

การสร้างลวดลายด้วยวิธีการโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้แมสค์จากแสงสีน้ำเงิน

MASKLESS PHOTOLITHOGRAPHY BY USING BLU-RAY TECHNOLOGY



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุนาโน

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# MASKLESS PHOTOLITHOGRAPHY BY USING BLU-RAY TECHNOLOGY



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING  
IN NANOMATERIAL ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาภาควิชาและนาโนเทคโนโลยี  
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
โครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การสร้างลวดลายด้วยวิธีการโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้แมสค์จากแสงสีน้ำเงิน

Special Project Title MASKLESS PHOTOLITHOGRAPHY BY USING BLU-RAY TECHNOLOGY

นักศึกษา นาย วัฒนรัช ศรีจารุทรศน์  
รหัสประจำตัว 551100044  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี  
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน  
ปีการศึกษา 2558  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร. ดารินี พรหมโยธิน

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุธี ชูดีไพจิตร	
ดร.ทศติยาภรณ์ ทิวาวงศ์	
ผศ.ดร.ดารินี พรหมโยธิน	
ดร.นวพันธ์ ชัยนิกิจ	

สถาบันเทคโนโลยี

ภาควิชาภาควิชาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน  
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธี ชูดีไพจิตร)

หัวหน้าภาควิชาภาควิชาและนาโนเทคโนโลยี

วันที่ 23 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง

การสร้างลวดลายด้วยวิธีการโฟโตลิโทกราฟี  
แบบไม่ใช้แมสค์จากแสงสีน้ำเงิน

นักศึกษา

นายวัฒนรักษ์ ศิริจารุพรรณ

รหัสประจำตัว

55110044

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมวัสดุนาโน

พ.ศ.

2558

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผศ.ดร.ดารินี พรหมโยธิน

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ดร.นวพันธ์ ชัยนิกิจ

ดร.กิตติพงษ์ ตันตีสันติสม

ดร.ชูเกียรติ ตันศราวิพุธ

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการสร้างลวดลายขนาดเล็กโดยใช้แสงสีน้ำเงินจากหัวอ่านแผ่นบลูเรย์ดิสก์ที่มีความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร ลงบนชิ้นงานแผ่นซิลิกอนที่เคลือบด้วยสารไวแสง ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างลวดลายแบบไม่ใช้โฟโตแมสค์ เพื่อสร้างระบบเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างลวดลายเพื่อการทดลองหลายด้านเช่น เซ็นเซอร์ (Sensor) ไมโครฟลูอิดิกส์ (Microfluidics) ระบบเครื่องกลจุลภาค (MEMS) เป็นต้น โดยระบบเครื่องมือนี้ใช้ฐานควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์และมีการเคลื่อนที่ตามชุดคำสั่ง (Programming code) เพื่อให้ได้ลวดลายตามที่ต้องการ ระบบเครื่องมือวิธีนี้ช่วยให้สามารถสร้างลวดลายได้หลากหลายรูปแบบเอื้อแก่การทดลองจำนวนมาก โดยการทดลองจะคำนึงถึงพารามิเตอร์ต่างๆที่ส่งผลต่อการเขียนลวดลาย เช่น ศักย์ไฟฟ้าของหัวอ่านบลูเรย์ ความเร็วในการเคลื่อนที่ ระยะโฟกัส เป็นต้น เมื่อการทดลองสามารถหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดได้แล้วจะมีการทดลองขีดความสามารถของเครื่องมือก่อนการนำไปใช้จริง ได้แก่ ความสามารถในการทดลองซ้ำ (repeatability) ความสามารถในการเขียนลวดลายขนาดเล็ก (resolution) และความสามารถในการเขียนลวดลายในพื้นที่กว้าง (uniformity)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	MASKLESS PHOTOLITHOGRAPHY BY USING BLU-RAY TECHNOLOGY
Student	Mr. Wattanaruk Sirjarutus
Student ID	55110044
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterial Engineering
Year	2015
Special Project Advisor	Asst. Prof. Darinee Phromyothin
Special Project Co-advisor	Dr. Navaphan Kayunkid Dr. Kittipong Tantisantisom Dr. Chookiat Tansarawiput

### Abstract

Blu-ray produced light wavelength 405 nm that can be used in lithography system as maskless photolithography. By using Blu-ray head assembly combined with 3D motion stage creates a system for maskless photolithography for many application experiment as sensor, microfluidics, and MEMs. 3D motion stage controlled by programming code and patterns generated by using G-code made the experiment have more variety patterns. The experiment studied the parameters, such as voltage of head assembly, speed of stage, and focusing, to create a smallest and sharpness linear of pattern and lead to next experiment for testing the system with 3 abilities as repeatability, resolution, and uniformity.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. ดารินี พรหมโยธิน, ดร.นวพันธ์ ชัยนิกิจ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ดร.กิตติพงษ์ ตันติสันติสม, ดร.ชูเกียรติ ตันศราวีฑูร ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ยอมเสียสละอันมีค่าคอยให้คำแนะนำ คำปรึกษา รวมถึงสอนเกี่ยวกับแนวคิดเชิงวิทยาศาสตร์ ตรรกศาสตร์ การแก้ปัญหา วิธีการนำเสนอ ทำให้รู้จักเกี่ยวกับการทำงานวิจัย การเรียนต่อในสายอาชีพนี้ และส่งผลให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปจนถึงระดับที่สามารถมีผู้มีความสามารถมารับช่วงต่อยอดต่อไปได้ ขอขอบคุณ ดร. ชูเกียรติ ตันศราวีฑูร ที่คอยดูแลและเห็นดเห็นอระหว่างการทำวิจัยตลอด 1 ปี ขอขอบคุณ กิตติพงษ์ ตันติสันติสม ที่คอยถามความคืบหน้าและให้คำแนะนำแนวทางการแก้ปัญหาระหว่างการทำโครงการวิจัย

สิ่งสำคัญที่ขาดไม่ได้ก็คือ กำลังใจ จากบุคคลอันเป็นที่รัก ขอขอบคุณ นางสาวธัญจิรา ไพบูลย์ รัตนกร ผู้คอยให้กำลังใจ ช่วยเหลือและสนับสนุน ขอขอบคุณนายกันตพัฒน์ นากะพันธ์, นางสาวพรพรรณ นันทนาภิรมย์, นางสาวปิยวรรณ ลีเพ็ง, นายสิทธิธนต์ เจริญสุวรรณ, นายวิรัช ยุกพันธ์, นายอาณัติ ภัทรอนกสิน, นางสาวเบญจพร แซ่ตั้ง, นางสาวนภัสสร เจนสุภการ, นายบารเมษฐ์ สายสุวรรณ, นายกิตติพันธ์ ลาภเกียรติกุล, และนายธีรวัช พิพัฒน์พงศา เพื่อนผู้คอยร่วมทุกข์สุขตั้งแต่ต้นจนจบการทำโครงการวิจัย สุดท้ายนี้ขอขอบคุณนางราวักษ์ จงรักษ์ มารดาผู้คอยให้กำลังใจสำคัญยิ่ง และ นางสาววาราวีณ์ นายพิชญ์วัฒน์ ศิริจารุทรศน์ พี่สาวและบิดาผู้คอยให้คำปรึกษาด้านวิชาการ

วิฒนรักษ์ ศิริจารุทรศน์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ .....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนของการวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี หลักการ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 ลิโทกราฟี (Lithography).....	4
2.2 โฟโตลิโทกราฟี (Photolithography).....	4
2.2.1 สารไวแสง (Photoresist).....	5
2.2.2 สารล้างฟิล์ม (Developer).....	5
2.2.3 โฟโตลิโทกราฟีแบบใช้โฟโตแมสค์ (Mask Photolithography).....	5
2.2.4 โฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้โฟโตแมสค์ (Maskless Photolithography).....	5
2.2.5 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการสร้างสวดลาย (Parameter) .....	7
2.3 หัวอ่านบลูเรย์ (Blu-ray Writer).....	8
2.3.1 เครื่องตรวจจับแสง (Photodetector) .....	9
2.3.2 คอยล์มอเตอร์ (Coil Motor).....	10
2.3.3 ศักย์ไฟฟ้ากับความเข้มแสงของบลูเรย์ .....	10
2.3.4 การหาจุดโฟกัสอย่างง่าย โดยใช้หลักการของเครื่องตรวจจับแสง.....	10
2.4 การเคลือบผิววัสดุ (Spin Coating).....	11
2.5 วิธีการล้างสารไวแสงด้วยสารล้างฟิล์ม (Develop) .....	12
2.6 เครื่องควบคุมแกนสามมิติ (3D-Axis Motion Stage).....	12
2.7 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Review).....	12
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	14
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย .....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย .....	14
3.1.2 แผ่นซิลิกอน (Si-Wafer) .....	15
3.1.3 เครื่องควบคุมแกนสามมิติ (3D-Axis Motion Stage) .....	15
3.1.4 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Digital Microscope).....	16
3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	20
3.2.1 การเตรียมฟิล์มของสารไวแสง .....	20
3.2.2 การเก็บชิ้นงานหลังเคลือบด้วยสารไวแสง .....	20
3.2.3 การสร้างลวดลาย.....	20
3.2.4 การทดลองหาขีดความสามารถของระบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้โฟโตแมสค์	25
3.2.5 การล้างสารไวแสง.....	26
3.2.6 การตรวจสอบผลการทดลอง .....	26
3.2.7 การวัดขนาดและความขรุขระของลวดลาย .....	26
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	32
4.1 ผลการทดลองการเขียนลวดลาย .....	32
4.2 ผลการทดลองการแก้ปัญหาหระเหยโฟกัสโดยกล้องจุลทรรศน์ยูเอสบี .....	34
4.3 ผลการทดลองการแก้ปัญหาการจัดตำแหน่ง (Alignment) .....	35
4.4 ผลการทดลองการสอบเทียบเครื่อง (Calibration).....	38
4.5 ผลการทดลองขีดความสามารถของระบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้โฟโตแมสค์ .....	40
บทที่ 5 .....	48
สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ .....	48
5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย.....	48
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	49
บรรณานุกรม.....	54
ประวัติผู้เขียน.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างแสดงการทำโฟโตริซิสโดยใช้โฟโตแมสค์ (Mask Photolithography).....	48
2.2 ตัวอย่างแสดงการทำโฟโตริซิสโดยไม่ใช้โฟโตแมสค์ (Maskless Photolithography).....	48
2.3 (a.) การโปรเจกชันหาตำแหน่งของเครื่องEBL (b.) การลากผ่านเพื่อสร้างลวดลาย) .....	6
2.4 (a)ภาพด้านบนของหัวอ่านบลูเรย์ SF-AW210 (b)ภาพการเดินทางของแสงสีน้ำเงิน (405 นาโนเมตร) ก่อนออกมาจากเลนส์ใกล้วัตถุ.....	9
2.5 วิธีการหาจุดโฟกัสโดยอัตโนมัติใช้ทฤษฎีแอสติกมาติก.....	10
2.6 ภาพที่สังเกตได้จากกล้องจุลทรรศน์ยูเอสบี .....	11
3.1 Positive photoresist ma-P 1205.....	14
3.2 Developer ma-D 331 .....	15
3.3 แผ่นซิลิกอน .....	15
3.4 เครื่องCNC.....	16
3.5 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง.....	16
3.6 กล้องจุลทรรศน์ยูเอสบี .....	17
3.7 กล้องป้องกันรังสียูวี .....	17
3.8 เครื่องเคลือบผิววัสดุ.....	18
3.9 บีมสเปกโตรกราฟ.....	18
3.10 เครื่องให้ความร้อน .....	19
3.11 ชุดอุปกรณ์ตัดแผ่นซิลิกอน.....	19
3.12 มัลติมิเตอร์ .....	19
3.13 การเก็บรักษาชิ้นงานในกระตาดฟอยด์ .....	20
3.14 ส่วนประกอบของชุดการทำโฟโตลิโทกราฟีโดยไม่ใช้โฟโตแมสค์.....	21
3.15 โครงสร้างการสร้างลวดลายด้วยวิธีโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้แมสค์ .....	21
3.16 หน้าต่างโปรแกรม Mach3Mill.....	22
3.17 กดที่ปุ่ม Load G-Code เพื่อเลือกโค้ดของลวดลายเข้าสู่โปรแกรม .....	22
3.18 เมื่อเลือกโค้ดเข้าสู่โปรแกรมแล้ว โปรแกรมจะแสดงรูปแบบของลวดลายตามโค้ดที่ได้รับ .....	23
3.19 ทำการปรับแกน Z ขึ้น-ลงเพื่อหาระยะโฟกัสโดยเทียบโฟกัสไปพร้อมกับการเคลื่อนที่ .....	23
3.20 ทำการตรวจสอบความเอียงของชิ้นงานโดยการเทียบโฟกัสตั้งแต่จุด A-E ให้ได้ภาพเหมือนหรือ ใกล้เคียงกัน .....	23
3.21 เมื่อเซ็ระบบพร้อมแล้วกดปุ่ม Cycle Start เพื่อเริ่มการทำงานของโปรแกรม .....	24
3.22 การทดลองหาระยะโฟกัสของแสงบลูเรย์ และภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ยูเอสบี .....	24

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.23 ลวดลายการทำการสอบเทียบเครื่องมือ .....	25
3.24 หน้าต่างโปรแกรมเริ่มแรก .....	26
3.25 กดเลือกที่ Plugins --> analyze stripes v2.4.4 เพื่อเลือกรูปภาพที่จะทำการวัด.....	27
3.26 ทำการวัดขนาดของ label ของรูปภาพเพื่อทำการ Set Scale.....	27
3.27 เลือกที่ Analyze --> Set Scale.....	28
3.28 กรอกขนาดของ label ที่ช่อง Known Distance เพื่อเป็นการทำ baseline ข้อมูลทั้งหมดจากนั้น กด OK.....	28
3.29 เลือกตำแหน่งของลวดลายที่ต้องการวัด จากนั้นกดปุ่ม OK.....	29
3.30 จะได้ภาพส่วนที่ต้องการวัดขนาด จากนั้นกดปุ่ม OK.....	29
3.31 โปรแกรมจะทำการวัดขนาดของลวดลายและความขรุขระของลวดลาย โดยจะแสดงผลที่ หน้าต่าง Log.....	30
3.32 Flow Chart แสดงแผนผังการทำงานโครงงานวิจัย .....	31
4.1 ลวดลายที่ปรากฏหลังการให้แสงสีน้ำเงินจากหัวอ่านบลูเรย์.....	32
4.2 ส่วนปลายของเส้นลวดลายที่เกิดการอันเดอร์เดเวลอป.....	33
4.3 ภาพแสดงผลของการไม่จัดตำแหน่ง (a.) เส้นลวดลาย ณ จุดเริ่มต้นการทดลอง (b.) เส้นลวดลาย ส่วนปลายของภาพ (a.).....	33
4.4 เปรียบเทียบภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ยูเอสบี (a.) ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ยูเอสบี (b.) ตำแหน่งที่คาดว่า เป็นโฟกัส.....	34
4.5 การทดลองหาเงื่อนไขที่เหมาะสมทั้งระยะโฟกัส และศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้หัวอ่าน .....	34
4.6 กราฟแสดงขนาดและความขรุขระของลวดลาย (a.) เงื่อนไขที่ความเร็ว 45 $\mu\text{m/s}$ , กระแส 1.8 mA (b.) เงื่อนไขที่ความเร็ว 50 $\mu\text{m/s}$ , กระแส 1.8 mA (c.) เงื่อนไขที่ความเร็ว 100 $\mu\text{m/s}$ , กระแส 3.6 mA (d.) เงื่อนไขที่ความเร็ว 120 $\mu\text{m/s}$ , กระแส 3.6 mA.....	35
4.7 ภาพแสดงการตรวจสอบระยะห่างของชิ้นงานกับหัวอ่านบลูเรย์ (a.) ตำแหน่งที่ทำการวัดระยะห่าง ระหว่างหัวอ่านบลูเรย์กับชิ้นงาน (b.) ภาพที่ได้จากกล้อง .....	36
4.8 การทดลองเขียนลวดลายหลังแก้ปัญหาการจัดตำแหน่ง (a.) ลวดลายในพื้นที่ 1x1 ตารางมิลลิเมตร (b.) ลักษณะลวดลายจากภาพ (a.).....	37
4.9 การทดลองเขียนลวดลายหลังแก้ปัญหาการจัดตำแหน่งซ้ำ (a.) ลวดลายในพื้นที่ 1x1 ตาราง มิลลิเมตร (b.) ลักษณะลวดลายจากภาพ (a.).....	37
4.10 ลวดลายที่มีการทดสอบเงื่อนไขจำนวนมาก .....	38
4.11 กราฟแสดงขนาดและความขรุขระของลวดลาย (a.) เงื่อนไขที่ความเร็ว 50 $\mu\text{m/s}$ , กระแส 1.8 mA (b.) เงื่อนไขที่ความเร็ว 55 $\mu\text{m/s}$ , กระแส 1.8 mA (c.) เงื่อนไขที่ความเร็ว 100 $\mu\text{m/s}$ , กระแส 3.6 mA (d.) เงื่อนไขที่ความเร็ว 120 $\mu\text{m/s}$ , กระแส 3.6 mA.....	39
4.12 (a.) ลวดลายที่เกิด ณ ตำแหน่งโฟกัสที่ Z19 (b.) ลวดลายที่เกิด ณ ตำแหน่ง Z24 .....	40
4.13 (a.) ผลการสอบเทียบเครื่อง (b.) ผลการทำการทดลองซ้ำ.....	41

## สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.14 กราฟแสดงขนาดและความขรุขระของลวดลายเปรียบเทียบกันระหว่างผลการทดสอบเครื่องและผลการทดลองซ้ำ (a.) เปรียบเทียบเงื่อนไขที่ความเร็ว 50 $\mu\text{m/s}$ , กระแส 1.8 mA (b.) เปรียบเทียบเงื่อนไขที่ความเร็ว 55 $\mu\text{m/s}$ , กระแส 1.8 mA (c.) เปรียบเทียบเงื่อนไขที่ความเร็ว 100 $\mu\text{m/s}$ , กระแส 3.6 mA (d.) เปรียบเทียบเงื่อนไขที่ความเร็ว 120 $\mu\text{m/s}$ , กระแส 3.6 mA.....	42
4.15 ลวดลายที่ใช้เงื่อนไขความเร็ว 180 $\mu\text{m/s}$ (a.) ณ ตำแหน่ง Z15 (b.) ณ ตำแหน่ง Z19 .....	43
4.16 ภาพจำลองการเคลื่อนที่ของจุดแสง.....	43
4.17 เงื่อนไขที่ความเร็ว 20 $\mu\text{m/s}$ , 0.9 mA (a.) ลวดลายที่มีระยะห่างกัน 20 $\mu\text{m}$ (b.) ลวดลายที่มีระยะห่างกัน 10 $\mu\text{m}$ .....	44
4.18 เงื่อนไขที่ความเร็ว 40 $\mu\text{m/s}$ , 1.8 mA (a.) ลวดลายที่มีระยะห่างกัน 20 $\mu\text{m}$ (b.) ลวดลายที่มีระยะห่างกัน 10 $\mu\text{m}$ .....	44
4.19 กราฟแสดงขนาดและความขรุขระของลวดลาย (a.) เงื่อนไขที่ความเร็ว 20 $\mu\text{m/s}$ , 0.9 mA (b.) เงื่อนไขที่ความเร็ว 40 $\mu\text{m/s}$ , 1.8 mA.....	48
4.20 การทดลองที่แสดงแสงที่เกิดจากการแทรกสอด.....	48
4.21 ตัวอย่างลวดลายที่ทำการทดลอง.....	46
4.22 กราฟเปรียบเทียบขนาดของลวดลายที่เปลี่ยนไปเมื่อพื้นที่ในการทดลองมีขนาดใหญ่ขึ้น.....	47

# สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างวิธีการต่างๆในระเบียบวิธีการทำโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช่โฟโตแมสค์.....	7
---	---



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในศตวรรษที่ 21 เทคโนโลยีทั่วโลกได้ถูกพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว ไม่ว่าจะเป็น เทคโนโลยีการสื่อสาร เทคโนโลยีการแพทย์ เทคโนโลยีที่ใช้ในอุตสาหกรรม เป็นต้น เทคโนโลยีต่างๆ ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาในช่วง 10-15 ปีมานี้เติบโตขึ้นอย่างรวดเร็วได้ ส่วนหนึ่งเกิดจากการนำความรู้เกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้งาน ดังเช่นในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อาทิ สมาร์ทโฟน แท็บเล็ต มีการพัฒนาอย่างก้าวกระโดดมากในช่วงไม่ถึง 10 ปี เพิ่มความสะดวกสบายในด้านการสื่อสารเป็นอย่างมาก ทั้งนี้ความต้องการของผู้บริโภคนั้นก็รวดเร็วเช่นกัน ซึ่งสิ่งที่คุณต้องการคือความเร็วในการตอบสนองที่มากขึ้นของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทุกชนิด โดยตัวแปรสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพในด้านความเร็วของสมาร์ทโฟน หรือแท็บเล็ตนั้นก็คือ ไมโครชิปภายในของแต่ละอุปกรณ์ และภายในตัวของไมโครชิปนี้มีทรานซิสเตอร์อยู่เป็นจำนวนมาก ทรานซิสเตอร์เหล่านี้เกิดจากการสร้างลวดลายภายในของตัวไมโครชิป ยิ่งทรานซิสเตอร์มีจำนวนมากความเร็วของอุปกรณ์ก็ยิ่งมาก [1] ดังนั้นลวดลายภายในของไมโครชิปยิ่งเล็กเท่าใด ก็จะทำให้สร้างทรานซิสเตอร์ได้มากขึ้นเท่านั้น และกระบวนการที่จะสามารถสร้างลวดลายในระดับไมโครเมตรไปจนถึงในระดับนาโนเมตรนั้นคือกระบวนการที่เรียกว่า โฟโตลิโทกราฟี (Photolithography)

โฟโตลิโทกราฟี (Photolithography) คือการฉายแสงในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) ไปจนถึงย่านแสงสีน้ำเงิน ลงบนชิ้นงาน (Sample) ที่มีการเคลือบสารโฟโตเรซิสแล้วแปะด้วยแม่แบบโฟโตแมสค์ แล้วนำชิ้นงานไปล้างออกด้วยสารล้างฟิล์ม (Developer) ทำให้เกิดลวดลายตามแม่แบบถ่ายทอดลงบนฟิล์ม และลวดลายจะถูกถ่ายทอดลงบนชิ้นงานด้วยกระบวนการต่างๆ เช่น กระบวนการปลูกโลหะ (Metal deposition) กระบวนการกัดลาย (Etching) เป็นต้น ซึ่งลวดลายขนาดเล็กถูกนำไปใช้งานในหลายด้าน ตัวอย่างเช่น ในงานอิเล็กทรอนิกส์, งานเซ็นเซอร์ (Sensor), งานไมโครฟลูอิดิกส์ (Microfluidics), ระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค (MEMS) เป็นต้น

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสร้างลวดลายที่มีขนาดต่ำกว่า 5 ไมโครเมตร ต้องใช้เครื่องโฟโตลิโทกราฟีที่มีความละเอียดสูงและมีราคาสูงมาก [2-4] ซึ่งการใช้โฟโตแมสค์ที่ใช้ทั่วไปมีขนาดประมาณ 5 ไมโครเมตร ทำให้ไม่เพียงพอต่อการศึกษาคูณลักษณะใหม่ๆ ของอุปกรณ์เมื่ออุปกรณ์หลายชนิดมีขนาดเล็กลง อีกทั้งในอุตสาหกรรมที่ต้องการผลิตอุปกรณ์จำนวนมาก ในระยะเวลาอันสั้น วิธีฉายแสงผ่านโฟโตแมสค์ที่โดยปกติจะใช้เวลาในหน่วยวินาที แต่หากต้องการลวดลายที่มีขนาดเล็กกว่า 5 ไมโครเมตร จะใช้เวลาในการผลิตโฟโตแมสค์ และเวลาในการขนส่งสู่ประเทศไทยมาก ทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง รวมถึงการที่โฟโตแมสค์ไม่สามารถเปลี่ยนรูปแบบของแม่แบบได้ กล่าวคือหากต้องการแม่แบบลวดลายใหม่ ต้องผ่านกระบวนการ สั่งทำ ผลิต และขนส่งอีก ทำให้เสียเวลาจำนวนมาก ดังนั้นโฟโตลิโทกราฟีที่ไม่ต้องใช้โฟโตแมสค์ (Maskless Photolithography) จึงเหมาะแก่การศึกษาวิจัยที่มีการเปลี่ยนแปลงแม่แบบหรือลวดลายของอุปกรณ์อยู่ตลอดเวลาไปตามผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลวดลายที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรมีความสำคัญมากในด้านเทคโนโลยี ไม่ว่าจะเป็นคอมพิวเตอร์ความเร็วสูง ที่เกิดจากการที่มีทรานซิสเตอร์ขนาดเล็กจำนวนมากบรรจุอยู่ในชิพ (chip) แต่การสร้างลวดลายให้เล็กในระดับ 10-20 นาโนเมตร [5] นั้นมีค่าใช้จ่ายสูง แม้จะเป็นวิธีโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้โฟโตแมสก์ก็ตาม ดังนั้นในระดับการศึกษาวิจัย การใช้วิธีการฉายแสงที่มีพลังงานสูงไปสู่โฟโตรีซิสและถ่ายทอดสู่ชิ้นงานนั้น แสงสีน้ำเงินจึงเป็นตัวเลือกที่หาได้ง่ายและราคาถูกลงกว่า โดยแสงสีน้ำเงินที่นำมาใช้คือแสงที่ได้จาก หัวอ่านแผ่นบลูเรย์ (Blu-ray disc reader) ที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 405 นาโนเมตร [6]

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อพัฒนาและสร้างชุดโฟโตลิโทกราฟีที่สร้างลวดลายโดยไม่ใช้แม่แบบโฟโตแมสก์ โดยที่ลวดลายจะถูกกำหนดโดยชุดคำสั่งซึ่งเปลี่ยนแปลงได้ทำให้เกิดความยืดหยุ่นต่องานวิจัย
- 1.2.2 สามารถสร้างลวดลายที่มีความละเอียด 2 ไมโครเมตร ได้
- 1.2.3 สามารถสร้างเครื่องมือที่มีราคาถูก และสามารถใช้งานในการออกแบบและสร้างลวดลายของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในห้องปฏิบัติการได้

## 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

การสร้างลวดลายที่มีขนาดเล็กและคมชัดจำเป็นต้องมีการควบคุมการเคลื่อนที่ที่มีความแม่นยำสูง ความคลาดเคลื่อนต่ำและสามารถควบคุมได้ทั้งสามมิติ การสร้างลวดลายขนาดเล็กต้องใช้ลำแสงที่มีขนาดเล็กและมีความเข้มแสงมากพอที่จะทำลายพันธะของโฟโตรีซิส การเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงผนวกกับความเข้มแสงมาก หรือ การเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำแต่ขนาดลำแสงเล็กมาก จะทำให้ได้ลวดลายที่มีขนาดเล็กแต่ต่างกันที่ความคมชัดของลวดลาย

