร์ รวมไปถึงลวดลายบนไมโครชิปในเซนเซอร์และไบโอเซนเซอร์ อาศัยกระบวนการผลิตที่เรียกว่า โฟโตลิโทกราฟี (Photolithography) เป็นกระบวนการพิมพ์รูปแบบหรือสร้างลวดลายวงจรที่ต้องการลงบนแผ่นรองรับเพื่อให้เกิดลวดลายต่างๆ โดยการใช้แสงในช่วงความยาวคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ตบนวัสดุแผ่นรองรับ กระบวนการดังกล่าว จะมีลักษณะเหมือนการแกะสลักลงบนผิวของวัสดุรองรับที่เป็นของแข็ง โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมผลิตแผ่นวงจร วัสดุแผ่นรองรับที่มักจะถูกนำมาสร้างลวดลายผลิตจากแผ่นโลหะกึ่งตัวนำบางจะใช้ ซิลิกอนที่นำไปผ่านกระบวนการตัดขวางให้เป็นแผ่นบางเคลือบด้วยออกไซด์เพื่อให้พื้นผิวของโลหะกึ่งตัวนำมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า แล้วนำมาเคลือบด้วยสารไวแสงซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับแสงในช่วงความยาวคลื่นรังสีอัลตราไวโอเล็ต ส่งผลให้สารไวแสงเกิดการเปลี่ยนแปลงของพันธะเคมีและการเรียงตัวโมเลกุล สารไวแสงนั้น แบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่ สารไวแสงชนิดบวก (Positive photoresist) และสารไวแสงชนิดลบ (Negative photoresist) กรณีสารไวแสงชนิดบวก เมื่อผ่านการฉายด้วยแสงในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ต และนำมาให้ความร้อนโมเลกุลจะสลายหายไป ส่วนกรณีสารไวแสงชนิดลบเมื่อผ่านการฉายแสงและให้ความร้อนโมเลกุลจะจับตัวกันแน่นไม่สามารถล้างออกด้วยน้ำยาล้างเคมี (Develop solution) เนื่องจากคุณสมบัติดังกล่าวของสารไวแสง แสงในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ฉายผ่านแผ่นบางๆ ที่มีลักษณะเป็นแผ่นทึบและถูกเจาะรูตามลวดลายที่ต้องการ เรียกว่า มาสก์ฉายแสง (Photomask) แสงจะสามารถผ่านลวดลายที่เป็นช่องให้แสงผ่านเท่านั้น เมื่อเอาวัสดุแผ่นรองรับมารับแสงที่ฉายผ่านมาสก์ฉายแสง หลังจากการฉายแสงจึงนำไปให้ความร้อนและล้างด้วยน้ำยาล้างเคมีจะทำให้เกิดลวดลายวงจรตามที่ต้องการ ที่แสงฉายผ่านช่องของมาสก์ฉายแสงลงบนวัสดุแผ่น

รองรับและขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารไวแสงที่ใช้ ถึงแม้ว่ากระบวนการโฟโตลิโทกราฟีจะเป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมในวงการอุตสาหกรรมการผลิตลวดลายวงจรต่างๆ แต่ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของความยืดหยุ่นในการสร้างลวดลายใหม่ๆ และต้นทุนการผลิต เนื่องจากในการสร้างลวดลายต้องมีการผลิตมาสก์ฉายแสงของลวดลายนั้นๆ ทุกครั้ง ผู้ประดิษฐ์จึงออกแบบและสร้างกล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบของโฟโตลิโทกราฟี โดยอาศัยอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโคร (Digital micromirror device) ซึ่งเป็นชิปขนาดเล็กที่ประกอบด้วยกระจกอลูมิเนียมขนาดเล็กระดับไมโครเรียงกันเป็นอาร์เรย์ 2 มิติหรือ พิกเซล (Pixel) ซึ่งเป็นระบบเชิงกลไฟฟ้าสามารถถูกควบคุมการทำงานของกระจกให้หมุนปรับเปลี่ยนองศา และ ควบคุมการเปิด-ปิด เพื่อการฉายภาพหรือลวดลายต่างๆ ผ่านการควบคุมของโปรแกรมทางคณิตศาสตร์บนคอมพิวเตอร์ สำหรับการจัดเรียงระบบของกล้องจุลทรรศน์ที่ผู้ประดิษฐ์ออกแบบอาศัยหลักการการเรียงระบบเลนส์แบบโคเลอร์ (Köhler illumination) เพื่อให้ลวดลายแสงที่ควบคุมผ่านอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโครฉายตกกระทบบไปยังวัสดุแผ่นรองรับ ในระบบโฟโตลิโทกราฟีโดยไม่ต้องใช้มาสก์ และสามารถสร้างลวดลายที่มีขนาดระดับไมโคร และมีระบบควบคุมตำแหน่งที่ถูกต้องในการพิมพ์ลวดลายผ่านสายตาแบบระบบของกล้องจุลทรรศน์

### ลักษณะและความมุ่งหมายของการประดิษฐ์

ผู้ประดิษฐ์ออกแบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงโดยอาศัยอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโครเพื่อสร้างลวดลายบนวัสดุรองรับ และเพื่อเป็นอุปกรณ์ฉายภาพแทนการใช้มาสก์ที่ต้องผลิตใหม่เมื่อออกแบบลวดลายใหม่ และช่วยลดต้นทุนการผลิตส่วนของมาสก์ในอุตสาหกรรม ในระบบประกอบด้วย ส่วนควบคุมการฉายภาพที่ได้จากอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโคร ไปยังวัสดุแผ่นรองรับอาศัยการจัดเรียงระบบเชิงแสงแบบกล้องจุลทรรศน์แบบโคเลอร์ฉายแสงขนานลงไปบนอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโคร ในการจัดเรียงเชิงแสงแบบโคเลอร์ ใช้หลอดแสงจันทร์ (Mercury Lamp) ที่ให้ความยาวคลื่นของแสงในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ตและช่วงรังสีที่ตาสามารถมองเห็น ให้แสงที่มีกำลังแสงสูง ซึ่งเมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดผ่านระบบฉายแสงแบบโคเลอร์จะทำให้เป็นแสงขนาน และใช้ไดอะแฟรมในการปรับขนาดหน้าแสงให้มีขนาดเหมาะสมไปตกกระทบบยังอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโคร ที่มีลักษณะเป็นกระจกทำหน้าที่เป็นหน้าจอขนาดเล็ก หรือ พิกเซล ขนาด 5 – 10 ไมโครเมตร โดยแต่ละพิกเซลสามารถเลือกปรับมุมได้ จึงใช้ในการควบคุมและเลือกช่วงของความยาวคลื่นของแสงที่ต้องการฉายไปยังวัสดุรองรับ การควบคุมการทำงานมุมของกระจกทำได้ด้วยการเปิด – ปิดพิกเซลผ่านโปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์บนคอมพิวเตอร์ ใช้เลนส์แก้ววัตถุในการปรับขนาดของภาพหรือลวดลายที่

ต้องการฉายจากอุปกรณ์กระจกฉีตระดับไมโครให้มีขนาดเล็กลงหรือใช้ขยายภาพให้เหมาะสมตกลงบนวัสดุแผ่นรองรับ ใช้ตัวแยกลำแสงในการสะท้อนภาพจากเลนส์ใกล้วัตถุเข้ามายังเซนเซอร์รับภาพ เพื่อใช้ในการหาตำแหน่งในการพิมพ์ลวดลายที่ถูกต้อง ซึ่งสามารถสังเกตได้ผ่านคอมพิวเตอร์ เมื่อนำวัสดุแผ่นรองรับที่ถูกเคลือบด้วยสารไวแสงมารองรับการฉายลวดลายด้วยระบบกล้องจุลทรรศน์นี้ และนำไปผ่านความร้อนหรือการล้างด้วยน้ำยาล้างสารเคมีจะทำให้ได้ลวดลายแกะสลักที่มีขนาดในระดับไมโคร

### คำอธิบายรูปเขียนโดยย่อ

รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบและการจัดเรียงแสงของระบบกล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงโดยอาศัยอุปกรณ์กระจกฉีตระดับไมโคร

รูปที่ 2 แสดงการควบคุมการฉายภาพด้วยแสงจากกล้องจุลทรรศน์ผ่านโปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์บนคอมพิวเตอร์

รูปที่ 3 แผนภาพหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงโดยอาศัยอุปกรณ์กระจกฉีตระดับไมโคร

รูปที่ 4 แสดงถึงขั้นตอนที่ 1 ของวิธีการใช้หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงโดยอาศัยอุปกรณ์กระจกฉีตระดับไมโคร

รูปที่ 5 แสดงการทำงานของอุปกรณ์กระจกฉีตระดับไมโครและการควบคุมแสงสะท้อนออกมาจากอุปกรณ์ให้มีลวดลายตามต้องการ

รูปที่ 6 แสดงถึงขั้นตอนที่ 2 การวางวัสดุแผ่นรองรับที่ผ่านการเคลือบด้วยสารไวแสงบนตำแหน่งที่ต้องการฉายภาพผ่าน

รูปที่ 7 แสดงถึงขั้นตอนที่ 4 การฉายภาพจากอุปกรณ์กระจกฉีตระดับไมโครผ่านเลนส์ใกล้วัตถุไปยังวัสดุแผ่นรองรับ

รูปที่ 8 แสดงผลการสร้างลวดลายด้วยกล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงโดยอาศัยอุปกรณ์กระจกฉีตระดับไมโคร

### การเปิดเผยการประดิษฐ์โดยสมบูรณ์

จากรูปที่ 1 กล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงโดยอาศัยอุปกรณ์กระจกฉีตระดับไมโคร เพื่อสร้างลวดลายที่มีขนาดในระดับไมครอน มีการ

เรียงชุดแสง ซึ่งประกอบไปด้วยหลอดไฟ (1) เป็นแหล่งกำเนิดแสงให้กับอุปกรณ์ ซึ่งสามารถให้แสงในช่วงความยาวคลื่นรังสีอัลตราไวโอเล็ต ความยาวคลื่น 285 – 400 นาโนเมตร และแสงในช่วงที่ตามองเห็น ความยาวคลื่น 400 – 700 นาโนเมตร เลนส์คอนเดนเซอร์ (2) ทำหน้าที่เปลี่ยนแสงที่มีหน้าคลื่นแสงไม่เท่ากันให้มีหน้าคลื่นแสงที่เท่ากันทุกจุด เข้าสู่โคอะแฟรม (3) สำหรับปรับขนาดลำแสงที่มาจากเลนส์คอนเดนเซอร์ (2) ให้มีขนาดลำแสงเหมาะสมพอดีกับขนาดของชิปอุปกรณ์กระจกฉีตระดับไมโคร (5) เมื่อฉายผ่านแผ่นกรองแสง (4) ซึ่งมีหน้าที่เลือกกรองแสงที่มีความยาวคลื่นในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ตให้ผ่านไปยังอุปกรณ์กระจกฉีตระดับไมโคร (5) ที่ถูกควบคุมด้วยโปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ผ่านคอมพิวเตอร์(14) ในการสร้างลวดลายผ่านการเปิด-ปิดพิกเซลภาพที่ต้องการสร้างลงบนวัสดุแผ่นรองรับจะถูกกระจกขนาดเล็กบนอุปกรณ์กระจกฉีตระดับไมโคร(5) สะท้อนไปยังคู่เลนส์(6)(7) เพื่อปรับขนาดให้พอดีกับเลนส์ใกล้วัตถุ(10)ก่อนถูกส่งไปยังตัวแยกแสง(8) หลังจากผ่านตัวแยกแสงภาพจะถูกส่งไปยังเลนส์หลอด(9) และเลนส์ใกล้วัตถุ(10) ตามลำดับ ภาพที่เข้าสู่เลนส์ใกล้วัตถุ(10) จะถูกลดขนาดตามกำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุ นั้น ๆ ก่อนฉายลงบนแผ่นรองรับที่วางอยู่บนแท่นวางแผ่นรองรับ(11) ส่วนอื่น ๆ ได้แก่ เลนส์นูน(12) และเซนเซอร์รับภาพ(13) ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์(14) ผ่านสายนำส่งข้อมูลเชื่อมต่อผ่านสายยูเอสบี (USB) (15) จะถูกใช้งานเมื่อต้องการบันทึกภาพบนแผ่นรองรับผ่านโหมดของกล้องจุลทรรศน์

