

การศึกษากระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแบบสามมิติ

STUDY ON THREE DIMENSION PHOTOLITHOGRAPHY PROCESS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-EN-M-048-248

การศึกษากระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแบบสามมิติ

STUDY ON THREE DIMENSION PHOTOLITHOGRAPHY PROCESS



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 82887
วัน,เดือน,ปี 25 ก.ค. 2551

b. 113 55142
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในชั้นเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
พ.ศ.2551



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONICS ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2008



COPYRIGHT 2008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า


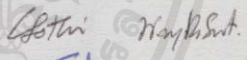
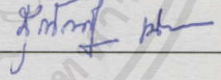
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

เป็นทรัพย์สินของทางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษากระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแบบสามมิติ
Study on Three Dimension Photolithography Process
นักศึกษา นายจิรวัดน์ จันตะวงศ์
รหัสประจำตัว 48061352
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สมเกียรติ	ศุภเดช	
รศ.ดร.วิศุทธิ์	ฐิติรุ่งเรือง	
ดร.อัมพร	โพธิ์โย	
ดร.โยธิน	วงศ์ประเสริฐ	
ผศ.ดร.สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 20 พฤษภาคม 2551 เวลา 13.00-15.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 5

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.รวีวรรณ ชินะตระกูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....26.....เดือน.....พฤษภาคม.....พ.ศ. 2551.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษากระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแบบสามมิติ
นักศึกษา	นาย จิรวัดน์ จันตะวงศ์
รหัสประจำตัว	480613052
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2551
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันนี้ การพัฒนาทางด้านไมโครเทคโนโลยีสมัยใหม่ส่งผลทำให้อุปกรณ์เครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ มีขนาดที่เล็กลงและกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเข้ามามีบทบาทหลักที่สำคัญเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการผลิตเชิงอุตสาหกรรมเพื่อสร้างลายวงจรเหล่านั้น

วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะกล่าวถึงการสร้างลายวงจรโฟโตลิโธกราฟีแบบสามมิติ เพื่อใช้เป็นแนวทางในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ในการลดขั้นตอนการกัดที่มีหลายระดับความลึกของพื้นผิวเวเฟอร์ หรือใช้เป็นแนวทางเพื่อสร้างอุปกรณ์ด้านไฟฟ้าจุลภาคเชิงกลซึ่งมีโครงสร้างจุลภาคทั่วไปเป็นแบบสามมิติ กล่าวคือ เป็นโครงสร้างลายวงจรซึ่งประกอบด้วย ความกว้าง, ยาว, และสูง ที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะความสูงนั้นอาจมีลักษณะแบบขั้นบันได ลาดเอียงหรือรูปร่างโค้งเว้า ส่วนการสร้างผนังความสูงลายวงจรที่ไม่ตั้งตรงนี้ ต้องอาศัยเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรด้วยเทคนิคเกรย์สเกลซึ่งเป็นเทคนิคที่สามารถสร้างโครงสร้างจุลภาคสามมิติด้วยฉายแสงเพียงครั้งเดียวผ่านโฟโตมาสก์ต้นแบบที่ประกอบด้วยช่องเปิดแสงขนาดเล็กเพื่อทำให้เกิดการแทรกสอดของแสงและเกิดการกรองพลังงานแสง โดยจะมีระดับปริมาณพลังงานที่แตกต่างกันยังชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง งานวิจัยนี้ทำการสร้างโครงสร้างจุลภาคสามมิติบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงโดยใช้กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแบบสามมิติด้วยวิธีการสองเทคนิค คือ เทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรแบบแปรเปลี่ยนพลังงานแสงโดยตรงจากแหล่งจ่ายแสง และเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรด้วยแผ่นโฟโตมาสก์ชนิดเกรย์สเกล เพื่อศึกษาลวดลายจุลภาคสามมิติต้นแบบที่ถูกสร้างได้บนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง เมื่อนำชิ้นงานเวเฟอร์แบบจุลภาคสามมิติเหล่านี้ไปทำการกัดแบบแห้งจะทำให้เกิดลวดลายวงจรถาวรที่มีรูปแบบจุลภาคสามมิติเช่นเดียวกับลวดลายของน้ำยาไวแสงบนเวเฟอร์นั้นๆ และเมื่อนำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแบบสามมิติชนิดเกรย์สเกลไปสร้างเป็นเลนส์จุลภาคต้นแบบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเท่ากับ 45 ไมครอนบนฐานรองซิลิคอน พบว่าได้ผลการทดลองที่น่าพอใจ จากข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้จะใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาการถ่ายแบบลายวงจรสามมิติที่มีความซับซ้อนในโอกาสต่อไป

Thesis Title	Study on Three Dimension Photolithography process
Student	Mr. Jirawat Jantawong
Student ID.	480613052
Degree	Master of Engineering
Program	Microelectronics Engineering
Year	2008
Thesis Advisor	Assist.Prof.Dr. Surasak Niemchareon

ABSTRACT

At the present, the developments of micro technology evolution take many electronic devices to smallest sizes and photolithography is employed into the main process at manufactory for the patterns fabrication.

This thesis demonstrates the fabrication of three dimension (3D) photolithography process and there then valuable to microelectronics manufacturing process such the reduction of etching process from the several etch depth step on wafer surface to be single process, or applicable to the Micro-Electro Mechanical System (MEMS) fabrication. The MEMS devices are comprised of 3D microstructure such as width, length, and height which is a different thick levels such step, slope, or curvature profile. This non-vertical side wall must be used the techniques of gray scale photolithography process in order to 3D microstructure forming on the photoresist film and single expose thru the master photomask, which it is also comprised of smalls opening area on the photomask (slit) to be generate the light diffraction and filter that incident energy. The light ray interference is controlled by different levels quantitative of energy dose then exposed to the underneath photoresist film. This thesis has studied the fabrication of 3D microstructure on the photoresist film with two typical techniques of photolithography process as (1) energy dose variation photolithography technique (2) gray scale photolithography technique. After the etching process is done which such a wafer was coated by 3D microstructure photoresist film then this wafer can be transferred the permanent 3D microstructure features onto the wafers surface same as the before 3D structural. Moreover, this research had also achieved micro lens size $45\ \mu\text{m}$ with making from the gray scale photolithography technique; this information will be guide line to do next development for more complex 3D photolithography process.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ผู้ให้คำปรึกษา วางแผนแนวทางต่างๆ ตลอดจนชี้แนะแนวทางการวิจัยนี้บรรลุปเป้าหมาย

ขอขอบคุณ คร.กฤษฎา เสียงแจ้ว ผู้ให้คำแนะนำเกี่ยวข้องกับหัวข้อที่เป็นประโยชน์เรื่อง กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแบบสามมิติซึ่งเกี่ยวข้องกับงานวิจัยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบคุณ คุณ นิธิ อัทธินักวิจัยของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ที่ช่วยสร้าง แผ่นโฟโตมาส์ด้วยเครื่อง DWL สำหรับนำมาใช้ในงานวิจัย และความร่วมมือที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแบบสามมิติ

ขอขอบคุณ คณะอาจารย์ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์และเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้

และสุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณแม่ และครอบครัวที่คอยให้กำลังใจตลอดจนการสนับสนุนด้วยดีตลอดมา

จิรวัดน์ จันดีะวงศ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	X
รายการคำย่อ.....	XII
ศัพท์เทคนิค.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 แนวคิดและสมมติฐานของการศึกษาการวิจัย.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษาและขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 การดำเนินการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย.....	4
1.6 รายละเอียดเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	7
2.1 ชนิดของโฟโตลิโกราฟี.....	8
2.1.1 โฟโตลิโกราฟีชนิดลบ.....	8
2.1.2 โฟโตลิโกราฟีชนิดบวก.....	9
2.2 พื้นฐานของกระบวนการโฟโตลิโกราฟี.....	10
2.2.1 การเคลือบผิวหน้าแผ่นเวเฟอร์.....	11
2.2.2 การเคลือบน้ำยาไวแสง.....	12
2.2.3 การอบน้ำยาไวแสง.....	17
2.2.4 การฉายแสง.....	17
2.2.5 การล้างลายน้ำยาไวแสง.....	18
2.2.6 การตรวจสอบคุณภาพหลังจากการล้างลายน้ำยาไวแสง.....	19
2.3 เครื่องถ่ายแบบลายวงจร.....	19

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4 ระบบโปรเจคชั่นและข้อจำกัดของเครื่องฉายแบบลายวงจร.....	22
2.4.1 ระบบเลนส์ของเครื่องฉายแบบลายวงจร.....	22
2.4.2 ความละเอียดของระบบ โปรเจคชั่น.....	23
2.4.3 ช่องเปิดแสง	24
2.4.4 ความถี่กระยะ โฟกัส.....	25
2.4.5 แหล่งจ่ายแสงของเครื่องฉายแบบลายวงจร.....	26
2.4.6 สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า	27
2.5 คุณสมบัติทางกายภาพของแสงที่เกี่ยวข้องกับระบบเครื่องฉายแบบลายวงจร.....	28
2.5.1 การสะท้อนของแสง.....	29
2.5.2 การหักเหของแสง.....	29
2.5.3 การเลี้ยวเบนของแสง.....	30
2.6 น้ำยาไวแสง.....	30
2.6.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของน้ำยาไวแสง.....	31
2.6.2 น้ำยาไวแสงแบบ I-line.....	33
2.6.3 ชนิดของน้ำยาไวแสง.....	34
2.7 โครงสร้างระดับจุลภาคโดยทั่วไปของน้ำยาไวแสง.....	36
2.8 เทคนิคการฉายแสงแบบแปรเปลี่ยนพลังงานแสง โดยตรงจากแหล่งแสง.....	37
2.9 เทคนิคแบบเกรย์สเกล.....	37
2.10 ทฤษฎีและกระบวนการกัดแบบแห้ง.....	39
บทที่ 3 การออกแบบและการสร้างโฟโตมาส์กต้นแบบ.....	43
3.1 การออกแบบลวดลายต้นแบบ.....	44
3.2 แผ่นโฟโตมาส์ก.....	46
3.3 การสร้างต้นแบบลายวงจร โฟโตมาส์ก.....	47
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	51
4.1 การสร้างลายจุลภาคสามมิติด้วยเทคนิคแปรเปลี่ยนพลังงานแสง โดยตรงจากแหล่งจ่ายแสง.....	51