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

ลวดลายที่เกิดจากการฉายลำแสงสีน้ำเงินจากหัวอ่าน ต้องถูกควบคุมระยะโฟกัสให้แม่นยำที่สุด เพราะการคลาดเคลื่อนของโฟกัสเพียงเล็กน้อยทำให้ลำแสงที่ตกกระทบกับโฟโตรีซิสมีขนาดเปลี่ยนไปส่งผลกับขนาดของลวดลายด้วยเช่นกัน การวิจัยจึงคำนึงถึงการจัดการโฟกัสของลำแสงให้ผลออกมาเหมือนกันหรือใกล้เคียงเดิมทุกครั้ง ตัวแปรสำคัญในการกำหนดขนาดลวดลายคือศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัวอ่านบลูเรย์และความเร็วในการเคลื่อนที่ของแท่นเคลื่อนที่สามมิติ ที่ถูกควบคุมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทำให้สามารถกำหนดขนาดและรูปร่างของลวดลายได้ตามที่ได้ออกแบบไว้

## 1.5 ขั้นตอนของการวิจัย

- 1.5.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีโดยไม่ใช้โฟโตแมสก์ (Maskless Photolithography)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.5.1 แก้ปัญหาเรื่องระยะโฟกัส และ การจัดวางของชิ้นงานให้มีจุดอ้างอิงเดิม
- 1.5.2 ทดลองหาเงื่อนไขที่ดีที่สุด กล่าวคือ ได้ขนาดของลวดลายที่เล็กและคมชัดที่สุด โดยควบคุมตัวแปรสำคัญสองตัว ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้หัวอ่าน และ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแท่นเคลื่อนที่สามมิติ
- 1.5.3 เมื่อได้เงื่อนไขที่ดีที่สุดแล้ว ใช้เงื่อนไขดังกล่าวมาทำการทดลองเพื่อหาความสามารถของเครื่องมือ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎี หลักการ และเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

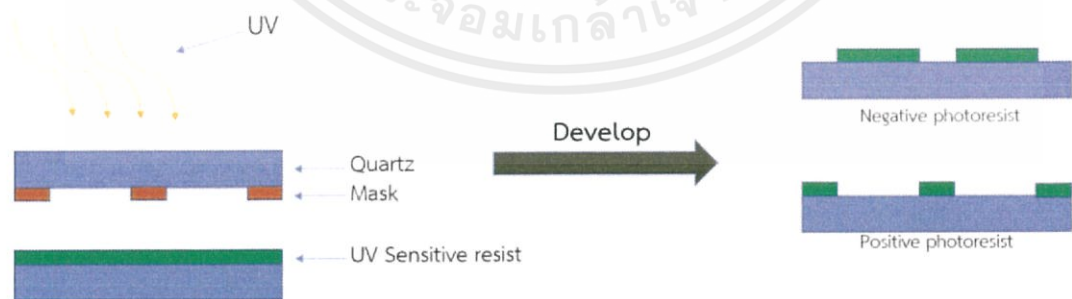
#### 2.1 ลิโทกราฟี (Lithography)

ลิโทกราฟี (Lithography) [7,8] คือการแกะสลักลวดลายขนาดเล็กลงบนพื้นผิวของของแข็ง เป็นกระบวนการการประดิษฐ์แบบใหญ่ไปเล็ก (Top-Down) วิธีการลิโทกราฟีถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายในด้านอุตสาหกรรมต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ไมโครฟลูอิดิกส์ (Microfluidics) หรือระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค (Microelectromechanical systems) ล้วนเกิดจากการใช้ความรู้ในด้านการทำลิโทกราฟีมาประยุกต์ใช้จริงในเทคโนโลยีประจำวัน ไมโครลิโทกราฟี หรือนาโนลิโทกราฟีที่ใช้ในเทคโนโลยีข้างต้นนั้นถูกทำขึ้นจากวิธีการโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography)

#### 2.2 โฟโตลิโทกราฟี (Photolithography)

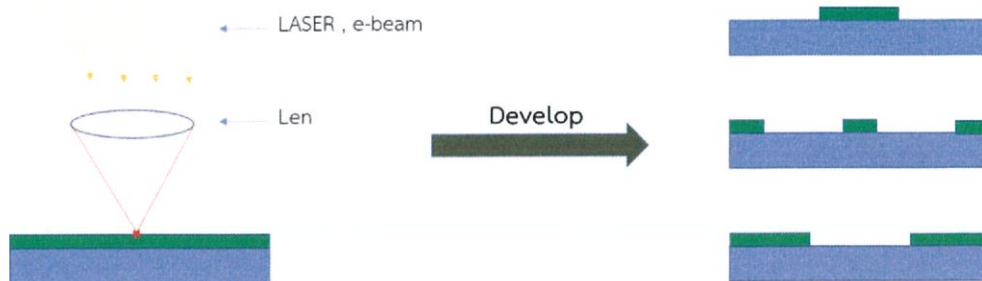
โฟโตลิโทกราฟี [9,10] เป็นการแกะสลักลวดลายวิธีการหนึ่งโดยการฉายแสงในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) ไปจนถึงแสงสีน้ำเงิน ผ่านโฟโตแมสก์ที่ติดอยู่บนชั้นงานที่เคลือบด้วยสารไวแสง (Photoresist) เกิดเป็นลวดลายตามแบบของโฟโตแมสก์ที่ติดไว้ โดยหลังจากฉายแสงแล้วนำชั้นงานไปทำการล้างออกด้วยสารล้างฟิล์ม (Developer) เพื่อให้ได้ลวดลายตามแบบโฟโตแมสก์

ดังที่กล่าวมาข้างต้นนั้นเป็นวิธีการพื้นฐานของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีที่ใช้เพื่อศึกษาหรือทำการวิจัย ซึ่งขนาดที่ได้จะไม่เล็กไปถึงระดับนาโนเมตร ลวดลายจะเล็กที่สุดได้ไม่ต่ำกว่า 1 ไมโครเมตร ดังนั้นการสร้างลวดลายที่มีขนาดเล็กกว่าไมโครเมตรไปสู่ระดับนาโนเมตรนั้นต้องใช้วิธีการที่ไม่ใช่โฟโตแมสก์ (Maskless) ที่ใช้วิธีการฉายแสงที่ถูกเลนส์รวมให้เป็นจุดเดี่ยวแล้วเขียนเป็นลวดลายที่มีขนาดขึ้นกับขนาดของจุดรวมแสง



ภาพที่ 2.1 ตัวอย่างแสดงการทำโฟโตริซิสโดยใช้โฟโตแมสก์ (Mask Photolithography)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.2 ตัวอย่างแสดงการทำโฟโตริซิสโดยไม่ใช้โฟโตแมสค์ (Maskless Photolithography)

### 2.2.1 สารไวแสง (Photoresist)

สารไวแสง [11] เป็นสารที่เมื่อโดนแสงมาตกกระทบในระยะเวลาหนึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างพันธะเคมีภายใน โดยสารไวแสงจะแบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่ สารไวแสงโพสิทีฟ และ สารไวแสงเนกาทีฟ ซึ่งสารไวแสงแบบโพสิทีฟนั้นเมื่อได้รับการฉายแสงในระยะเวลาหนึ่งจะทำให้เกิดการอ่อนตัวบริเวณที่โดนแสงตกกระทบ เมื่อนำไปล้างด้วยสารล้างฟิล์มจะทำให้สารไวแสงบริเวณนั้นถูกล้างออกไป ในขณะที่สารไวแสงชนิดเนกาทีฟจะแสดงผลตรงกันข้าม เมื่อสารไวแสงชนิดเนกาทีฟได้รับแสงบริเวณใด บริเวณที่ได้รับแสงจะแข็งตัวขึ้นทำให้เมื่อล้างออกด้วยสารล้างฟิล์ม บริเวณที่ถูกล้างออกจะเป็นบริเวณที่ไม่ได้รับการฉายแสงนั่นเอง

### 2.2.2 สารล้างฟิล์ม (Developer)

สารล้างฟิล์ม [12] เป็นสารละลายที่ใช้ในการละลายสารไวแสงที่เคลือบอยู่บนชิ้นงาน โดยจะชำระล้างส่วนที่อ่อนของสารไวแสงออกขึ้นอยู่กับว่าเป็นสารไวแสงชนิดใด สารล้างฟิล์มนั้นสามารถแบ่งชนิดได้ตามสารไวแสงที่ใช้

### 2.2.3 โฟโตลิโทกราฟีแบบใช้โฟโตแมสค์ (Mask Photolithography)

การสร้างลวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีผ่านโฟโตแมสค์ [13,14] เป็นการฉายแสงพลังงานสูง เช่น แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ลงบนชิ้นงานที่ได้ทำการแปะโฟโตแมสค์ไปแล้ว กระบวนการนี้จะสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว เหมาะกับระบบอุตสาหกรรมที่ต้องการสร้างลวดลายจำนวนมากและใช้เวลาน้อย โดยโฟโตแมสค์จะถูกติดอยู่บนกระจกควอทซ์(Quartz) แล้วแปะทับลงบนชิ้นงาน ดังภาพที่ 2.1 โดยกระจกควอทซ์จะไม่ดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ตทำให้พลังงานของแสงไม่ถูกลดทอนไปเมื่อตกกระทบกับชิ้นงาน

ผลที่ได้จากการใช้วิธีฉายแสงผ่านโฟโตแมสค์จะได้ลวดลายที่มีความคมชัด สามารถนำมาใช้งานได้และมีขนาดเล็กที่สุดประมาณ 5 ไมโครเมตร แต่เนื่องด้วยการใช้งานของโฟโตแมสค์นั้นไม่สามารถเปลี่ยนรูปแบบได้ หากต้องการรูปแบบของลวดลายใหม่ก็ต้องใช้โฟโตแมสค์แบบใหม่ซึ่งโฟโตแมสค์ที่มีขนาดเล็กมากนั้นทำได้ค่อนข้างยากและหากสั่งซื้อก็จะมีราคาสูง จึงได้เกิดการคิดค้นวิธีการสร้างลวดลายแบบไม่ใช้โฟโตแมสค์ขึ้น

### 2.2.4 โฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้โฟโตแมสค์ (Maskless Photolithography)

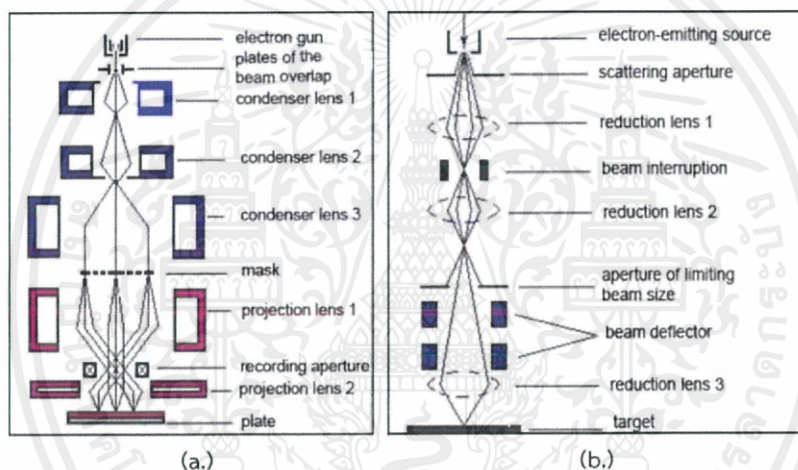
โฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้โฟโตแมสค์ [15,16] มีข้อดีกว่าแบบที่ต้องใช้โฟโตแมสค์ในด้านความหลากหลายของลวดลายที่สร้างได้ สามารถออกแบบและเปลี่ยนแปลงลวดลายได้ง่าย การทำงานของโฟโตลิโทกราฟีชนิดนี้คือการใช้แสงที่ตกกระทบลงบนพื้นผิวของวัสดุเป็นลำแสงหรือจุดของแสง

เพื่อกัดเป็นลวดลาย ซึ่งควบคุมลวดลายจากคอมพิวเตอร์ วิธีการทำลิโทกราฟีแบบไม่ใช่โฟโตแมสค์ทำได้หลายวิธีดังนี้

#### 2.2.4.1 การสร้างลวดลายด้วยลำแสงอิเล็กตรอน (Electron Beam lithography)

เป็นการยิงลำแสงอิเล็กตรอนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน [17,18] มาตกกระทบลงบนผิวของชิ้นงานซึ่งควบคุมการเคลื่อนที่สร้างลวดลายด้วยคอมพิวเตอร์ ลวดลายที่ได้จากวิธีการนี้มีขนาดเล็กในระดับ 100 นาโนเมตร ไปจนถึง 5 นาโนเมตร ซึ่งวิธีการนี้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมในปัจจุบันเกี่ยวกับวงจรไฟฟ้าหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ความสามารถของวิธีการนี้มีข้อจำกัดที่น้อย เนื่องจากลำแสงอิเล็กตรอนมีระยะชัดลึก (Depth of focus) ในระดับมิลลิเมตร ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยมาก มีความคมชัดสูง และการจัดตำแหน่ง (Alignment) สามารถทำได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือ ราคาเครื่องมือของลำแสงอิเล็กตรอนมีราคาสูงถึง 50 ล้านบาทโดยประมาณ ซึ่งในระดับอุตสาหกรรมขนาดกลางไม่กล้าเสี่ยงที่จะลงทุนกับการใช้งานวิธีการนี้



ภาพที่ 2.3 (a.) การโปรเจกชันหาตำแหน่งของเครื่องEBL (b.) การลากผ่านเพื่อสร้างลวดลาย [19]

#### 2.2.4.2 พินโฮล (Pin-Hole)

พินโฮล [20] เป็นการยิงลำแสงเลเซอร์ที่มีความเข้มแสงสูงมากให้ทะลุผ่านรูขนาดเล็กตามขนาดลวดลายที่จะสร้าง ซึ่งขนาดของรูต้องไม่เล็กกว่าความยาวคลื่นไม่เช่นนั้นจะเกิดการแทรกสอดทำให้จุดแสงใหญ่ขึ้น การใช้วิธีการพินโฮลนี้ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานมาก เพราะต้องยิงแสงพลังงานสูงแล้วมีแสงเพียงเล็กน้อยที่สามารถลอดผ่านรูไปได้ ซึ่งแสงที่รอดผ่านรูไปได้นั้นค่าความเข้มแสงจะลดลงหลายพันเท่า ซึ่งพลังงานที่จะไปตกกระทบกับชิ้นงานอาจไม่เพียงพอที่จะทำลายพันธะของสารไวแสงที่เคลือบอยู่

#### 2.2.4.3 คาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์ (CO<sub>2</sub> laser)

คาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์ [21] เป็นคลื่นต่อเนื่องที่มีพลังงานสูงมาก ในอุตสาหกรรมจะถูกนำมาใช้ตัดหรือเชื่อมวัสดุต่างๆ แต่สำหรับการแกะสลักลวดลายจะใช้พลังงานที่ต่ำลงมาระดับหนึ่ง ใช้ในงานจำพวกไมโครฟลูอิดิกส์ (Microfluidics) แต่มีข้อจำกัดคือมีขนาดประมาณ 1-100 ไมโครเมตร

#### 2.2.4.4 แสงสีน้ำเงิน (Blu-ray direct write)

แสงสีน้ำเงินหรือบลูเรย์ (Blu-ray) ที่ได้จากหัวอ่านแผ่นดิสก์มีความยาวคลื่นในช่วง 400-450 นาโนเมตร ขึ้นอยู่กับยี่ห้อหรือรุ่นของหัวอ่านบลูเรย์นั้นๆ เนื่องจากมีพลังงานสูงทำให้สามารถใช้ในการสร้างลวดลายได้ ซึ่งลวดลายที่ได้จะมีขนาดเล็กไม่เล็กไปกว่าขนาดของจุดแสง ซึ่งจุดแสงที่ได้จากหัวอ่านบลูเรย์นี้มีขนาดประมาณ 400-500 นาโนเมตรขึ้นอยู่กับความสามารถของเลนส์ใกล้วัตถุ ขนาดของจุดแสงสามารถหาได้จากสูตร [22] ดังนี้

$$\text{Spot size} = \frac{\lambda}{\text{N.A.}}$$

โดยที่ spot size คือขนาดของจุดแสง,  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของแสง, N.A. คือ ความสามารถของเลนส์ใกล้วัตถุ แม้จะมีขนาดเล็กไม่เท่ากับวิธีการยิงลำแสงอิเล็กทรอนิกส์แต่มีค่าใช้จ่ายน้อยกว่ามาก ในขณะเดียวกันปัญหาของการใช้หัวอ่านบลูเรย์คือระยะชัดลึก (Depth of focus) มีค่าน้อยมากทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ง่ายกว่าวิธีการยิงลำแสงอิเล็กทรอนิกส์ ส่งผลให้การจัดตำแหน่ง (Alignment) ทำได้ยาก

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างวิธีการต่างๆในระเบียบวิธีการทำโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้โฟโตแมสค์

VS	e <sup>-</sup> beam lithography	CO <sub>2</sub> Laser	Pin-hole	Blu-ray lithography
<b>Cost</b>	Very expensive (~50 MB)	Low cost (≤1MB)	Low cost (≤1MB)	Low cost (≤1MB)
Spot Size	1-100 nm	1-100 μm	0.5-10 μm	0.5-5 μm
Depth of field	centimeter	centimeter	centimeter	micrometer
Alignment	easy	easy	easy	hard
Systems	complicated	easy	easy	easy
Feature size	nanometer	micrometer	Micro&nanometer	Micro&nanometer
Industrial	Super speed computer	Cutting	For studying and analyzing	For studying and analyzing

#### 2.2.5 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการสร้างลวดลาย (Parameter)

##### 2.2.5.1 กำลังงานต่อพื้นที่ของแสง และพลังงานต่อพื้นที่ของแสง

ปัจจัยในการสร้างลวดลายเกี่ยวข้องกับพลังงานของแสงที่ตกกระทบลงบนชิ้นงานว่าเพียงพอจะทำลายพันธะของสารไวแสงหรือไม่ โดยที่สารไวแสงแต่ละชนิดจะบอกถึงค่าพลังงานในการทำลายพันธะของสารไวแสงชนิดนั้น

ค่ากำลังงานต่อพื้นที่ของบลูเลเซอร์มีหน่วยเป็น  $\text{mW}/\text{cm}^2$  ซึ่งควบคุมโดยแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เลเซอร์ และค่าพลังงานต่อพื้นที่ของแสงที่ถูกดูดซับโดยฟิล์มสารไวแสงมีหน่วยเป็น  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  ซึ่งควบคุมได้จากความเร็วในการเคลื่อนที่ของชุดขับเคลื่อน 3 แกน โดยที่ค่าพลังงานต่อพื้นที่ ( $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ) = ค่ากำลังงานต่อพื้นที่ ( $\text{mW}/\text{cm}^2$ ) x เวลา (second)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.5.2 ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแสงในการสร้างลวดลาย

ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแสงเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดขนาดของลวดลาย ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแสงที่ต่ำจะทำให้พื้นผิวของสารไวแสงได้รับพลังงานยาวนานกว่าแสงที่เคลื่อนที่เร็ว ทำให้ลวดลายที่ได้มีขนาดใหญ่ ในขณะที่แสงที่มีความเร็วมากเคลื่อนที่ผ่านพื้นผิวดกกระทบด้วยระยะเวลาอันสั้น ทำให้ลวดลายมีขนาดเล็ก ทั้งนี้การจะเกิดลวดลายหรือไม่ขึ้นกับพลังงานของแสงว่าจะพอต่อการทำลายพันธะหรือไม่ด้วย

### 2.2.5.3 ระยะเวลาพักของเลนส์ใกล้วัตถุ

ระยะเวลาพักของเลนส์ใกล้วัตถุสามารถทำให้ปัจจัยในด้านพลังงานหรือความเร็วมีผลน้อยลงไปได้มาก เพราะหากแสงไม่ได้อยู่ ณ จุดโฟกัสจะทำให้แสงตกกระทบมีขนาดใหญ่และสูญเสียพลังงานไปมากจนทำให้ไม่สามารถทำลายพันธะได้ หรือหากทำลายพันธะได้ก็อาจเกิดลวดลายที่ไม่คมชัดหรือมีขนาดใหญ่จนเกินไป ซึ่งระยะเวลาพักของแสงเป็นตัวแปรควบคุมที่สำคัญที่สุดในงานวิจัยนี้

### 2.2.5.4 ความเข้มแสง

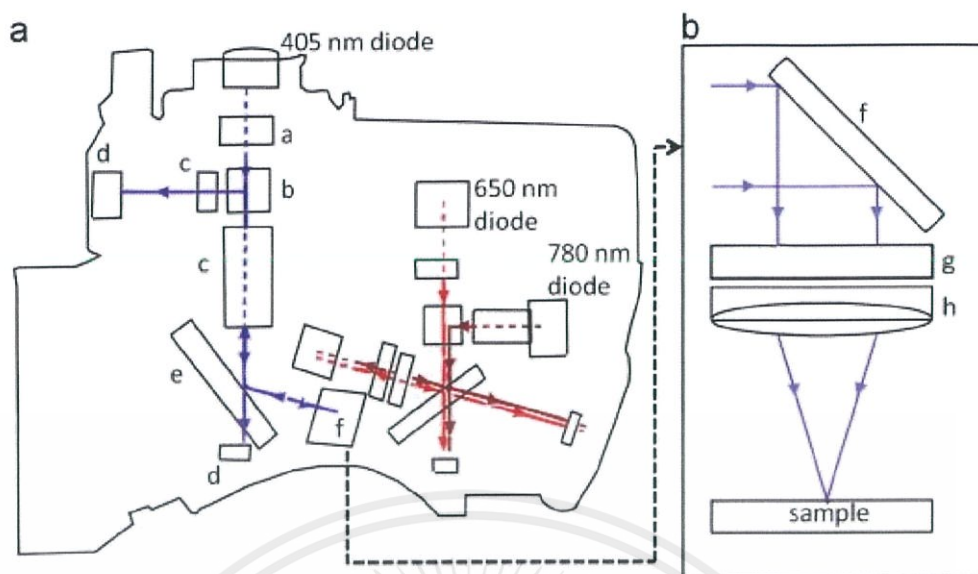
ความเข้มแสงของบลูเรย์เป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดขนาดของลวดลายได้ แสงที่มีความเข้มสูงทำให้จุดแสงมีขนาดใหญ่จะเกิดลวดลายที่ใหญ่ตามไปด้วยและการใช้แสงที่มีความเข้มสูงอาจทำให้ลวดลายที่เกิดขึ้นมีลักษณะไม่คมชัดเพราะบริเวณขอบของจุดแสงที่มีพลังงานต่ำกว่าอาจทำให้เกิดการอันเดอร์เดเวลอป (underdevelop) ทำให้ลวดลายที่ได้มีขอบที่ไม่สามารถล้างออกได้หมดเนื่องจากแสงไม่สามารถทำลายพันธะได้หมด

### 2.2.5.5 การกระเจิงของแสง

การกระเจิงของแสงที่เกิดจากเลนส์ใกล้วัตถุทำให้เกิดสิ่งๆที่เรียกว่าวงแหวนขึ้น เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นกับเลนส์ใกล้วัตถุของหัวอ่านบลูเรย์ ถึงแม้ว่าแสงจะอยู่ในระยะโฟกัส แต่หากเกิดวงแหวนของแสงขึ้นจะทำให้ลวดลายไม่เป็นไปตามที่ต้องการเพราะจะถูกแสงจากวงแหวนรบกวน วงแหวนสามารถแก้ไขด้วยการใช้แสงที่มีความเข้มแสงน้อยลงเพื่อให้พลังงานแสงบริเวณวงแหวนไม่เพียงพอต่อการทำลายพันธะของพอลิเมอร์ของสารไวแสง

## 2.3 หัวอ่านบลูเรย์ (Blu-ray Writer)

แสงที่ใช้ในการสร้างลวดลายในการวิจัยนี้คือแสงสีน้ำเงินจากหัวอ่านบลูเรย์ ที่มีความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร ซึ่งส่วนประกอบภายในหัวอ่านบลูเรย์แสดงดังภาพ



ภาพที่ 2.4 (a)ภาพด้านบนของหัวอ่านบลูเรย์ SF-AW210 (b)ภาพการเดินทางของแสงสีน้ำเงิน(405นาโนเมตร) ก่อนออกมาจากเลนส์ใกล้วัตถุ [23]

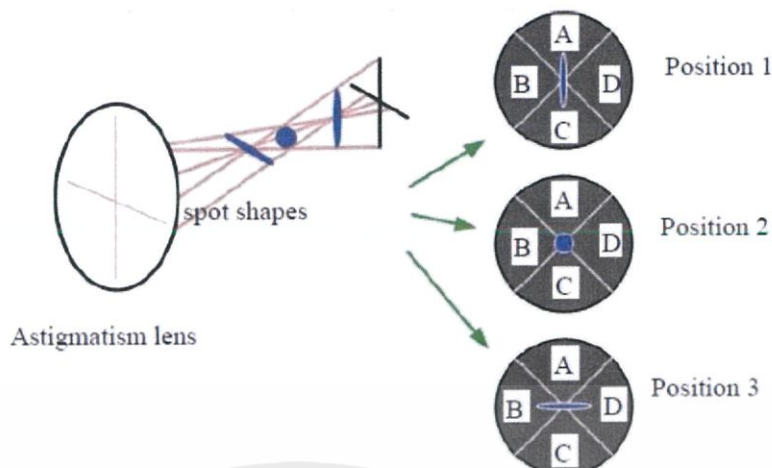
จากภาพที่ 2.4 (a) แสงจะออกจากแหล่งกำเนิดแสง 405 นาโนเมตร ไปที่เกรตติง (a) ไปสู่บีมสปลิตเตอร์ (b) แสงจะเคลื่อนที่ตรงไปผ่าน คอลลิเมทเลนส์ (c) ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแสงให้เป็นแสงขนาน แล้วสะท้อนที่กระจกสะท้อน (e) แล้วแยกแสงไปสู่เครื่องตรวจจับแสง (d) และแสงอีกส่วนจะไปออกที่หัวอ่านผ่านกระจกสะท้อน (f) หลังจากที่แสงตกกระทบกับผิวของวัตถุแล้วจะเกิดการสะท้อนกลับมาในทิศทางเดิมไปสู่เครื่องตรวจจับแสง (d) เพื่อตรวจหาระยะโฟกัส