จากรูปที่ 2 กล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบต้นแบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงโดยอาศัยอุปกรณ์กระจกฉีตระดับไมโครเพื่อสร้างลวดลายในระดับไมโคร สามารถนำมาใช้งานในโหมดของกล้องจุลทรรศน์แสงได้ จะมีการนำแผ่นกรองแสงออก(4) เพื่อให้แสงในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นสามารถผ่านเข้าไปในระบบได้ ถ้าหากต้องการบันทึกหรือส่งดูภาพบนแผ่นรองรับโดยไม่ต้องฉายภาพ ให้เลือกให้กระจกเล็ก ๆ ของอุปกรณ์ฉีตไมโครมิเตอร์(5) อยู่ในโหมดใช้งานหรือเปิดพิกเซลทั้งหมด หลังจากแสงผ่านคู่เลนส์(6)(7)ปรับขนาด ตัวแยกแสง(8) เลนส์หลอด(9)และเลนส์ใกล้วัตถุ(10) ภาพบนแผ่นรองรับ(11) จะสะท้อนกลับมายังเลนส์ใกล้วัตถุ(10) ผ่านเลนส์หลอด(11) ไปยังตัวแยกแสง(8) สะท้อนไปยังเลนส์นูนหน้าเซนเซอร์รับภาพ(12)เพื่อรวมสร้างภาพลงบนเซนเซอร์รับภาพ(13) และภาพที่บันทึกได้จะถูกแสดงบนคอมพิวเตอร์(14) ผ่านการเชื่อมต่อผ่านสายนำส่งข้อมูลเชื่อมต่อผ่านสายยูเอสบี(USB) (15)

จากรูปที่ 3 กล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบต้นแบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงโดยอาศัยอุปกรณ์กระจกฉีตระดับไมโครเพื่อสร้างลวดลายในระดับไมโครหลักการทำงานดังที่อธิบายไว้โดยละเอียดในแผนภาพแสดงขั้นตอนการใช้งาน ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้



จากรูปที่ 4 แสดงขั้นตอนที่ 1 (S1) เป็นการออกแบบบลูดาเลย์ที่ต้องการพิมพ์ลงบนแผ่นรองรับบนโปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์บนคอมพิวเตอร์(14) และเชื่อมต่ออุปกรณ์กระจกไมโครดิจิตอลกับคอมพิวเตอร์ผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เชื่อมต่อผ่านสายนำส่งข้อมูลผ่านสายยูเอสบี(USB) (15) ซึ่งเราจะสามารถสร้างบลูดาเลย์ต่าง ๆ (19)(20) ผ่านการควบคุมการเปิด(17)-ปิด(18) ของแต่ละพิกเซลของอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโครได้

รูปที่ 5 แสดงการทำงานของอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโครที่ทำต่อแสงที่ตกกระทบลงบนผิวของกระจก จากการออกแบบบลูดาเลย์ผ่านคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ในส่วนบริเวณที่เราไม่ต้องการสร้างภาพ(18) กระจกพิกเซลของอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโคร(5) จะมีการเอียงมุมเพื่อให้แสงที่มาตกกระทบ(21)สะท้อนไปยังทิศทางอื่นหรือออกจากระบบออกไป(23) แต่ส่วนที่เราต้องการสร้างภาพ(19) แสงที่ตกกระทบบนอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโคร(5) จะถูกสะท้อนออกไปยังเลนส์ในระบบต่อไป(22)ทำให้เราสามารถควบคุมแสงที่จะสะท้อนออกมาจากอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโครให้มีบลูดาเลย์ตามที่เรต้องการได้

จากรูปที่ 6 แสดงขั้นตอนที่ 2 (S2) เป็นการนำแผ่นรองรับ(24)ที่ผ่านการเคลือบด้วยสารไวแสงมาวางบนแท่นวางตัวอย่างหรือแผ่นรองรับ (11) และขยับแผ่นรองรับให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการสร้างบลูดาเลย์ เพื่อทำการฉายภาพจากอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโครลงบนตำแหน่งที่ถูกต้องก่อนทำการเปิดแหล่งกำเนิดแสงในระบบเพื่อเริ่มทำการฉายภาพในขั้นตอนที่ 3 (S3) และทำการฉายภาพในขั้นตอนที่ 4 (S4)

จากรูปที่ 7 แสดงขั้นตอนที่ 4 (S4) กล้องจุลทรรศน์ฉายภาพจากอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโครผ่านเลนส์ใกล้วัตถุ(10) ไปยังแผ่นรองรับ(24) เพื่อเป็นการลดขนาดภาพที่ฉายให้มีขนาดเล็กลงในระดับไมโครแล้วนำไปอบร้อนและล้างด้วยน้ำยาเคมีต่อไปในขั้นตอนที่ 5

จากรูปที่ 8 แสดงผลการสร้างบลูดาเลย์ด้วยกล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบต้นแบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงโดยอาศัยอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโครเพื่อสร้างบลูดาเลย์ในระดับไมโครด้วยบลูดาเลย์ตัวอย่าง(25)และการเปรียบเทียบการเคลือบสารไวแสงประเภทชนิดบวกและลบ แผ่นรองรับที่ถูกเคลือบด้วยสารไวแสงชนิดบวก(26) บริเวณที่ถูกฉายแสงจะละลายหายไปเมื่อถูกความร้อน ส่วนสารไวแสงประเภทลบ(27) บริเวณที่ถูกฉายแสงจะยึดติดแน่นเมื่ออบด้วยความร้อนและไม่สามารถล้างออกได้ด้วยสารเคมี ทำให้บริเวณที่ไม่ถูกฉายแสงสลายหายไป

### วิธีการในการประดิษฐ์ที่ดีที่สุด

ดังที่ได้เปิดเผยไว้แล้วในหัวข้อการเปิดเผยการประดิษฐ์โดยสมบูรณ์



### ข้อถ้อยสิทธิ

1. กล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบต้นแบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงโดยอาศัยอุปกรณ์กระจกคิจิตต์ระดับไมโครเพื่อสร้างลวดลายในระดับไมโคร อาศัยหลักการจัดเรียงระบบแสงแบบกล้องจุลทรรศน์ชนิดใช้แสงสะท้อนในการสร้างลวดลายลงบนวัสดุแผ่นรองรับในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดไฟแสงจันทร์ มีความยาวคลื่นตั้งแต่ช่วงแสงอัลตราไวโอเลตถึงช่วงที่ตามองเห็น คือ 285 – 700 นาโนเมตร ระบบการจัดเรียงเลนส์แบบโคเลอร์ ทำหน้าที่รวบรวมแสงที่ไร้ทิศทางจากหลอดไฟ และสร้างลำแสงที่มีความสม่ำเสมอและมีหน้าคลื่นแสงเท่ากัน ปรับขนาดภาพให้มีความเหมาะสมกับอุปกรณ์ภายในระบบ ใช้อุปกรณ์กระจกคิจิตต์ระดับไมโครในการสร้างลวดลายผ่านการควบคุมด้วยโปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์บนคอมพิวเตอร์ และเลนส์ใกล้วัตถุทำหน้าที่ย่อขนาดลวดลายที่ต้องการพิมพ์ลงบนวัสดุแผ่นรองรับ และ ขยายภาพเพื่อการมองเห็นผ่านเซนเซอร์รับภาพที่รับภาพมาจากตัวแยกแสงและแสดงผลบนคอมพิวเตอร์
2. ระบบการสร้างลวดลายด้วยอุปกรณ์กระจกคิจิตต์ระดับไมโคร ในระบบของกล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบต้นแบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงโดยอาศัยอุปกรณ์กระจกคิจิตต์ระดับไมโคร เพื่อสร้างลวดลายในระดับไมโคร ตามข้อถ้อยสิทธิที่ 1 ในการสร้างลวดลายผ่านการควบคุมด้วยโปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์บนคอมพิวเตอร์ ควบคุมการทำงานของกระจกขนาดเล็กที่เรียงตัวกันเป็นพิกเซล ควบคุมการปรับเอียงองศา การเปิด-ปิดของพิกเซล และควบคุมการสร้างภาพที่จะฉายออกไปยังวัสดุแผ่นรองรับ
3. ระบบแบ่งแยกแสงออกเป็นสองส่วน ในระบบของกล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบต้นแบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงโดยอาศัยอุปกรณ์กระจกคิจิตต์ระดับไมโครเพื่อสร้างลวดลายในระดับไมโคร ตามข้อถ้อยสิทธิที่ 1 เพื่อให้แสงสามารถส่องผ่านและสะท้อนออกด้วยมุม 90 องศา เพื่อการสะท้อนภาพที่เกิดจากการมองเห็นผ่านเลนส์ใกล้วัตถุไปยังเซนเซอร์รับภาพแสดงผลผ่านโปรแกรมในคอมพิวเตอร์ และเพื่อการส่งผ่านภาพเข้าไปในเลนส์ใกล้วัตถุและการย่อขนาดของลวดลายที่ถูกสร้างผ่านอุปกรณ์กระจกคิจิตต์ระดับไมโคร
4. วิธีการใช้งานกล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบต้นแบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงโดยอาศัยอุปกรณ์กระจกคิจิตต์ระดับไมโครเพื่อสร้างลวดลายในระดับไมโคร ตามข้อถ้อยสิทธิที่ 1 – 3 มีขั้นตอนการทำงาน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ออกแบบและสร้างลวดลายผ่านโปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์บนคอมพิวเตอร์ และเชื่อมต่ออุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโครกับคอมพิวเตอร์ และนำภาพเข้าสู่กระบวนการพิมพ์ลวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสง

ขั้นตอนที่ 2 นำแผ่นรองรับที่ผ่านการเคลือบด้วยสารไวแสงไปวางยังตำแหน่งที่ต้องการฉายภาพผ่าน

ขั้นตอนที่ 3 ควบคุมแสงจากแหล่งกำเนิดแสงของระบบกล้องจุลทรรศน์แบบแสงสะท้อนไปยังเซนเซอร์รับภาพแสดงผลในคอมพิวเตอร์

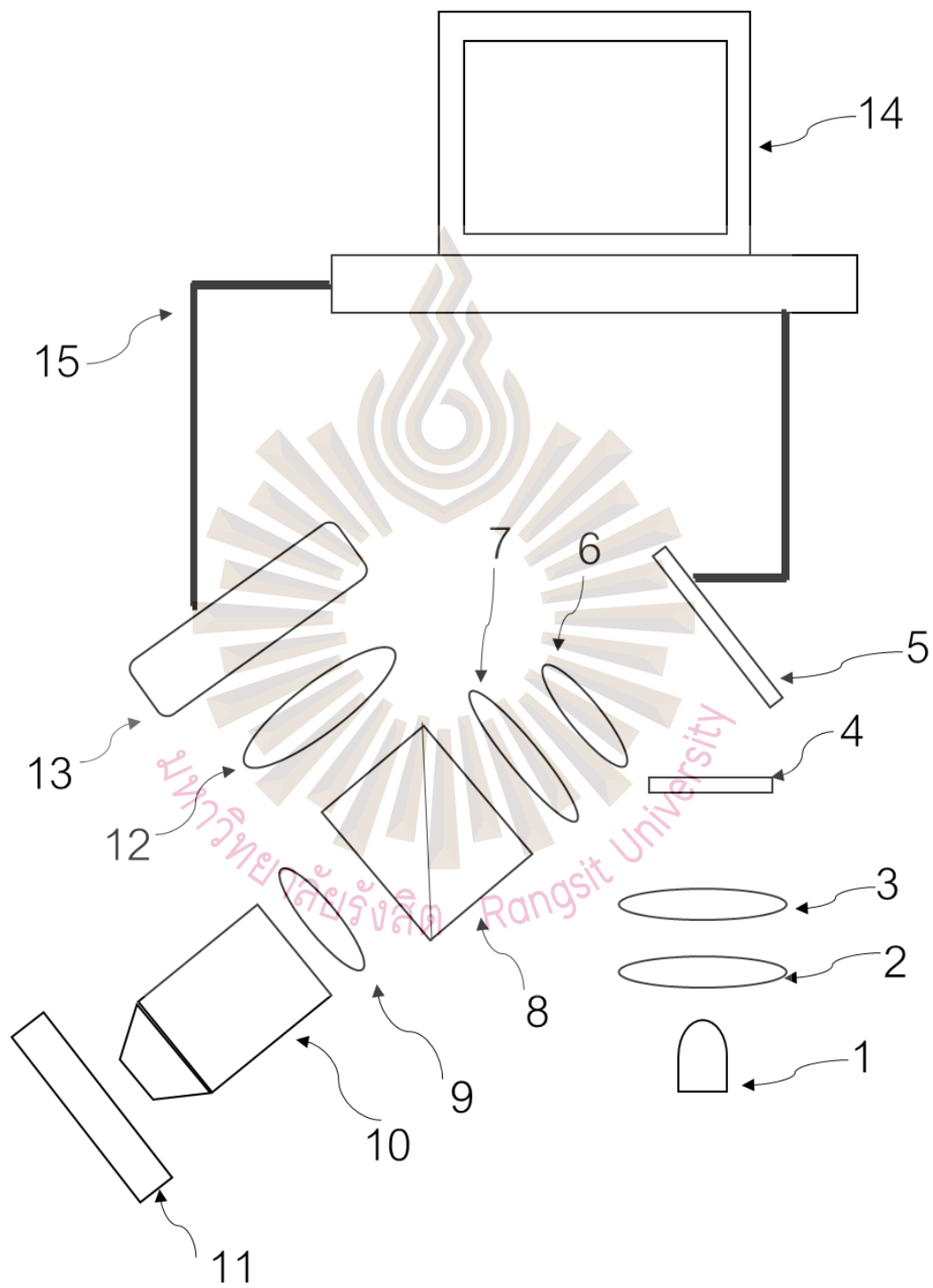
ขั้นตอนที่ 4 ลดขนาดลวดลายที่ได้รับจากอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโคร โดยการเลือกใช้เลนส์ใกล้วัตถุกำลังขยายต่างๆ และฉายภาพจากอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโครไปยังวัสดุแผ่นรองรับ เพื่อทำให้เกิดลวดลายที่สามารถพิมพ์ผ่านกล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพที่มีขนาดในระดับไมโครได้