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.1.1 การเตรียมชิ้นงานเวเฟอร์และการเคลือบน้ำยาไวแสง.....	54
4.1.2 การหาความสัมพันธ์ค่าความหนาฟิล์มน้ำยาไวแสง กับระดับพลังงานแสงที่ใช้แสง.....	57
4.1.3 การหาความสัมพันธ์สัดส่วนการกัดแบบแห้งบนเวเฟอร์แบบซิลิคอน กับชั้นหนาน้ำยาไวแสง.....	66
4.1.4 การศึกษาผลกระทบการแทรกสอดทางแสงในระบบโปรเจกชัน.....	61
4.2 การทดสอบการลดชั้นตอนการกัดด้วยเทคนิคโฟโตลิโธกราฟี แบบแปรเปลี่ยนระดับพลังงานแสงโดยตรงจากแหล่งจ่ายแสง.....	63
4.3 การสร้างโครงสร้างจุลภาคสามมิติบนฟิล์มน้ำยาไวแสงด้วยเทคนิค โฟโตลิโธกราฟีแบบเกรย์สเกล.....	66
4.3.1 การทดสอบหาความละเอียดระบบโปรเจกชันเลนส์ของเครื่อง ถ่ายแบบลายวงจร.....	68
4.3.2 การหาเงื่อนไขค่าโคซแสงที่เหมาะสมในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจร แบบเกรย์สเกล.....	68
4.3.3 การตรวจสอบภาพลายจุลภาคสามมิติหลังจากการล้างน้ำยาไวแสง.....	71
4.3.4 กระบวนการแอนนิวเพื่อปรับปรุงผิวฟิล์มน้ำยาไวแสง.....	72
บทที่ 5 การศึกษาการสร้างต้นแบบเลนส์จุลภาค โดยเทคนิคเกรย์สเกล.....	74
5.1 การออกแบบเลนส์.....	74
5.2 กระบวนการสร้างเลนส์ระดับจุลภาค.....	77
5.3 การวิเคราะห์ผลการสร้างเลนส์ระดับจุลภาค.....	78
5.3.1 โครงสร้างจุลภาคสามมิติของเลนส์จุลภาคต้นแบบบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง....	78
5.3.2 โครงสร้างจุลภาคสามมิติของเลนส์จุลภาคต้นแบบบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง หลังการให้ความร้อนเพื่อแอนนิลแก่ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง.....	80
5.3.3 การตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคสามมิติของเลนส์จุลภาคต้นแบบบนเวเฟอร์ ชนิดซิลิคอนหลังการกัดแบบแห้ง.....	80
บทที่ 6 สรุป.....	83

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	86
ภาคผนวก ก.	89
ภาคผนวก ข.....	95
ภาคผนวก ค.	104
ประวัติผู้เขียน.....	113
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	113



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ระดับชั้นห้องสะอาด.....	10
2.2 ลักษณะงานเสียในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี	20
3.1 คุณลักษณะเฉพาะของฐานรองโฟโตมาสก์.....	48
4.1 ผลการทดสอบค่าความละเอียดของระบบโปรเจกชันสตีปเปอร์	69



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ลักษณะชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ได้หลังจากการล้างลายวงจร.....	3
2.1 สายการผลิตของกระบวนการผลิตวงจรรวม.....	7
2.2 สายการผลิตร่วมในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี.....	8
2.3 โฟโตลิโธกราฟีชนิดลบ.....	9
2.4 โฟโตลิโธกราฟีชนิดบวก.....	9
2.5 ห้องปฏิบัติการโฟโตลิโธกราฟีของ บริษัท AMD.....	10
2.6 การสร้างพันธะเพื่อเพิ่มการยึดเกาะของน้ำยา HMDS.....	11
2.7 ลายวงจรที่เกิดบนน้ำยาไวแสงชนิดบวกและชนิดลบ.....	12
2.8 การเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยเทคนิคสเปรย์.....	13
2.9 การหยดน้ำยาไวแสงแบบสถิตย์.....	14
2.10 การหยดน้ำยาไวแสงแบบจลน์.....	14
2.11 การสร้างชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงด้วยเทคนิคการหมุนเคลือบ (ก) การจ่ายน้ำยาไวแสง (ข) การหมุนที่ความเร็วรอบต่ำ (ค) การเร่งไปสู่ความเร็วรอบสูง (ง) การหมุนที่ความเร็วรอบสูง	15
2.12 โครงสร้างของระบบเครื่องหมุนเคลือบ.....	15
2.13 ตำแหน่ง 9 จุดบนเวเฟอร์ที่ใช้วัดความหนาของฟิล์มน้ำยาไวแสง.....	16
2.14 เครื่องอบแบบแทนความร้อน.....	17
2.15 การถ่ายแบบลายวงจร.....	18
2.16 รูปแบบลักษณะการถ่ายแบบลายวงจร (ก) การถ่ายแบบลายวงจรแบบสัมผัสโดยตรง (ข) การถ่ายแบบลายวงจรแบบแนบสัมผัสชนิด (ค) การถ่ายแบบลายวงจรแบบ โปรเจคชั่น.....	21
2.17 เครื่องถ่ายแบบลายวงจรแบบสเตปเปอร์.....	22
2.18 โครงสร้างเลนส์นูน.....	23
2.19 โครงสร้างเลนส์เว้า.....	23
2.20 ลายวงจรสำหรับใช้ทดสอบหาค่าความละเอียดในเครื่องถ่ายแบบลายวงจร.....	24
2.21 ระบบโปรเจคชั่นของเครื่องถ่ายแบบลายวงจรสเตปเปอร์ ยี่ห้อ Ultratech ให้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ Nano Tech-190 นี้ล้มเหลวได้เฉพาะและต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้	24
2.22 ภาพแสดงระยะความลึกของโฟกัส.....	26

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.23	แหล่งจ่ายแบบหลอดเมอร์คิวรีของเครื่องถ่ายภาพวงจรสแตปเปอร์.....27
2.24	สเปกตรัมแสงของหลอดเมอร์คิวรีที่ใช้งานในระบบเครื่องถ่ายภาพลายวงจรสแตป.....28
2.25	สเปกตรัมแสงย่านอัลตราไวโอเล็ตและย่านสายตา.....28
2.26	การสะท้อนของแสง เมื่อแสงตกกระทบบนพื้นผิวเรียบ.....29
2.27	การหักเหของแสงเมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน.....30
2.28	ผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบของกระจกต้นแบบต่อลายวงจรที่ได้.....31
2.29	ลักษณะความคมชัดของน้ำยาไวแสง.....32
2.30	ส่วนประกอบของน้ำยาไวแสง ชนิดบวก.....35
2.31	PAC ในน้ำยาไวแสงชนิดบวก.....35
2.32	ภาพแสดงการเกิด Cross links ในน้ำยาไวแสงชนิดลบ.....35
2.33	โครงสร้างโครงสร้างระดับจุลภาคน้ำยาไวแสง (ก) โครงสร้างน้ำยาไวแสงแบบทั่วไป หรือสองมิติ (ข) โครงสร้างน้ำยาไวแสงที่มีรูปร่างโค้งเว้าขึ้นบนใด หรือมีโครงสร้างสามมิติ.....36
2.34	กระบวนการถ่ายภาพแบบลายวงจรแบบแปรเปลี่ยนพลังงานแสงโดยตรงจากแหล่งจ่ายแสง.....37
2.35	พิกซ์ และพิกเซล บนกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล.....38
2.36	กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแบบเกรย์สเกล.....39
2.37	ลักษณะการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกและการไอโซทรอปิก.....41
2.38	กระบวนการเกิดพาสมา.....41
3.1	เครื่อง DWL ของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์.....44
3.2	ลวดลายเกรย์สเกลแบบลาดเอียง.....45
3.3	เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นกระจกต้นแบบที่มีลวดลาย พิกเซลขนาด 1.0 ถึง 2.2 ไมครอน และพิกซ์เท่ากับ 2.5 ไมครอน.....46
3.4	ต้นแบบแผ่นโฟโตมาส์กขนาด 3x5 ตารางนิ้วที่สร้างโดยศูนย์วิจัยไมโครอิเล็กทรอนิกส์46
3.5	ภาพหน้าตัดของแผ่นโฟโตมาส์ก.....47
3.6	คุณสมบัติการส่องผ่านแสงของแต่ละชนิดวัสดุ.....48
3.7	กระบวนการสร้างแผ่นโฟโตมาส์ก.....49
4.1	กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแบบทั่วไปและแบบแปรเปลี่ยนค่าพลังงานแสง โดยตรงจาก แหล่งจ่ายแสง.....52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า 4.2	ลวดลายจุลภาคสามมิติของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงแบบชั้นบันได.....	53
4.3	ลักษณะพื้นผิวของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง (ก) ภาพลวดลายน้ำยาไวแสงที่ถูกฉายแสงที่ โดสแสงเท่ากับ 200 mJ/cm ² (ข) ภาพลวดลายน้ำยาไวแสงที่ถูกฉายแสงที่โดสแสง เท่ากับ 480 mJ/cm ²	54
4.4	ความหนาชั้นฟิล์มจากการกระบวนการหมุนเคลือบของน้ำยาไวแสงเบอร์ AZ-P4620.....	55
4.5	ค่าความหนาน้ำยาไวแสงเบอร์ AZ-P4620 ที่ได้จากความเร็รรอบที่สองของเครื่องหมุนเคลือบ ที่ความเร็รรอบ 1000 rpm ถึง 3400 rpm	55
4.6	ตำแหน่ง 9 จุดที่ทำกรวัดค่าความหนาของน้ำยาไวแสงเบอร์ AZ-P4620 ที่ความเร็ว เท่ากับ 2200 รอบต่อวินาที.....	56
4.7	เครื่องมือวัดความหนาแบบพื้นผิวแบบไม่สัมผัสชั้นงาน CCI รุ่น 3000 Å ของบริษัท Taylor Hobson precision	57
4.8	ภาพจำลองสามมิติของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงเบอร์ AZ-P4620 ที่วัดได้จากเครื่อง CCI	58
4.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์พลังงานแสงอัลตราไวโอเล็ต ต่อค่าความหนาน้ำยาไวแสง.....	58
4.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์พลังงานแสงอัลตราไวโอเล็ตและค่าความหนาของน้ำยาไวแสง..	60
4.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์พลังงานแสงอัลตราไวโอเล็ตต่อค่าความหนา ฟิล์มน้ำยาไวแสง AZ-P4620 และค่าความลึกบนพื้นผิวเวเฟอร์ซิลิคอน	60
4.12	กราฟความสัมพันธ์ของความว่องไวกับบนเวเฟอร์ซิลิคอน ต่อชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง AZ-P4620.....	61
4.13	ภาพแสดงการถ่ายแบบลายวงจรแบบชั้นบันไดสองระดับขั้นแทรกสอดเพื่อศึกษาผลกระทบ จากการแสง.....	62
4.14	ภาพหน้าตัดของฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ความหนาฟิล์มเท่ากับ 10 ไมครอน ด้วยอัตราขยายของ กล้องจุลทรรศน์ทางแสงที่ 150 เท่า.....	63
4.15	กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแบบแปรเปลี่ยนค่าพลังงานโดยตรงแสงจากแหล่งจ่าย พลังงานแสง (ก) เวเฟอร์ก่อนการฉายแสง (ข) เวเฟอร์ระหว่างการฉายแสง (ค) เวเฟอร์หลังจากการล้างลาย (ง) เวเฟอร์หลังจากการกัดแบบแห้ง (จ) เวเฟอร์หลังจากการล้างฟิล์มน้ำยาไวแสง.....	65
4.16	ภาพจุลภาคสามมิติหลังการกัดแบบแห้งด้วยเครื่องวัด CCI ของเคลสารทดลองที่ถูกรับไปใช้.....	66
4.17	ผลจากการวัดด้วยเครื่องวัด CCI	66