ระยะโฟกัสของเลนส์ใกล้วัตถุของหัวอ่านบลูเรย์มีระยะชัดลึก (Depth of focus) ที่น้อยมาก กล่าวคือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะเพียงเล็กน้อย ก็สามารถทำให้หลุดจากระยะโฟกัสได้ (Out of focus) ดังนั้นการหาระยะโฟกัสของเลนส์เพื่อให้จุดรวมแสงตกกระทบพอดีกับพื้นผิวของชิ้นงานจึงต้องใช้เครื่องตรวจจับแสง (Photodetector) ช่วยในการหาระยะโฟกัสที่แท้จริงในแต่ละการทดลอง

### 2.3.1 เครื่องตรวจจับแสง (Photodetector)

เครื่องตรวจจับแสงเป็นอุปกรณ์ที่ติดอยู่กับหัวอ่านบลูเรย์ซึ่งคอยทำหน้าที่ควบคุมระยะโฟกัสของแสงที่ตกกระทบลงบนแผ่นบลูเรย์ดิสก์ผ่านคอยล์มอเตอร์ (Coil motor) ที่อยู่บริเวณเลนส์ใกล้วัตถุ

การทำงานของเครื่องตรวจจับแสงจะตรวจจับแสงที่สะท้อนกลับมาหลังจากกระทบกับพื้นผิวของวัตถุโดยจะระบุว่าเป็นตำแหน่งใดโดยการอ่านค่ากระแสที่วัดได้ โดยใช้ทฤษฎีแอสติกมาติก (Astigmatic principle) เป็นพื้นฐานในการอ่านค่า



ภาพที่ 2.5 วิธีการหาจุดโฟกัสโดยอัตโนมัติใช้ทฤษฎีแอสติγμαติก [24]

จากรูปจะเห็นว่า ณ ตำแหน่งต่างๆที่ไม่ใช่จุดโฟกัสแสงที่ตกกระทบลงบนเครื่องตรวจจับแสงจะไม่กลมและมีส่วนที่กระทบไปโดนควอทเทิร์นอื่น หมายความว่าเครื่องตรวจจับแสงจะสามารถตรวจจับกระแสได้จากแสงที่ตกกระทบบควอทเทิร์นทั้ง 4 และจะเข้าสู่โฟกัสเมื่อกระแสเป็น 0 นั่นเอง

### 2.3.2 คอยล์มอเตอร์ (Coil Motor)

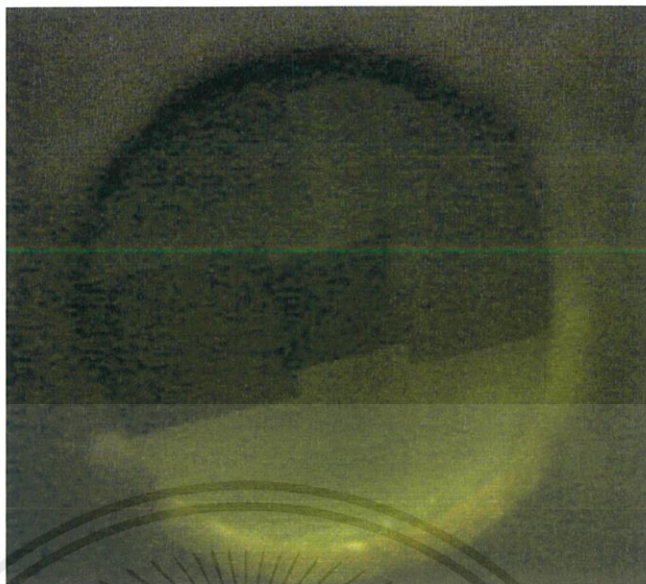
คอยล์มอเตอร์ทำหน้าที่รับคำสั่งจากเครื่องตรวจจับแสงเพื่อจับระยะโฟกัสด้วยการใช้สนามแม่เหล็กควบคุมการเคลื่อนที่ ขึ้น-ลง ของเลนส์ใกล้วัตถุเพื่อหาระยะโฟกัสจริงจากผลการอ่านค่าของเครื่องตรวจจับแสง

### 2.3.3 ศักย์ไฟฟ้ากับความเข้มแสงของบลูเรย์

ความเข้มของแสงสีน้ำเงินที่ออกมาจากเลนส์ใกล้วัตถุนั้นสามารถเพิ่มหรือลดได้โดยการจ่ายศักย์ไฟฟ้าซึ่งความเข้มของแสงจะแปรผันตรงกับศักย์ไฟฟ้า เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้ามากค่าความเข้มแสงจะมาก และการจ่ายศักย์ไฟฟ้าที่มากเกินไปจะทำให้เกิดความร้อนขึ้น ส่งผลให้ไดโอดที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงนั้นเสียหาย สามารถสังเกตได้จากการให้ศักย์ไฟฟ้าเท่าเดิมแต่กระแสที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้การทดลองไม่สามารถทำซ้ำได้

### 2.3.4 การหาจุดโฟกัสอย่างง่าย โดยใช้หลักการของเครื่องตรวจจับแสง

เนื่องจากการทำงานของเครื่องตรวจจับแสงที่ต่อกับหัวอ่านบลูเรย์นั้นมีความซับซ้อนมาก ทำให้การนำมาใช้งานจริงนั้นค่อนข้างยาก จึงใช้วิธีอย่างง่ายแทน โดยการถอดเครื่องตรวจจับแสงออกแล้วนำกล้องจุลทรรศน์ยูเอสบีมาต่อแทน ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์จะเป็นดังภาพ



ภาพที่ 2.6 ภาพที่สังเกตได้จากกล้องจุลทรรศน์ยูเอสบี

จากภาพจะสังเกตได้ว่าจะมี 4 ควาทแรนท์โดยที่ตรงกลางจะมีแผ่นกั้นอยู่ ซึ่งการอ่านระยะโพกัสของเครื่องตรวจจับแสงนั้นเมื่อแสงอยู่ในระยะโพกัสจะทำให้แสงมารวมตัวกันตรงกลางเกิดเป็นจุดแสงตรงกลาง และจะไม่มีแสงบริเวณควาทแรนท์เลย แม้ว่าวิธีนี้จะทำให้สามารถหาระยะโพกัสจริงได้แต่ไม่สามารถสั่งการคอยด์มอเตอร์ (Coil motor) ได้ทำให้ไม่สามารถทำอโต้โพกัสของระบบหัวอ่านบลูเรย์

แสงที่ปรากฏในอยู่ในควาทแรนท์จะสามารถบอกตำแหน่งของโพกัสในแนวลึกหรือตื้น ปัจจัยในการพิจารณาภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์นั้นมีความผิดพลาดจากองศาในการตั้งกล้องได้ เช่น การตั้งกล้องส่อง ณ ตำแหน่งที่ไม่เหมือนกันในแต่ละการทดลอง จะให้ภาพที่ออกมาไม่เหมือนกัน หรือหาตำแหน่งโพกัสไม่ได้ จึงต้องใช้การอ้างอิงภาพเสมือนจากตำแหน่งที่สนใจเพียงจุดเดียวจึงจะนำมาใช้กับการทดลองได้

## 2.4 การเคลือบผิววัสดุ (Spin Coating)

การเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง [25] เป็นการหยดสารที่ต้องการจะเคลือบลงบนชิ้นงานให้ทั่วแล้วหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็วสูงจะทำให้สารกระจายตัวออกเป็นวงกว้างและการระเหยของตัวทำละลายจะทำให้เกิดเป็นชั้นฟิล์มบางๆเคลือบอยู่บนชิ้นงาน โดยความหนาของฟิล์มจะขึ้นอยู่กับความเร็วในการหมุนในแต่ละรอบและระยะเวลาในการหมุน ซึ่งจะให้ผลของฟิล์มที่บางที่แตกต่างกันออกไป หากต้องการฟิล์มที่มีขนาดบางจะต้องใช้อัตราเร็วในการหมุนเหวี่ยงสูง วิธีการนี้จะให้ฟิล์มบางที่ค่อนข้างสม่ำเสมอจึงเป็นที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน

วิธีการเตรียมชิ้นงานที่เคลือบด้วยชั้นฟิล์มของสารไวแสง (photoresist) ที่ต้องการความหนาประมาณ 500 นาโนเมตร การเตรียมชิ้นงานด้วยวิธีการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงจึงเป็นวิธีการที่ง่ายและรวดเร็วมาก สามารถเตรียมชิ้นงานได้ครั้งละหลายชิ้นงาน สะดวกแก่การเตรียมและจัดเก็บเครื่องมือ แต่การเคลือบฟิล์มด้วยการหมุนเหวี่ยงมีข้อเสียคือ การหมุนเหวี่ยงของเครื่องจะทำให้สารที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้เสียไปจำนวนมากกว่าที่จะเกาะอยู่เป็นชั้นฟิล์ม หากใช้สารราคาแพงมาเคลือบจะไม่เหมาะสมกับวิธีการนี้มากนัก

## 2.5 วิธีการล้างสารไวแสงด้วยสารล้างฟิล์ม (Develop)

สารไวแสงหลังผ่านการฉายแสงมาแล้ว จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีขึ้น เนื่องจากแสงจะไปทำการตัดพันธะของพอลิเมอร์ให้สั้นลง และจะถูกชะออกด้วยสารล้างฟิล์ม (developer) ตัวสารล้างฟิล์มจะมีความจำเพาะเจาะจงในการล้างสารไวแสงแต่ละชนิด เช่น สารล้างฟิล์มสำหรับสารไวแสงชนิดบวก จะไม่สามารถนำไปล้างสารไวแสงชนิดลบให้ออกได้ แต่ในทางตรงกันข้าม สารล้างฟิล์มชนิดลบสามารถนำมาใช้ล้างสารไวแสงชนิดบวกได้ การล้างสารไวแสงออกนั้นจะส่งผลต่อลวดลายที่ได้พอสมควร กล่าวคือ หากใช้ระยะเวลาสั้นเกินไปในการล้างสารไวแสงอาจทำให้เกิดการอันเดอร์เดเวลอป (Underdevelop) เพราะล้างไม่หมด หรือหากใช้เวลานานเกินไปก็อาจเกิดการโอเวอร์เดเวลอป (Overdevelop) ได้เนื่องมาจากขอบนอกที่มีความเข้มแสงน้อยแต่เมื่อโดนชะล้างนานๆก็อาจหลุดได้เช่นกัน ในงานวิจัยนี้การล้างสารไวแสงใช้เวลาประมาณ 1 นาที

## 2.6 เครื่องควบคุมแกนสามมิติ (3D-Axis Motion Stage)

เครื่องควบคุมแกนสามมิติใช้ในการรับคำสั่งเคลื่อนที่จากคอมพิวเตอร์เพื่อสร้างลวดลายให้กับชิ้นงาน โดยเครื่องเคลื่อนที่สามมิตินี้ต้องมีความละเอียดในระดับไมโครเมตรหรือนาโนเมตร เพราะลวดลายที่ใช้งานอยู่ในระดับ 500-1000 นาโนเมตร ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากเครื่องควบคุมแกนสามมิตินี้หากคิดเป็นร้อยละจะมีค่าสูงมากและจะทำให้ไม่เหมาะกับการสร้างลวดลายที่ต้องการความละเอียดสูง ชีตความสามารถของเครื่องจะเป็นตัวกำหนดความคมชัดของลวดลายเพราะเครื่องที่มีความสามารถสูงจะทำให้สามารถหาระยะโฟกัสจริงของแสงได้อย่างแม่นยำกว่าเครื่องที่มีความสามารถต่ำกว่า

## 2.7 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)

ในปีค.ศ. 2002 Emily F. Nuwaysir และคณะ [26] ได้คิดค้นการทำ DNA microarray ด้วยวิธีการทำโฟโตลิโทกราฟีขึ้น ซึ่งช่วยให้สามารถเตรียมชิ้นงาน บันทึกผล ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายขึ้นมากกว่าวิธีการดั้งเดิม วิธีการทดลองคือการใช้ เครื่องมือ Maskless Array Synthesizer ที่แปลงมาจากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีโดยใช้แสงเป็น digital light processor เพื่อสร้างโฟโตแมสค์ขึ้นมา ผลการทดลองนั้นสามารถสร้างลวดลายขนาดเล็กสุดที่ 16 ไมโครเมตร

ปีค.ศ. 2006 J.KOCHและคณะ [27] ได้ทดลองการใช้วิธีการโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้โฟโตแมสค์เนื่องจากมองว่าการใช้โฟโตแมสค์นั้นลวดลายที่ได้จะมีขนาดไม่เล็กมากพอที่ต้องการ การทดลองนี้จะใช้แสงของเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 157 นาโนเมตร (Deep UV) โดยเลเซอร์นี้เป็น พัลส์เลเซอร์ (Pulse Laser) ที่มีความเร็วระดับเฟมโตเซคคอน (Femtosecond laser) เขียนลงบนฟิล์มทองคำที่หนา 100 นาโนเมตรได้ขนาดของลวดลายประมาณ 500 นาโนเมตร และกระบวนการนี้สามารถพัฒนาไปได้ถึงในระดับที่ต่ำกว่า 100 นาโนเมตรได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีค.ศ. 2008 Rosanne M. Guijt และ Michael C. Breadmore [28] ได้ทำการลองการใช้แสง UV LEDs ที่มีความยาวคลื่น 372 นาโนเมตรมาทำการทดลองเป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยมีการจัดตั้งระบบการทดลองโดยใช้คอลลิเมทเลนส์เป็นเลนส์ที่คอยช่วยให้แสงที่ผ่านมามากออกไปเป็นแสงขนาน แล้วกระทบกับชิ้นงาน และมีตัวแปรที่นำมาพิจารณาเงื่อนไขคือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเลเซอร์ ให้ผลที่ว่าเมื่อใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่น้อยขนาดของลวดลายจะมาก และหากใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่มากลวดลายจะมีขนาดเล็ก โดยความเร็วที่ใช้คือ 245 ไมโครเมตรต่อวินาที จะได้ขนาดของลวดลายอยู่ที่ 17 ไมโครเมตร

ปีค.ศ. 2011 Hao-Wen Chang และคณะ [24] ได้ใช้หัวอ่านบลูเรย์มาใช้ในการทำโฟโตลิโทกราฟี โดยแก้ปัญหาเรื่องระยะชัดลึกมีค่าน้อยด้วยการใช้เครื่องตรวจจับแสงภายในของหัวอ่านมาใช้งาน และควบคุมการเคลื่อนที่ของเลเซอร์และชิ้นงานด้วยฐานควบคุมแกนระดับนาโนเมตรเพื่อความแม่นยำของลวดลายและการหาโฟกัส การที่ใช้งานเครื่องตรวจจับแสงทำให้สามารถสร้างลวดลายขนาดเล็กได้ ในอุดมคติแล้วการวาดลวดลายด้วยแสงที่ถูกรวมที่จุดโฟกัสจะมีลวดลายขนาดเท่ากับจุดแสง ซึ่งการทดลองก็เป็นไปตามสมมุติฐานคือ จุดแสงมีขนาดเท่ากับ 3 ไมโครเมตรและขนาดของลวดลายเท่ากับ 3.3 ไมโครเมตร

ปี ค.ศ. 2012 Christian A. Rothenbach และ Mool C. Gupta [23] นั้นใช้หัวอ่านบลูเรย์ SF-AW210 ทำการฉายลงบนชิ้นงานโดยใช้สารไวแสงชนิดลบ แต่ไม่ได้ใช้เครื่องตรวจจับแสงในการหาระยะโฟกัสแต่ใช้วิธีการสังเกตจากการเลื่อนเข้า-ออกของหัวอ่านกับชิ้นงาน และทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการทดลองด้วยการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าที่ใช้จ่ายให้กับหัวอ่านบลูเรย์ ผลปรากฏว่าที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำนั้นให้ขนาดของลวดลายที่เล็กที่สุดที่ 450 นาโนเมตร ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของจุดแสงที่ 400-500 นาโนเมตร

## บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการสร้างลวดลายที่มีขนาดเล็กและคมชัด ซึ่งขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 การควบคุมความเร็ว และระยะห่างระหว่างชั้นงานกับหัวอ่านบลูเรย์จะถูกสั่งการด้วยระบบคอมพิวเตอร์ โดยในระหว่างการทดลองการเขียนลวดลายนั้นต้องทำในกล่องเหลืองเพื่อป้องกันแสงจากภายนอกมารบกวน

### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

##### 3.1.1.1 สารไวแสง (Photoresist)

สารไวแสงที่ใช้คือ ma-P 1205 เป็นสารไวแสงชนิดบวก (positive photoresist) ของบริษัท ไมโครริซิส สารไวแสงชนิดนี้เตรียมด้วยการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็ว 2000 รอบต่อวินาทีเป็นเวลา 1 นาที จะให้ความหนาฟิล์มประมาณ 0.5 ไมครอน และต้องการกำลังแสง 35 มิลลิจูลต่อตารางเซนติเมตรในการทำลายพันธะระหว่างกันของชั้นฟิล์ม

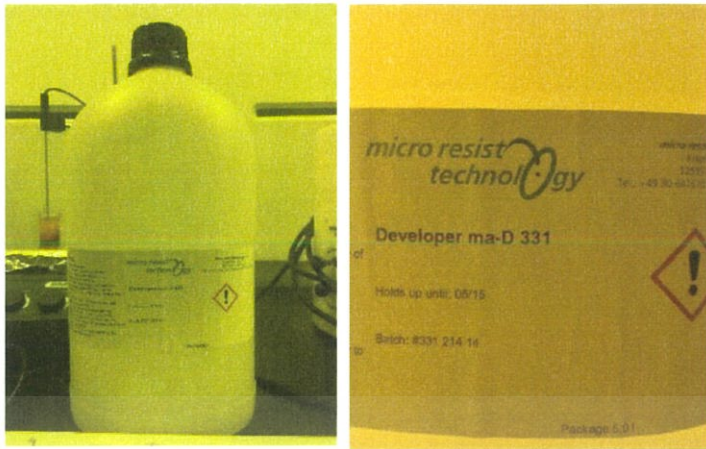


ภาพที่ 3.1 Positive photoresist ma-P 1205

##### 3.1.1.2 สารล้างฟิล์ม (Developer)

สารล้างฟิล์มที่ใช้ต้องเป็นสารล้างฟิล์มเฉพาะล้างสารไวแสงของแต่ละชนิด สำหรับ ma-P 1205 จะใช้สารล้างฟิล์มจากบริษัทเดียวกันคือ บริษัทไมโครริซิส โดยใช้ชื่อว่า ma-D 331 แต่สำหรับสารไวแสงชนิดบวกนั้นสามารถใช้สารล้างฟิล์มชนิดลบได้เช่นกันคือ ma-D 331s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.2 Developer ma-D 331

### 3.1.2 แผ่นซิลิกอน (Si-Wafer)

แผ่นซิลิกอนใช้เป็นฐานในการเคลือบสารไวแสง เพราะแผ่นซิลิกอนสามารถเตรียมชิ้นงานได้ง่าย และมีพื้นผิวเรียบ แผ่นซิลิกอนที่นำมาใช้ต้องเป็นแผ่นซิลิกอนที่มีความเรียบของผิวมากและควรทำความสะอาดผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนก่อน

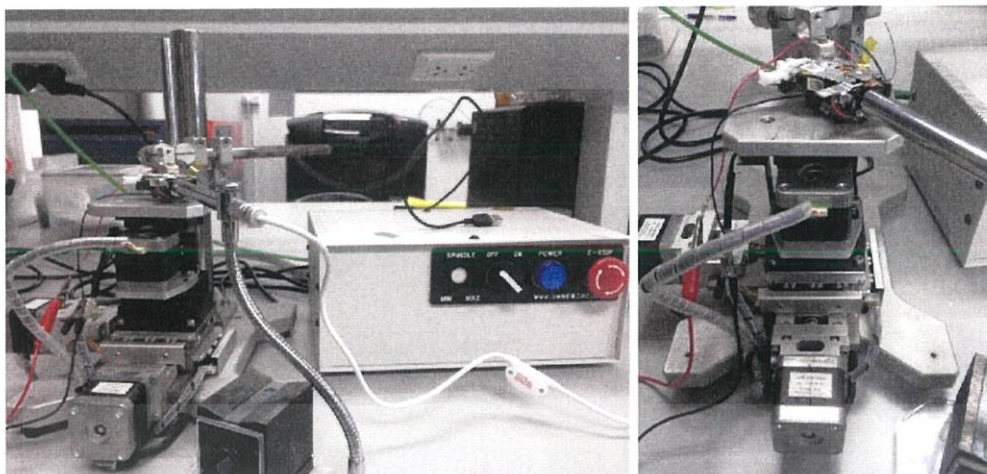


ภาพที่ 3.3 แผ่นซิลิกอน

### 3.1.3 เครื่องควบคุมแกนสามมิติ (3D-Axis Motion Stage)

ควบคุมการเคลื่อนที่ของชิ้นงานที่ต้องการทดลอง โดยประยุกต์ใช้งานจากเครื่อง Computer Numerical Control (CNC) มาทำเป็นแท่นเคลื่อนที่สามมิติ ซึ่งมีความละเอียดในระดับ 1 ไมโครเมตร และสั่งการด้วยโปรแกรม Mach3Mill

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.4 เครื่อง CNC

### 3.1.4 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope)

กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงใช้เพื่อวิเคราะห์ผลการเขียนลวดลาย วัดขนาด และบันทึกผลการทดลองในแต่ละเงื่อนไขที่ใช้ทดลอง



ภาพที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

### 3.1.5 กล้องจุลทรรศน์ยูเอสบี (USB Digital Microscope)

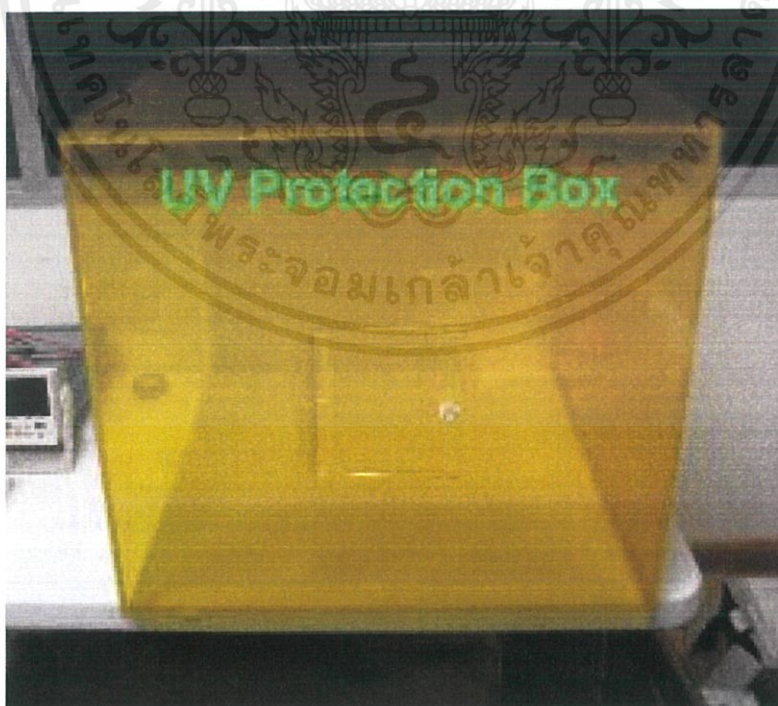
ใช้ในการทดลองหาโฟกัสของหัวอ่านบลูเรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์ยูเอสบี

3.1.6 กล่องป้องกันรังสียูวี (UV Protection Box)  
 ป้องกันแสงในช่วงยูวีไม่ให้เข้ามาทำปฏิกิริยาหรือทำลายชั้นฟิล์มของสารไวแสง



ภาพที่ 3.7 กล่องป้องกันรังสียูวี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.7 เครื่องเคลือบผิววัสดุ (Spin Coating)

ใช้เคลือบสารไวแสงลงบนแผ่นซิลิกอน



ภาพที่ 3.8 เครื่องเคลือบผิววัสดุ

### 3.1.8 ปั๊มสุญญากาศ (Rotary Vacuum Pump)

ใช้ดูดแผ่นซิลิกอนให้ติดกับเครื่องเคลือบผิววัสดุขณะที่ทำการหมุนเหวี่ยง โดยการต่อกับเครื่องเคลือบผิววัสดุ



ภาพที่ 3.9 ปั๊มสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.9 เครื่องให้ความร้อน (Hot Plate)

ให้ความร้อนแก่แผ่นซิลิกอนหลังถูกเคลือบด้วย ma-P 331



ภาพที่ 3.10 เครื่องให้ความร้อน

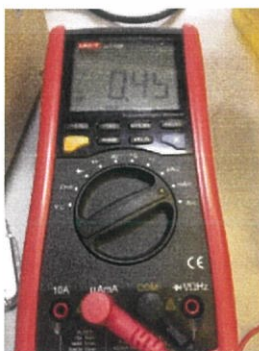
### 3.1.10 ชุดอุปกรณ์ตัดแผ่นซิลิกอน

ใช้ที่ตัดแผ่นซิลิกอนหัวเพชรและไม้บรรทัดเพื่อวัดขนาด



ภาพที่ 3.11 ชุดอุปกรณ์ตัดแผ่นซิลิกอน

### 3.1.11 มัลติมิเตอร์



ภาพที่ 3.12 มัลติมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

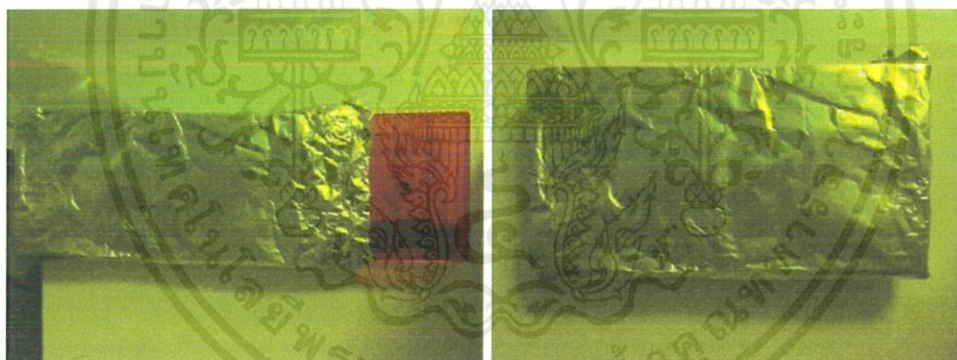
### 3.2.1 การเตรียมฟิล์มของสารไวแสง

ความหนาของฟิล์มของสารไวแสง จะหนาประมาณ 500 นาโนเมตร เตรียมด้วยวิธีการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงด้วยสารไวแสง ma-P 1205 ก่อนหยดสารควรรอพักให้สารเย็นตัวลงเท่ากับอุณหภูมิห้องเสียก่อนจึงจะหยดให้ทั่วแผ่นซิลิกอน จากนั้นทำการหมุนด้วยความเร็ว 2000 รอบต่อวินาที ใช้เวลา 1 นาที เมื่อหมุนเสร็จให้นำแผ่นซิลิกอนไปวางบนเครื่องให้ความร้อน (Hot plate) ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นทำการตัดแผ่นซิลิกอนด้วยที่ตัดหัวเพชรขนาด 1.5x2.5 ตารางเซนติเมตร