ขั้นตอนที่ 5 คือ นำแผ่นรองรับไปอบร้อนและล้างด้วยน้ำยาล้างเคมี

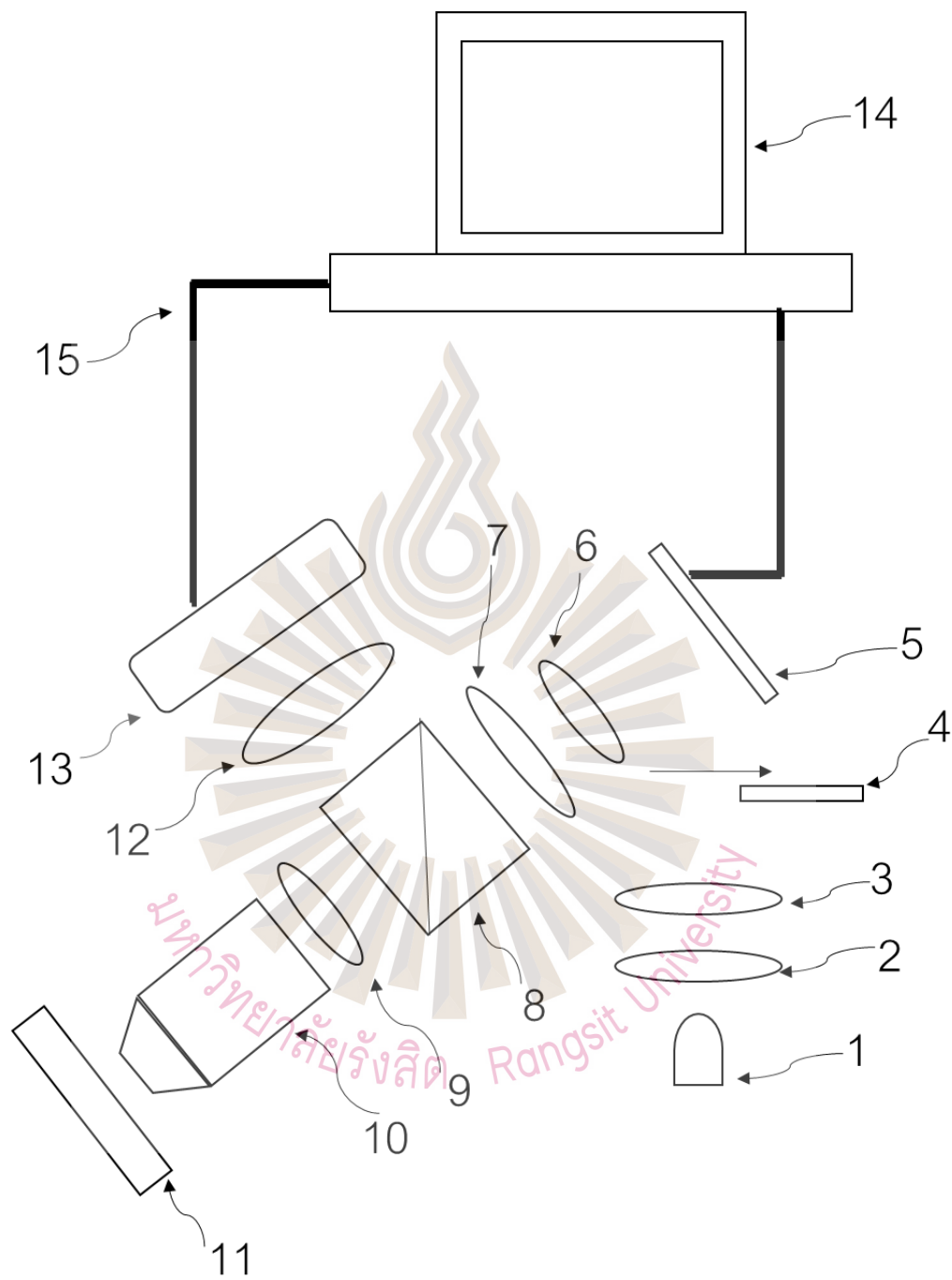
ขั้นตอนที่ 6 คือ ได้แผ่นรองรับที่ถูกแกะสลักตามลวดลายที่ออกแบบ

5. กล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบต้นแบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงโดยอาศัยอุปกรณ์กระจกดิจิทัลระดับไมโคร การใช้งาน และ ลวดลายที่ออกแบบได้จากระบบ ตามข้อถ้อยสิทธิ์ที่ 1-4