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแบบเทคนิคเกรย์สเกล.....	67
4.19 ภาพถ่ายลายวงจรหลังการล้างน้ำยาไวแสงเพื่อทดสอบหาความละเอียด ของระบบโปรเจคชั่น	69
4.20 การทดสอบหาค่าโคซพลังงานแสงที่เหมาะสมสำหรับแผ่นโฟโตมาสก์แบบเกรย์สเกล (ก) 350 mJ/cm ² (ข) 400 mJ/cm ² (ค) 450 mJ/cm ² (ง) 500 mJ/cm ²	70
4.21 ภาพลวดลายจุดภาคสามมิติแบบลาดเอียงหลังจากการล้างลายน้ำยาไวแสง (ก) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ทางแสงที่ 50 เท่า (ข) ภาพถ่ายจากเครื่อง AFM.....	71
4.22 ภาพถ่าย AFM ลวดลายจุดภาคสามมิติแบบลาดเอียงหลังการล้างลายน้ำยาไวแสง (ก) ไม่ผ่านการอบแอนนิล (ข) ผ่านการอบแอนนิลที่อุณหภูมิที่ 120 องศาเซลเซียส เวลา 3 นาที.....	73
5.1 ลักษณะของชนิดเลนส์โดยทั่วไป.....	74
5.2 โครงสร้างแบบจำลองเลนส์นูน.....	75
5.3 ตัวอย่างรูปแบบการออกแบบร่างสายเกรย์สเกลสำหรับลายรูปร่างเลนส์นูน.....	76
5.4 ภาพลวดลายเกรย์สเกลสำหรับเลนส์นูนที่กำลังขยายของกล้องจุลทรรศน์ที่ 20 เท่า.....	77
5.5 ภาพลวดลายเกรย์สเกลสำหรับเลนส์เว้าที่กำลังขยายของกล้องจุลทรรศน์ที่ 20 เท่า.....	77
5.6 กระบวนการสร้างลายวงจรโดยเทคนิคเกรย์สเกล.....	78
5.7 ภาพถ่าย AFM ลวดลายของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงหลังจากการล้างลายวงจร (ก) รูปร่างเลนส์นูน (ข) รูปร่างเลนส์เว้า.....	79
5.8 ภาพถ่าย AFM ลวดลายของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงของเลนส์เว้าหลังจากการล้างลาย และผ่านการอบแอนนิล	80
5.9 ภาพถ่าย AFM เปรียบเทียบโครงสร้างเลนส์จุดภาคแบบนูนหลังการกัดแบบแห้ง (ก) ไม่ผ่านการอบแอนนิลน้ำยาไวแสงหลังล้างลาย (ข) ผ่านการอบแอนนิลน้ำยาไวแสงหลังล้างลาย.....	81
5.10 ภาพถ่าย AFM เปรียบเทียบโครงสร้างเลนส์จุดภาคแบบเว้าหลังการกัดแบบแห้ง (ก) ไม่ผ่านการอบแอนนิลน้ำยาไวแสงหลังล้างลาย (ข) ผ่านการอบแอนนิล น้ำยาไวแสงหลังล้างลาย.....	81

รายการคำย่อ

อักษรย่อ	คำเต็มภาษาอังกฤษ	คำแปลภาษาไทย
TFH	Thin film head	หัวอ่านเขียนข้อมูล
MEMS	Micro electro mechanical system	ระบบจุลภาคไฟฟ้าเชิงกล
NA	Numerical Aperture	ช่องเปิดควบคุมแสงในระบบโปรเจกชัน
DOF	Depth of focus	ความลึกของระยะโฟกัส
DNQ	Diazonaphthoquinone	ไดอะโซเนพโทควิโนน
PAC	Photoactive compound	โฟโตแอคทีฟคอมเปาوند
COG	Chrome on Glass	ชั้นฟิล์มโลหะโครเมียมที่เคลือบบนกระจก
RIE	Reactive ion etch	การกัดกร่อนด้วยปฏิกิริยาไอออน
BIM	Binary photomask	โฟโตมาสก์แบบไบนารี
DWL	Direct Write Laser	การเขียนโดยตรงด้วยลำแสงเลเซอร์
PG	Pattern Generator	เครื่องสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบ
CD	Critical Dimension	ค่าระยะวิกฤตของลายวงจร
CCI	Coherence Correlation Interferometer	เครื่องวัดความหนาฟิล์มด้วยเทคนิคทางแสง
KOH	Potassium Hydroxide	น้ำยาล้างลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
MMS	Micro Mechanical system	ระบบกลไกระดับไมครอน
AFM	Atomic Force Measurement	เครื่องตรวจสอบพื้นผิวซึ่งให้กำลังขยายสูง
OM	Optical Microscope	กล้องจุลทรรศน์ทางแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศัพท์เทคนิค