การเตรียมสารไวแสงมีผลกับลวดลายที่จะเกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากหลายๆปัจจัย เช่น อายุของสารไวแสง อุณหภูมิของสารไวแสง เครื่องให้ความร้อนที่ต่างกันทำให้อุณหภูมิที่ฟิล์มได้รับไม่เท่ากัน ส่งผลต่อเกรนของฟิล์ม และส่งผลไปถึงกระบวนการเขียนลวดลายถัดไป

### 3.2.2 การเก็บชิ้นงานหลังเคลือบด้วยสารไวแสง

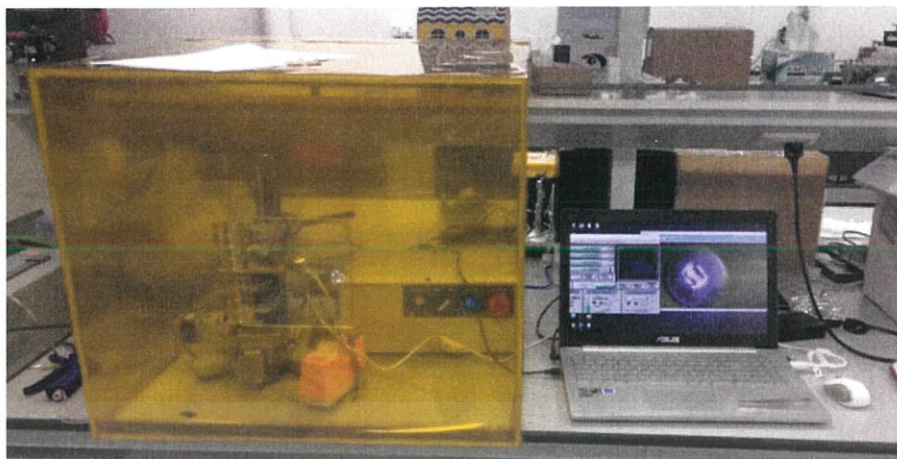
หลังจากแผ่นซิลิกอนถูกเคลือบด้วยสารไวแสงและถูกแบ่งตามขนาดที่ได้กำหนดไว้ การเก็บรักษาชิ้นงานต้องเก็บไม่ให้โดนแสงยูวีเพื่อป้องกันฟิล์มถูกทำลาย โดยจะเก็บไว้ในกล่องเก็บชิ้นงานแล้วห่อด้วยกระดาษฟอยด์



ภาพที่ 3.13 การเก็บรักษาชิ้นงานในกระดาษฟอยด์

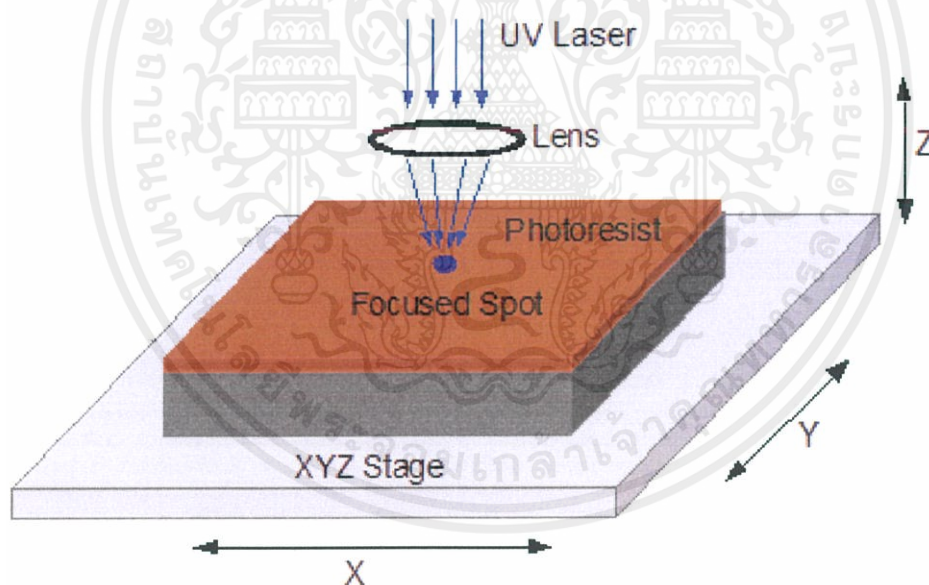
### 3.2.3 การสร้างลวดลาย

หลังจากที่เตรียมชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว การเขียนลวดลายจะถูกสั่งการด้วยระบบคอมพิวเตอร์ที่ควบคุมเครื่อง CNC โดยชิ้นงานจะติดอยู่บนฐานเคลื่อนที่สามมิติ ในขณะที่หัวอ่านบลูเรย์จะถูกติดตั้งในส่วนที่ไม่สามารถขยับได้ กระบวนการทั้งหมดนี้จะกระทำภายในกล่องป้องกันแสงยูวี (UV Protection Box)



ภาพที่ 3.14 ส่วนประกอบของชุดการทำโฟโตลิโทกราฟีโดยไม่ใช้โฟโตแมสค์

การจะสร้างลวดลายที่มีความคมชัดและมีขนาดเล็กต้องทำให้แสงจากหัวอ่านบลูเรย์โฟกัสพอดีกับพื้นผิวของชิ้นงาน ซึ่งจะใช้หลักการของเครื่องตรวจจับแสงเพื่อหาโฟกัสอย่างง่ายดังที่กล่าวในบทที่ 2 เมื่อหาตำแหน่งโฟกัสได้แล้วจึงจะสามารถเริ่มการเขียนลวดลายได้

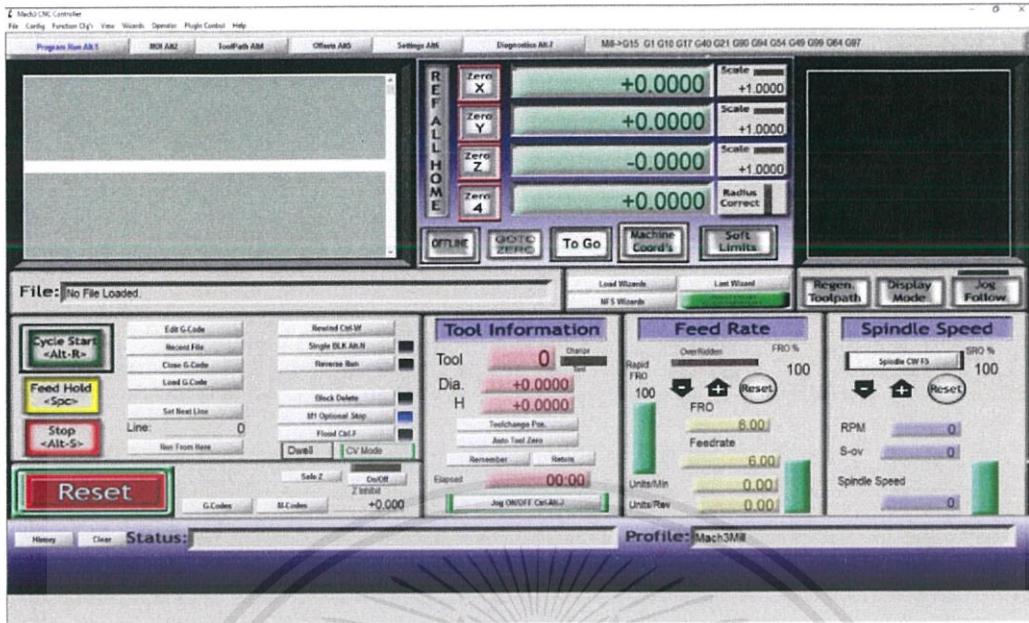


ภาพที่ 3.15 โครงสร้างการสร้างลวดลายด้วยวิธีโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้แมสค์

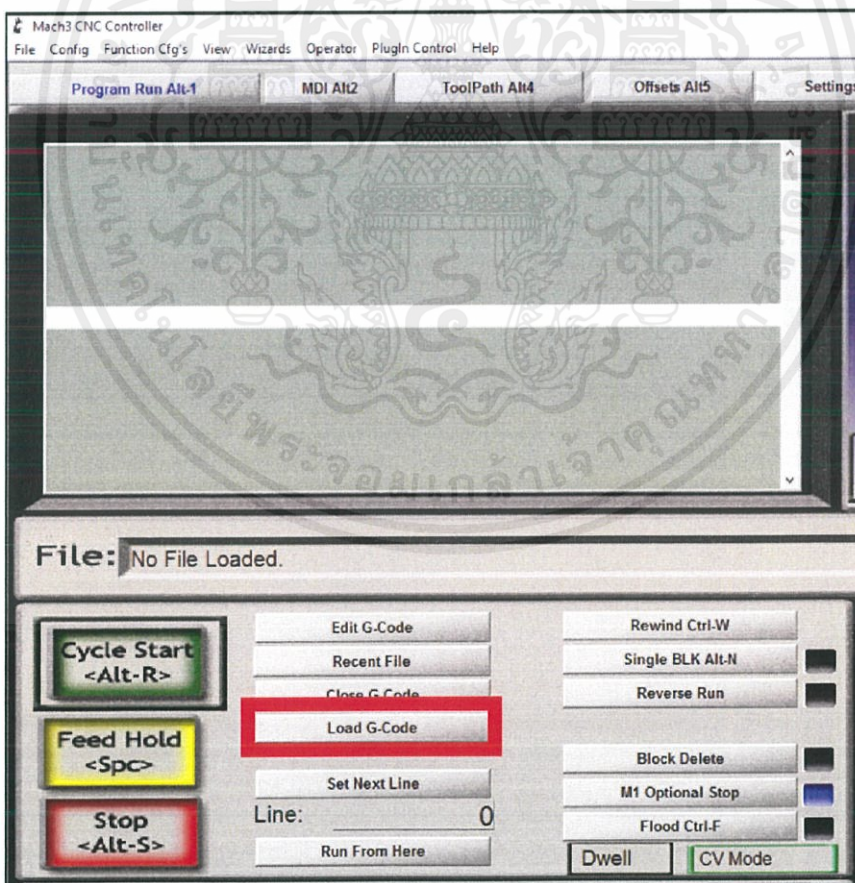
### 3.2.3.1 การกำหนดลวดลาย

การกำหนดลักษณะ ออกแบบ หรือการสร้างลวดลายจะถูกควบคุมด้วยโปรแกรม Mach3Mill ซึ่งเป็นโปรแกรมใช้ควบคุมเครื่อง CNC การทำงานของโปรแกรมจะเคลื่อนที่ได้ 2 วิธี ได้แก่ การควบคุมด้วยคีย์บอร์ดสามารถสั่งการเคลื่อนที่ซ้าย-ขวา ขึ้น-ลงจากแป้นพิมพ์บนคอมพิวเตอร์และการเคลื่อนที่โดยการอ่าน G-Code ที่ป้อนให้กับโปรแกรม โดยการใช้งานจะเป็นไปดังภาพที่ 3.16 – 3.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

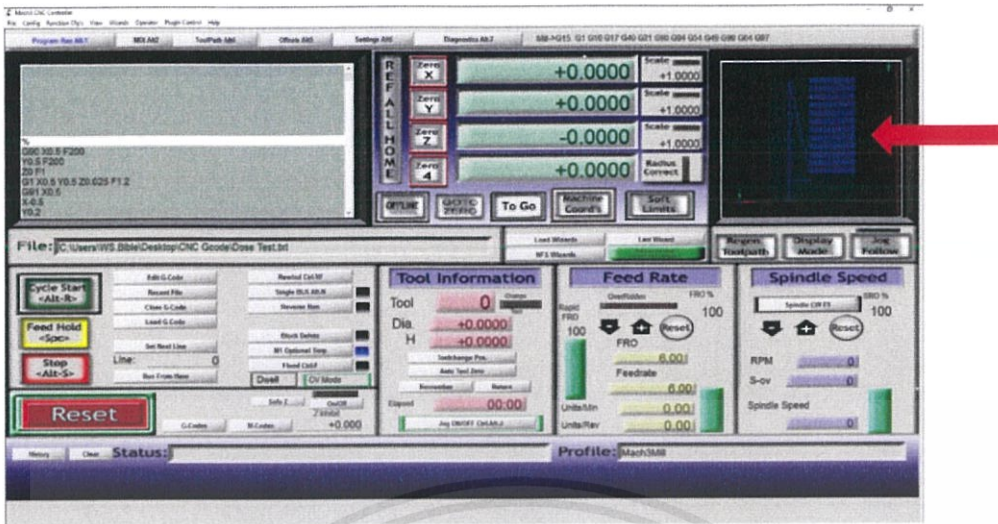


ภาพที่ 3.16 หน้าต่างโปรแกรม Mach3Mill

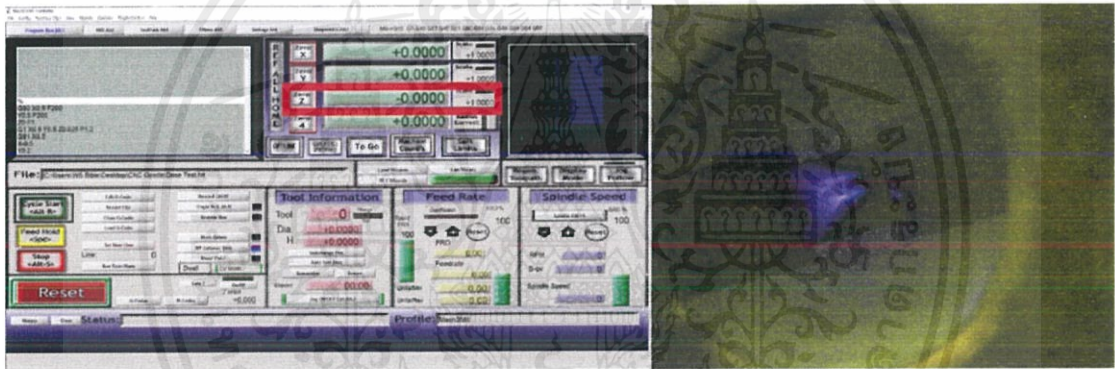


ภาพที่ 3.17 กดที่ปุ่ม Load G-Code เพื่อเลือกโค้ดของลวดลายเข้าสู่โปรแกรม

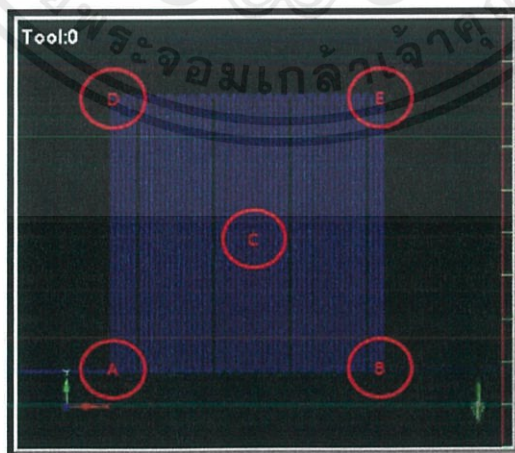
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.18 เมื่อเลือกโค้ดเข้าสู่โปรแกรมแล้ว โปรแกรมจะแสดงรูปแบบของลวดลายตามโค้ดที่ได้รับ

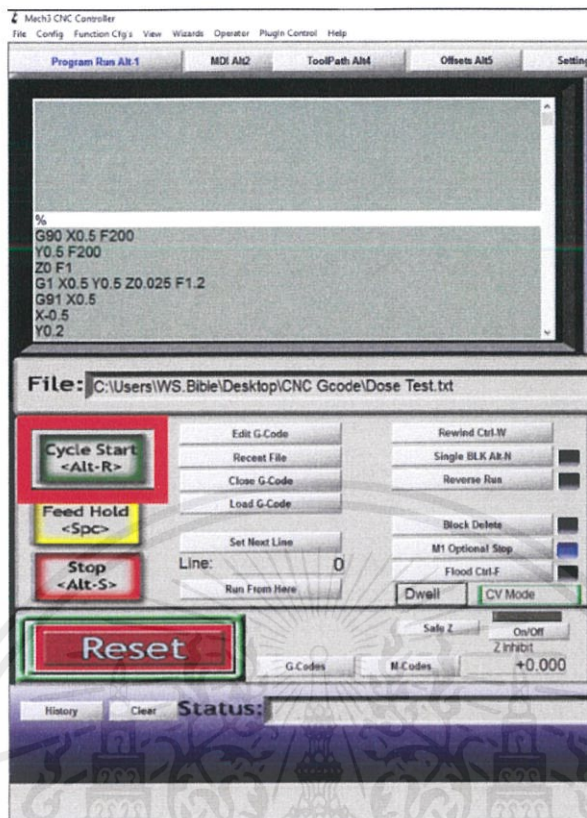


ภาพที่ 3.19 ทำการปรับแกน Z ขึ้น-ลง เพื่อหาระยะไฟกัส โดยเทียบไฟกัสไปพร้อมกับการเคลื่อนที่



ภาพที่ 3.20 ทำการตรวจสอบความเอียงของชิ้นงานโดยการเทียบไฟกัสตั้งแต่จุด A-E ให้ได้ภาพเหมือนหรือใกล้เคียงกัน

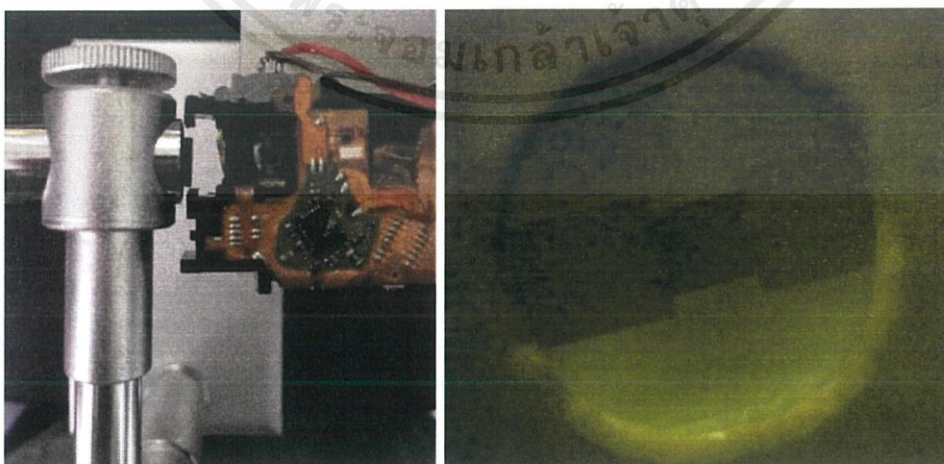
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.21 เมื่อเซ็ทระบบพร้อมแล้วกดปุ่ม Cycle Start เพื่อเริ่มการทำงานของโปรแกรม

### 3.2.3.2 การทดลองหาระยะไฟกัสจริง

จากการใช้กล้องจุลทรรศน์ยูเอสบีสองไปที่ช่องเครื่องตรวจจับแสง ดังรูป 3.22 แล้วดูแสงสะท้อนกลับเพื่อหาไฟกัส โดยจะทดลองโดยการคาดการณ์ระยะไฟกัสจากภาพที่ได้ แล้วทดลองเขียนลวดลายแล้วเปลี่ยนความสูง-ต่ำ (แกน Z) เพื่อหาระยะไฟกัสจริงว่าตรงกับจุดที่สนใจจากภาพหรือไม่

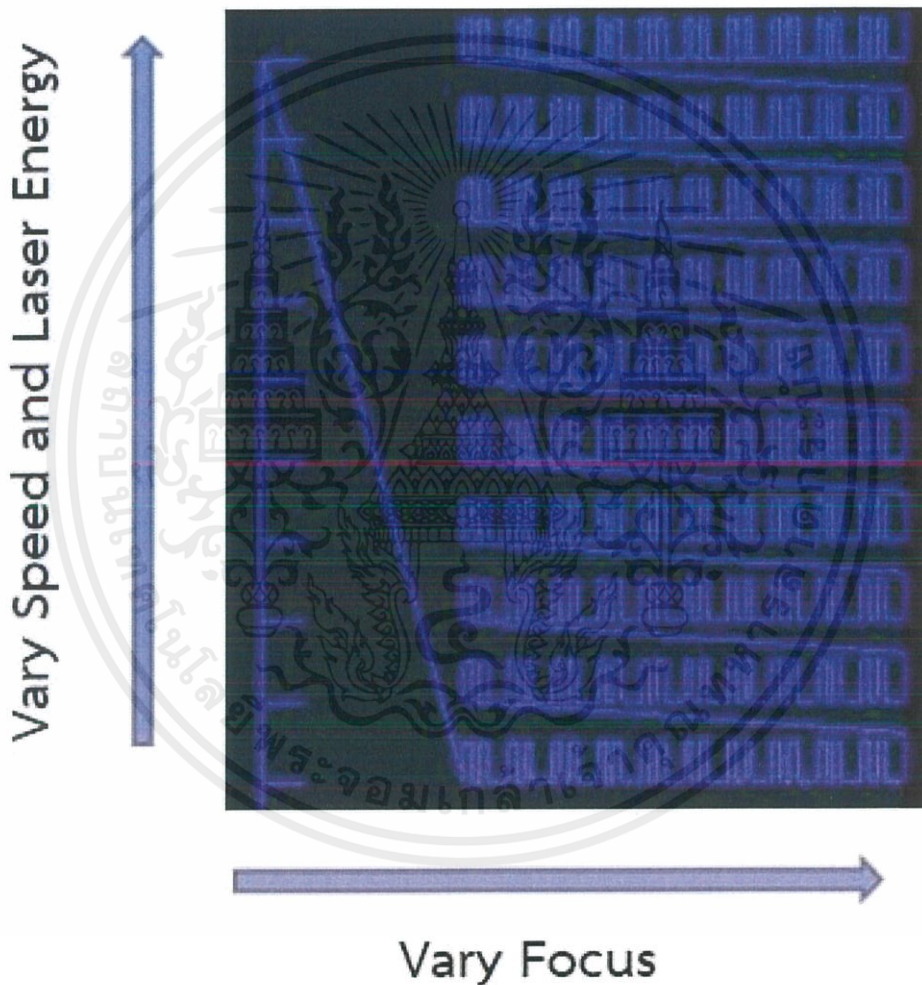


ภาพที่ 3.22 การทดลองหาระยะไฟกัสของแสงบลูเรย์ และภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ยูเอสบี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3.3 การทดลองเพื่อสอบเทียบเครื่องมือ (Calibration)

ก่อนทำการทดลองในแต่ละครั้งต้องทำการสอบเทียบเครื่องมือทุกครั้งเพื่อให้การทดลองเป็นไปในแนวทางเดียวกัน การทดลองการสอบเทียบจะทำให้สามารถระบุหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดแล้วนำมาวิเคราะห์เทียบกับผลในครั้งต่อไปได้ โดยจะทำการทดลองหาเงื่อนไขจากการเปลี่ยนตัวแปร 3 ตัว ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้า ความเร็ว และระยะโฟกัส ซึ่งมีแนวทางในการทดลองดังภาพที่ 3.23 ให้แกนตั้งเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าและความเร็ว เริ่มจากน้อยไปมาก แกนนอนเป็นการเปลี่ยนระยะโฟกัสที่ขยับเข้าใกล้หัวอ่านบลูเรย์มีหน่วยเป็น ไมโครเมตร และใช้ชื่อแทนว่า  $Z(x)$  โดยที่  $x$  เป็นระยะที่เข้าใกล้หัวอ่านบลูเรย์



ภาพที่ 3.23 ลวดลายการทำการสอบเทียบเครื่องมือ

### 3.2.4 การทดลองหาขีดความสามารถของระบบโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้โฟโตแมสค์

#### 3.2.4.1 ความสามารถในการทดลองซ้ำ (Repeatability)

หลังจากทำการสอบเทียบเครื่องมือแล้ว เมื่อทดลองซ้ำเครื่องมือจะสามารถให้ลวดลายที่มีขนาดเท่าเดิมหรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.4.2 ความสามารถในการเขียนลวดลายขนาดเล็ก (Resolution)

ขนาดของลวดลายสามารถเขียนได้จำนวนเส้นต่อพื้นที่มากแค่ไหน เช่น ใน 1 ตารางเซนติเมตร จะสามารถเขียนลวดลายแบบเส้นได้กี่เส้น เป็นต้น

### 3.2.4.3 ความสามารถในการเขียนในพื้นที่ที่กว้าง (Uniformity)

เมื่อเขียนลวดลายในระยะกว้างหรือขนาดใหญ่ ลวดลายจะมีความสม่ำเสมอเท่ากันทั้งหมดหรือไม่ และจะบอกได้ถึงประสิทธิภาพในการจัดตำแหน่ง (Alignment) ว่ามีประสิทธิภาพแค่ไหน

## 3.2.5 การล้างสารไวแสง

หลังจากเสร็จการเขียนลวดลายก่อนจะนำมาสารไวแสง ชิ้นงานต้องห้ามโดนแสงจากภายนอก กระบวนการล้างสารไวแสงก็จะอยู่ในห้องป้องกันแสงยูวีเช่นกัน

การล้างสารไวแสงจะใช้สารล้างฟิล์ม ma-D 331 ในการชะล้าง วิธีการล้างคือ

- (1) จุ่มชิ้นงานลงในสารละลาย ma-D 331 เป็นเวลา 20 วินาที
- (2) เขย่าชิ้นงานหรือปิกเกอร์ที่บรรจุสารละลาย ma-D 331 เป็นเวลา 40 วินาที
- (3) เมื่อครบเวลาตามกำหนดให้นำชิ้นงานขึ้นมาแล้วล้างด้วยน้ำปลอดประจุ (DI)
- (4) นำชิ้นงานไปเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน และนำไปตรวจสอบผลการทดลอง

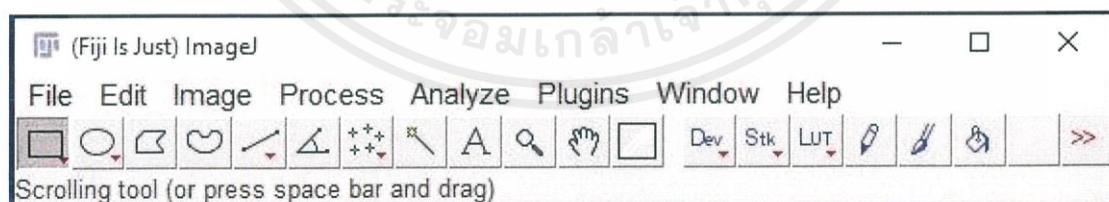
## 3.2.6 การตรวจสอบผลการทดลอง

ผลการทดลองจะตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงเพื่อตรวจสอบลวดลายต่างๆที่เกิดขึ้น พร้อมทั้งวัดขนาดของลวดลายที่ได้ และบันทึกภาพ

ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์สามารถนำมาวิเคราะห์เพิ่มเติมหาความขรุขระของขอบของลวดลาย (Line Edge Roughness)