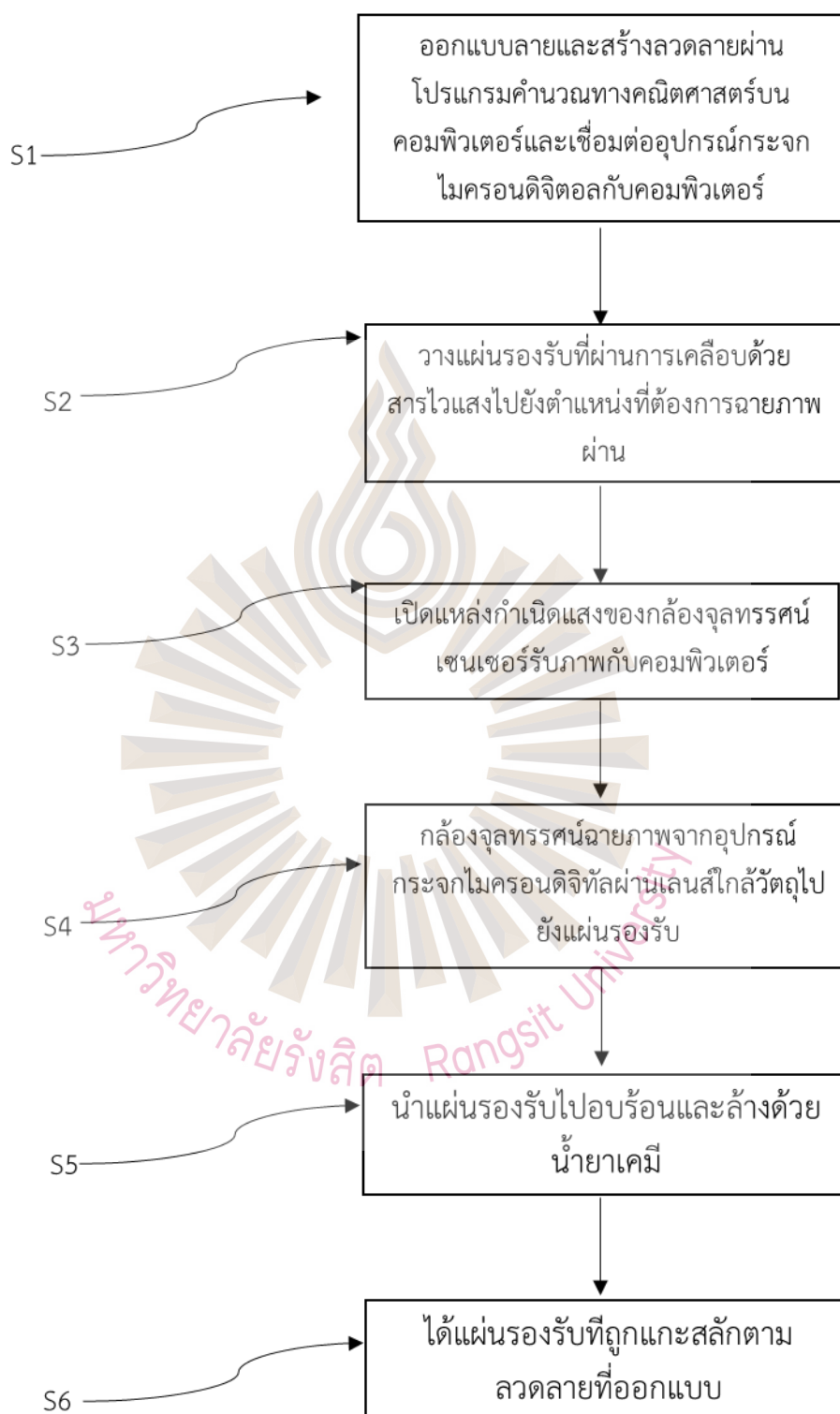
รูปเขียน



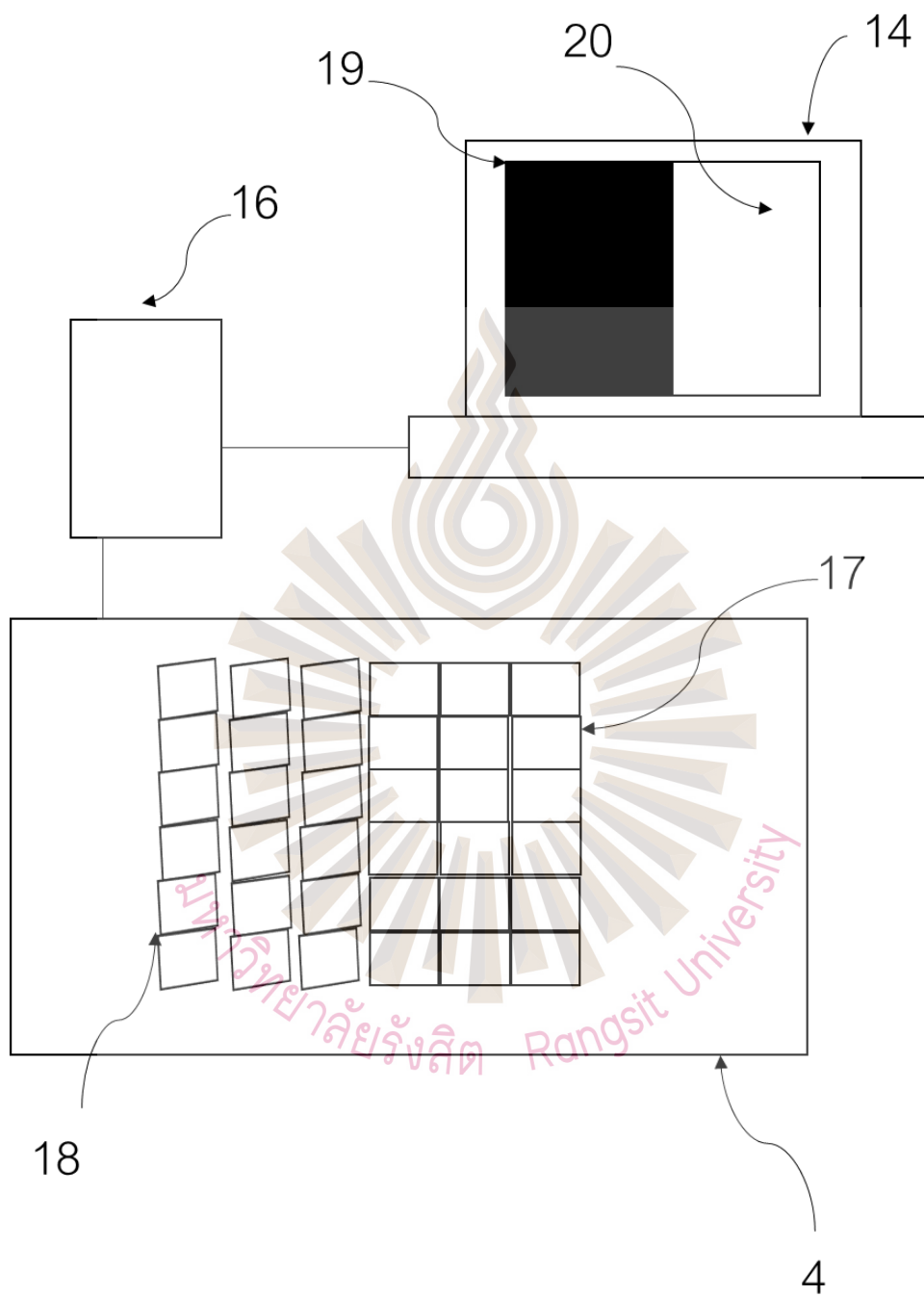
รูปที่ 1



รูปที่ 2

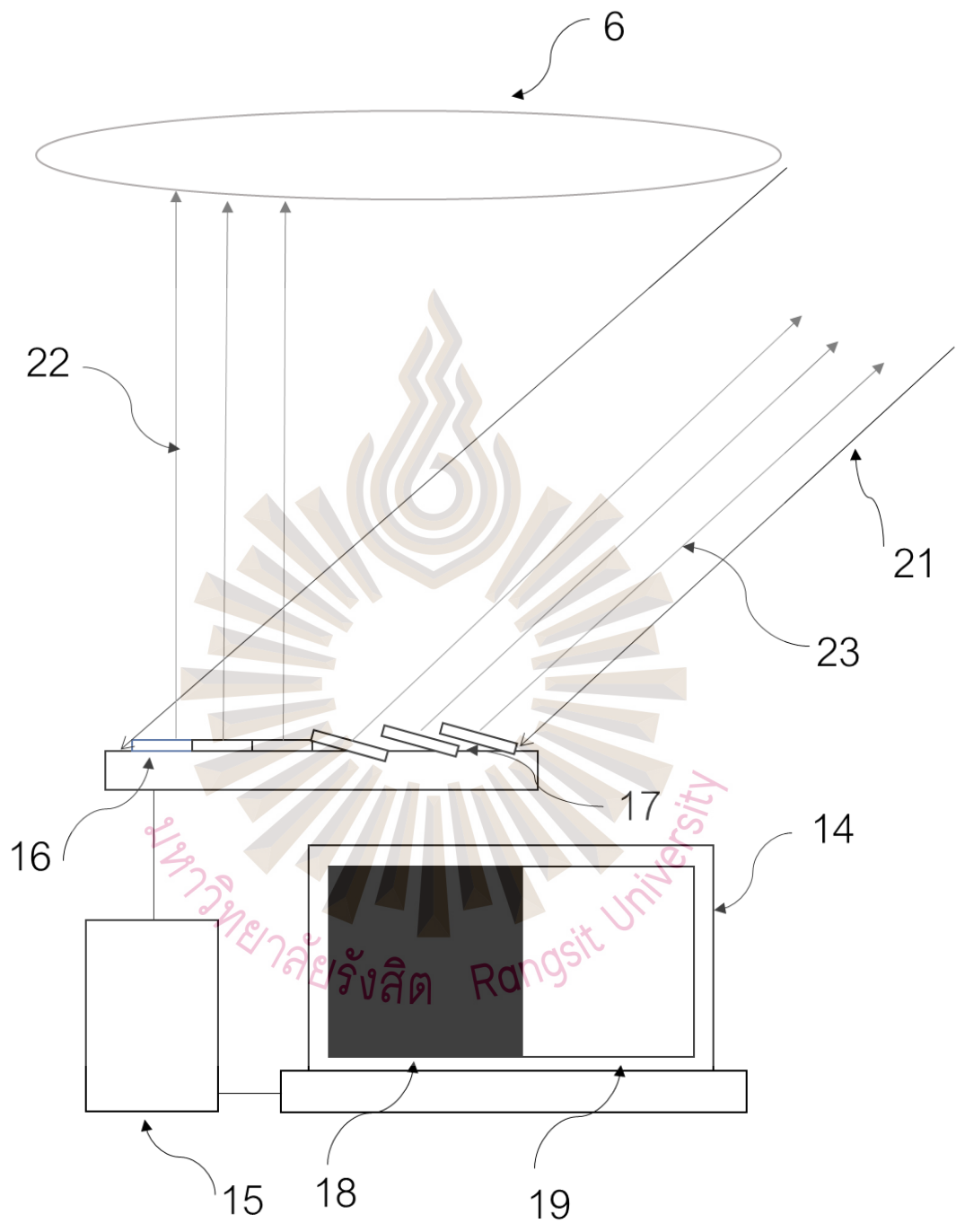


รูปที่ 3

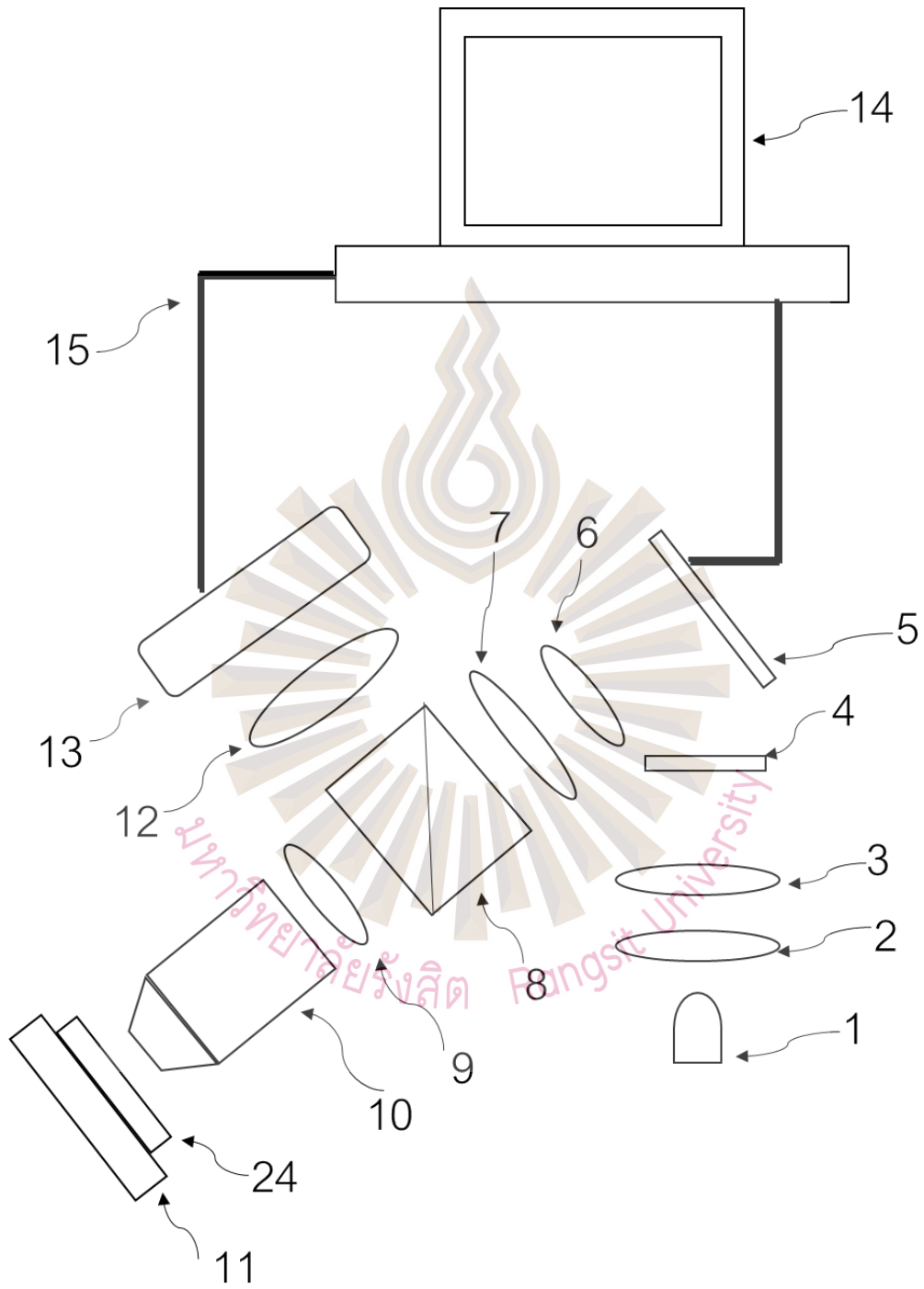


รูปที่ 4

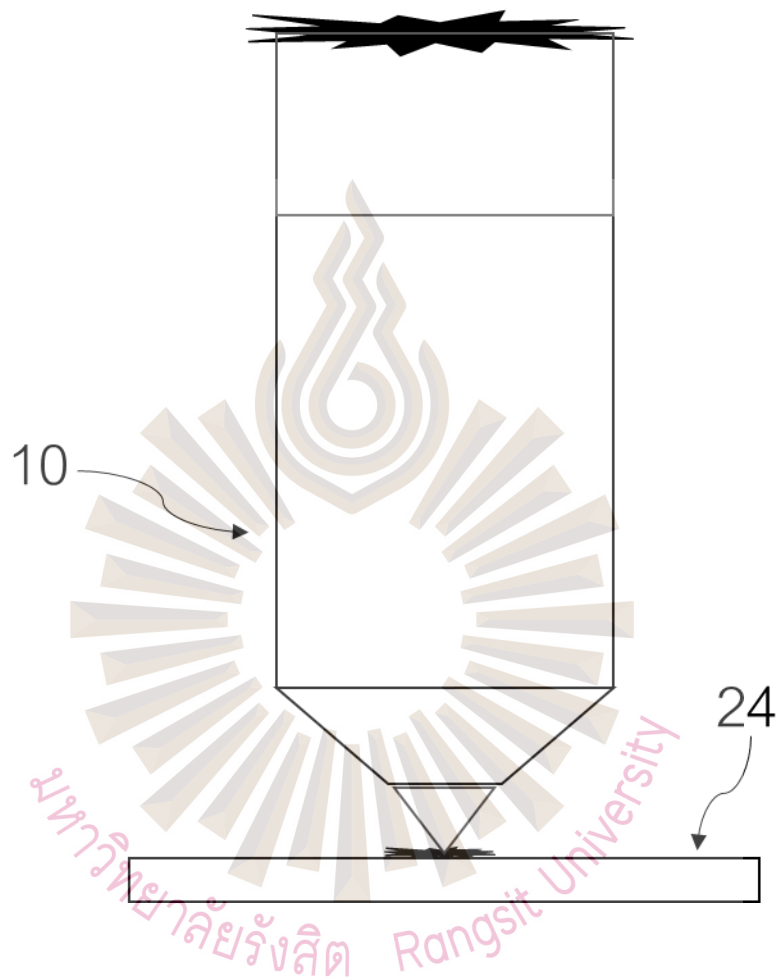




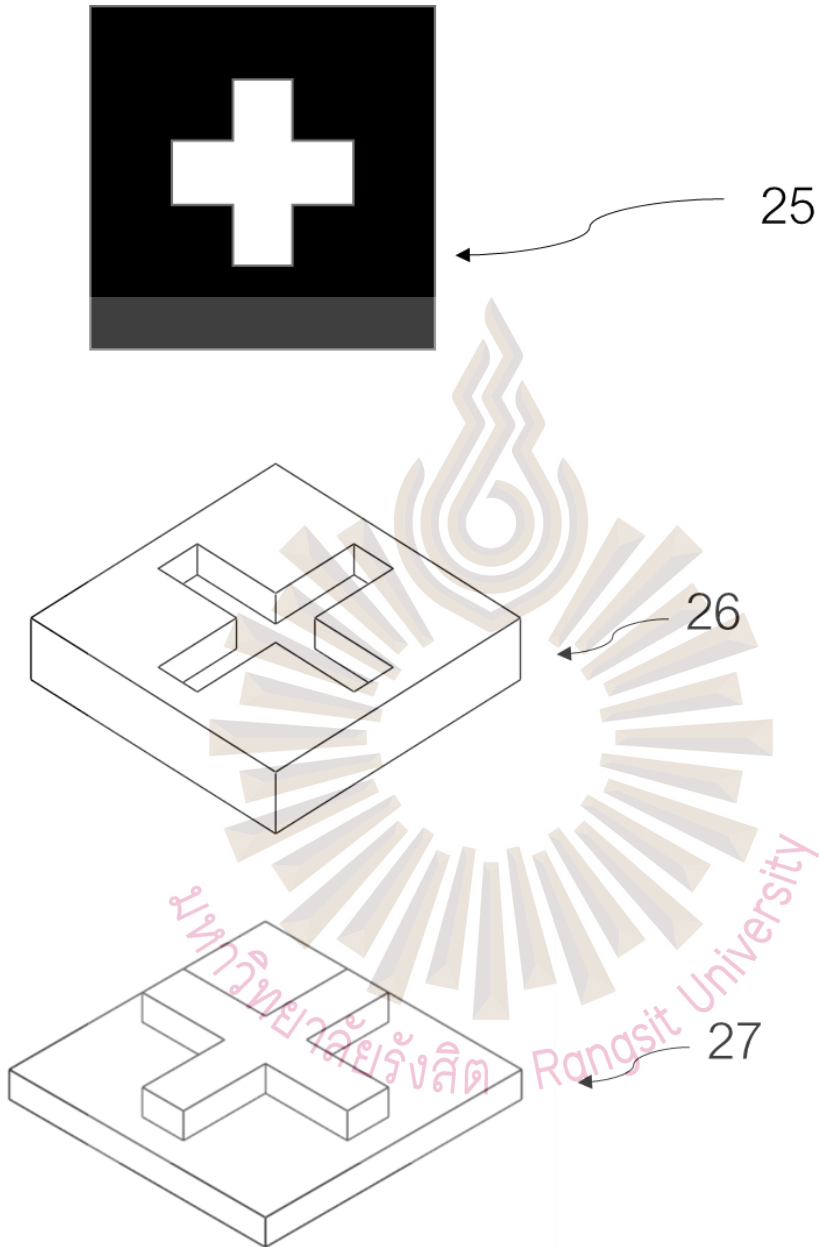
รูปที่ 5



รูปที่ 6



รูปที่ 7



รูปที่ 8

### บทสรุปการประดิษฐ์

กล้องจุลทรรศน์สำหรับการฉายภาพในระบบต้นแบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แสงโดยอาศัยอุปกรณ์กระจกฉีตระดับไมโครเพื่อสร้างลวดลายในระดับไมโคร เป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบโดยอาศัยหลักการของกล้องจุลทรรศน์สองโหมด ได้แก่ ชนิดส่งผ่านแสงเพื่อฉายภาพไปยังวัสดุแผ่นรองรับและพิมพ์ลวดลาย และชนิดสะท้อนแสงเพื่อใช้แสดงภาพของลวดลายด้วยเซนเซอร์บนคอมพิวเตอร์ทำให้เห็นภาพและระบุตำแหน่งที่ต้องการพิมพ์ได้ ระบบกล้องจุลทรรศน์ประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดแสงที่ให้แสงในช่วงความยาวคลื่นรังสีอัลตราไวโอเลตและแสงในช่วงที่ตามองเห็น เลนส์คอนเดนเซอร์แบบโคเลอร์ แผ่นกรองแสง คูเลนส์ปรับขนาดลำแสง อุปกรณ์กระจกฉีตระดับไมโคร ตัวแยกแสง เลนส์ใกล้วัตถุ และ เซนเซอร์รับภาพ มีหลักการของการสร้างลวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้มาสก์แต่ใช้อุปกรณ์กระจกฉีตระดับไมโครที่ประกอบไปด้วยกระจกขนาดเล็กเป็นพิคเซลที่สามารถปรับเอียงมุม เพื่อกำหนดทิศทางและรูปร่างของแสงที่สะท้อนออกไปได้ ทำให้สามารถควบคุมการสร้างลวดลายฉายผ่านระบบกล้องจุลทรรศน์ ไปยังบริเวณวัสดุแผ่นรองรับที่เคลือบสารไวแสง เมื่อแสงที่มีลวดลายถูกฉายลงบนวัสดุแผ่นรองรับที่เคลือบด้วยสารไวแสง นำไปอบร้อนและล้างออกด้วยน้ำยาล้างเคมี เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารไวแสง ทำให้ได้ลวดลายที่สร้างขึ้น



ภาคผนวก ข

สิทธิบัตร

อุปกรณ์แสงสำหรับตรวจวัดคลื่นเสียงความถี่สูงด้วยโครงสร้างเกรตติงระดับไมครอน

บนวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่นโดยอาศัยคลื่นเสียงที่ผิวและการแทรกสอดแบบ

เฟอร์รี่-พาร์โรท์

มหาวิทยาลัยรังสิต Rangsit University



## รายละเอียดการประดิษฐ์

### ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์

อุปกรณ์แสงสำหรับตรวจวัดคลื่นเสียงความถี่สูงด้วยโครงสร้างเกรตติงระดับไมครอนบนวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่น โดยอาศัยคลื่นเสียงที่ผิวและการแทรกสอดแบบเฟอร์บี-พาร์โรท์

### สาขาวิทยาการที่เกี่ยวข้องกับการประดิษฐ์

การวัดคลื่นเสียงความถี่สูง, เซนเซอร์, ฟิสิกส์, จุลทรรศนศาสตร์ (ฟิสิกส์), แสงและทัศนูปกรณ์

### ภูมิหลังของศิลปะ หรือ วิทยาการที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันการวิจัยในด้านต่าง ๆ เช่น ทางด้านอุตสาหกรรมการผลิตเซนเซอร์ ได้มีการใช้กล้องจุลทรรศน์ในการส่องหา ตรวจวัดวัตถุหรือสร้างภาพของวัตถุที่มีขนาดเล็กๆ ในระดับไมครอน ซึ่งกล้องจุลทรรศน์มีอยู่หลายประเภท ขึ้นอยู่กับหลักการที่ใช้ในการถ่ายภาพหรือประเภทของตัวอย่างที่นำมาถ่ายภาพ เช่น กล้องจุลทรรศน์แบบฟลูออเรสเซนซ์ ที่ใช้หลักการการกระตุ้นสารเรืองแสงให้มีการดูดกลืนพลังงานและปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน วิธีนี้ถูกนำมาใช้ในการถ่ายภาพเพื่อตรวจหาเซลล์มะเร็งหรือความผิดปกติของเซลล์ได้ การใช้แสงในการถ่ายภาพเป็นวิธีการหนึ่งทางการแพทย์สำหรับชี้วัดตำแหน่งที่ผิดปกติ เมื่อกล้องจุลทรรศน์ได้ถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นเพื่อถ่ายภาพตัวอย่างลักษณะอื่น กล่าวคือ การถ่ายภาพตัดขวางด้วยโฟโตอะคูสติก (Photoacoustic tomography) [1] เป็นวิธีการถ่ายภาพที่อาศัยการดูดกลืนแสงเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนแล้วทำให้เกิดการขยายตัวทางความร้อนและปลดปล่อยออกมาในรูปของคลื่นอะคูสติก