ภาษาไทย

เซมิคอนดักเตอร์

ลวดลายแผงวงจร

โครงสร้างทางแนวราบ

อิเล็กทรอนิกส์แอคทูเอชัน

ผนังแบบตั้งตรง

รูปร่างแบบลำดับขั้น

รูปร่างแบบลาดเอียง

รูปร่างโค้ง

การถ่ายแบบลายวงจรแบบเกรย์ สเกล

พิกเซล

พิทช์

การล้างลายที่ไม่เสร็จสมบูรณ์

ควอทซ์

กระบวนการกัด

การฝังประจุแบบไอออน

การเตรียมชิ้นงานเวเฟอร์

การอบไอระเหย

การเคลือบน้ำยาไวแสง

การอบน้ำยาไวแสง

การถ่ายแบบลายวงจร

การล้างลาย

โฟโตลิโธกราฟีชนิดลบ

โฟโตลิโธกราฟีชนิดบวก

ครอสลิงกิ้ง

ห้องสะอาด

ภาษาอังกฤษ

Semiconductor

Printed Circuit Board

Planar structure

Electrostatic actuation

Vertical side well

Step profile

Slope profile

Curvature profile

Gray scale photolithography

Pixel

Pitch

Incomplete develop

Quartz

Etching

Ion implantation

Wafer preparation

Vapor prime and Bake

Coating

Soft bake

Wafer alignment and exposure

Develop

Negative photolithography

Positive photolithography

Cross linking

Clean room

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศัพท์เทคนิค

ภาษาไทย

ชุดสะอาด

การเคลือบผิวหน้าเวเฟอร์

สารเฮกซะเมทิลไดซิลิเซน

แบบจุ่มลงในสารเคมี

แบบสปิน

แบบอบไอละเหย

หมู่ไฮดรอกไซด์

ไตรเมทิลไซลิล

หมู่ไฮดรอกซิล

ออกไซด์

หมู่ไตรเมทิลซิลิโลามีน

ผิวหน้าชิ้นงานมีพลังงานที่ผิวดำ

มุมสัมผัสของหยดน้ำสูง

ผิวของเวเฟอร์กลายเป็นผิวที่ไม่เกาะน้ำ

น้ำยาไวแสง

แสงอัลตราไวโอเล็ต

สารโพลีเมอร์

สารไวแสง

สารเติมแต่ง

การพ่นเคลือบ

ขอบด้านบนไม่มีน้ำยาไวแสงปกคลุม

เกิดตามด

การหยอดแบบสถิตย์

การหยอดแบบจลน์

ความเร็วแรก

ความเร็วรอบสูง

อุณหภูมิของน้ำยาไวแสง

ปริมาณน้ำยาไวแสง

ภาษาอังกฤษ

Cleanroom suits

Wafer priming

Hexamethyldisilazane

Immersion priming

Spin priming

Vapor priming

Hydroxide group

Trimethylsilyl

Hydroxyl

Oxide

Trimethylsilylamine

Low surface energy

High contact angle

Hydrophobic surface

Photoresist

Ultraviolet

Polymer

Sensitizers

Additives

Spray coating

Flowing effect

Pinhole

Static dispense

Dynamic dispense

First spin speed

Second spin speed

Photoresist temperature

Photoresist volume

ศัพท์เทคนิค

ภาษาไทย

อุณหภูมิห้อง

อัตราเร่งในการหมุน

ความเร็วในการหมุน

เวลาในการหมุนเคลื่อน

แรงดูดไอเสีย

ความชื้นสัมพัทธ์

ความหนืดของน้ำยาไวแสง

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

แผ่นความร้อน

หลอดไอปรอท

การถ่ายแบบลายวงจรแบบสัมผัสโดยตรง

การถ่ายแบบลายวงจรแบบแนบสัมผัสชนิด

การถ่ายแบบลายวงจรแบบโปรเจคชั่น

เครื่องถ่ายแบบลายวงจรแบบสเต็ปเปอร์

เลนส์

เลนส์นูน

เลนส์เว้า

ระยะโฟกัส

ขนาดลายเส้น

ระยะระหว่างลายเส้น

สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การสะท้อนของแสง

การหักเหของแสง

การเลี้ยวเบนของแสง

ทางผ่านช่องแคบ

ขอบที่มีความคม

เกิดลวดลายจากการแทรกสอด

ภาษาอังกฤษ

Room temperature

Acceleration rate

Spin velocity

Spin time

Exhaust force

Relative humidity

Viscosity

Standard deviation

Hot plate

Mercury vapor lamp

Contact printing

Proximity printing

Projection printing

Step and repeat projection

Lens

Converging

Diverging

Focus range

Line width

Space

Electromagnetic spectrum

Electromagnetic Wave

Reflection

Refraction

Diffraction

Narrow opening

Sharp edge

Interference pattern

ศัพท์เทคนิค

ภาษาไทย

ความละเอียด

ความคมชัด

เอกซ์โพสเชอร์ โดส

ความหนืด

การยึดเกาะ

ความสามารถทนทานต่อการกัด

ความตึงผิว

แรงยึดติด

ความเค้นดึง

แรงเกาะติด

การจัดเก็บและบรรจุภัณฑ์

สารละลายอะซิเตท

ไซลีน

สารฟีนอลฟอร์มาดีไฮน์ เรซิน

โฟโตแอคทีฟคอมเปาเวอ์ด

ไดอะโซเนพโทควิโนน

พอลิไอโซพรีนพอลิเมอร์

การเกิดการเชื่อม โยงข้าม

ค่าระยะวิกฤต

กระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล

การควบคุมการส่องผ่านของแสง

การส่องผ่านของแสง

การกัดแบบแห้ง

การกัดแบบเปียก

พลาสมา

กรด

ด่าง

การระดมยิงด้วยพลาสมา-ไอออน

ภาษาอังกฤษ

Resolution

Contrast

Exposure dose

Viscosity

Adhesion

Etch resistance

Surface tension

Cohesion force

Tensile stress

Adhesion force

Storage and handling

Acetate solvents

Xylene

Phenolformaldehyde resin

Photoactive compound

Diazonapthoquinone

Polyisoprene polymer

Crosslink

Critical dimension

Gray scale photomask

Optical transmissibility

Light transmission

Dry etching

Wet etching

Plasma

Acid

Bases

Plasma-ion bombardment

ศัพท์เทคนิค

ภาษาไทย

การกัดแบบไอโซทรอปิก

การกัดแบบแอนไอโซทรอปิก

การกัดเป็นแบบเลือกเฟ้น

กรดบัฟเฟอร์ไฮโดรฟลูออริก

เกิดเป็นลักษณะอันเดอร์คัท

ขนาดสิ่งประดิษฐ์

ฟลูออโรคาร์บอน

คลอโรคาร์บอน

การกัดกร่อนด้วยปฏิกิริยาไอออน

พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการกัด

อัตราการกัด

ค่าความว่องไวในการกัด

การออกแบบลวดลายต้นแบบ

โฟโตมาสก์

พื้นที่เปิดแสงเพื่อให้แสงผ่าน

พื้นที่ทึบแสง

หน่วยอ้างอิงทางขนาด

เครื่องสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบ

ลายเส้นแบบโพลีกอน

สปีตเตอร์

ความราบเรียบสูง

อัตราการดูดกลืนแสงน้อยที่สุด

การขยายตัวเชิงความร้อนต่ำ

มีจุดบกพร่องของฐานรองน้อยที่สุด

ตู้อบแบบคอนเวกชัน

โพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์

ผลกระทบดิฟแฟรคชัน

ฐานรองแผ่นเวเฟอร์

ภาษาอังกฤษ

Isotropic

Anisotropic

Selective

Buffered HF

Undercut

Device feature

Fluorocarbon

Cholorocarbon

Reactive ion etch

Etch parameter

Etch rate

Etch selectivity

Layout design

Photomask

Clear region

Opaque region

Dimension unit

Pattern Generator

Polygon line

Sputter

High surface flatness

Low refractive index

Low thermal expansion

Low defect density

Convection oven

Potassium Hydroxide

Diffraction effect

Stage

ศัพท์เทคนิค

ภาษาไทย

ค่าต้นทุนที่ใช้จ่ายในกระบวนการผลิตโดยอ้อม

การล้างลายและการกัดลายเพียงครั้งเดียว

ระบบแสงระดับไมครอน

ระบบกลไกระดับไมครอน

กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ

ผิวโค้งนูน

ผิวโค้งเว้า

ผิวเรียบ

เพโนคอนเวกซ์

เพโนคอนเคฟ

กล้องจุลทรรศน์ทางแสง

ภาษาอังกฤษ

Indirect material cost

Single develop and Etch

Micro-Optical

Micro Mechanical system

Multi-Film Thickness Mask

Convex surface

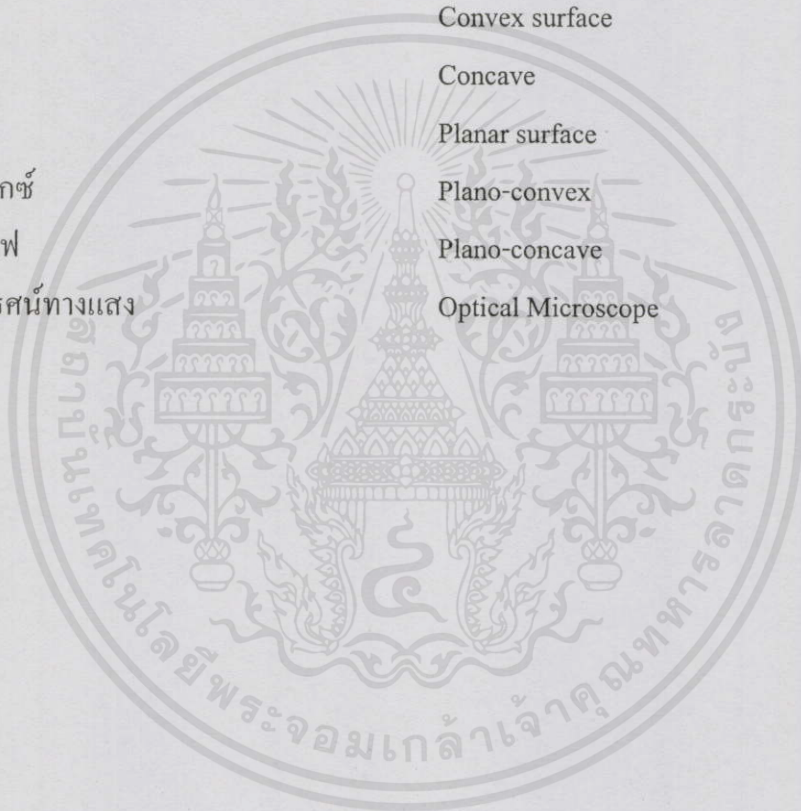
Concave

Planar surface

Plano-convex

Plano-concave

Optical Microscope