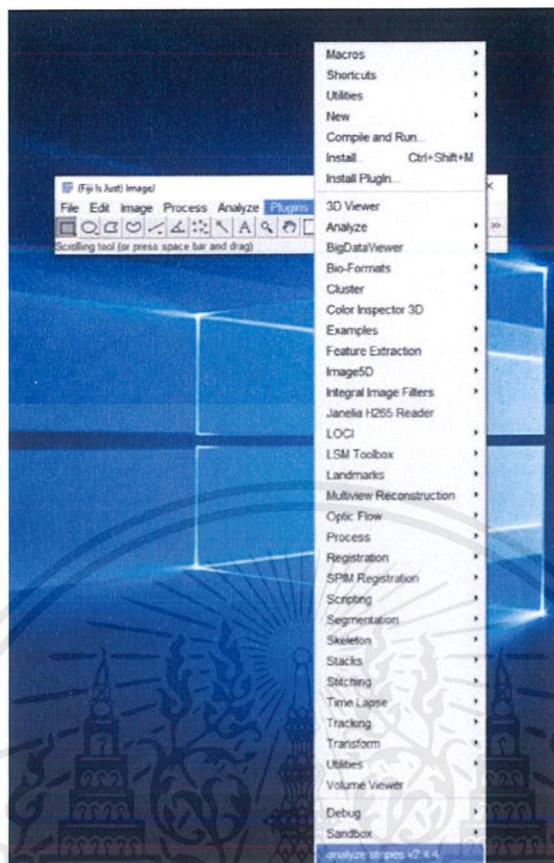
## 3.2.7 การวัดขนาดและความขรุขระของลวดลาย

ขนาดและความขรุขระของขอบของลวดลาย (Line Edge Roughness) จะถูกวัดด้วยโปรแกรม Fiji โดยใช้ฟังก์ชันเสริมชื่อ Analyze Stripes v2.4.4

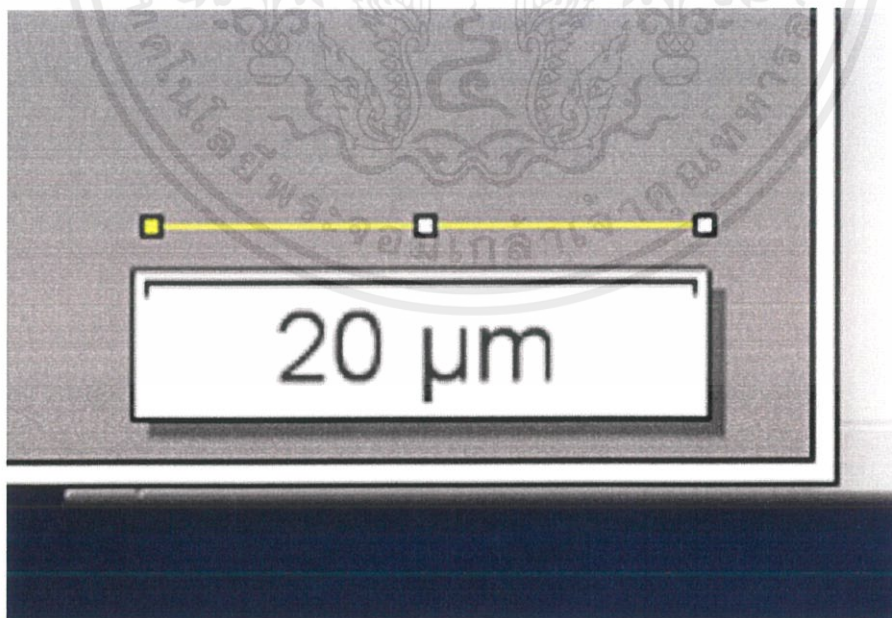


ภาพที่ 3.24 หน้าต่างโปรแกรมเริ่มแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

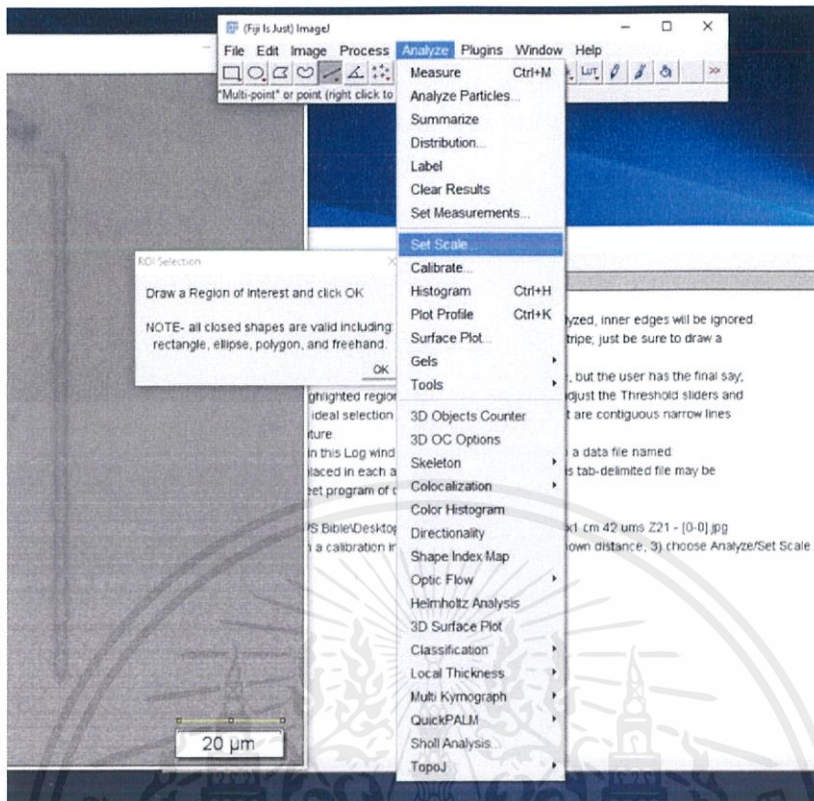


ภาพที่ 3.25 กดเลือกที่ Plugins --> analyze stripes v2.4.4 เพื่อเลือกรูปภาพที่จะทำการวัด

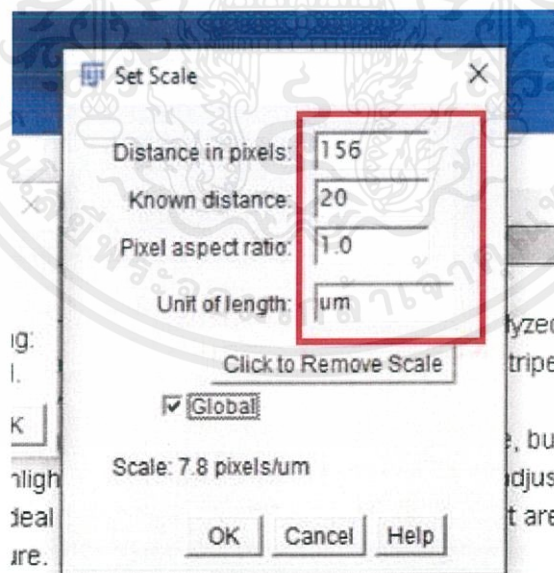


ภาพที่ 3.26 ทำการวัดขนาดของ label ของรูปภาพเพื่อทำการ Set Scale

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

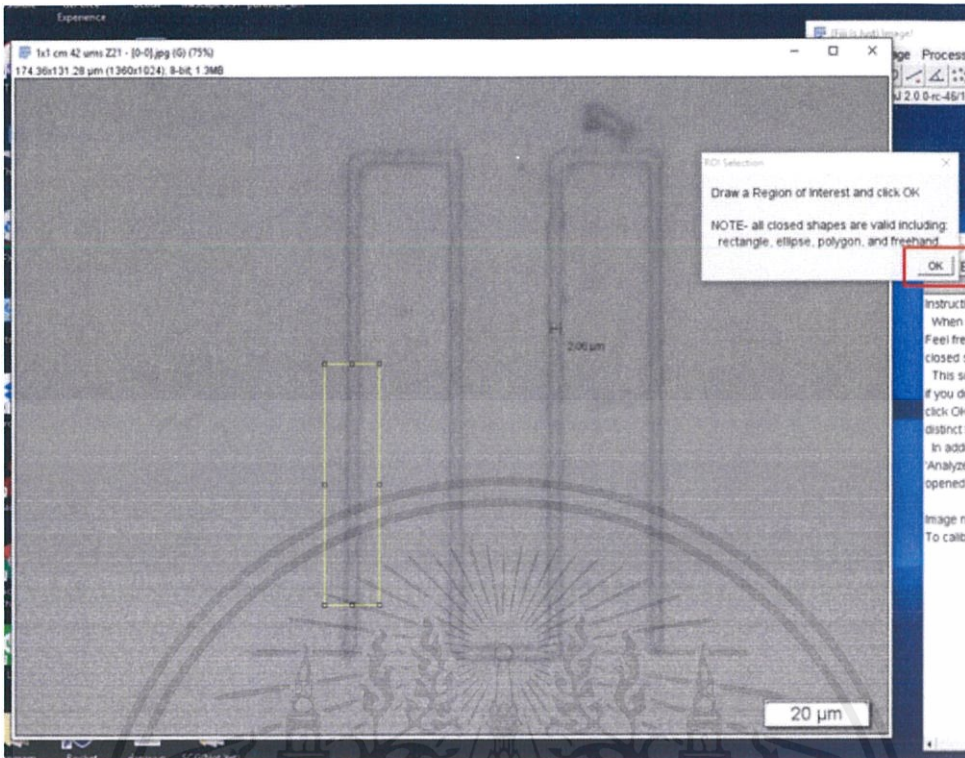


ภาพที่ 3.27 เลือกที่ Analyze --> Set Scale

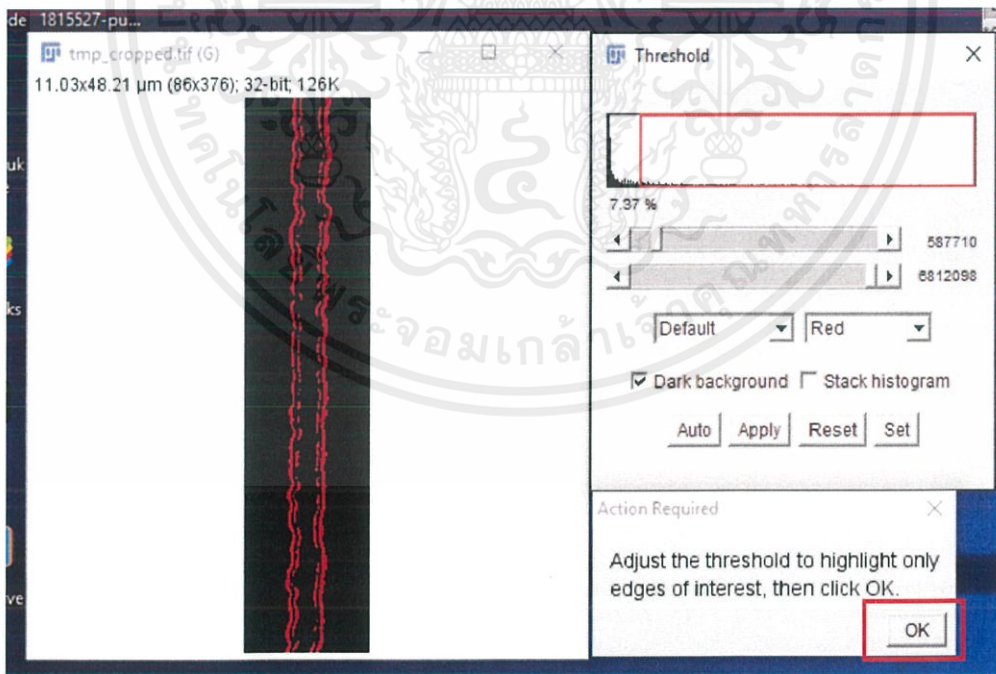


ภาพที่ 3.28 กรอกขนาดของ label ที่ช่อง Known Distance เพื่อเป็นการทำ baseline ข้อมูลทั้งหมดจากนั้นกด OK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

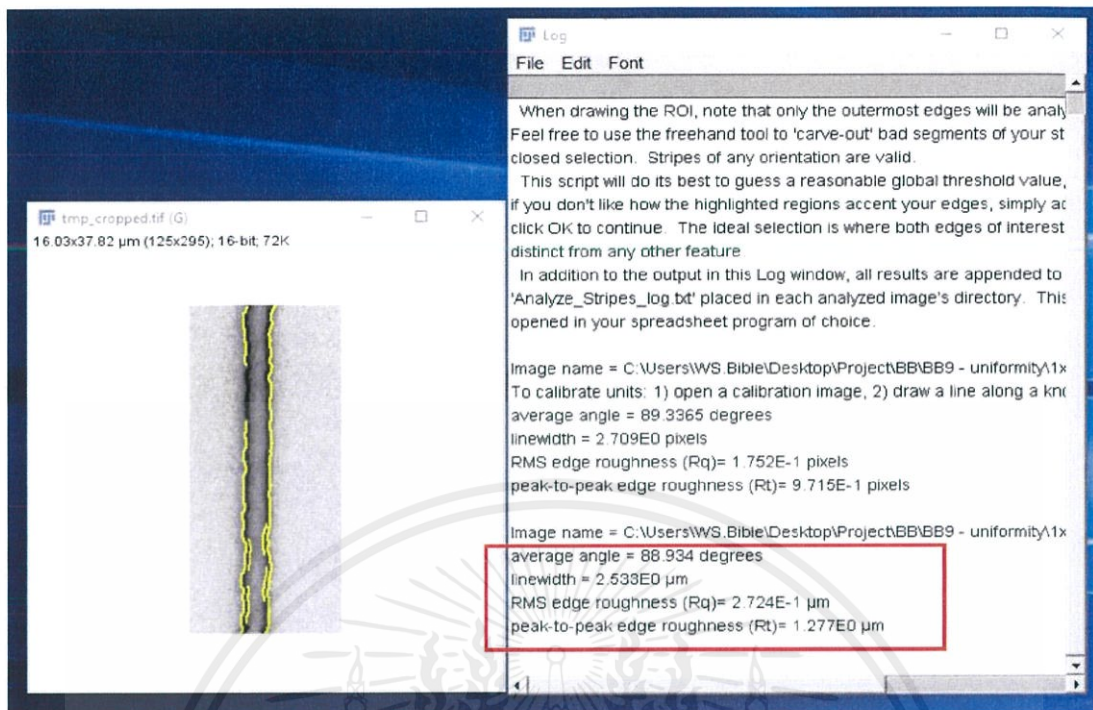


ภาพที่ 3.29 เลือกตำแหน่งของลวดลายที่ต้องการวัด จากนั้นกดปุ่ม OK



ภาพที่ 3.30 จะได้ภาพส่วนที่ต้องการวัดขนาด จากนั้นกดปุ่ม OK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.31 โปรแกรมจะทำการวัดขนาดของลวดลายและความขรุขระของลวดลาย โดยจะแสดงผลที่หน้าต่าง Log

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.32 Flow Chart แสดงแผนผังการทำงานโครงการวิจัย

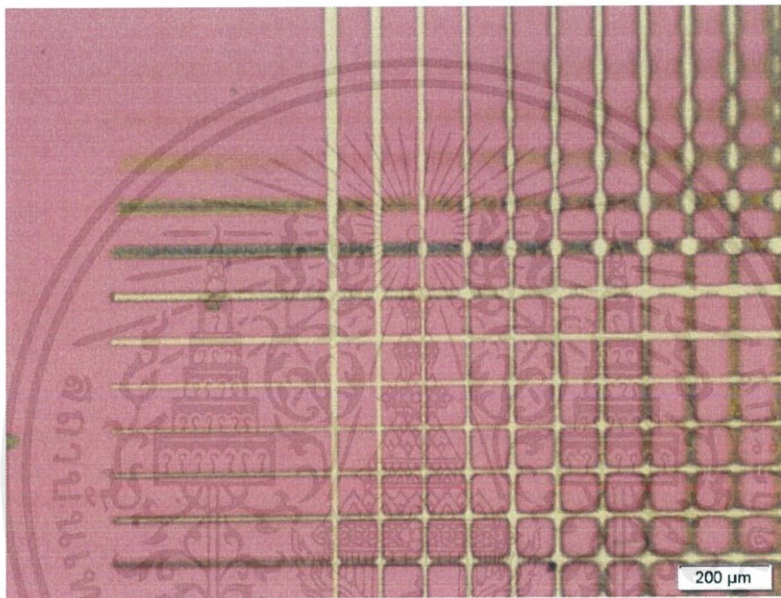
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 4.1 ผลการทดลองการเขียนลวดลาย

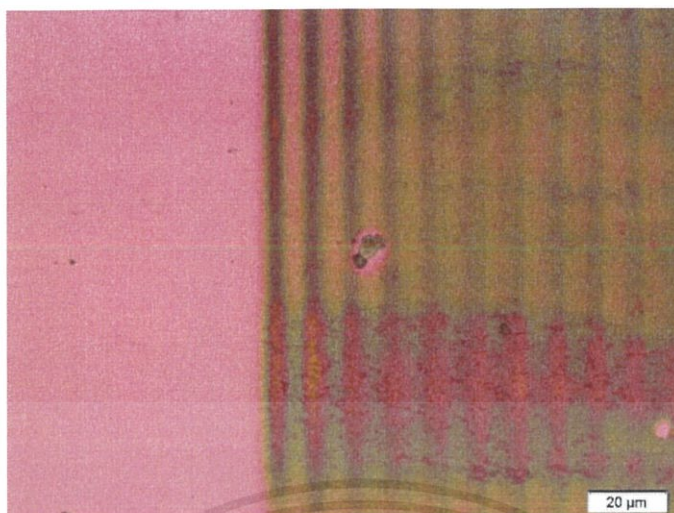
เขียนลวดลายโดยการกำหนดรูปแบบของลวดลายและควบคุมด้วยพารามิเตอร์ต่างความเร็วและศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้หัวอ่านบลูเรย์



ภาพที่ 4.1 ลวดลายที่ปรากฏหลังการให้แสงสีน้ำเงินจากหัวอ่านบลูเรย์

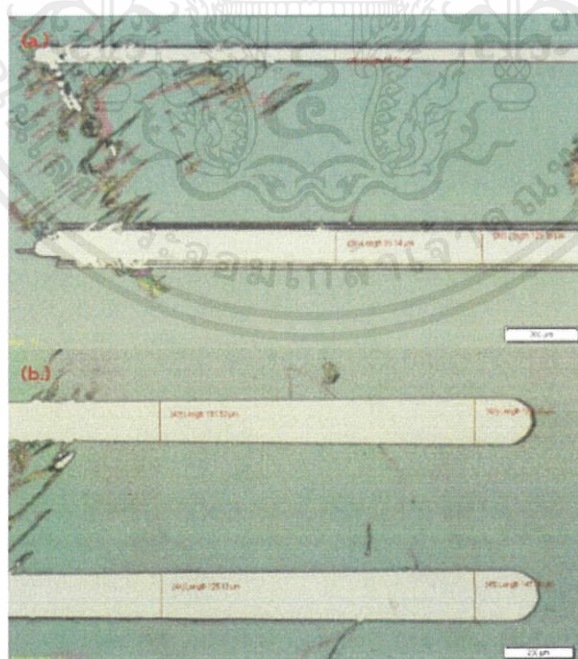
จากภาพที่ 4.1 จะเห็นว่าเส้นลวดลายต่างๆมีขนาดไม่เท่ากันและมีส่วนที่เกิดการอันเดอร์เดเวลอป (Underdevelop) แต่ละเส้นมีขนาดที่ไม่เท่ากันตั้งแต่ขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ สาเหตุเกิดมาจากการทดลองเปลี่ยนระยะแกน z หรือ ระยะโฟกัสของแสงในแต่ละเส้น เพื่อที่จะหาว่าระยะโฟกัสนั้นอยู่ในช่วงใด จากการทดลองในขั้นนี้จะทำให้ประมาณระยะโฟกัสของเลนส์ใกล้วัตถุของหัวอ่านบลูเรย์ได้

จากการทดลองข้างต้นยังพบอีกว่าลวดลายไม่ได้เกิดเป็นลวดลายตลอดทั้งเส้น ในส่วนปลายของเส้นตรงเกิดการอันเดอร์เดเวลอปขึ้น ดังภาพที่ 4.2 จึงมีการตั้งข้อสังเกตว่าเพราะเหตุใดลวดลายจึงไม่สามารถเกิดได้ตลอดทั้งเส้น



ภาพที่ 4.2 ส่วนปลายของเส้นลวดลายที่เกิดการอันเดอร์เดเวลอป

เนื่องจากตลอดเส้นลวดลาย 1 เส้น จะใช้ระยะโฟกัสเท่ากันตลอดทั้งเส้น และลวดลายทั้งหมดอยู่ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน จึงสันนิษฐานว่าการเกิดการอันเดอร์เดเวลอปเกิดจากการเอียงของชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการจัดตำแหน่ง (Alignment) ทำให้เมื่อเขียนลวดลายเป็นบริเวณกว้างจึงเกิดการเปลี่ยนไปของระยะโฟกัสเมื่อแสงไม่ได้อยู่ในตำแหน่งโฟกัสทำให้กำลังงานแสงต่อพื้นที่ลดต่ำลงและไม่เพียงพอต่อการทำลายพันธะของสารไวแสงให้เกิดการเปลี่ยนแปลง หรือหากให้ศักย์ไฟฟ้าที่สูงอาจทำให้ลวดลายมีขนาดใหญ่ขึ้น ถึงแม้แสงจะไม่ได้อยู่ในตำแหน่งโฟกัส ดังรูป 4.3

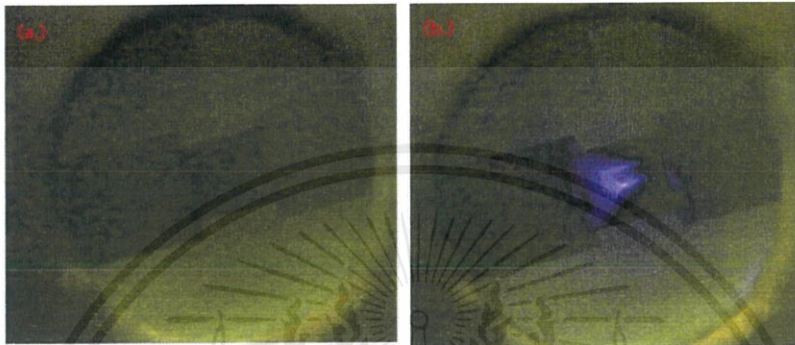


ภาพที่ 4.3 ภาพแสดงผลที่เกิดจากการไม่จัดตำแหน่ง (a.) เส้นลวดลาย ณ จุดเริ่มต้นการทดลอง (b.) เส้นลวดลายส่วนปลายของภาพ (a.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

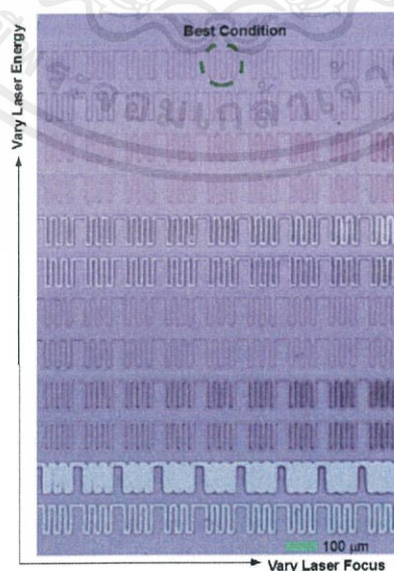
## 4.2 ผลการทดลองการแก้ปัญหาระยะโฟกัสโดยกล้องจุลทรรศน์ยูเอสบี

โดยทั่วไปแล้วหัวอ่านบลูเรย์มีเครื่องตรวจจับแสงภายในตัวและมีระบบการหาโฟกัสอัตโนมัติ (Autofocusing) แต่เนื่องจากการถอดชุดอุปกรณ์หัวอ่านบลูเรย์ออกจากชุดอุปกรณ์หลัก การควบคุมระบบโฟกัสอัตโนมัติจึงเป็นไปได้ยาก จึงเปลี่ยนมาใช้ในการทดลองโดยนำกล้องจุลทรรศน์ยูเอสบีมาส่องเข้าไปแทนที่เครื่องตรวจจับแสงของหัวอ่านบลูเรย์ และทำการให้ศักย์ไฟฟ้าเพื่อให้เกิดแสงสีน้ำเงินขึ้น แล้วเริ่มทำการทดลอง



ภาพที่ 4.4 ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ยูเอสบี (a.) ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ยูเอสบี (b.) ตำแหน่งที่คาดว่าเป็นโฟกัส

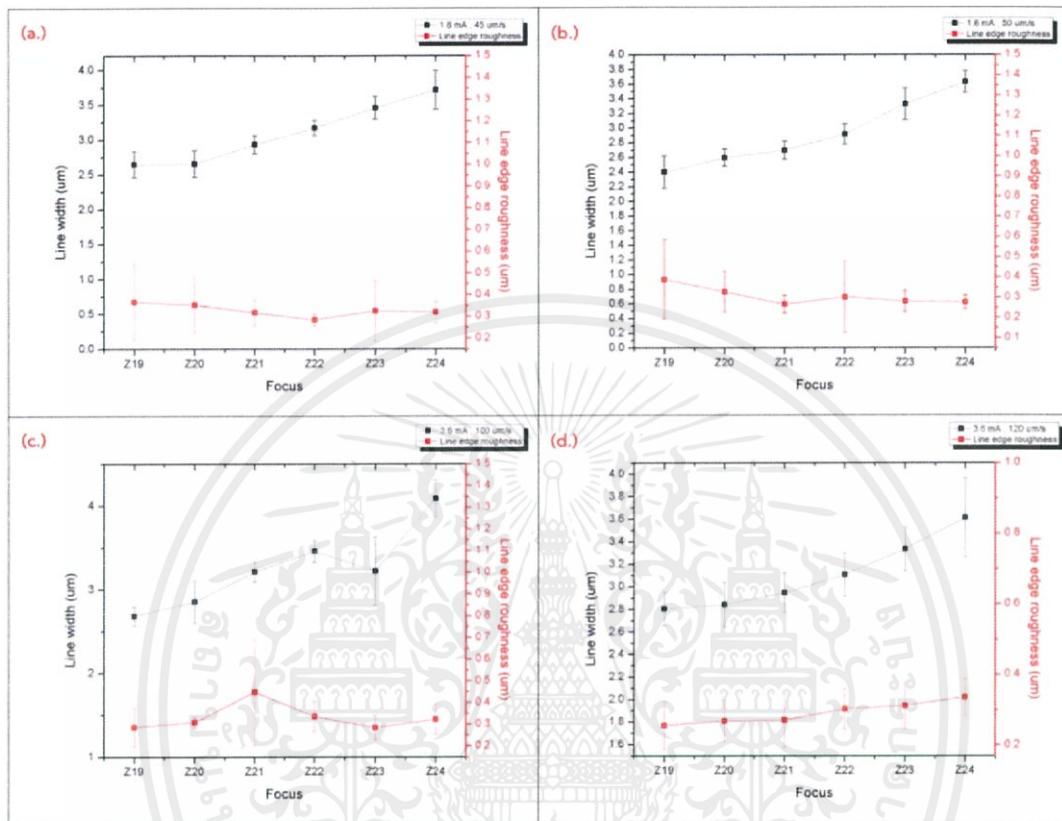
จากภาพที่ 4.4 จะเห็นว่าจุดแสงมีขนาดเล็กและอยู่กึ่งกลางของแผ่นกัน จึงคาดการณ์ได้ว่าแสงที่ตกกระทบเครื่องตรวจจับแสงจะมีน้อยมากจนบอกได้ว่าเป็นตำแหน่งโฟกัสจริงตามหลักแอสติกมาติก และเริ่มเขียนลวดลายโดยยังคงทำการหาระยะโฟกัสที่แท้จริงโดยการเปลี่ยนแกน  $z$  ขึ้น-ลง ในการทดลองเมื่อ  $z$  มีค่าเพิ่มขึ้นหมายถึงมีการเคลื่อนที่เข้าใกล้กันระหว่างหัวอ่านบลูเรย์กับชิ้นงานในหน่วยไมโครเมตร