นำไปสร้างเป็นภาพได้ ซึ่งใช้สำหรับการวินิจฉัยทางคลินิก เช่น การถ่ายภาพเส้นเลือดเพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของฮีโมโกลบินเมื่อมีการจับและปล่อยออกซิเจน การถ่ายภาพจากความเปรียบต่างของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของเนื้อเยื่อที่ถ่ายภาพ ด้วยเทคนิคการถ่ายภาพลักษณะนี้จึงสามารถแยกความแตกต่างระหว่างเนื้อเยื่อที่มีความปกติและเนื้อเยื่อที่เป็นโรคได้ เนื่องจากมีความละเอียดของภาพสูงกว่ารูปแบบการถ่ายภาพในลักษณะอื่นๆ ในปัจจุบัน จากมุมมองทางคลินิกการถ่ายภาพด้วยโฟโตอะคูสติกแสดงให้เห็นถึงความปลอดภัยและประสิทธิภาพในการวินิจฉัยบริเวณเนื้อเยื่อที่เป็นโรค โดยใช้ความเปรียบต่างของเนื้อเยื่อภายนอก แสดงการปลดปล่อยสารหรือยาเข้าสู่เส้นเลือดไปจนถึงการบำบัดและการติดตามระยะโรคได้ด้วย โดยหลักการถ่ายภาพด้วยคลื่นเสียงนี้ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบโฟโตอะคูสติกในการสร้างภาพตัวอย่างจากการตรวจวัดคลื่นเสียงที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้น ตัวอย่างจะถูกยิงด้วยเลเซอร์แบบพัลส์ ความร้อนจากพลังงานของเลเซอร์จะทำให้

ตัวอย่างเกิดการหดและขยายของตัวอย่าง ทำให้เกิดคลื่นเสียงที่มีความถี่สูง การตรวจวัดปริมาณคลื่นเสียงจากบริเวณต่างๆ ของตัวอย่างทำให้สามารถสร้างภาพจากปริมาณคลื่นเสียงที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งเทคนิคนี้สามารถถ่ายภาพลงไปได้ถึงความลึกระดับเซนติเมตร จึงนิยมนำมาใช้ในทางการแพทย์เพื่อถ่ายภาพเนื้อเยื่อที่มีความหนาแน่นค่อนข้างสูง โดยทั่วไปการตรวจวัดคลื่นเสียง ใช้อุปกรณ์วัดที่มีชื่อว่า เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric detector)[2] เป็นการตรวจวัดการสั่นหรือพลังงานกลที่เกิดขึ้นจากคลื่นเสียง อุปกรณ์นี้สามารถเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดของอุปกรณ์ชนิดนี้ในเรื่องของความละเอียดในการวัดและขนาดที่ค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับขนาดของตัวอย่าง เทคนิคที่นำมาใช้ในการวัดคลื่นเสียงนี้จึงได้มีการถูกพัฒนา รวมถึงการนำเทคนิคเชิงแสง ซึ่งเป็นเทคนิคที่ให้ความละเอียดในการวัดสูง เช่น การใช้วงแหวนสั่นพ้องของแสง และ โครงสร้างเพอร์บี-พาร์โรทที่ประกอบไปด้วยชั้นของโลหะ 2 ชั้นประกบกัน เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามเทคนิคต่างๆ ยังคงมีข้อจำกัดในตัวเอง เช่น การใช้วงแหวนสั่นพ้องของแสง ยังคงมีข้อจำกัดในเรื่องของช่วงการตอบสนอง โครงสร้างเพอร์บี-พาร์โรท ซึ่งมีลักษณะที่ไม่โปร่งใส ทำให้ไม่เหมาะสมในการนำมาใช้ร่วมกับการถ่ายภาพ ผู้ประดิษฐ์จึงนำเสนอการตรวจวัดคลื่นเสียงความถี่สูงโดยการใช้วัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่นซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ตามแรงที่มากระทำ และการใช้โครงสร้างเกรตติง การเพิ่มเกรตติงที่มีขนาดในระดับไมครอนเข้าไปในโครงสร้างจะทำให้เกิดคลื่นเสียงบนพื้นผิวของวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่น ทำให้วัสดุยืดหยุ่นมีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงความหนาได้มากขึ้น รวมถึงการเพิ่มเกรตติงยังทำให้เกิดปรากฏการณ์การสั่นพ้องของเพอร์บี-พาร์โรท ในการตรวจวัดด้วยแสงซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการวัดคลื่นเสียงความถี่สูงจากวิธีการวัดในรูปแบบเดิม

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Xia, J., Yao, J., & Wang, L. V. (2014). Photoacoustic tomography: principles and advances. *Electromagnetic waves (Cambridge, Mass.)*, 147, 1.
- [2] Paltauf, G., Hartmair, P., Kovachev, G., & Nuster, R. (2017). Piezoelectric line detector array for photoacoustic tomography. *Photoacoustics*, 8, 28-36.