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้ มีพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีสมัยใหม่ ส่งผลทำให้อุปกรณ์เครื่องใช้ต่างๆ มีขนาดที่เล็กลง กระบวนการผลิตโฟโตลิโธกราฟีเข้ามามีบทบาทที่สำคัญที่ใช้ในการผลิตเชิงอุตสาหกรรม เช่น ทางด้านเซมิคอนดักเตอร์ [1,2] (Semiconductor) ทางด้านหัวอ่านเขียนฟิล์มบาง [3] (Thin Film Head, TFH) ทางด้านลวดลายแผงวงจร[4] (Printed Circuit Board, PCB) และทางด้านอุปกรณ์ไฟฟ้าจุลภาคเชิงกล[5] (Micro Electro Mechanical System, MEMS) ซึ่ง MEMS มีรากฐานมาจากการออกแบบวงจรรวมที่มีโครงสร้างทางแนวราบ (Planar structure) และมีการผลิตในรอบสิบปีนี้เอง โดยมีจุดประสงค์หลักเพื่อใช้สร้างโครงสร้างส่วนประกอบทางฮาร์ดแวร์ (Hardware) ขนาดเล็กเพื่อตอบสนองสัญญาณทางไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น อิเล็กโตรสแตติกแอกชูเอชัน (Electrostatic actuation) เพื่อเป็นอุปกรณ์ตรวจจับความสั่นในรถยนต์และอุปกรณ์ที่เกี่ยวกับไมโครสวิทช์ต่างๆ อีกมากมาย กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเป็นกระบวนการหนึ่งที่สำคัญ ซึ่งสามารถใช้สร้างลวดลายวงจรได้อย่างมีประสิทธิภาพ และผลิตภัณฑ์ที่สร้างได้นั้นล้วนแต่มีคุณภาพสูงและทำให้มีผลิตผล (Productivity) เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีส่วนในการสร้างผลิตภัณฑ์ครั้งละจำนวนมากๆ ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตลดลง แต่กระนั้นกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีที่ใช้ในการสร้างลายวงจร โดยทั่วไปนั้นมิลลิวัดลายวงจรเพียงแบบระนาบสองมิติ กล่าวคือ ลวดลายที่สร้างได้จะมีโครงสร้างชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงหลังการล้างลายมีระยะเพียงความกว้างและความยาวเท่านั้น ส่วนผนังของลายวงจรบนน้ำยาไวแสงยังคงเป็นแบบตั้งตรง (Vertical side wall) ตามความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาเทคนิคการสร้างเพื่อให้ได้โครงสร้างจุลภาคของน้ำยาไวแสงหลังจากการล้างลวดลายน้ำยาไวแสงให้มีผนังลายวงจรที่ไม่ตั้งตรง ซึ่งมีโครงสร้างของน้ำยาไวแสงอาจเป็นแบบลำดับขั้น (Step profile), ลาดเอียง (Slope profile) หรือเป็นรูปร่างโค้ง (Curvature profile) หรือเรียกว่า กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแบบสามมิตินั้นเอง เทคนิคที่ใช้คือการถ่ายแบบลายวงจรแบบเกรย์ สเกล (Gray scale photolithography) [6] โดยที่เทคนิคเกรย์สเกลนี้สามารถสร้างโครงสร้างจุลภาคสามมิติด้วยฉายแสงเพียงครั้งเดียวผ่านกระจกโฟโตมาส์กต้นแบบพิเศษที่ประกอบด้วยช่องเปิดแสงขนาดเล็กที่ประกอบขึ้นด้วยขนาดระยะของพิกเซล (Pixel) และพิทช์ (Pitch) บนแผ่นโฟโตมาส์กต้นแบบ จึงทำให้เกิดการแทรกสอดของลำแสงที่ใช้ในการฉายยังชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง (Light diffraction) หรือเป็นการควบคุมปริมาณพลังงานแสงที่ฉายให้มีระดับโดสแสงที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ไปยังมีการใช้เทคนิคการฉายแสงซ้ำโดยตรงลงบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงด้วยเทคนิคการแปรเปลี่ยนระดับพลังงานแสงจากแหล่งจ่ายพลังงานแสงซึ่งจะส่งผลให้

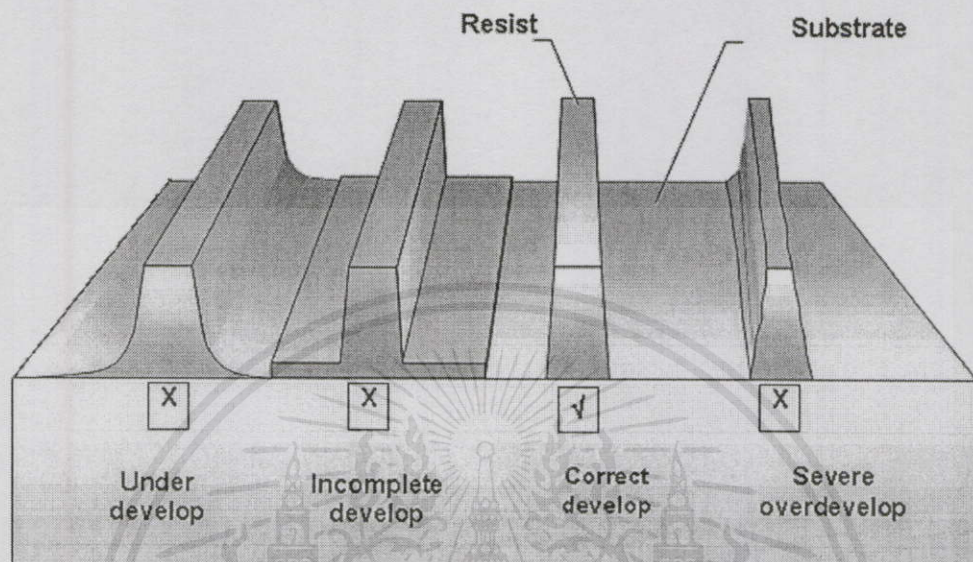
ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ได้รับระดับพลังงานแสงที่แตกต่างกันและเกิดชั้นหนาของ โครงสร้างฟิล์ม น้ำยาไวแสงที่ต่างระดับกัน หรือเป็นโครงสร้างสามมิติบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงนั่นเองเมื่อนำเวเฟอร์ ที่ได้หลังจากกระบวนการล้างลายวงจรแล้ว ไปทำการกัดแบบแห้งจะสามารถสร้างลายวงจรของ เวเฟอร์ที่มีลักษณะ โครงสร้างพื้นผิวแบบจุลภาคสามมิติได้ และยังพบว่าโครงสร้างสามมิติที่เป็น แบบขั้นบันไดสามารถช่วยลดกระบวนการกัดที่มีหลายระดับความลึกหรือที่มีหลายกระบวนการกัด เหลือกระบวนการกัดเพียงครั้งเดียว

1.2 แนวคิดและสมมติฐานของการศึกษการวิจัย

จากพื้นฐานกระบวนการผลิตโฟโตลิโธกราฟีที่ใช้งานโดยทั่วไป ประกอบด้วย กระบวนการผลิตพื้นฐานต่างๆ เช่น การเตรียมชิ้นงานแผ่นเวเฟอร์ก่อนการเคลือบน้ำยาไวแสง การ เคลือบน้ำยาไวแสง การอบน้ำยาไวแสงที่ถูกเคลือบบนแผ่นเวเฟอร์ การถ่ายแบบลายวงจร การล้าง ลายวงจรน้ำยาไวแสง และการตรวจสอบคุณภาพของลายวงจรที่ได้หลังจากการล้างลายวงจร ในรูป ที่ 1.1 แสดงถึงแบบจำลองโครงสร้างลวดลายน้ำยาไวแสงที่ได้หลังจากขั้นตอนการล้างลายวงจร น้ำยาไวแสง เมื่อเราพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงดังรูปที่ 1.1 จะพบว่ามี โครงสร้างบางลักษณะของงานเสียในส่วนที่เกี่ยวข้องกับปัญหาซึ่งเกิดจากกระบวนการล้างลาย น้ำยาไวแสง เช่น Under develop และ Over develop พบว่า สาเหตุหลักของงานเสียในส่วนนี้เป็น สาเหตุมาจากกระบวนการล้างลายน้ำยาไวแสงเอง [7] เช่น เกิดจากส่วนผสมหรือคุณภาพของน้ำยา ที่ใช้ล้างลายวงจร หรือพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องล้างลายวงจรที่ไม่เหมาะสม นอกจากนี้ยังมี อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์แวดล้อม ที่อาจส่งให้เกิดปัญหานี้อีกด้วย

ส่วนงานเสียที่เกิดจากการล้างลายที่ไม่เสร็จสมบูรณ์ หรือ Incomplete develop นั้น มีสาเหตุ หลักเกิดจากการฉายแสงด้วยค่าโคซแสงที่ไม่เหมาะสมต่อความหนาฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เลือกใช้งาน ดังนั้นถ้าเราวิเคราะห์เฉพาะงานเสียตรงส่วนนี้แล้ว จะพบว่าเราสามารถที่จะนำไปประยุกต์เพื่อใช้ สร้างโครงสร้างจุลภาคสามมิติบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงได้โดยการควบคุมระดับปริมาณพลังงาน แสงอัลตราไวโอเล็ตของเครื่องถ่ายแบบลายวงจรที่จะใช้ทำการฉายแสงยังชิ้นงานเวเฟอร์ ซึ่งการ ควบคุมการถ่ายแบบลายวงจรโดยทั่วไปจะสามารถควบคุมปริมาณค่าโคซแสงได้สองกรณี คือ (1) การควบคุมระดับพลังงาน โดยตรงจากแหล่งจ่ายแสงของเครื่องถ่ายแบบลายวงจร โดยการ แปรเปลี่ยนระดับพลังงานที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดโครงสร้างสามมิติบนชั้นน้ำยาไวแสงได้ และ (2) การควบคุมระดับพลังงานแสงที่ถูกฉายผ่านแผ่นโฟโตมาสก์ต้นแบบชนิดพิเศษโดยสามารถทำให้ เกิดปริมาณแสงที่มีหลายระดับแสงฉายแสงไปยังชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เคลือบอยู่บนแผ่นเวเฟอร์ ด้วยการฉายแสงเพียงครั้งเดียว เทคนิคนี้ถูกเรียกว่าโฟโตลิโธกราฟีแบบเทคนิคเกรย์สเกลนั่นเอง เมื่อนำแผ่นชิ้นงานเวเฟอร์ที่มีโครงสร้างของลายวงจรน้ำยาไวแสงแบบสามมิติเข้าสู่ขั้นตอน กระบวนการกัดแบบแห้งจะสามารถทำให้เกิดการถ่ายแบบลวดลายสามมิติยังแผ่นเวเฟอร์เป้าหมาย

โดยมีโครงสร้างสามมิติเช่นเดียวกับโครงสร้างบนชั้นน้ำยาไวแสงได้ กระบวนการนี้สามารถนำไปประยุกต์เพื่อใช้สร้างอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กในระดับไมครอน เช่น เลนส์ระดับจุลภาคหรืออุปกรณ์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ไฟฟ้าจุลภาคเชิงกลได้



รูปที่ 1.1 ลักษณะของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ได้หลังจากการล้างลายวงจร [7]

1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษาและขอบเขตการวิจัย

ในการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีในการออกแบบโฟโตลิโธกราฟีแบบสามมิติ และการสร้างลวดลายต้นแบบที่มีโครงสร้างจุลภาคสามมิติบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงด้วยเทคนิคแบบการฉายแสงด้วยการแปรเปลี่ยนระดับพลังงานแสงโดยตรงจากแหล่งจ่ายแสง และเทคนิคเกรย์สเกล ด้วยการใช้อุปกรณ์ลายวงจรแบบสเต็ปเปอร์ที่มีความแม่นยำในการเคลื่อนที่ของแท่นฐานรองชิ้นงานสูง โดยมีวัตถุประสงค์หลักการวิจัยดังต่อไปนี้