ภาพที่ 4.5 การทดลองหาเงื่อนไขที่เหมาะสมทั้งระยะโฟกัส และศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้หัวอ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 4.5 แสดงถึงวิธีการทดลองหาระยะโฟกัสโดยจะคำนึงถึงพารามิเตอร์ที่สำคัญ 3 อย่าง ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้า ความเร็ว และระยะโฟกัส ซึ่งลวดลายที่เล็กที่สุดจะเป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุด การวัดขนาดจะใช้วิธีทางสถิติ



ภาพที่ 4.6 กราฟแสดงขนาดและความขรุขระของลวดลายที่เงื่อนไขต่างกัน (a.) เงื่อนไขที่ความเร็ว 45  $\mu\text{m/s}$ , กระแส 1.8 mA (b.) เงื่อนไขที่ความเร็ว 50  $\mu\text{m/s}$ , กระแส 1.8 mA (c.) เงื่อนไขที่ความเร็ว 100  $\mu\text{m/s}$ , กระแส 3.6 mA (d.) เงื่อนไขที่ความเร็ว 120  $\mu\text{m/s}$ , กระแส 3.6 mA

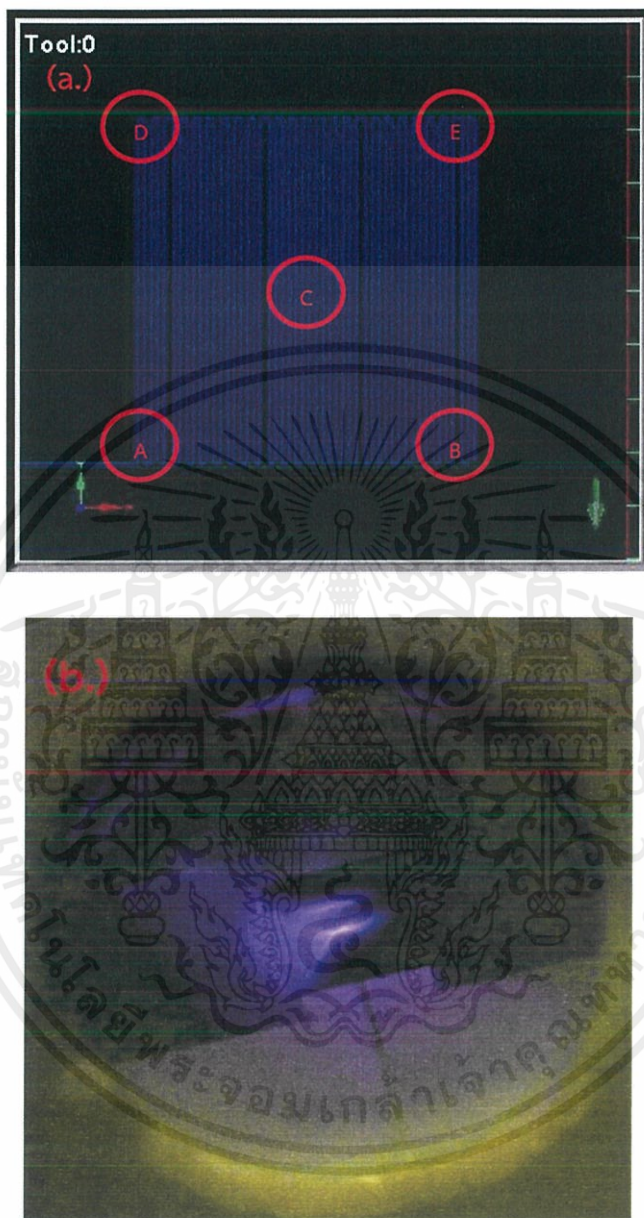
จากภาพที่ 4.6 กราฟ (a.) ถึงกราฟ (d.) แสดงขนาดของลวดลายที่เล็กที่สุดที่ตำแหน่งเดียวกันทุกเงื่อนไขคือ ตำแหน่ง Z19 หรือ ตำแหน่งที่ใกล้จากจุดสังเกตเดิม 19 ไมโครเมตร โดยข้อมูลก่อนหน้า Z19 นั้นไม่สามารถวัดขนาดได้เนื่องจากเกิดการอันเดอร์เดเวลอป จึงจำเป็นที่จะต้องวัดขนาดโดยเริ่มตั้งแต่ Z19 ไปจนถึงตำแหน่งที่สามารถวัดได้ตำแหน่งสุดท้าย และจากการทดลองสามารถบอกได้ว่าตำแหน่งโฟกัสที่แท้จริงคือตำแหน่ง Z19

### 4.3 ผลการทดลองการแก้ปัญหาการจัดตำแหน่ง (Alignment)

จากปัญหาการจัดตำแหน่งดังกล่าวไว้ในผลการทดลองข้างต้น จึงมีการทดลองโดยนำเอาการใช้การสังเกตภาพจากกล้องจุลทรรศน์ยูเอสบีมาระบุความเรียบของชิ้นงานว่ามีความเอียงหรือไม่ โดยจะทำการลากไปที่จุดต่างๆก่อนที่จะเริ่มสร้างลวดลายโดยให้ทุกๆตำแหน่งบนลวดลายไม่เกิดการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

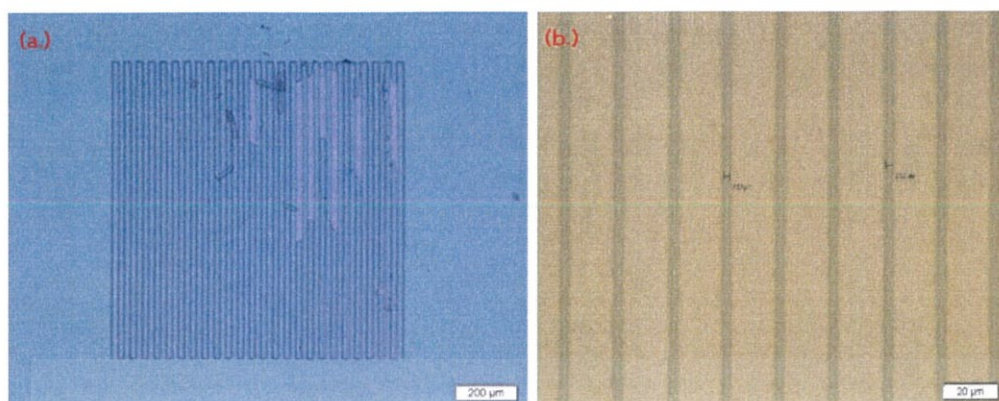
เปลี่ยนแปลงของระยะโฟกัส ถ้าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของระยะโฟกัสตลอดแนวของลวดลายจะสรุปได้ว่าชิ้นงานนั้นเรียบจริง



ภาพที่ 4.7 ภาพแสดงการตรวจสอบระยะห่างของชิ้นงานกับหัวอ่านบลูเรย์ (a.) ตำแหน่งที่ทำการวัดระยะห่างระหว่างหัวอ่านบลูเรย์กับชิ้นงาน (b.) ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ยูเอสบีโดยใช้เป็นตัวกำหนดระยะห่างระหว่างหัวอ่านบลูเรย์และชิ้นงาน

จากภาพที่ 4.7 ทุกตำแหน่งที่จะเขียนลวดลายตั้งแต่ตำแหน่ง A ถึง ตำแหน่ง E จะต้องได้ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ยูเอสบีเหมือนดังในภาพ (b.) ซึ่งเป็นตัวบอกถึงระยะห่างของหัวอ่านบลูเรย์กับชิ้นงาน เมื่อทำให้แสงทุกตำแหน่งเหมือนกัน แสดงว่าทุกๆตำแหน่งมีระยะห่างของหัวอ่านบลูเรย์และชิ้นงานเท่ากันตลอดลวดลาย และเริ่มทำการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.8 การทดลองเขียนลวดลายหลังแก้ปัญหาการจัดตำแหน่ง (a.) ลวดลายในพื้นที่ 1x1 ตารางมิลลิเมตร (b.) ลักษณะลวดลายจากภาพ (a.)

จากภาพที่ 4.8 แสดงให้เห็นถึงความสม่ำเสมอของลวดลายตลอด 1 มิลลิเมตร และบอกได้ว่าการจัดตำแหน่งสามารถทำได้โดยใช้กระบวนการตั้งที่กล่าวมาข้างต้น เนื่องจากทุกตำแหน่งถูกอ้างอิงจากตำแหน่งของแสงที่เท่ากัน ดังนั้นทุกตำแหน่งในชิ้นงานจึงมีความเรียบเท่ากันตลอดลวดลาย จากภาพที่ 4.8 (a.) จะเห็นว่ามี การหลุดของสารไวแสงออกเป็นแผ่น ซึ่งเป็นปัญหาจากการเตรียมชิ้นงาน

การทำการทดลองเพื่อทดลองซ้ำถึงความสามารถในการจัดตำแหน่งของเครื่องมือพบปัญหาจากความไม่เท่าเดิมของลวดลาย หรือก็คือไม่สามารถทำการทดลองซ้ำได้ ดังภาพที่ 4.9



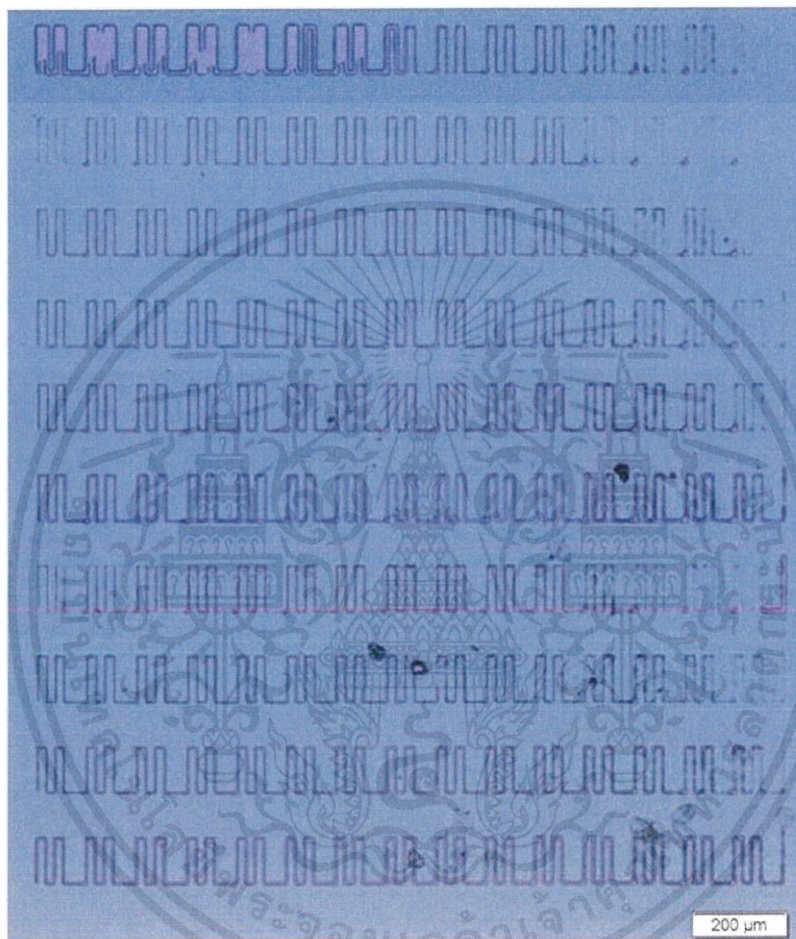
ภาพที่ 4.9 การทดลองเขียนลวดลายหลังแก้ปัญหาการจัดตำแหน่งซ้ำ (a.) ลวดลายในพื้นที่ 1x1 ตารางมิลลิเมตร (b.) ลักษณะลวดลายจากภาพ (a.)

จากการทดลองซ้ำในครั้งนี้จะเห็นว่าลักษณะของลวดลายไม่เหมือนเดิม มีความขรุขระ และขนาดของลวดลายไม่เท่ากับการทดลองในครั้งก่อนหน้า จึงทำการทดลองในการสอบเทียบเครื่อง (Calibration) เพื่อให้สามารถทำการทดลองซ้ำในแต่ละครั้งได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 ผลการทดลองการสอบเทียบเครื่อง (Calibration)

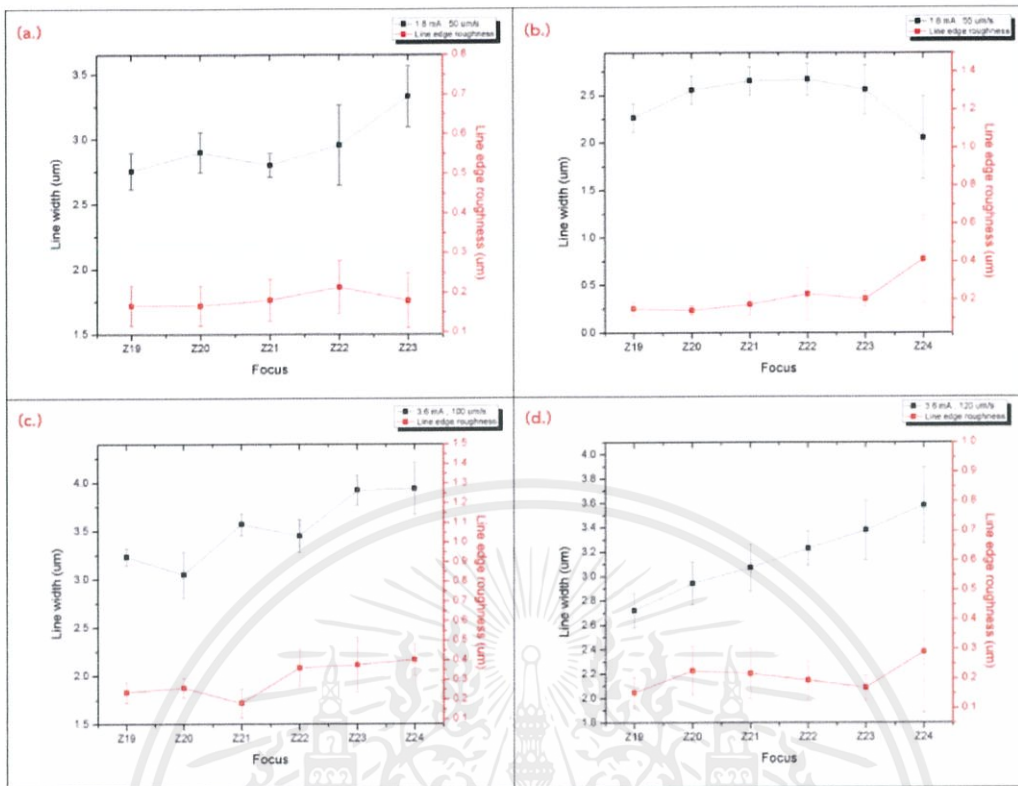
การทดลองเพื่อทำการสอบเทียบเครื่องนั้นจะเป็นการทดลองเพื่อตรวจสอบและทำมาตรฐานของเครื่องในแต่ละครั้งที่ใช้งาน ซึ่งจะทำการหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดหรือลวดลายที่เล็กที่สุดจากการเขียนด้วยเงื่อนไขจำนวนมาก และเมื่อได้เงื่อนไขที่ต้องการจึงนำไปทดลองในหัวข้อต่อไป



ภาพที่ 4.10 ลวดลายที่มีการทดลองเงื่อนไขจำนวนมาก

จากภาพที่ 4.10 จะเห็นว่าเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองการสอบเทียบจะมีเพียงเงื่อนไขเดียวที่ให้ขนาดของลวดลายที่มีขนาดเล็ก การสอบเทียบเครื่องช่วยให้สามารถระบุเงื่อนไขที่ใกล้เคียงหรือเป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุด และในการทดลองในสภาพที่มีตัวแปรต่างกันมากกว่า 1 ตัว การสอบเทียบจะตัดตัวแปรนั้นๆลง เพราะไม่ว่าจะอยู่ในสถานการณ์ใด แม้ว่าเงื่อนไขที่ดีที่สุดจะเปลี่ยนไป แต่การสอบเทียบเครื่องมือจะช่วยให้หาเงื่อนไขที่ดีที่สุดได้ โดยเงื่อนไขที่ดีที่สุดที่นำมาวิเคราะห์และตรวจสอบเป็นไปดังภาพที่ 4.11

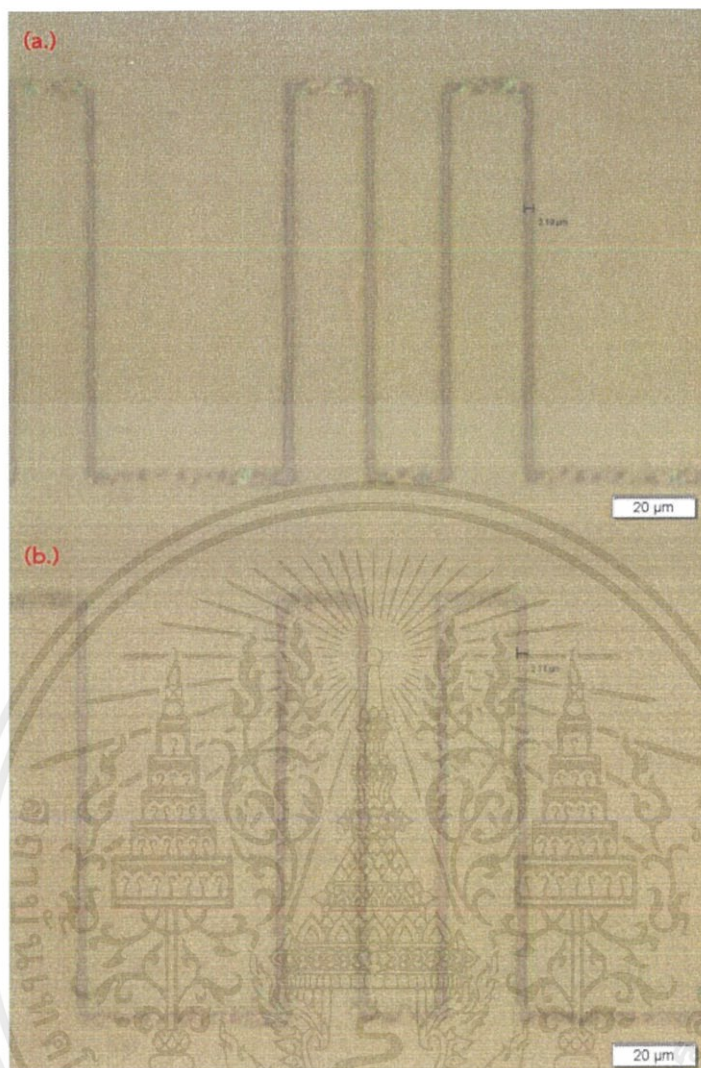
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงขนาดและความขรุขระของลวดลายที่เงื่อนไขต่างกัน (a.) เงื่อนไขที่ความเร็ว 50  $\mu\text{m/s}$ , กระแส 1.8 mA (b.) เงื่อนไขที่ความเร็ว 55  $\mu\text{m/s}$ , กระแส 1.8 mA (c.) เงื่อนไขที่ความเร็ว 100  $\mu\text{m/s}$ , กระแส 3.6 mA (d.) เงื่อนไขที่ความเร็ว 120  $\mu\text{m/s}$ , กระแส 3.6 mA

จากภาพที่ 4.11 ได้ทำการคัดเลือกลวดลายที่มีขนาดเล็กจำนวน 4 ลวดลาย มาคำนวณเพื่อหาขนาดลวดลายที่เล็กที่สุดโดยจะพิจารณาที่ตำแหน่งโฟกัส (Z19) เท่านั้น จะเห็นว่าเงื่อนไขที่ความเร็ว 55 ไมโครเมตรต่อวินาที, กระแส 1.8 มิลลิแอมป์ มีขนาดของลวดลายเล็กที่สุดที่  $2.267 \pm 0.153$  ไมโครเมตร

จากภาพที่ 4.11 (b.) ณ ตำแหน่ง Z24 จะสังเกตว่ามีขนาดของลวดลายที่วัดได้เล็กกว่าตำแหน่งโฟกัส แต่ลวดลายที่เกิดจากตำแหน่ง Z24 นั้นมีความขรุขระมากและค่า S.D. มีค่ามาก ขนาดของลวดลายไม่สามารถควบคุมได้เนื่องจากแสงไม่อยู่ในภาวะโฟกัสทำให้พลังงานแสงต่อพื้นที่ลดลง อาจจะยังเพียงพอต่อการทำลายพันธะของสารไวแสงและทำให้เกิดเป็นลวดลายได้ แต่ลวดลายที่ได้จะไม่คมชัดเพราะแสงไม่ได้ถูกรวมเป็นจุดเดียว โดยเมื่อเปรียบเทียบลวดลาย ณ ตำแหน่งโฟกัสกับตำแหน่ง Z24 จะได้ดังภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 (a.) ลวดลายที่เกิด ณ ตำแหน่งโพลัสที่ Z19 (b.) ลวดลายที่เกิด ณ ตำแหน่ง Z24

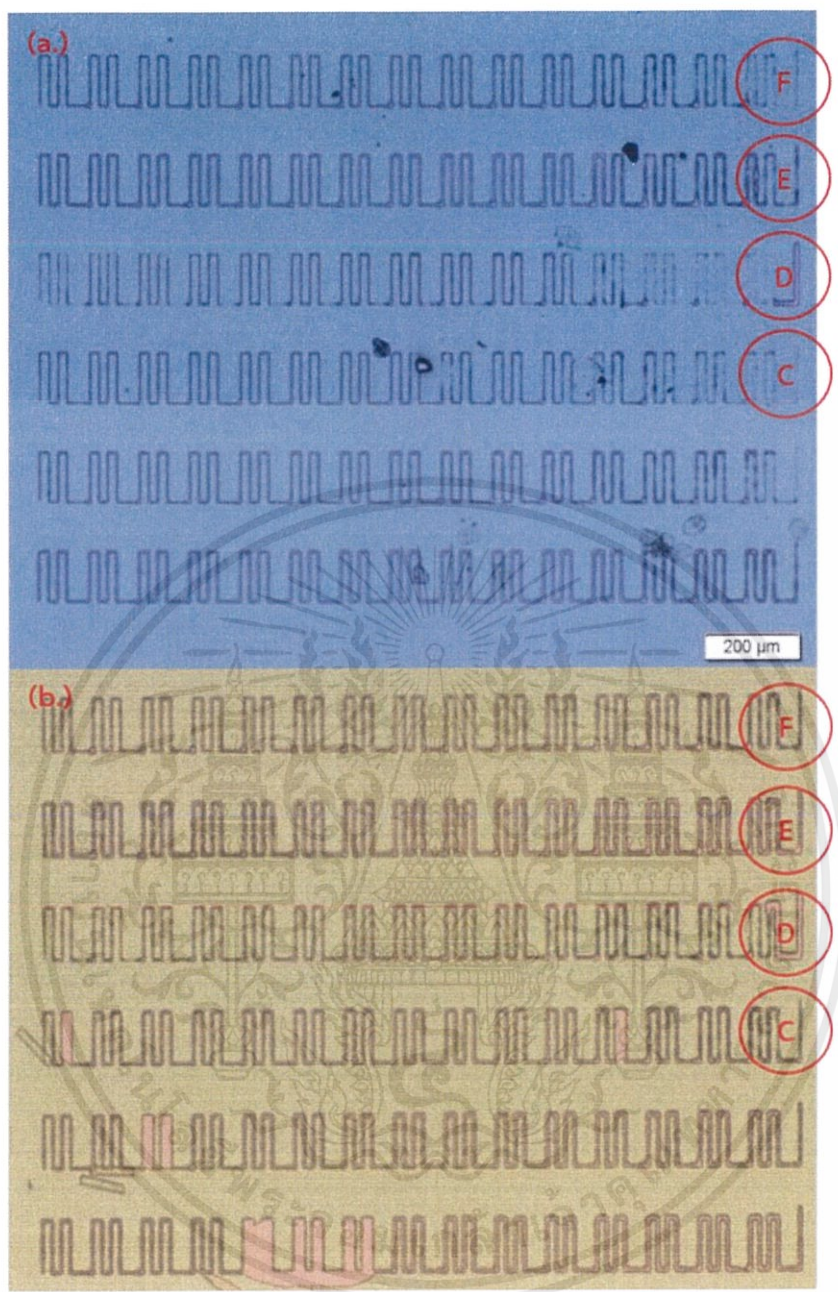
จากภาพที่ 4.12 จะเห็นว่าที่ตำแหน่ง Z24 ลวดลายมีความขรุขระมาก และมีขนาดไม่คงที่เมื่อเทียบกับตำแหน่งที่ Z19 ที่มีความสม่ำเสมอของลวดลายมากกว่า ดังนั้นการนำไปใช้งานต่อจึงไม่เหมาะสมกับตำแหน่ง Z24

## 4.5 ผลการทดลองขีดความสามารถของระบบโฟโวลีโทกราฟีแบบไม่ใช้โฟโตแมสค์

### 4.5.1 Repeatability

หลังจากการทำการสอบเทียบเครื่อง (Calibration) แล้วจึงเริ่มทำการทดสอบขีดความสามารถของระบบ โดยเริ่มแรกที่ความสามารถในการทดลองซ้ำ