### ลักษณะและความมุ่งหมายของการประดิษฐ์

ผู้ประดิษฐ์ได้ทำการออกแบบอุปกรณ์แสงสำหรับตรวจวัดคลื่นเสียงความถี่สูงด้วยโครงสร้างเกรตติงระดับไมครอนบนวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่น โดยอาศัยคลื่นเสียงที่ผิวและการแทรกสอดแบบเพอร์บี-พาร์โรทเพื่อให้ได้อุปกรณ์แสงที่สามารถตรวจวัดคลื่นเสียงความถี่สูงได้อย่างมี

ประสิทธิภาพ มีสภาพไวในการตรวจวัด และอุปกรณ์แสงที่ออกแบบสร้างขึ้นจากวัสดุที่มีความยืดหยุ่นและสภาพโปร่งใส ทำให้เหมาะสำหรับนำมาใช้ในการถ่ายภาพ การผลิตเกรตติงบนวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่น สามารถทำได้โดยการเคลือบวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่นบนแผ่นกระจกแก้วด้วยการเคลือบผิวแบบหมุนเหวี่ยง จากนั้นสร้างรูปร่างเกรตติงด้วยกระบวนการซอฟต์แวร์ลิโทกราฟี ในกระบวนการนี้จะต้องสร้างเกรตติงแม่พิมพ์ขึ้นมาก่อนด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี เนื่องจากเกรตติงที่สร้างมีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตร แล้วนำแม่พิมพ์มากดลงบนวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่น นำกระจกที่มีโครงสร้างเกรตติงไปติดกับปริซึมและนำไปต่อกับระบบแสง ที่ประกอบไปด้วยเลนเซอร์ที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงแบบโคฮีเรนต์และตัวรับภาพ หลังจากนั้นจะใส่ตัวกลางของคลื่นเสียงลงบนเกรตติง หลักการของอุปกรณ์นี้คือ แสงเลนเซอร์จะถูกยิงเข้าไปยังปริซึม ผ่านไปยังโครงสร้างเกรตติงและแสงที่ตกกระทบจะสะท้อนกลับมายังเช่นเซอร์รับภาพ แสงที่สะท้อนเข้ามาสู่เช่นเซอร์รับภาพจะเกิดเป็นแถบมืด สลับกับแถบสว่าง ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เดียวกับแทรกสอดแบบเฟอร์บี-พาร์โรท์ ซึ่งเกิดจากการแทรกสอดกันระหว่างแสงที่สะท้อนออกจากสองรอยต่อ ได้แก่ รอยต่อระหว่างปริซึมกับวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่นและรอยต่อระหว่างวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่นกับตัวกลางของคลื่นเสียง โดยโครงสร้างของเกรตติงเป็นตัวช่วยให้ปรากฏการณ์นี้สามารถมองเห็นได้เนื่องจากการเลี้ยวเบนของแสงที่ตกกระทบและสะท้อนออกจากเกรตติง หลังจากนั้นจะทำการติดตั้งโพรบสำหรับใช้เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูงให้อยู่เหนือเกรตติง เมื่อปล่อยคลื่นเสียงความถี่สูงให้ตกกระทบลงบนเกรตติง เกรตติงจะมีลักษณะเหมือนถูกกดและเมื่อคลื่นเสียงความถี่สูงตกกระทบลงบนเกรตติง จะเกิดคลื่นเสียงบนพื้นผิวเกรตติงและเกิดการกระเจิงของคลื่นพื้นผิวทำให้เกรตติงยุบตัวและมีการเปลี่ยนแปลงความหนาอย่างมากและเมื่อความหนาเกรตติงเปลี่ยนแปลง สัญญาณของแสงที่สะท้อนออกจากเกรตติงจะเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้แถบมืดและแถบสว่างที่เกิดขึ้นนั้นเกิดการเลื่อนตำแหน่ง จากบริเวณที่เคยมืด ก็กลายเป็นสว่างเมื่อความหนาเกรตติงเปลี่ยนแปลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงที่ตรวจวัดได้นั้นสามารถนำมาใช้วัดและแปลงเป็นปริมาณคลื่นเสียงความถี่สูงได้

### คำอธิบายรูปเขียนโดยย่อ

รูปที่ 1 แสดงแผนภาพขั้นตอนการประดิษฐ์

รูปที่ 2 แสดงถึงขั้นตอนที่ 1 ของการประดิษฐ์ การสร้างลวดลายเกรตติงลงบนวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่นด้วยกระบวนการซอฟต์แวร์ลิโทกราฟี

รูปที่ 3 แสดงระบบและอุปกรณ์แสงสำหรับตรวจวัดคลื่นเสียงความถี่สูงด้วยโครงสร้างเกรตติงระดับไมครอนบนวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่น โดยอาศัยคลื่นเสียงที่ผิวและการแทรกสอดแบบเฟอร์บี-พาร์โรท์

รูปที่ 4 แสดงการตรวจวัดคลื่นอัตราโซนิกด้วยด้วยโครงสร้างเกรตติงระดับไมครอนบนวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่น โดยอาศัยคลื่นเสียงที่ผิวและการแทรกสอดแบบเฟอร์บี-พาร์โรท์ โดยใช้เซนเซอร์รับภาพเป็นตัวรับความเข้มแสงที่สะท้อนออกมาจากเกรตติงและปริซึมและการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงและการเลื่อนตำแหน่งของแถบมืดและแถบสว่างที่เกิดขึ้นจากการแทรกสอดแบบเฟอร์บี-พาร์โรท์

รูปที่ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาของเกรตติงที่เกิดจากคลื่นเสียงความถี่สูงที่ทำให้เกิดการเลื่อนตำแหน่งของแถบมืดและแถบสว่างที่ตกกระทบบนเซนเซอร์รับภาพ

#### การเปิดเผยการประดิษฐ์โดยสมบูรณ์

จากรูปที่ 1 อุปกรณ์แสงสำหรับตรวจวัดคลื่นเสียงความถี่สูงด้วยโครงสร้างเกรตติงระดับไมครอนบนวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่น โดยอาศัยคลื่นเสียงที่ผิวและการแทรกสอดแบบเฟอร์บี-พาร์โรท์ มีขั้นตอนการประดิษฐ์ดังที่อธิบายไว้โดยละเอียดในแผนภาพแสดงขั้นตอนการประดิษฐ์ ดังนี้

จากรูปที่ 2 แสดงขั้นตอนที่ 1 (S1) การสร้างลวดลายเกรตติงที่มีขนาดในระดับไมครอนลงบนวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่น (1) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกใส (2) โดยใช้วิธีการเคลือบแบบใช้แรงหมุนเหวี่ยง การสร้างลวดลายบนวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่นจะใช้วิธีที่มีชื่อว่า ซอฟท์ลิโทกราฟี เป็นการใช้เกรตติงแม่พิมพ์ (3) ที่สร้างขึ้นจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีที่ตกลงบนวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่น เพื่อให้วัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่นมีรูปร่างเป็นเกรตติง (4) ตามที่ต้องการ

จากรูปที่ 3 แสดงขั้นตอนที่ 2 (S2) หลังจากสร้างลวดลายเกรตติงบนวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่น (4) แล้วนำแผ่นกระจกที่มีเกรตติงไปติดบนปริซึม (5) และนำปริซึมไปประกอบเข้าไประบบแสงที่ประกอบไปด้วย เลเซอร์ (6) ที่ให้แหล่งกำเนิดแสงแบบโคฮีเรนต์และเซนเซอร์รับภาพ (7) เมื่อฉายแสงเลเซอร์ (8) ตกกระทบบนปริซึม (5) ส่องผ่านไปยังวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่นและโครงสร้างเกรตติง (4) และแสงสะท้อน (9) ออกมา โดยแสงที่สะท้อนกลับจะเกิดจากรอยต่อระหว่างปริซึมและวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่น (10) และรอยต่อระหว่างวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่นกับตัวกลางของคลื่นเสียงความถี่สูง (11) แสงที่สะท้อนออกจากทั้งสองรอยต่อนี้เกิดการแทรกสอดกัน เรียกว่าการแทรกสอดแบบเฟอร์บี-พาร์โรท์ ทำให้เกิดแถบมืด (12) และแถบสว่าง (13) เนื่องจากความแตกต่างระหว่างเฟสของแสงที่สะท้อนออกมาจากทั้งสองรอยต่อและตกกระทบบนเซนเซอร์รับภาพ (7) ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านสายยูเอสบี (14) และฉายบนจอคอมพิวเตอร์ (15)

จากรูปที่ 4 แสดงขั้นตอนที่ 3 (S3) และขั้นตอนที่ 4 (S4) การวางหัวโพรบแหล่งกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูง (17) ไว้เหนือเกรตติง (4) สำหรับการวัดคลื่นเสียงความถี่สูง เมื่อคลื่นเสียงความถี่สูง (18) สูงตกกระทบลงบนเกรตติงจะทำให้เกรตติงขยับตัวลงอย่างมาก เนื่องจากปรากฏการณ์การเกิดคลื่นเสียงบนพื้นผิวของเกรตติงและการกระเจิงของคลื่นเสียงบนพื้นผิว ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความหนาของเกรตติง เนื่องจากการถูกกดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงนั้นสามารถตรวจจับได้ด้วยแสงที่ตกกระทบระหว่างรอยต่อระหว่างปริซึมและวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่น (10) และรอยต่อระหว่างวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่นกับตัวกลางของคลื่นเสียงความถี่สูง (11) ซึ่งเมื่อความหนาของวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่นเปลี่ยนแปลงทำให้เฟสของแสงที่สะท้อนมาจากรอยต่อระหว่างเกรตติงและตัวกลางของคลื่นเสียงความถี่สูง เกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้แสงที่แทรกสอดกันเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้แถบมืด (12) และแถบสว่าง (13) เกิดการเลื่อนตำแหน่ง ทำให้จากเดิมบริเวณที่เคยเป็นแถบมืด กลายเป็นแถบสว่าง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงทำให้สามารถตรวจวัดคลื่นเสียงความถี่สูงที่ตกกระทบลงบนเกรตติงได้

จากรูปที่ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาของโครงสร้างเกรตติงซึ่งเกิดจากกระทบของคลื่นเสียงความถี่สูงทำให้แถบมืดและแถบสว่างเปลี่ยนตำแหน่ง จากเดิมก่อนปล่อยคลื่นเสียงความถี่สูงเกรตติงยังไม่ขยับตัว (4) แสงที่สะท้อนกลับออกมาจากรอยต่อระหว่างปริซึมกับวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่น (10) และรอยต่อระหว่างวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่นกับตัวกลางของคลื่นเสียงความถี่สูง (11) แทรกสอดกันทำให้เกิดแถบมืดแถบสว่างแล้วตกกระทบลงบนเซนเซอร์รับภาพและถูกฉายผ่านหน้าจอกอมพิวเตอร์ เมื่อปล่อยคลื่นเสียงความถี่สูง (18) ตกกระทบลงบนเกรตติง เกรตติงจะเปลี่ยนแปลงความหนา (19) ทำให้เฟสของแสงที่สะท้อนออกจากรอยต่อระหว่างวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่นและตัวกลางของคลื่นเสียงความถี่สูง เปลี่ยนแปลง เนื่องจากระยะทางที่แสงเดินทางเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงเฟสของแสงดังกล่าวเมื่อสะท้อนออกมาแทรกสอดกับแสงที่สะท้อนจากรอยต่อระหว่างปริซึมกับวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่น ทำให้ตำแหน่งของแถบมืดและแถบสว่างเลื่อนจากตำแหน่งเดิม จากที่ตำแหน่งที่เคยเป็นแถบมืดจะสว่างขึ้นและแถบสว่างจะมีลดลง