1. เพื่อเป็นการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีชนิดบวกรูปแบบทั่วไป เพื่อนำกระบวนการเหล่านี้ไปประยุกต์ ใช้งานการออกแบบและทำการสร้างลายวงจรโฟโตลิโธกราฟีแบบสามมิติ
2. เพื่อศึกษาการออกแบบลายวงจร เพื่อใช้สร้างแผ่นโฟโตมาสก์ต้นแบบตลอดถึงขั้นตอนการสร้างลวดลายต้นแบบโฟโตมาสก์
3. เพื่อศึกษาการสร้างลายวงจรต้นแบบที่มีโครงสร้างสามมิติบนชั้นน้ำยาไวแสงโดยใช้เทคนิคโฟโตลิโธกราฟีแบบเกรย์สเกล
4. เพื่อศึกษาการสร้างลายวงจรสามมิติบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงด้วยเทคนิคการแปรเปลี่ยนระดับพลังงานแสงโดยตรงจากแหล่งจ่ายแสง

5. เพื่อศึกษาทฤษฎี และขั้นตอนของกระบวนการกัดแบบแห้งที่ใช้ในการทดลอง
6. เพื่อศึกษาผลกระทบทางแสงที่อาจก่อให้เกิดการเสีรูบของลวดลายโครงสร้างสามมิติบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง เช่น การแทรกสอดแสงในระบบโปรเจกชัน เป็นต้น
7. เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้งานของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแบบสามมิติ เช่น การลดขั้นตอนของกระบวนการกัดและการสร้างต้นแบบเลนส์ระดับจุลภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 100 ไมครอน

1.4 การดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยนี้เป็นการนำเทคนิคการสร้างลายวงจรโฟโตลิโธกราฟีแบบสามมิติจากสองเทคนิคดังที่กล่าวไว้แล้วตอนต้น ซึ่งทั้งสองเทคนิคนี้มีความเกี่ยวพัน โดยตรงกับระดับพลังงานแสงที่ใช้ฉายแสงยังชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง และทำให้เกิดโครงสร้างจุลภาคสามมิติ โดยมีขั้นตอนการทําวิจัยเพื่อทดสอบข้อสมมติฐาน ดังนี้

1. ทำการศึกษาลักษณะความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงชนิดบวทที่ได้จากการเคลือบด้วยเครื่องมือเคลือบ และการหาเงื่อนไขของการเคลือบน้ำยาไวแสง
2. ทำการศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ของระดับพลังงานแสงที่ส่งผลต่อชั้นความหนาของฟิล์มน้ำยาไวแสง
3. ทำการศึกษาเพื่อสร้างลายวงจร โครงสร้างจุลภาคสามมิติบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงโดยใช้เทคนิคแปรเปลี่ยนระดับพลังงานแสงโดยตรงจากแหล่งจ่ายแสง
4. ทำการศึกษาเพื่อหาผลกระทบจากภาวะการแทรกสอดแสงในระบบโปรเจกชันของเครื่องสตีปเปอร์
5. ทำการศึกษาการออกแบบลวดลายโฟโตมาสก์แบบเทคนิคเกรย์สเกลและขั้นตอนกระบวนการสร้างแผ่นโฟโตมาสก์ที่ใช้งาน
6. ทำการศึกษากระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแบบสามมิติด้วยเทคนิคเกรย์สเกล
7. ทำการศึกษากระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแบบสามมิติด้วยเทคนิคการแปรเปลี่ยนระดับพลังงานแสงโดยตรงจากแหล่งจ่ายแสง เพื่อใช้ลดขั้นตอนของกระบวนการกัดแบบแห้ง
8. ทำการศึกษาเพื่อประยุกต์การใช้งานกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแบบสามมิติด้วยเทคนิคเกรย์สเกล เพื่อสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้าจุลภาคเชิงกล เช่น เลนส์ระดับจุลภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 100 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้ คือ ความรู้ที่เกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานโดยทั่วไปและขั้นสูงของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เช่นการออกแบบลวดลายแผ่นโฟโตมาส์กที่ใช้งานแบบทั่วไปและแบบเทคนิคเกรย์สเกล กระบวนการสร้างลวดลายโฟโตลิโธกราฟีแบบสามมิติ ด้วยเทคนิคแปรเปลี่ยนระดับพลังงานแสงโดยตรงจากแหล่งจ่ายแสงและเทคนิคเกรย์สเกล และเมื่อนำไปประยุกต์ใช้งานเชิงอุตสาหกรรมแล้วจะสามารถช่วยใช้ในการลดขั้นตอนกระบวนการการกัดแบบแห้งที่มีหลายระดับความลึกลงเหลือเพียงขั้นตอนเดียว ซึ่งจะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำลงตลอดจนสายการผลิตที่สั้นลง นอกจากนี้กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแบบเทคนิคเกรย์สเกล เทคนิคนี้สามารถสร้างลวดลายจุลภาคสามมิติที่มีผนังของชั้นน้ำยาไวแสงเป็นแบบต่างๆ ได้ เช่นเป็นผนังแบบรูปร่างโค้ง แบบลาดเอียง แบบขั้นบันได หรือแบบมีผนังที่ตั้งตรงได้ โดยการถ่ายแบบลายวงจรเพียงครั้งเดียว ซึ่งมีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานการสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้าจุลภาคเชิงกลต่างๆ ได้

1.6 รายละเอียดเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บท โดยในแต่ละบทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย แนวคิด และข้อสมมติฐานการวิจัย วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย การดำเนินการวิจัยเพื่อทดสอบข้อสมมติฐาน ผลประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย รวมถึงรายละเอียดของเนื้อหาวิทยานิพนธ์เพื่อให้ผู้อ่านได้ทราบถึงขอบเขตของวิทยานิพนธ์เล่มนี้

บทที่ 2 บททฤษฎี กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยรวมแบบทั่วไป หลักการพื้นฐานและทฤษฎีการออกแบบลวดลายโฟโตมาส์กสามมิติด้วยเทคนิคเกรย์สเกล และเทคนิคการฉายแสงซ้ำ โดยการแปรเปลี่ยนพลังงานแสงโดยตรงจากแหล่งจ่ายแสง คุณสมบัติของน้ำยาไวแสงและการเลือกใช้น้ำยาไวแสง การเคลือบน้ำยาไวแสง หลักการทำงานของเครื่องถ่ายแบบลายวงจร และทฤษฎี กระบวนการกัดแบบแห้ง

บทที่ 3 การออกแบบและการสร้างโฟโตมาส์กต้นแบบ กล่าวถึงการออกแบบร่างลวดลายโฟโตมาส์กต้นแบบ และกระบวนการสร้างแผ่นโฟโตมาส์กที่ใช้ในการวิจัย

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง กล่าวถึงการหาเงื่อนไขต่างๆ ของกระบวนการสร้างลายวงจรโฟโตลิโธกราฟีแบบสามมิติ เช่น การหาค่าความสม่ำเสมอของน้ำยาไวแสงที่ได้จากการเคลือบน้ำยาไวแสงแบบหมุนเคลือบ การหาความสัมพันธ์ค่าความหนาของฟิล์มน้ำยาไวแสงกับระดับพลังงานแสงที่ใช้น้ำยาไวแสง การหาความสัมพันธ์สัดส่วนการกัดบนเวเฟอร์แบบซิลิคอนต่อชั้นฟิล์มของน้ำยาไวแสง การศึกษาผลกระทบจากการแทรกสอดทางแสงในระบบโปรเจกชันสำหรับ

เครื่องถ่ายแบบลายวงจรสตีปเปอร์ที่ใช้งาน การสร้างลายวงจรจุลภาคสามมิติแบบขั้นบันไดด้วย
เทคนิคแปรเปลี่ยนระดับพลังงานแสงโดยตรงจากแหล่งจ่ายแสง เพื่อศึกษาในการลดขั้นตอนการกัด
แบบแห้ง และทำการศึกษากการสร้างลายวงจรต้นแบบด้วยเทคนิคเกรย์สเกล

บทที่ 5 การศึกษาการสร้างต้นแบบเลนส์จุลภาค โดยเทคนิคเกรย์สเกล เป็นการศึกษาเพื่อ
ประยุกต์การใช้งานของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีสามมิติที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคเกรย์สเกล

บทที่ 6 สรุป

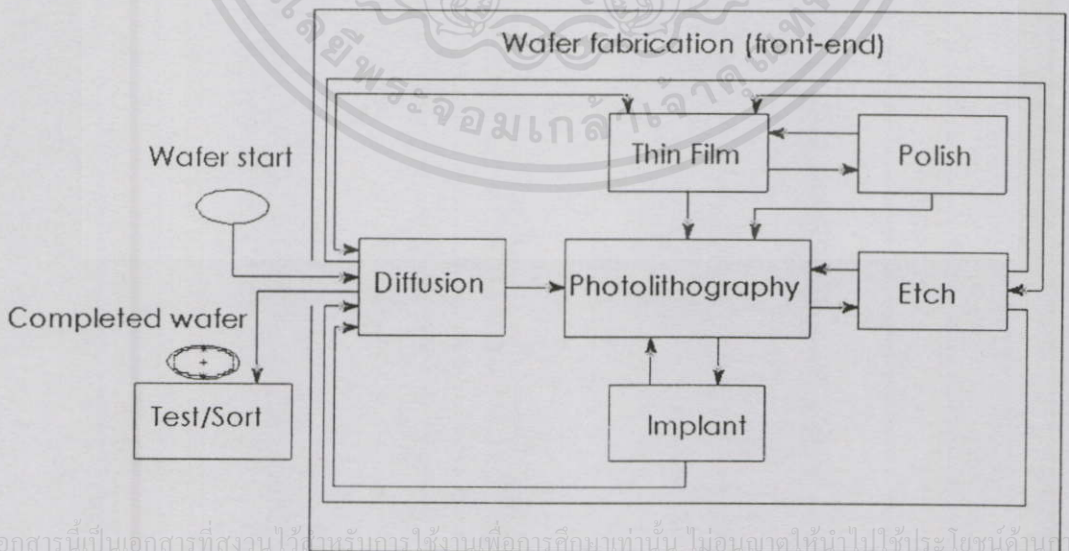


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎี

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเป็นศิลปะที่ว่าด้วยการคัดลอกวาดลายภาพจากวาดลายต้นแบบไปยังวัตถุอื่นๆ เช่น ฐานรองซิลิคอน ซึ่งวิทยาการของโฟโตลิโธกราฟีนี้ มีการกระทำมานานมากกว่าหนึ่งร้อยปีที่แล้ว โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อสลักวาดลายลงบนหินหรือโลหะ คำว่า “Photolithography” มาจากภาษากรีกโบราณ ซึ่งเกิดจากการสร้างวาดลายภาพลงบนหิน โดยการใช้แสง ในอุตสาหกรรมเซมิคอนดักเตอร์กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีถูกใช้ในการคัดลอกวาดลายที่เล็กมากในระดับไมโครเมตร หรือนาโนเมตร เพื่อใช้ในการกำหนดขนาดพื้นที่ๆ แม่นยำลงในวัสดุที่ไวต่อแสง เช่น น้ำยาไวแสงและกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีนี้จะถูกกระทำโดยการใช้แสงเสมอ