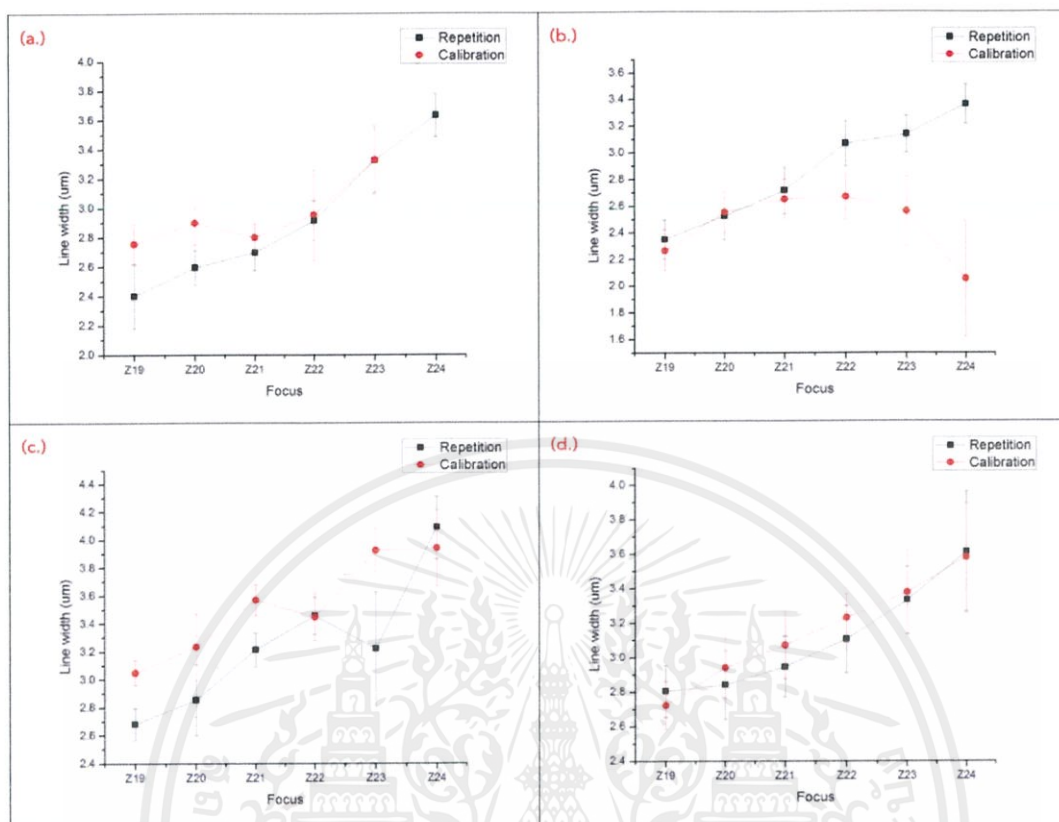
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.13 ภาพผลการทดลองเขียนลวดลายหลายเงื่อนไข (a.) ผลการสอบเทียบเครื่อง (b.) ผลการทำการทดลองซ้ำ

จากภาพที่ 4.13 เป็นการเขียนลวดลายที่ใช้เงื่อนไขเดียวกันโดยเริ่มต้นจากการสอบเทียบเครื่องแล้วจึงเริ่มทำการทดลองซ้ำโดยทำการวัดลวดลายที่เงื่อนไข C ถึง F และแต่ละเงื่อนไขมีรายละเอียดดังนี้ เงื่อนไข C มีความเร็ว 50 ไมโครเมตรต่อวินาที, กระแส 1.8 มิลลิแอมป์ เงื่อนไข D มีความเร็ว 55 ไมโครเมตรต่อวินาที, กระแส 1.8 มิลลิแอมป์ เงื่อนไข E มีความเร็ว 100 ไมโครเมตรต่อวินาที, กระแส 3.6 มิลลิแอมป์ เงื่อนไข F มีความเร็ว 120 ไมโครเมตรต่อวินาที, กระแส 3.6 มิลลิแอมป์ และทุกเงื่อนไขมีการเปลี่ยนของพัลส์ครั้งละ 1 ไมโครเมตรเท่ากัน และเริ่มวัดที่ Z19 ถึง Z24 เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



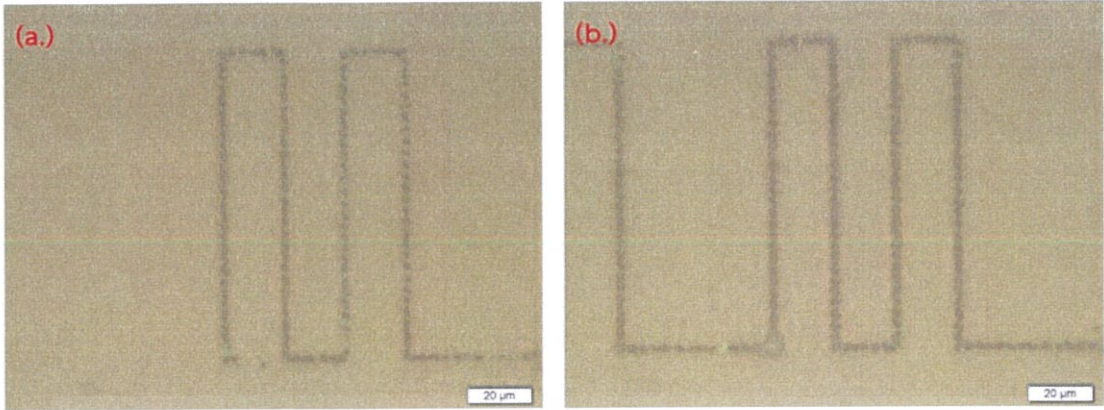
ภาพที่ 4.14 กราฟแสดงขนาดและความขรุขระของลวดลายเปรียบเทียบกันระหว่างผลการทดสอบเครื่องและผลการทดลองซ้ำ (a.) เปรียบเทียบเงื่อนไขที่ความเร็ว 50  $\mu\text{m/s}$ , กระแส 1.8 mA (b.) เปรียบเทียบเงื่อนไขที่ความเร็ว 55  $\mu\text{m/s}$ , กระแส 1.8 mA (c.) เปรียบเทียบเงื่อนไขที่ความเร็ว 100  $\mu\text{m/s}$ , กระแส 3.6 mA (d.) เปรียบเทียบเงื่อนไขที่ความเร็ว 120  $\mu\text{m/s}$ , กระแส 3.6 mA

จากภาพที่ 4.14 เป็นกราฟเปรียบเทียบขนาดของลวดลายระหว่างการทดลองการสอบเทียบเครื่องและการทดลองซ้ำซึ่งขนาดของลวดลายมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย (a.) ขนาดลวดลายเปลี่ยนแปลงไป 0.355 ไมโครเมตร คิดเป็น 12.88% (b.) ขนาดลวดลายเปลี่ยนแปลงไป 0.084 ไมโครเมตร คิดเป็น 3.71% (c.) ขนาดลวดลายเปลี่ยนแปลงไป 0.368 ไมโครเมตร คิดเป็น 12.07% (d.) ขนาดของลวดลายเปลี่ยนแปลงไป 0.083 ไมโครเมตร คิดเป็น 3.05%

จากผลการทดลองข้างต้นสังเกตได้ว่าเมื่อใช้เงื่อนไขที่มีความเร็วต่ำ การคลาดเคลื่อนของขนาดของลวดลายจะมีค่ามากกว่าการใช้เงื่อนไขที่มีความเร็วต่ำอยู่มากเพราะเมื่อกำหนดให้การเคลื่อนที่เข้าบริเวณที่ถูกแสงจะยาวนานกว่าการใช้ความเร็วที่สูง ทำให้เกิดการลอกออกของลวดลายได้มากขึ้น ขนาดใหญ่ขึ้นได้ และเนื่องจากเครื่อง CNC เป็นการใช้สเต็ปมอเตอร์ (Step Motor) จึงเกิดการสั่นของเครื่องขณะทำการเขียนลวดลาย เมื่อให้ความเร็วต่ำทำให้จุดแสงไม่ได้เคลื่อนเป็นเส้นตรงส่งผลให้ขนาดของลวดลายไม่สม่ำเสมอมีค่า peak to peak edge roughness มาก

การทำงานของเครื่อง CNC ที่เป็นสเต็ปมอเตอร์นั้นไม่เพียงส่งผลต่อการเขียนลวดลายความเร็วต่ำเท่านั้น เมื่อใช้ความเร็วสูงจะเกิดปัญหาดังภาพที่ 4.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.15 ลวดลายที่ใช้เงื่อนไขความเร็ว 180  $\mu\text{m/s}$  (a.) ณ ตำแหน่ง Z15 (b.) ณ ตำแหน่ง Z19

ลวดลายดังภาพที่ 4.15 เกิดจากการเคลื่อนที่เป็นสเต็ปมอเตอร์ของเครื่อง CNC ทำให้มีช่องว่างของแต่ละสเต็ปที่มอเตอร์เคลื่อนที่ประกอบกับการที่จุดแสงนั้นเป็นวงกลมทำให้มีช่องว่างบริเวณขอบของลวดลาย (ภาพที่ 4.16) และส่งผลให้ลักษณะของลวดลายมีลักษณะเป็นปล้องๆ ดังนั้นแม้จะเพิ่มพลังงานแสงมากแล้วให้เคลื่อนที่เร็ว ก็อาจจะได้ลวดลายที่มีความขรุขระมากกว่าการใช้พลังงานแสงต่ำแต่เคลื่อนที่ช้ากว่า



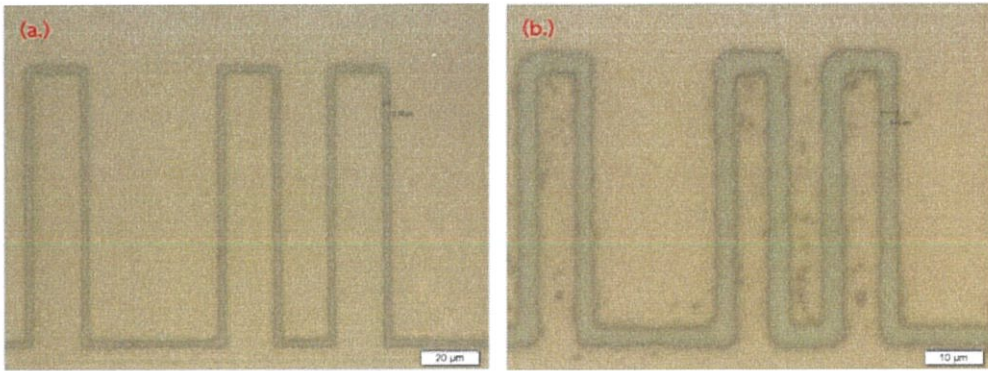
ช่องว่างจากการเคลื่อนที่  
แบบ Step Motor

ภาพที่ 4.16 ภาพจำลองการเคลื่อนที่ของจุดแสง

#### 4.3.2 Resolution

เมื่อได้เงื่อนไขที่ดีที่สุดจากการทำ Calibration แล้ว นำผลที่ได้มาทำการทดลองหาขีดจำกัดของเครื่องในส่วนของความคมชัดที่สุดที่สามารถทำได้ โดยจะทำการลดขนาดของชุดลวดลายลงครึ่งหนึ่ง แต่ใช้เงื่อนไขเดิม เพื่อดูลักษณะ ขนาด ของลวดลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



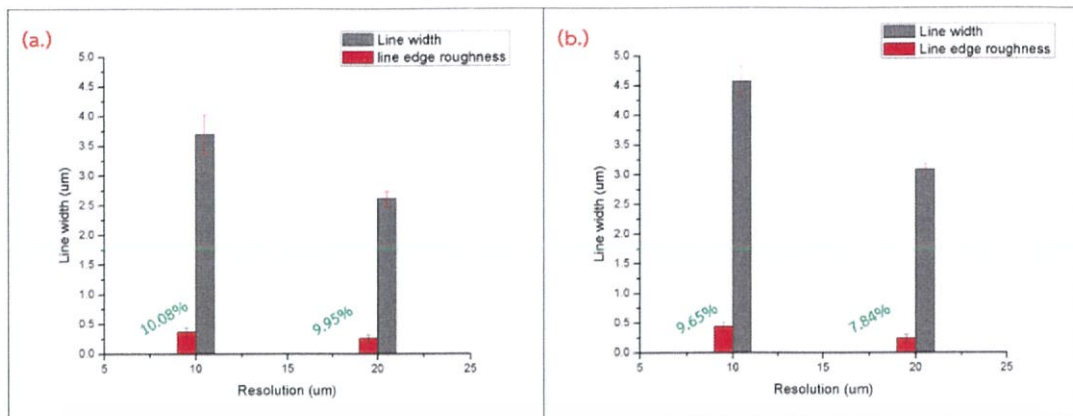
ภาพที่ 4.17 เงื่อนโซ่ที่ความเร็ว  $20 \mu\text{m/s}$  ,  $0.9 \text{ mA}$  (a.) ลวดลายที่มีระยะห่างกัน  $20 \mu\text{m}$  (b.) ลวดลายที่มีระยะห่างกัน  $10 \mu\text{m}$

จากภาพที่ 4.17 เมื่อทำการลดขนาดของชุดลวดลายลงมารั้งหนึ่ง ส่งผลต่อขนาดของลายเส้นให้มีขนาดใหญ่ขึ้นทั้งที่ใช้เงื่อนโซ่ในการทดลองเดียวกัน จึงทำการทดลองซ้ำอีกครั้งหนึ่งโดยการเปลี่ยนเงื่อนโซ่ให้มีความเร็วและจ่ายศักย์ไฟฟ้ามากขึ้น และผลการทดลองเป็นไปดังภาพที่ 4.18



ภาพที่ 4.18 เงื่อนโซ่ที่ความเร็ว  $40 \mu\text{m/s}$  ,  $1.8 \text{ mA}$  (a.) ลวดลายที่มีระยะห่างกัน  $20 \mu\text{m}$  (b.) ลวดลายที่มีระยะห่างกัน  $10 \mu\text{m}$

จากภาพที่ 4.18 แม้จะเพิ่มความเร็วและศักย์ไฟฟ้าแล้วแนวโน้มขนาดของลวดลายก็ยังคงใหญ่ขึ้นเมื่อระยะของลวดลายใกล้กันมากขึ้น แต่เมื่อลองวัดความคมชัดของลวดลายหรือวัด Line edge roughness ของทั้งสองรูปแบบแล้วจะได้ดังภาพที่ 4.19



ภาพที่ 4.19 กราฟแสดงขนาดและความขรุขระของลวดลาย (a.) เงื่อนไขที่ความเร็ว 20 μm/s , 0.9 mA (b.) เงื่อนไขที่ความเร็ว 40 μm/s , 1.8 mA

จากภาพที่ 4.19 จะเห็นว่าค่า Line edge roughness ของทั้งสองขนาดมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ และขนาดของลวดลายที่ใหญ่ขึ้นของกราฟ (a.) คิดเป็น 41.56% จากเดิม กราฟ (b.) คิดเป็น 48.10% จากเดิม แม้ขนาดจะใหญ่ขึ้นแต่ความขรุขระของลวดลายนั้นมีค่าน้อยจึงสามารถนำไปใช้งานในแอปพลิเคชันหรือการทดลองอื่นได้ต่อไป

การที่ขนาดของลวดลายมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อลดระยะห่างของลวดลายลงเป็นผลมาจากการแทรกสอดของแสงทำให้เกิดแสงรอบข้างจุดรวมแสง แสงที่เกิดจากการแทรกสอดนั้นมีพลังงานน้อยกว่าจุดโฟกัส แม้พลังงานน้อยแต่สารไวแสงสามารถดูดซับพลังงานเป็นพลังงานสะสม และเมื่อพลังงานสะสมมีค่าถึง 35 mJ/cm<sup>2</sup> พื้นจะจะถูกทำลายและสารไวแสงสามารถถูกล้างออกได้ การแทรกสอดของแสงเป็นปัญหาของกระบวนการลิโทกราฟีทุกชนิดขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของแสงที่ใช้ ถ้าความยาวคลื่นมากแสงที่เกิดจากการแทรกสอดจะมาก ถ้าความยาวคลื่นน้อยแสงที่เกิดจากการแทรกสอดจะน้อย



ภาพที่ 4.20 การทดลองที่แสดงแสงที่เกิดจากการแทรกสอด

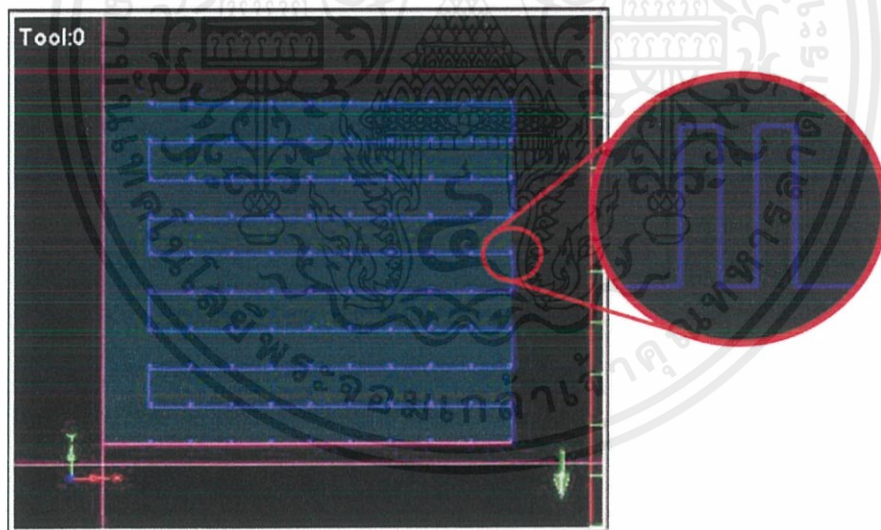
จากภาพที่ 4.20 เป็นการทดลองของดร.ชูเกียรติ ตันศราวิฑู ในปีค.ศ. 2014 ได้ทำการทดลองวัดขนาดของจุดแสงจากหัวอ่านบลูเรย์ โดยทำการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัวอ่าน ซึ่งพบว่าเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจุดแสงมีความเข้มเพิ่มขึ้น จุดแสงมีขนาดใหญ่ขึ้น และแสงที่เกิดจากการแทรกสอดก็มีความเข้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงที่เกิดจากการแทรกสอดเป็นสิ่งรบกวนต่อการเขียนลวดลายหลายประการ ได้แก่ การเขียนลวดลายที่ใช้ความเข้มแสงสูงเพราะเมื่อแสงมีความเข้มสูง แสงที่เกิดจากการแทรกสอดจะเริ่มส่งผลต่อการทำลายพันธะของสารไวแสงทำให้ลวดลายที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าที่ควรจะเป็น (เท่าจุดรวมแสง) , การเขียนลวดลายที่มีระยะห่างระหว่างเส้นน้อยทำให้แสงที่เกิดจากการแทรกสอดไปรบกวนลวดลายรอบข้างที่ถูกจุดรวมแสงลากผ่านไปแล้วหรือไปรบกวนในส่วนที่กำลังจะเขียนลวดลายถัดไปทำให้สารไวแสงมีการรับพลังงานสะสมก่อนที่จะถูกทำลายพันธะ เมื่อจุดแสงเดินทางไปถึงพลังงานสะสมก็ถึงขีดจำกัดทำให้พันธะถูกทำลายเร็วกว่าปกติและบริเวณรอบข้างถูกทำลายไปด้วยลวดลายจึงมีขนาดใหญ่ขึ้น, การใช้เงื่อนไขความเร็วในการทดลองต่ำทำให้แสงที่เกิดจากการแทรกสอดมีระยะเวลามากพอที่จะทำให้พันธะของสารไวแสงถูกทำลายจะให้ผลคล้ายกับการใช้แสงที่มีความเข้มสูงคือลวดลายจะมีขนาดใหญ่กว่าที่ควรจะเป็น

### 4.3.3 Uniformity

ความสามารถในการทดลองซ้ำดังที่กล่าวในหัวข้อที่ผ่านมาสามารถทำได้ในพื้นที่ระยะหนึ่งเมื่อระยะทางเปลี่ยนแปลงไปทำให้ขนาดของลวดลายเปลี่ยนไปได้ โดยตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคือ ความเอียง ซึ่งต้องทำการจัดตำแหน่งของเครื่องเพื่อไม่ให้งานเกิดการเอียงขึ้น การทดลองนี้จึงเป็นการทดสอบความสามารถในการจัดตำแหน่งของเครื่องมือ มีการทดลองดังภาพที่ 4.21

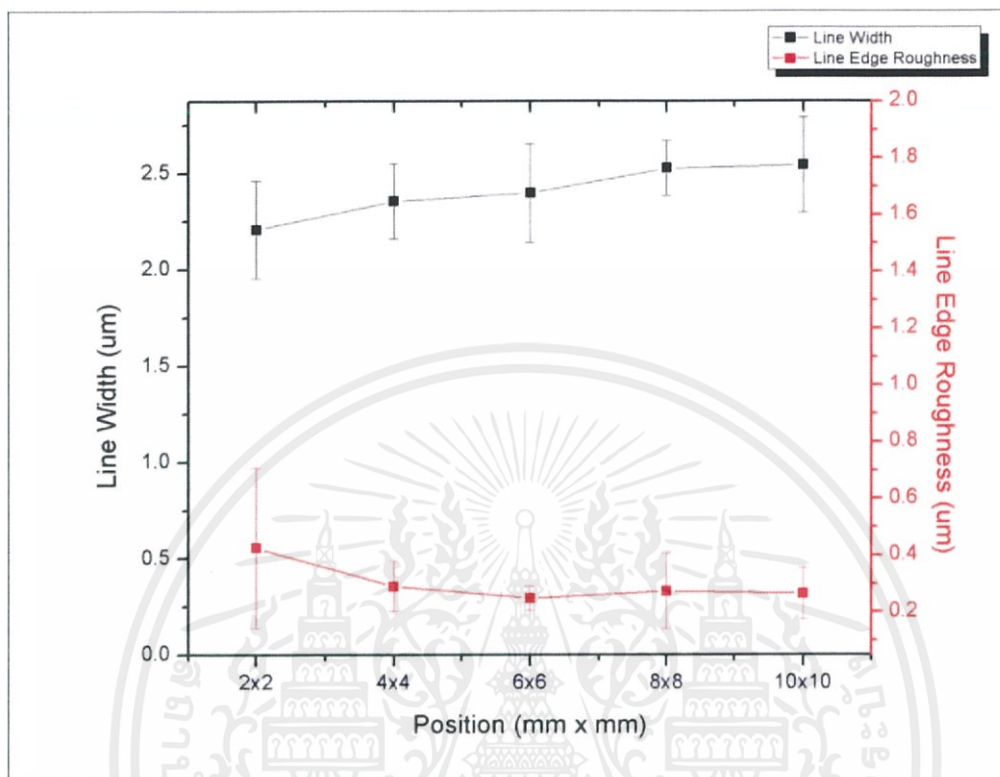


ภาพที่ 4.21 ตัวอย่างลวดลายที่ทำการทดลอง

จากภาพที่ 4.21 เป็นการจำลองลวดลายก่อนการทดลองจริงโดยแต่ละตำแหน่งจะห่างกัน 10 ไมโครเมตร 1 แถวมี่ทั้งหมด 10 ลวดลาย และ 1 คอลัมน์มีทั้งหมด 10 ลวดลาย รวมทั้งสิ้น 100 ลวดลาย ในขนาด 1x1 ตารางเซนติเมตร โดยจะเริ่มวัดขนาดของลวดลายจาก 2x2 ตารางมิลลิเมตร จากจุดศูนย์กลางเพื่อคุ้ระนาบเอียงของชิ้นงาน และก่อนการทดลองต้องทำการหาตำแหน่งการเขียนลวดลายที่ทั้ง 4 มุมของลวดลายให้มีระยะโฟกัสเท่ากันจากการทดลองการจัดตำแหน่งในหัวข้อที่ 4.3 การทดลองนี้จะอ้างอิงจากเงื่อนไขที่ดีที่สุดหัวข้อที่ 4.5 การ Calibration และผลของ Resolution

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในหัวข้อที่ 4.6 ทำให้ต้องลดความเร็วลงเพื่อเพิ่มระยะเวลาของแสงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ลวดลายนี้จึงถูกเขียนที่ความเร็ว 45 ไมโครเมตรต่อวินาที และกระแสที่ 1.8 มิลลิแอมป์



ภาพที่ 4.22 กราฟเปรียบเทียบขนาดของลวดลายที่เปลี่ยนไปเมื่อพื้นที่ในการทดลองมีขนาดใหญ่ขึ้น

จากภาพที่ 4.22 เป็นการแสดงกราฟเปรียบเทียบขนาดของลวดลายเมื่อเขียนในพื้นที่ขนาด 10x10 ตารางมิลลิเมตร ขนาดของลวดลายมีการเปลี่ยนแปลงจากพื้นที่ 2x2 ตารางมิลลิเมตร ไปถึง 10x10 ตารางมิลลิเมตร เป็นขนาด 0.335 ไมโครเมตร คิดเป็น 15.17% ซึ่งถือว่ายังอยู่ในการเปลี่ยนแปลงที่รับได้ จากกราฟจะเห็นว่าบริเวณขอบนอกจะมีความขรุขระของลวดลายน้อยกว่าและมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งเกิดจากการที่บริเวณขอบนอกนั้นได้ทำการจัดตำแหน่งโดยใช้วิธีในหัวข้อที่ 4.3 ทำให้บริเวณขอบนอกเป็นระยะจริงของการโฟกัสเส้นลวดลายจึงมีความขรุขระน้อยและทั่วทั้งลวดลายควรจะมีขนาดคมชัดที่เท่ากัน

สาเหตุที่บริเวณจุดกึ่งกลางของลวดลายมีค่าความขรุขระสูงแม้ทำการจัดตำแหน่งโฟกัสไปแล้วนั้น เป็นผลมาจากชั้นฟิล์มของสารไวแสงที่มีความไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งชิ้นงาน บางจุดอาจมีความหนาไม่เท่ากันจากการทดลองจึงสันนิษฐานได้ว่าชั้นฟิล์มของตัวอย่างการทดลองนั้นมีลักษณะเป็นลูกคลื่น บริเวณจุดกึ่งกลางการเขียนลวดลายทำให้ลวดลายทั้งระบบมีขนาดและความขรุขระไม่เท่ากัน

## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

เครื่องสร้างลวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีแบบไม่ใช้แมสค์ด้วยหัวอ่านบลูเรย์สามารถสร้างลวดลายได้เล็กที่สุดที่ 2 ไมโครเมตร ซึ่งขนาดของลวดลายจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของ substrate และศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้หัวอ่านบลูเรย์ ส่วนปัจจัยอื่น เช่น การจัดตำแหน่ง (Alignment) การหาตำแหน่งโฟกัส (Focusing) จำเป็นต้องทำการสอบเทียบเครื่อง (Calibration) เพื่อตรวจเช็คเงื่อนไขและความพร้อมของเครื่องมือจึงจะทำการทดลองได้ การเขียนลวดลายสามารถปรับเปลี่ยนขนาดได้โดยการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าหรือลดความเร็วลงเพื่อให้มีพลังงานตกกระทบต่อพื้นที่มากขึ้นทำให้ลวดลายมีขนาดใหญ่ขึ้น