### วิธีการในการประดิษฐ์ที่ดีที่สุด

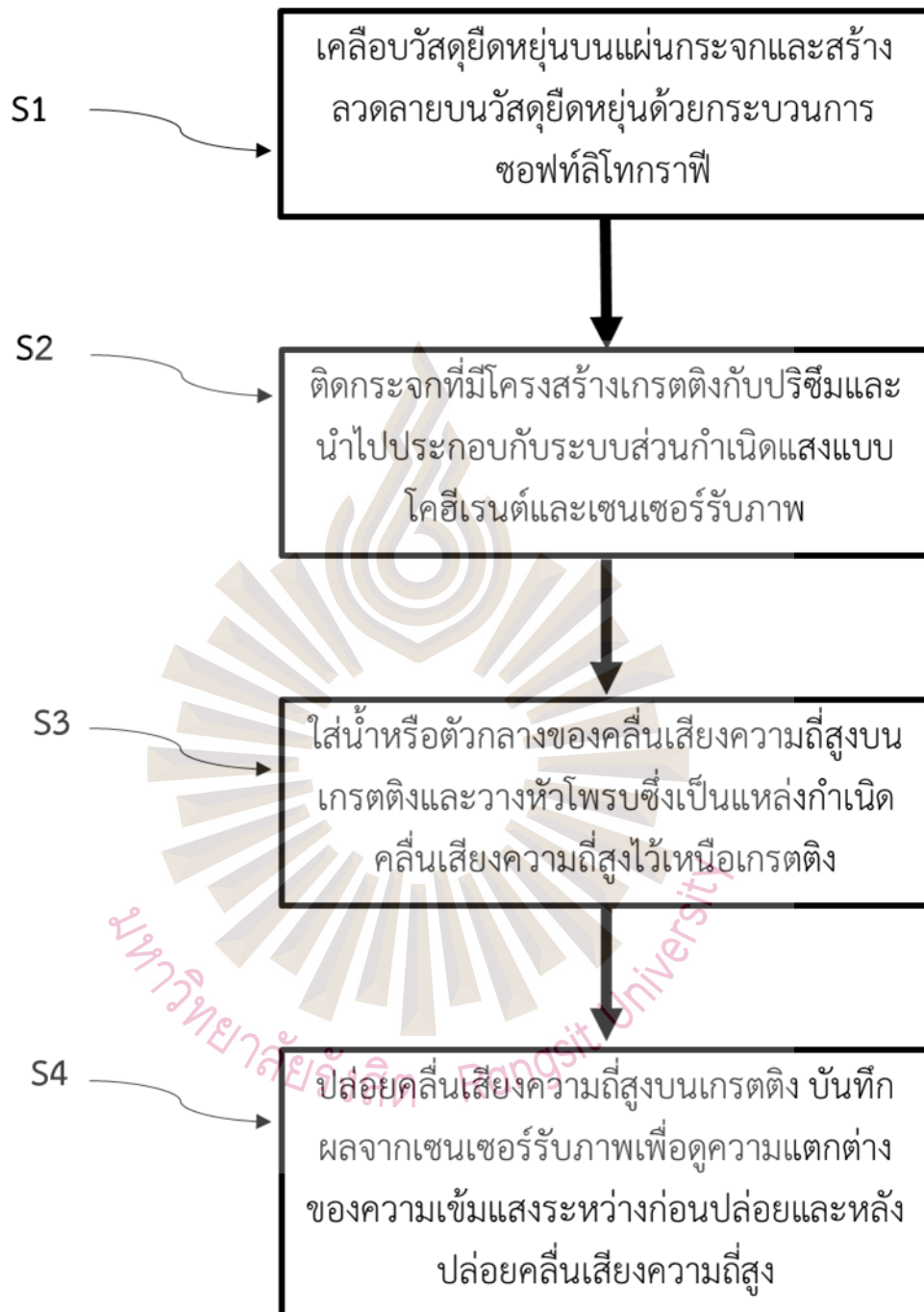
เหมือนที่ได้บรรยายในหัวข้อการเปิดเผยการประดิษฐ์โดยสมบูรณ์



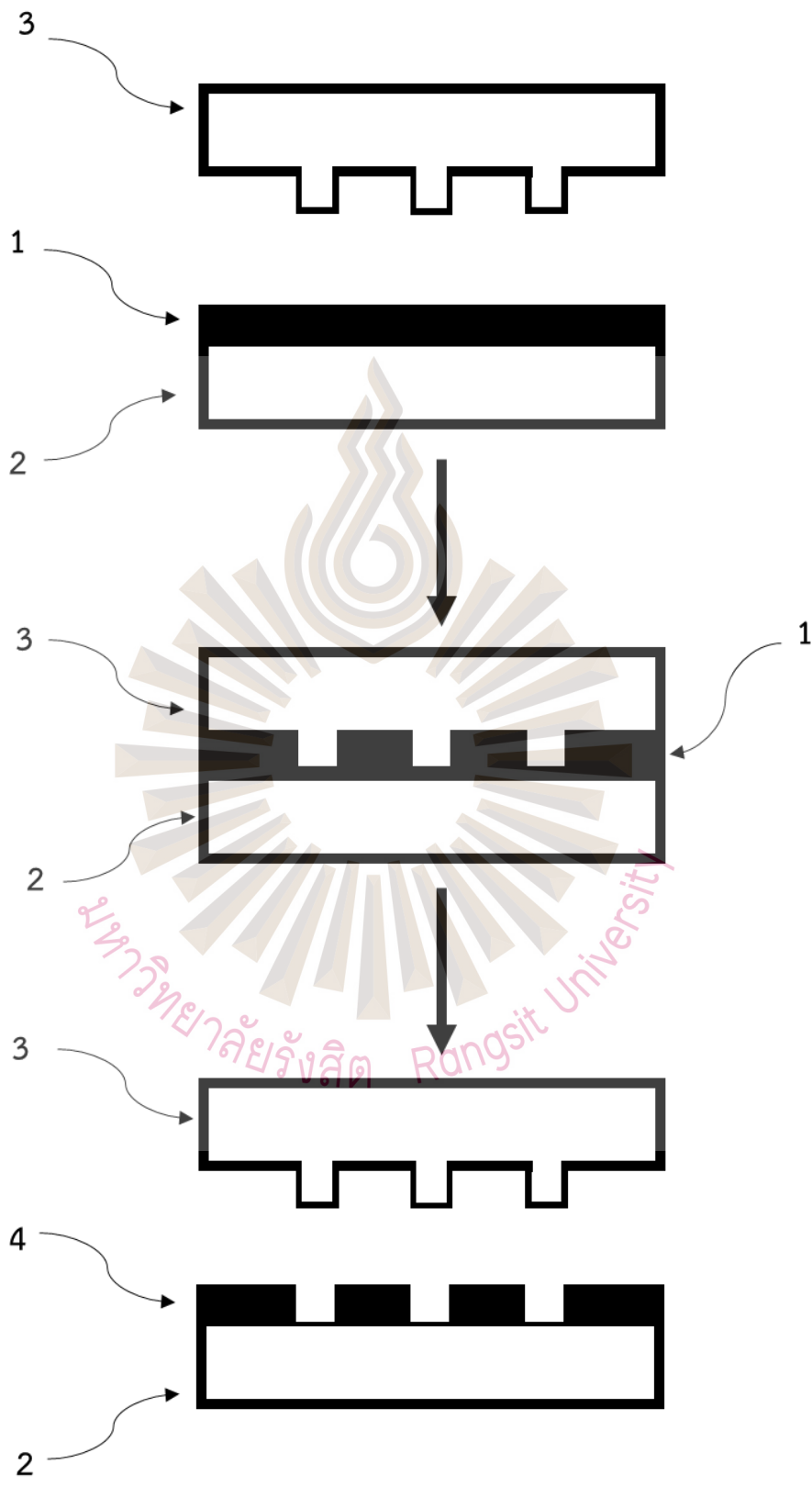
### ข้อถ้อยสิทธิ

1. อุปกรณ์แสงสำหรับตรวจวัดคลื่นเสียงความถี่สูงด้วยโครงสร้างเกรตติงระดับไมครอนบนวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่น โดยอาศัยคลื่นเสียงที่ผิวและการแทรกสอดแบบเฟอร์บี-พาร์โรท์ อาศัยคุณสมบัติของวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่น สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างต่อแรงที่มากระทำได้ง่าย รวมถึงการเกิดคลื่นเสียงบนพื้นผิวของวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่นและการกระเจิงของคลื่นเสียงบนพื้นผิว เมื่อคลื่นเสียงความถี่สูงตกกระทบทำให้เกรตติงเกิดการยุบตัวลงอย่างมาก สามารถนำมาใช้เป็นตัวรับรู้ในการตรวจวัดคลื่นเสียงความถี่สูงได้และมีสภาพไวในการตรวจวัดอย่างมาก
2. อุปกรณ์แสงสำหรับตรวจวัดคลื่นเสียงความถี่สูงด้วยโครงสร้างเกรตติงระดับไมครอนบนวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่น โดยอาศัยคลื่นเสียงที่ผิวและการแทรกสอดแบบเฟอร์บี-พาร์โรท์ ใช้หลักการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงความหนาของเกรตติงอาศัยการแทรกสอดแบบเฟอร์บี-พาร์โรท์ โดยการใช้แสงแบบโคฮีเรนต์ฉายเข้าไปในปริซึมและผ่านไปยังเกรตติง และวัดความหนาของเกรตติงจากการแทรกสอดของแสงที่สะท้อนจากระหว่างรอยต่อปริซึมกับวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่นและรอยต่อระหว่างวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่นกับตัวกลางของคลื่นเสียงความถี่สูง เมื่อปล่อยคลื่นเสียงความถี่สูงตกกระทบลงบนเกรตติง เกรตติงจะเปลี่ยนแปลงความหนาทำให้เฟสของแสงที่สะท้อนออกจากรอยต่อระหว่างวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่นกับตัวกลางของคลื่นเสียงความถี่สูงเปลี่ยนแปลงเนื่องจากระยะทางที่แสงเดินทางเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงเฟสของแสงดังกล่าวเมื่อสะท้อนออกมาแทรกสอดกับแสงที่สะท้อนจากรอยต่อระหว่างปริซึมกับวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่น ทำให้ตำแหน่งของแถบมืดและแถบสว่างเลื่อนจากตำแหน่งเดิม จากที่ตำแหน่งที่เคยเป็นแถบมืดจะสว่างขึ้นและแถบที่สว่างจะมีมืดลง ซึ่งแถบมืดและแถบสว่างที่เกิดขึ้นสามารถถูกตรวจจับไว้ด้วยเซนเซอร์รับภาพและฉายบนจอคอมพิวเตอร์ การตรวจวัดคลื่นอัตราไซคลิกที่ตกกระทบลงบนเกรตติงสามารถวัดด้วยการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงที่เกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่ง ทั้งแถบมืดหรือแถบสว่างที่ตรวจวัดได้ด้วยเซนเซอร์รับภาพ