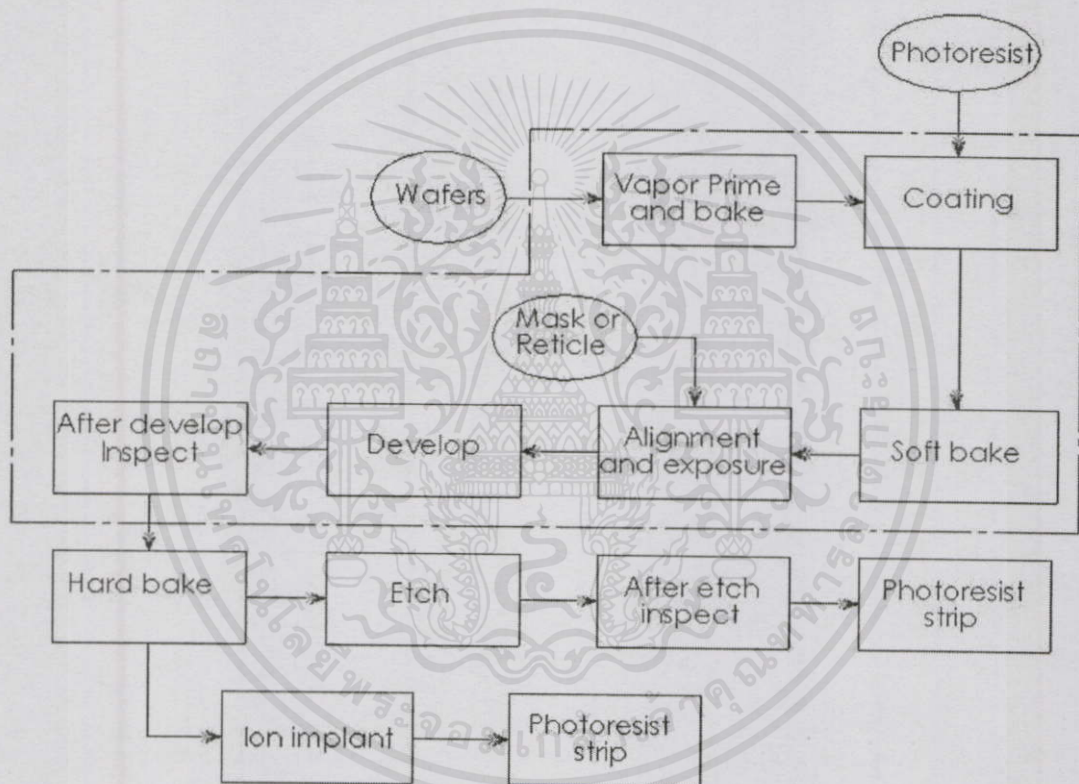
จุดประสงค์หลักของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีในปัจจุบัน แบ่งเป็นสองส่วนหลัก คือ (1) การสร้างลายวงจรต้นแบบโฟโตมาสก์ เป็นการสร้างลายวงจรบนฐานรองที่โปร่งแสง เช่น แผ่นควอตซ์ (Quartz) ที่มีความบริสุทธิ์สูงเพื่อใช้เป็นแม่พิมพ์ในการถ่ายแบบยังฐานรองชนิดอื่นๆ [8] และ(2) ใช้ในการสร้างลวดลายวงจรบนแผ่นเวเฟอร์ฐานรอง ซึ่งจะถูกเคลือบด้วยน้ำยาไวแสง เพื่อใช้สร้างลายวงจรแบบชั่วคราวก่อนการนำไปสู่กระบวนการกัด (Etching) หรือการฝังประจุแบบไอออน (Ion implantation) เพื่อเป็นการสร้างลายวงจรแบบถาวรบนฐานรองเวเฟอร์ต่อไป นอกจากนี้การผลิตด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี สามารถสร้างลวดลายวงจรที่มีจำนวนมากขึ้นได้ ด้วยกระบวนการผลิตเพียงครั้งเดียวเป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมิให้คัดลอกเปลี่ยนแปลง และต้องอ้างอิงถึงที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.1 สายการผลิตของกระบวนการผลิตวงจรรวม

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีนั้นถือว่าเป็นจุดศูนย์กลางของกระบวนการผลิตเซมิคอนดักเตอร์วงจรรวมซึ่งเห็นได้ชัดว่ามีการทำงานวนซ้ำกลับมาที่กระบวนการผลิตโฟโตลิโธกราฟี ดังแสดงในรูปที่ 2.1 หรือเป็นกระบวนการผลิตหลักในอุตสาหกรรมส่วนหน้าของการผลิตวงจรรวมนั่นเอง และมีจำนวนบ่อยครั้งที่มีการพิจารณาใช้ กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีในสายการผลิตแผ่นเวเฟอร์ ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของวงจรรวมที่ทำการออกแบบ ส่วนในรูปที่ 2.2 แสดงถึงรายละเอียดของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ประกอบด้วยกระบวนการพื้นฐานต่างๆ เช่น การเตรียมชิ้นงานเวเฟอร์ (Wafer preparation) การอบไอระเหย (Vapor prime and Bake), การเคลือบนำยาไวแสง (Coating), การอบนำยาไวแสง (Soft bake), การถ่ายแบบลายวงจร (Wafer alignment and exposure), การล้างลาย (Develop), และการตรวจสอบลายวงจร (After develop inspect) เป็นต้น



รูปที่ 2.2 สายการผลิตร่วมในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

2.1 ชนิดของโฟโตลิโธกราฟี [7,9]

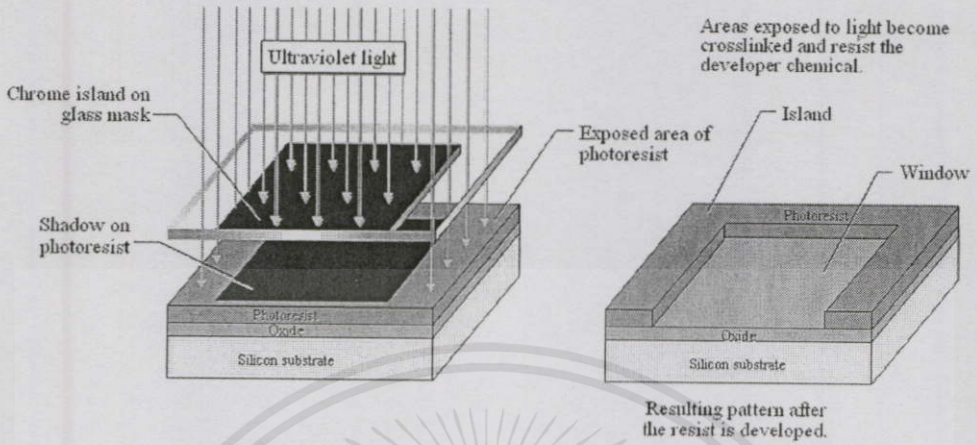
โฟโตลิโธกราฟีประกอบด้วยกระบวนการพื้นฐานสองชนิด คือ โฟโตลิโธกราฟีชนิดลบ (Negative photolithography) และบวก (Positive photolithography)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รวบรวมไว้สำหรับใช้ในการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

2.1.1 โฟโตลิโธกราฟีชนิดลบ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ลักษณะหลักของโฟโตลิโธกราฟีชนิดลบ คือ ส่วนนำยาไวแสงที่ถูกฉายแสงจะกลายเป็นส่วนที่ไม่สามารถละลายได้และแข็งตัวโดยครอสลิงกิง (Cross linking) ภาพลวดลายจะถูกขึ้นรูปเป็น

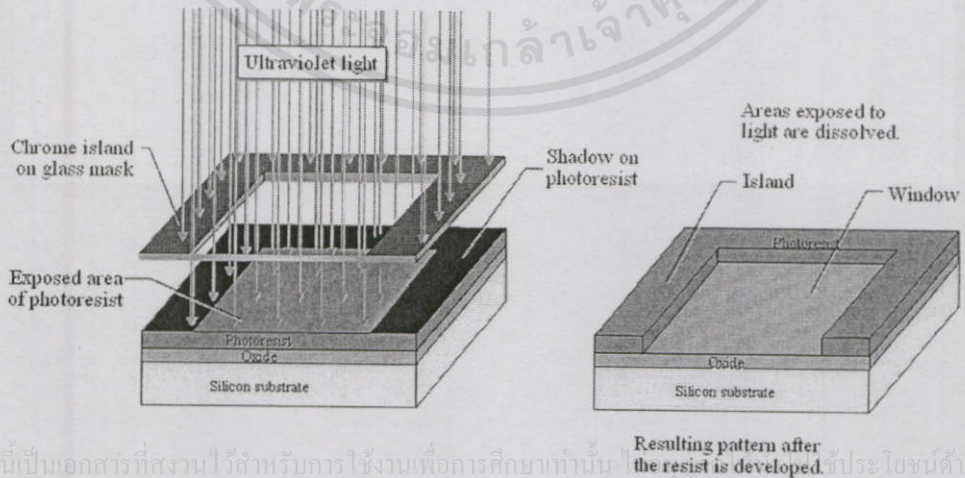
ลักษณะตรงกันข้ามจากลวดลายของลวดลายโฟโตมาส์กต้นแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และมีลักษณะลวดลายเช่นเดียวกับฟิล์มเนกาทีฟของกล้องถ่ายรูป