ความสามารถในการทดลองซ้ำของเครื่องมือมีความคลาดเคลื่อนมาก-น้อยขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่ใช้งาน หากใช้เงื่อนไขที่มีความเร็วน้อยจะได้รับผลจากการสั่นของมอเตอร์มาก ในขณะที่การใช้เงื่อนไขที่มีความเร็วมากเกินไปทำให้ค่าพลังงานต่อพื้นที่บริเวณขอบของลวดลายมีค่าไม่มากพอที่จะเกิดการหลุดออกของพันธะ แสดงให้เห็นถึงความสำคัญในการหาเงื่อนไขที่ดีจากการสอบเทียบเครื่อง เพื่อให้ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมในการทดลองหรือใช้งานต่อไป ซึ่งความสามารถของเครื่องมือในการเขียนลวดลายในพื้นที่กว้างนั้นมีปัจจัยสำคัญคือ การจัดตำแหน่ง (Alignment) และความหนาของฟิล์มของสารไวแสงที่ไม่สม่ำเสมอ ทั้งสองปัจจัยนี้ทำให้ลวดลายเกิดความไม่เท่าเทียมได้ เช่น หากทำการจัดตำแหน่งได้ผลว่าทุกตำแหน่งในการเขียนลวดลายมีระยะห่างระหว่างชั้นงานกับหัวอ่านบลูเรย์เท่ากัน และทำการทดลองโดยไม่ทราบว่าคุณสมบัติบางบริเวณมีความหนาไม่เท่ากัน ทำให้แสงทำลายพันธะลงไปได้ไม่เท่ากันส่งผลให้ขนาดของลวดลายไม่เท่ากันแม้จะใช้เงื่อนไขเดียวกันก็ตาม ลวดลายที่เปลี่ยนแปลงไป 20% ทางคณะผู้วิจัยยังคงถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่น่าไปใช้งานต่อไป ในส่วนของความคมชัดสำหรับหัวอ่านบลูเรย์จะสามารถสร้างลวดลายที่มีระยะห่างระหว่างเส้นน้อยมากไม่ได้ เนื่องจากเกิดการแทรกสอดของแสงที่จะไปรบกวนลวดลายที่จะเขียนรอบข้างส่งผลให้เกิดการโอเวอร์เดเวลอป (Overdevelop) ลวดลายหลุดออกทั้งหมดดังนั้นการเขียนลวดลายจึงควรต้องเว้นระยะห่างระหว่างเส้นไม่ต่ำกว่า 20 ไมโครเมตร ที่ความเร็ว 50 ไมโครเมตรต่อวินาที เพื่อไม่ให้แสงที่เกิดจากการแทรกสอดมารบกวนลายเส้นที่ติดกันได้ ในขณะที่การสอบเทียบเครื่องนั้นเป็นการเขียนลวดลายด้วยเงื่อนไขจำนวนมากเพื่อหาลวดลายที่ใช้งานได้จริงซึ่งลวดลายที่ใช้ในการสอบเทียบเครื่อง นั้นมีระยะห่างกัน 20 ไมโครเมตร แต่ยังคงส่งผลจากการสะสมของพลังงานในสารไวแสงโดยสังเกตได้จากการนำเงื่อนไขจากการสอบเทียบเครื่องไปทำการทดลองหาความสม่ำเสมอที่การเขียนลวดลายห่างกันมาก ขนาดของลวดลายเปลี่ยนไปจากตอนสอบเทียบเครื่อง การเขียนลวดลายในพื้นที่กว้างเครื่องมือมีขีดความสามารถเขียนในพื้นที่ 1x1 ตารางเซนติเมตร โดยที่ขนาดของลวดลายเปลี่ยนไป 15.17% เมื่อเทียบจากจุดศูนย์กลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

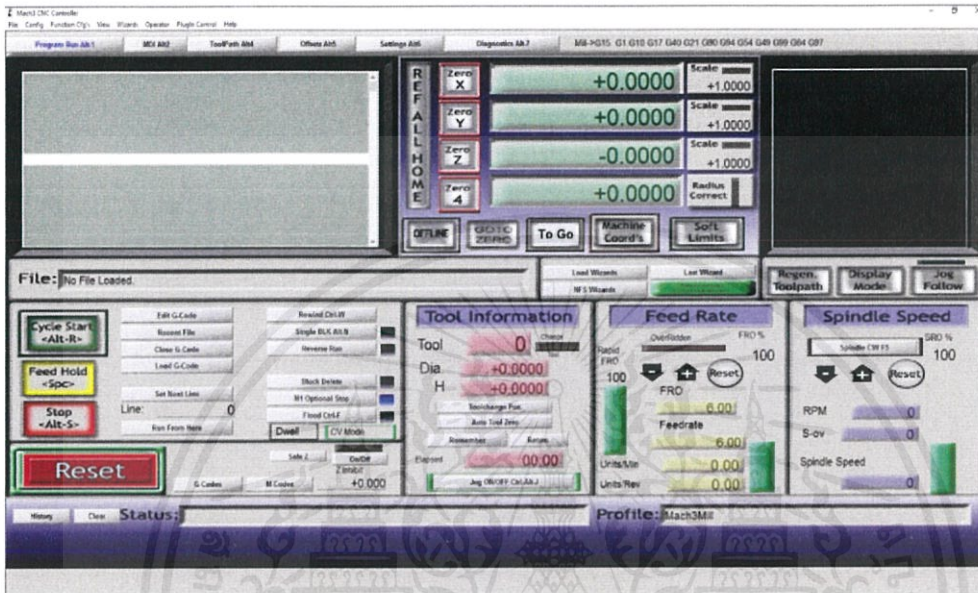
การเตรียมชิ้นงานจากซิลิกอนควรทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนก่อนทำการ spin coat และการทำ pre-bake มีความจำเป็นและละเอียดอ่อนมากโดยสารไวแสงแต่ละชนิดจะมีอุณหภูมิการ pre-bake ไม่เท่ากัน เมื่อให้อุณหภูมิไม่ถูกต้องจะทำให้ไม่สามารถเกิดลวดลายได้ตามเงื่อนไขเดิม รวมถึงการ post-bake สามารถช่วยให้ลวดลายมีขนาดเล็กลงได้โดยจะทำการให้อุณหภูมิหลังจากเขียนลวดลายเสร็จแต่ก่อนการทำเดเวลอป ทั้งนี้การจัดตำแหน่ง (Alignment) สามารถใช้ตัวช่วยในการควบคุมความเรียบโดยใช้เครื่องมือทางไมโครคอนโทรลเลอร์มาควบคุม substrate ปรับความเอียงของชิ้นงาน ทำให้เพิ่มความสามารถในด้านการทดลองซ้ำ (Repeatability) และ ความสม่ำเสมอ (Uniformity) ได้ เนื่องจากการทำลายพันธะของสารไวแสงเป็นการรับพลังงานสะสมจนถึงค่าที่กำหนดทำให้สามารถออกแบบการทดลองได้หลากหลายขึ้น เช่นการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงผ่านจุดเดิมมากกว่า 2 ครั้ง หรือการให้ศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าต่ำมากแต่ให้หยุดอยู่กับที่สามารถทำให้เกิดลวดลายได้เช่นกัน และอาจทำให้สามารถสร้างลวดลายที่มีระยะห่างระหว่างเส้นน้อยกว่าเดิมได้เพราะแสงที่เกิดจากการแทรกสอดมีพลังงานไม่มากพอที่จะทำลายพันธะได้



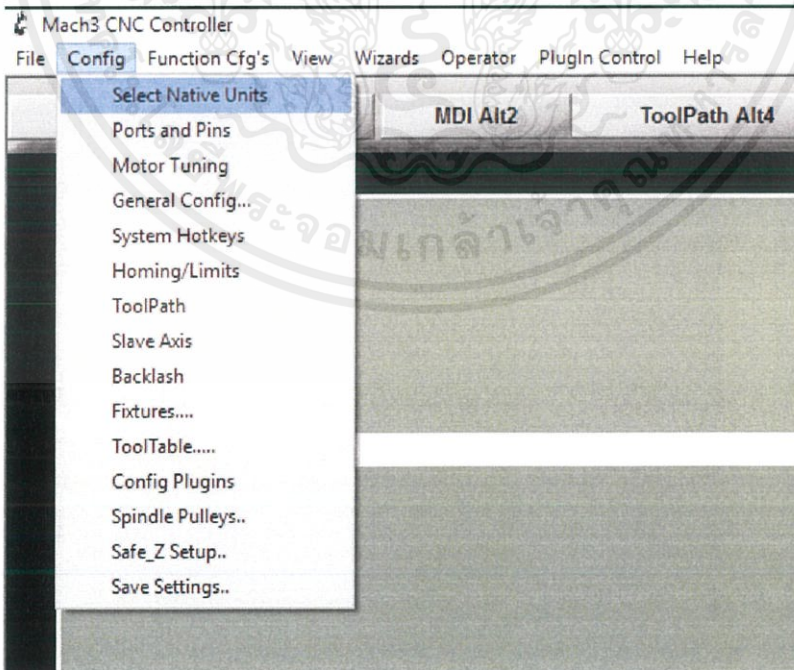
# ภาคผนวก

## การ Set Up Program

- เปิดโปรแกรม Mach3Mill

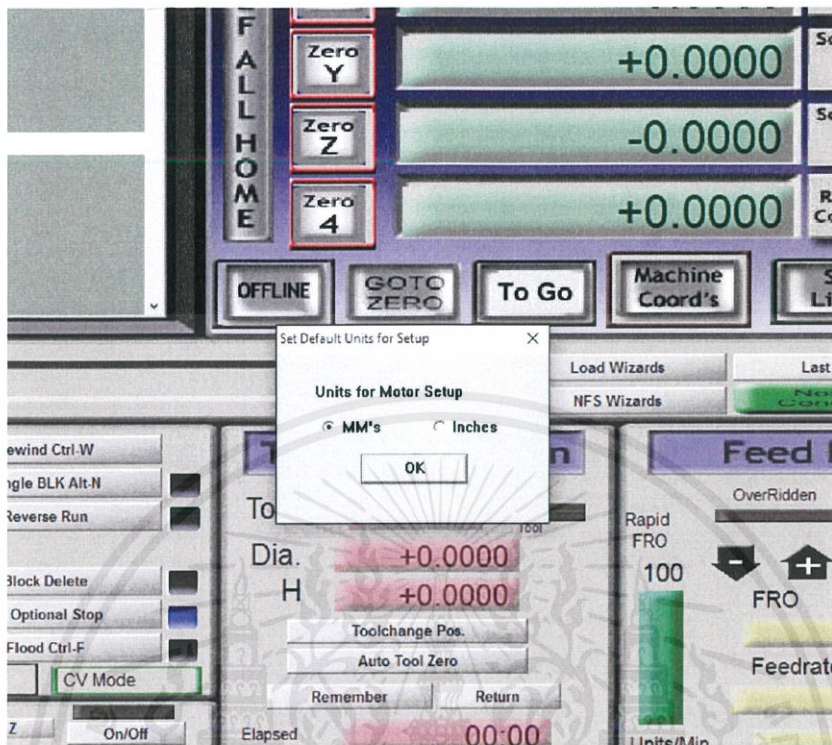


- เลือก Config > Select Native Units > กด OK

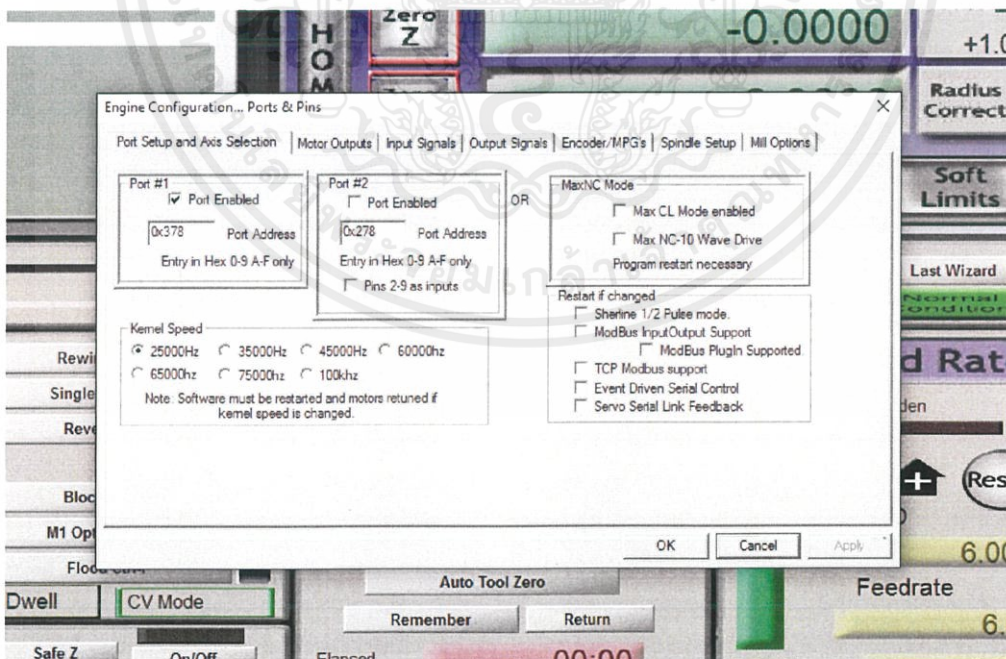


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Set Default Units for Setup > MM's > ok

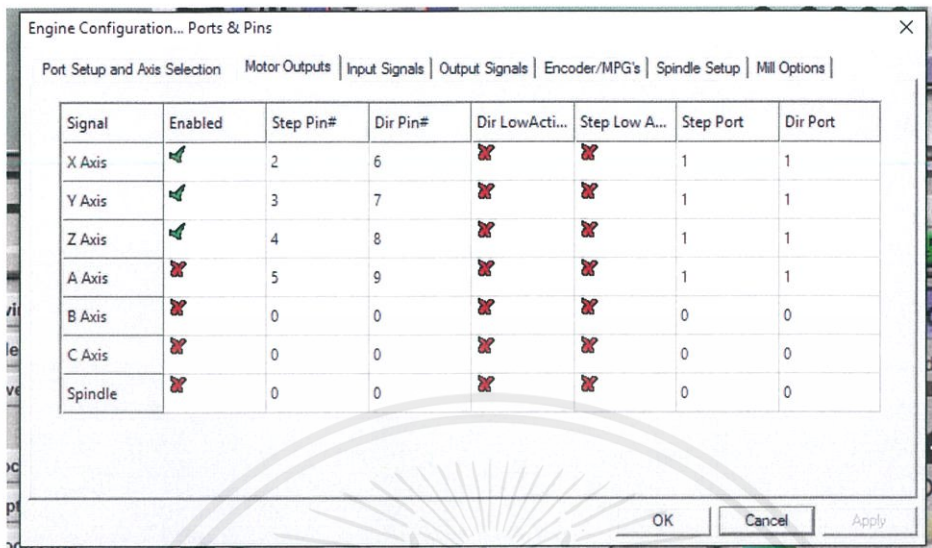


- Config > Ports and Pins > Port setup and Axis Selection

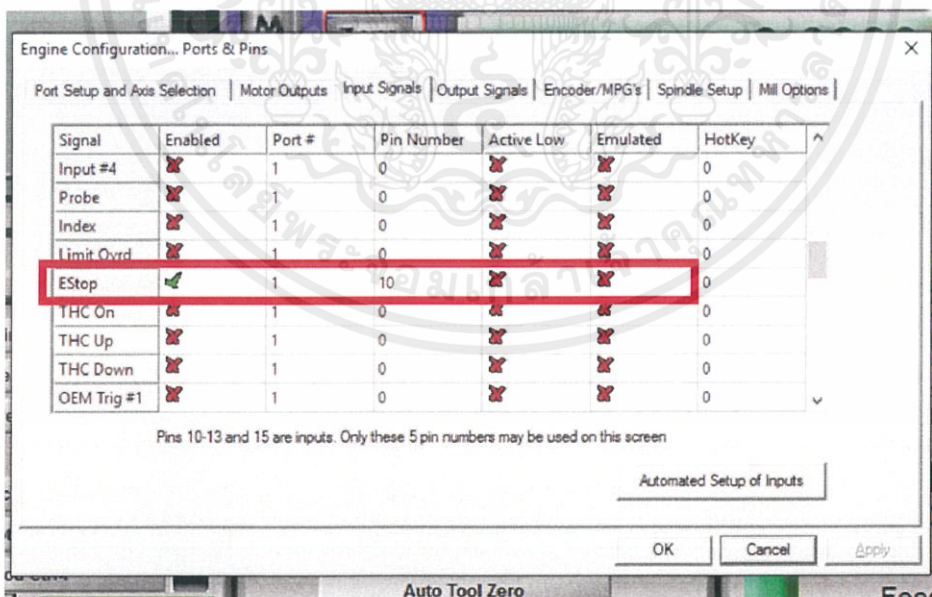


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## - Motor Outputs

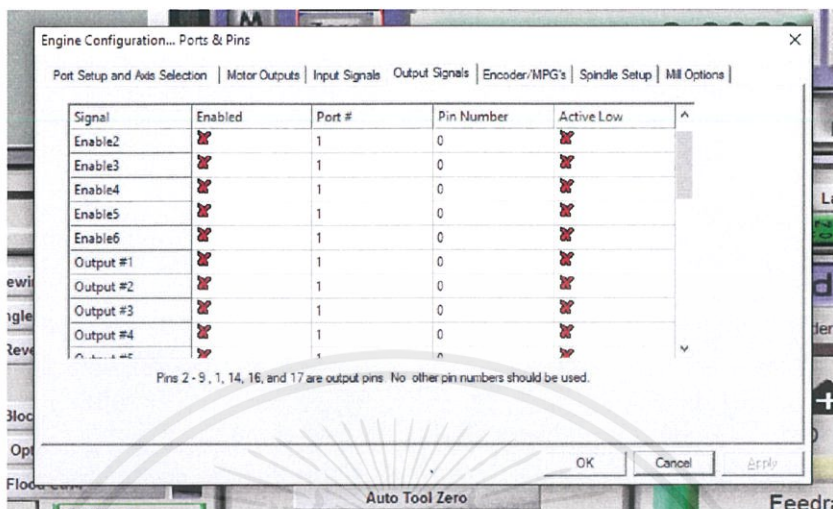


- เปลี่ยนช่อง Signal X'Y'Z' = ใส่เครื่องหมายถูกตรงช่อง Enabled
- Step Pin# / Dir Pin# ป้อนค่าตามรูปภาพด้านบนทั้ง 3 แกน
- Dir LowActi... เป็นการสั่งให้แกนเคลื่อนที่ในทิศทางใด จะใส่เครื่องหมายใดก็ได้
- Input Signals – ตรงช่อง Estop ใส่เครื่องหมายถูก ช่อง Enabled และ Port# =0, Pin Number = 1 แล้วกด OK

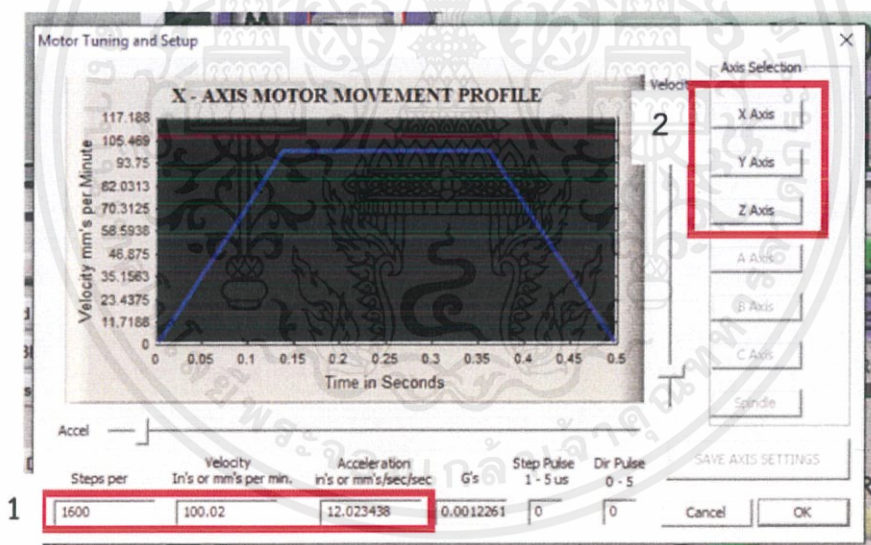


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Output Signals - ตรงช่อง Output#1 ใส่เครื่องหมายผิด ช่อง Enabled และ Port# =1, Pin Number = 0 แล้วกด OK



- Config > Motor tuning



ดังรูปด้านบน ช่อง steps per คือการเซตค่าพารามิเตอร์ของเกลิยมอเตอร์ว่า 1 สเต็ปเคลื่อนที่กี่ไมครอน ช่อง velocity เซตความเร็วของเครื่อง CNC ช่อง Acceleration เซตว่าจะให้ออกตัวเร็วหรือช้า / เบรกเร็วหรือช้า โดยจะปรับค่าตามแกน X'Y'Z ตามที่เลือก (ปรับทีละแกน) เมื่อปรับได้ในแต่ละแกนแล้วกด SAVE AXIS SETTING จากนั้นกด OK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] Watt F. Nucl Instrum Methods Phys Res B 1999;158.
- [2] Kouchiyama A, Aratani K, Takemoto Y, Nakao T, Kai S, Osato K, et al. Lpn J Appl Phys, Part 1 2003;42:769
- [3] LOT-Oriel Group Europe, "MicroWriter™ Laser Lithography System," 2010. Available at <[http://www.lot-oriel.com/files/downloads/dmo/eu/MicroWriter\\_Laser\\_Lithography\\_System\\_eu.pdf?phpMyAdmin=giwRNLwKd0p,,aCaCB54evpHoQ2](http://www.lot-oriel.com/files/downloads/dmo/eu/MicroWriter_Laser_Lithography_System_eu.pdf?phpMyAdmin=giwRNLwKd0p,,aCaCB54evpHoQ2)> [downloaded October 13, 2015].
- [4] SVG Optronics, "MicroLab: Laser Pattern Generator on curve surface," 2010. Available at <<http://www.svgoptronics.com/MicroLab.pdf>> [downloaded October 13, 2015]
- [5] Heidelberg Instruments,  $\mu$ PG 101 The Tabletop Laser Pattern Generator, 2010. Available at <<http://www.himt.de/factsheets/muepg101.pdf>> [downloaded October 13, 2015]
- [6] Fucetola CP, Korre H, Berggren KK. J Vac Sci Technol B 2009;27:2958.
- [7] Nall, J. R. and Lathrop, J. W. "Photolithographic Fabrication Techniques for Transistors Which Are an Integral Part of a Printed Circuit," IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 5, No. 2 (April 1958), p. 117.
- [8] สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาระบบการเรียนรู้อหวิทยาลัยมหิดล. Nanolithography. Web site: <<http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-4.html>> [cited October 15, 2015]
- [9] EE-527 Microfabrication, Photolithography, R. B. Darling.
- [10] Mark. A. McCord, M. J. Rooks, SPIE HANDBOOK OF MICROLITHOGRAPHY, MICROMACHINING AND MICROFABRICATION
- [11] สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์กรมหาชน). Siam X-ray LIGA. Web site: <[http://www.slri.or.th/th/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1695&Itemid=91](http://www.slri.or.th/th/index.php?option=com_content&view=article&id=1695&Itemid=91)> [cited October 15, 2015]
- [12] สตรีรัตน์ โฮ้ดัด. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.). Dielectric Properties and Gas Sensing Properties of Perovskite Oxide Thin Films. Web site: <[http://elibrary.trf.or.th/project\\_content.asp?PJID=MRG5180363](http://elibrary.trf.or.th/project_content.asp?PJID=MRG5180363)> [cited October 15, 2015]
- [13] Tamarind Institute. Photolithography: A Manual. Albuquerque, N.M.: Tamarind Institute:,2002. Print.
- [14] Eynon, Benjamin and Banqiu Wu. Photomask Fabrication Technology. New York: McGrawHill,2005.
- [15] Fries, David P.; Maskless Photolithography for Etching and Deposition. University of South Florida, assignee. Patent 6998219. Feb. 14, 2006.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] Imai, Masato, Akira Maehara, and Yoko Fukunaga. Mask for Photolithography, Method of Forming Thin Film, Liquid Crystal Display Device, and Method of Producing the Liquid Crystal Display Device. Sony Corporation, assignee. Patent 7153614. Dec 26, 2006.
- [17] Rai-Choudhury, P. Handbook of Microlithography, Micromachining, and Microfabrication, Section 2.5 Systems: 2.5.6 Shaped Spot and Cell Projection Systems, Table 2.4, Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1997.
- [18] Gusev A. I. Nanomaterials, Nanostructures, and Nanotechnologies (in Russian) // Fizmatlit, Moscow (2007) - 416 pp
- [19] McCord, M. A.; M. J. Rooks (2000). "2". SPIE Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication
- [20] P N Melentiev, et al. (2009). "Nanolithography based on an atom pinhole camera." Nanotechnology 20, (2009), pp. 1-7
- [21] Patel, C. K. N. (1964). "Continuous-Wave Laser Action on Vibrational-Rotational Transitions of CO<sub>2</sub>". Physical Review 136 (5A): A1187–A1193
- [22] Ohtsu M, editor. Progress in nano-electro-optics III , 95. Springer Verlag; 2002.
- [23] Christan A. Rothenbach, Mool C. Gupta. (2012) "High resolution, low cost laser lithography using a Blu-ray optical head assembly." Optics and Lasers in Engineering 50, 2012, pp. 900-904
- [24] Hao-Wen Chang, et al. (2011). "Development of Blue Laser Direct-Write Lithography System." International Journal of Engineering and Technology Innovation. Vol.2, no.1, 2012, pp. 63-71
- [25] Ossila enabling Innovation electronics. Spin Coating: A Guide to Theory and Techniques. Web site <<http://www.ossila.com/pages/spin-coating>> [cited October 18, 2015]
- [26] Emile F. Nuwaysir, et al. (2002). "Gene Expression Analysis Using Oligonucleotide Arrays Produced by Maskless Photolithography." Genome Res, Vol.50, pp. 47-56
- [27] J.KOCH, et al. (2005). "Maskless nonlinear lithography with femtosecond laser pulse." Applied Physics A, Vol.82, 2006, pp. 23-26
- [28] Rosanne M. Guijy, Michael C. Breadmore. (2008). "Maskless photolithography using UV LEDs." Lap on a Chip. Issue 8, (2008), pp. 62-66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้แต่ง

ชื่อ-นามสกุล	นายวัฒนรักษ์ ศิริจารุทรศน์
วัน เดือน ปีเกิด	28 กุมภาพันธ์ 2537
ที่อยู่	127/182 ม.3 ต.เสม็ด อ.เมือง จ.ชลบุรี 20000
E-mail Address	wattanaruk.bible@gmail.com
ประวัติการศึกษา	ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนชลราษฎรอำรุง จังหวัดชลบุรี

### ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

W. Sirijarutus, S. Charoensuwan, P. Thanakit, S. Pratontep, D. Sae-Tang Phromyothin, "A Study and Characterization of Photophysical Properties of Fluorene Derivative Thin Film", Key Engineering Materials, Vols. 675-676, pp. 201-204, 2016



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้