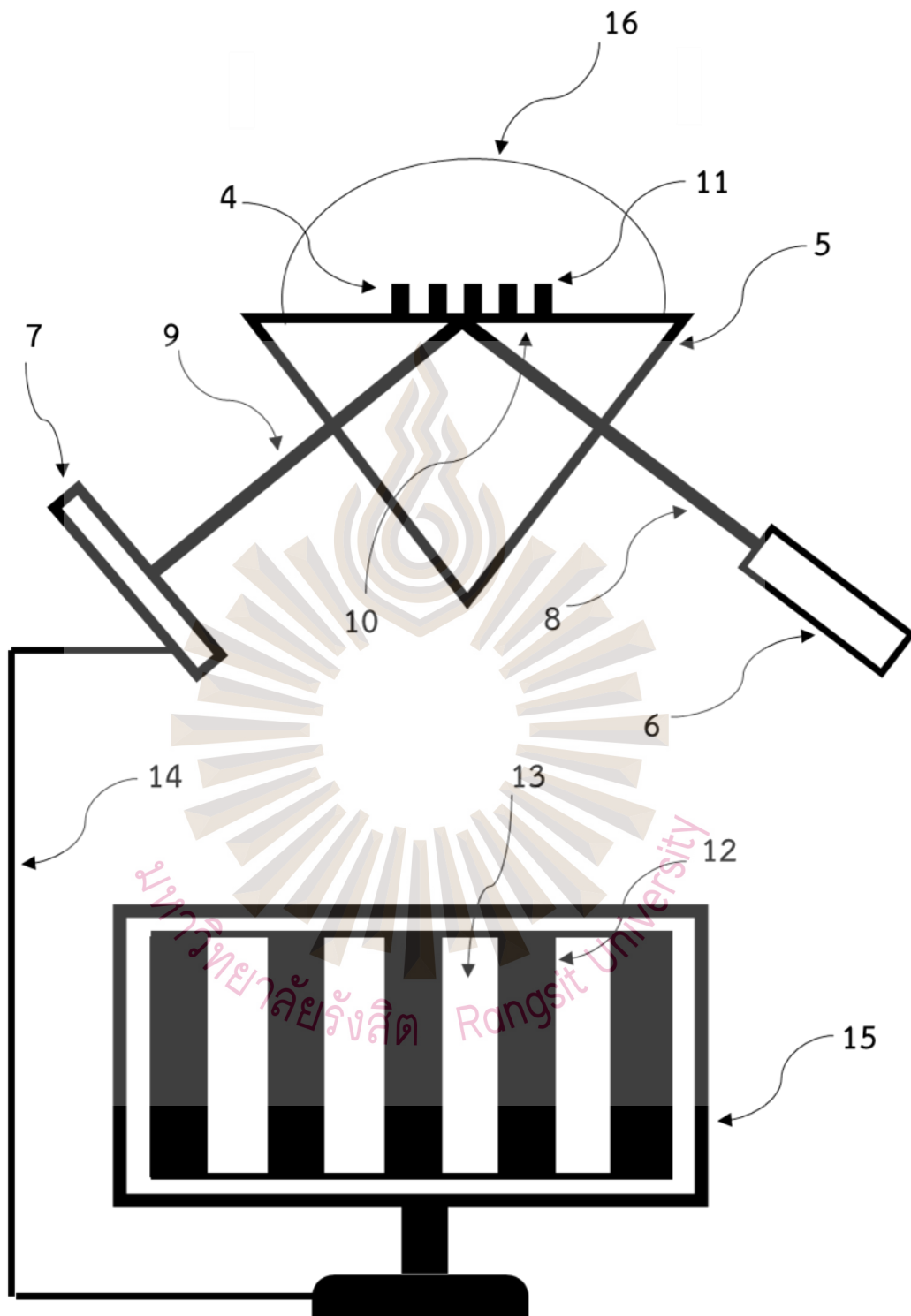




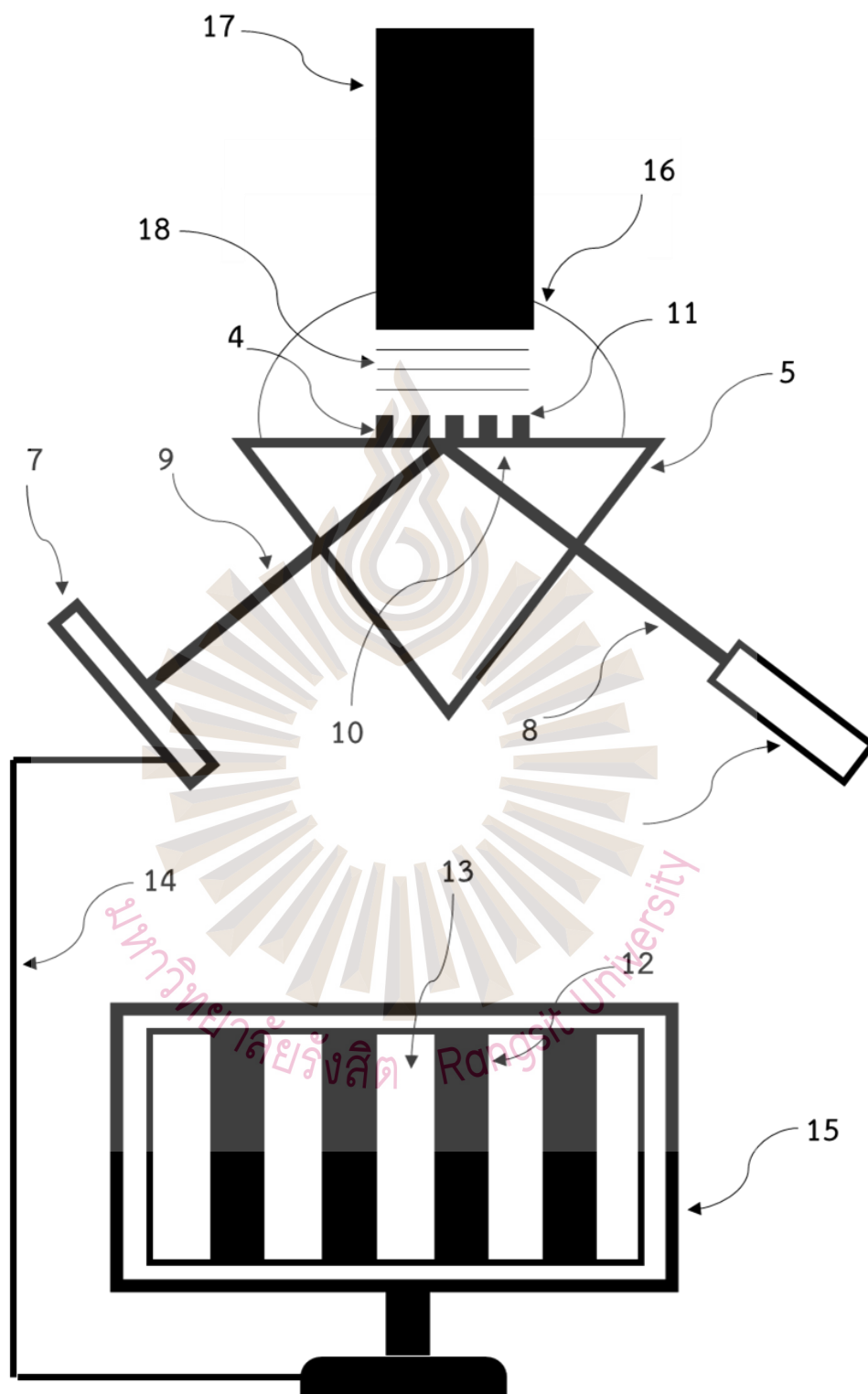
รูปที่ 1



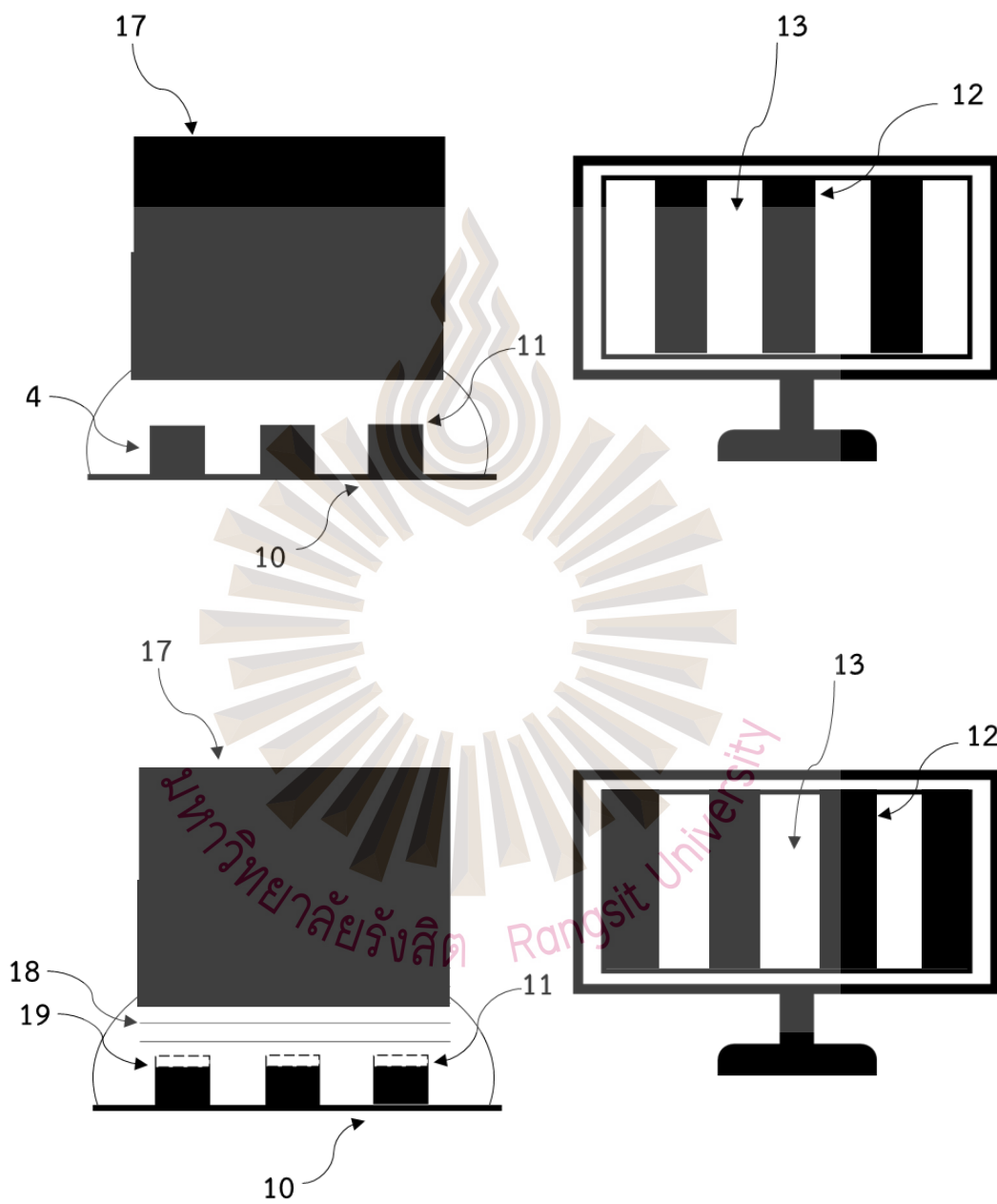
รูปที่ 2



รูปที่ 3



รูปที่ 4



รูปที่ 5

## บทสรุปการประดิษฐ์

อุปกรณ์แสงสำหรับตรวจวัดคลื่นเสียงความถี่สูงด้วยโครงสร้างเกรตติงระดับไมครอนบนวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่น โดยอาศัยคลื่นเสียงที่ผิวและการแทรกสอดแบบเฟอร์บี-พาร์โรท์ เป็นการออกแบบเทคนิคการตรวจวัดคลื่นเสียงความถี่สูงที่มีสภาพไวในการตรวจวัดสูง และสามารถนำไปใช้จริงในการถ่ายภาพด้วยหลักการกล้องจุลทรรศน์ถ่ายภาพด้วยคลื่นเสียง โดยโครงสร้างเกรตติงระดับไมครอนบนวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่นจะทำหน้าที่เป็นตัวรับรู้คลื่นเสียงความถี่สูง เมื่อคลื่นเสียงเดินทางผ่านตัวกลางและตกกระทบบนเกรตติงที่ทำจากวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่นที่สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้ตามแรงที่มากระทำ การที่คลื่นเสียงตกกระทบบนวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่นทำให้เกิดคลื่นเสียงพื้นผิวและเกิดการกระเจิงคลื่นเสียงพื้นผิวเนื่องจากเกรตติงทำให้เกรตติงเกิดการยุบตัวลงอย่างมาก โดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของเกรตติงตรวจจับได้ด้วยหลักการแทรกสอดของแสงแบบเฟอร์บี-พาร์โรท์ ที่นำมาใช้ในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงความหนาที่อยู่ระหว่างสองรอยต่อที่เกิดการสะท้อนของแสงและเกิดการแทรกสอดกันเกิดเป็นแถบมืดและแถบสว่าง และเมื่อความหนาดังกล่าวเปลี่ยนแปลงทำให้ตำแหน่งของแถบมืดและแถบสว่างเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งการตรวจวัดความเข้มแสงของแสงที่สะท้อนออกจากจะสามารถตรวจจับคลื่นเสียงความถี่สูงได้ แม้คลื่นเสียงจะมีแอมพลิจูดที่ต่ำมาก



## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	ชญานิศา สุขเกษม
วัน เดือน ปีเกิด	3 พฤษภาคม 2539
สถานที่เกิด	จังหวัดชลบุรี ประเทศไทย
ประวัติการศึกษา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์, 2560
ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่ได้รับ ระหว่างการศึกษา	1. ทุนพัฒนาศักยภาพบุคลากร STEM 2. ทุนอุดหนุนจากสำนักงานประสานงานโครงการวิจัย การพัฒนาเศรษฐกิจจากฐานความหลากหลายทางชีวภาพ 3. ทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันวิจัย มหาวิทยาลัย รังสิต รอบที่ 1 ปีการศึกษา 2561 4. ทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันวิจัย มหาวิทยาลัย รังสิต รอบที่ 3 ปีการศึกษา 2562
ที่อยู่ปัจจุบัน	96/12 หมู่ 9 ตำบล บางนาง อำเภอบางนา จังหวัด ชลบุรี 20160