รูปที่ 2.3 โฟโตลิโธกราฟีชนิดลบ

2.1.2 โฟโตลิโธกราฟีชนิดบวก

โฟโตลิโธกราฟีชนิดบวก ลวดลายที่ถูกถ่ายแบบลงบนเวเฟอร์จะมีภาพลวดลายเหมือนเช่นเดียวกับลวดลายบนแผ่นโฟโตมาส์กต้นแบบ พื้นที่ๆ ถูกฉายแสงด้วยแสงอัลตราไวโอเลตจะทำปฏิกิริยาทางเคมีแสงและกลายเป็นส่วนที่สามารถละลายได้และอ่อนตัวในน้ำยาล้างลาย ซึ่งลักษณะนี้หมายถึงพื้นที่ของน้ำยาไวแสงชนิดบวกที่ถูกทำการฉายแสงแล้วจะเป็นพื้นที่ที่สามารถล้างออกได้ นั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 2.4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

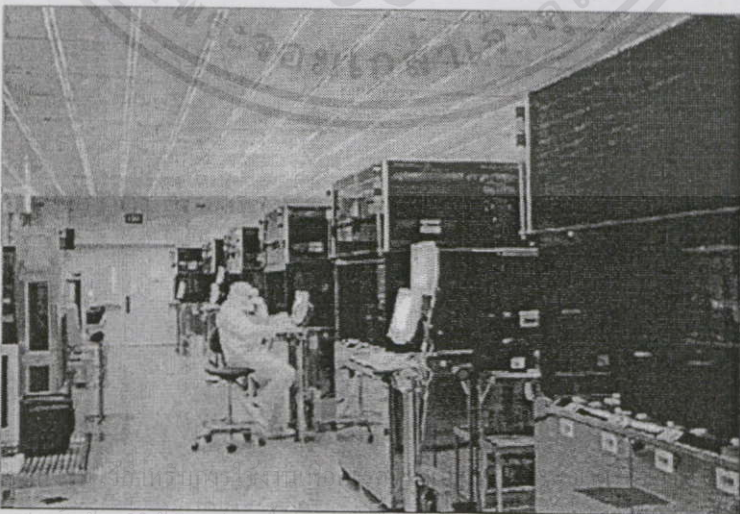
รูปที่ 2.4 โฟโตลิโธกราฟีชนิดบวก

2.2 พื้นฐานของกระบวนการโฟโตลิโกราฟี[7-8,13]

โฟโตลิโกราฟีเป็นกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรจำนวนมากที่ส่งผลต่อคุณภาพของลายวงจร เช่น ขนาดของลวดลายที่เล็กลงเพื่อให้มีการบรรจุจำนวนทรานส์ซิสเตอร์มากขึ้น, จำนวนชั้นความหนาแน่นของวงจรรวม, ความสะอาดของผิวเวเฟอร์, สารเคมีต่างๆ, ปริมาณฝุ่นและปฏิกิริยาเคมีแสงต่างๆ ฉะนั้นกระบวนการผลิตทุกขั้นตอนจะต้องกระทำในห้องสะอาด (Clean room) และมีสีเหลืองซึ่งโดยทั่วไปในอุตสาหกรรมการผลิตวงจรรวมจะปฏิบัติการในห้องสะอาดที่มีระดับต่ำกว่าระดับ 100 (Class 100) ลงมา ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งเป็นระดับของห้องสะอาด และรูปที่ 2.5 เป็นภาพแสดงของห้องปฏิบัติการโฟโตลิโกราฟีของบริษัท AMD (Advanced Micro Devices) ในห้องปฏิบัติการนี้จะมีการควบคุมปริมาณฝุ่นเป็นพิเศษและใช้แสงสีเหลืองเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาแสงต่อน้ำยาไวแสงที่ใช้ในกระบวนการผลิต ส่วนบุคลากรที่ทำการปฏิบัติการในห้องนี้จะต้องสวมชุดพิเศษที่สามารถป้องกันผงฝุ่นที่ติดมาได้ หรือที่เรียกว่าชุดสะอาด (Cleanroom suits) นอกจากนี้ยังมีการจำกัดจำนวนบุคลากรที่ทำงานในห้องปฏิบัติอีกด้วย

ตารางที่ 2.1 ระดับชั้นห้องสะอาด

Class	Particles /ft ³				
	≥ 0.1 μm	≥ 0.2 μm	≥ 0.3 μm	≥ 0.5 μm	≥ 5.0 μm
1	35	7.5	3	1	NA
10	350	75	30	10	NA
100	NA	750	300	100	NA
1,000	NA	NA	NA	1,000	7
10,000	NA	NA	NA	10,000	70
100,000	NA	NA	NA	100,000	700

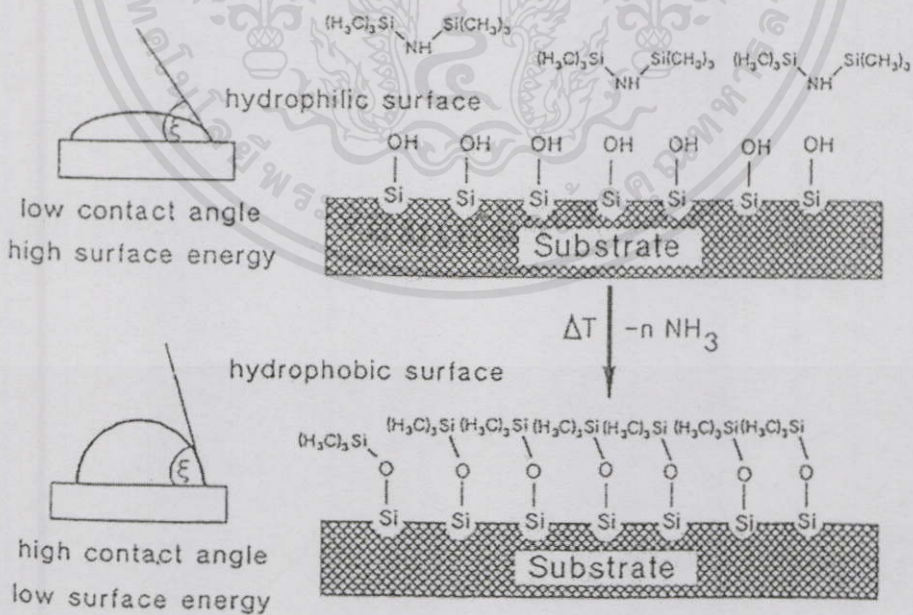


รูปที่ 2.5 ห้องปฏิบัติการโฟโตลิโกราฟีของบริษัท AMD

2.2.1 การเคลือบผิวหน้าแผ่นเวเฟอร์

การเคลือบผิวหน้าเวเฟอร์ (Wafer priming) เป็นการเคลือบด้วยสารเฮกซะเมทิลไดซิลิเดเซน (Hexamethyldisilazane, HMDS) ซึ่งมีคุณสมบัติในการกำจัดโมเลกุลของน้ำจากพื้นผิวซิลิคอน จุดประสงค์หลักของการเคลือบผิวหน้าแผ่นเวเฟอร์เพื่อช่วยส่งเสริมการยึดติดที่ดีขึ้นระหว่างน้ำยาไวแสงและผิวของเวเฟอร์ การทำความสะอาดและเคลือบแผ่นเวเฟอร์สามารถกระทำโดยแบบจุ่มลงในสารเคมี (Immersion priming) แบบสปิน (Spin priming) และแบบอบไอระเหย (Vapor priming) เพื่อเป็นการเตรียมชิ้นงานก่อนการทำการเคลือบน้ำยาไวแสง

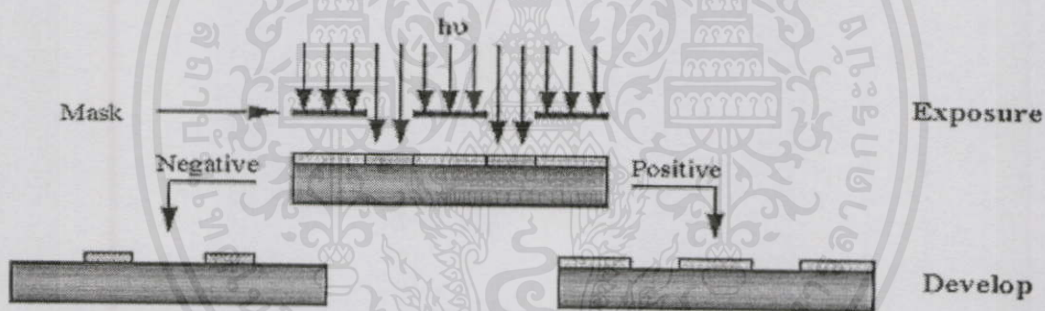
การอบไล่ความชื้นออกจากผิวหน้าเวเฟอร์และเพิ่มการยึดเกาะระหว่างชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงกับผิวหน้าเวเฟอร์ด้วยน้ำยาเฮกซะเมทิลไดซิลิเดเซน โดยโมเลกุลของ HMDS จะเข้าไปแทนที่โมเลกุลของหมู่ไฮดรอกไซด์ (Hydroxide group, OH) ของน้ำที่อยู่บนผิวเวเฟอร์ทำให้เกิดก๊าซแอมโมเนียและก๊าซออกซิเจนซึ่งเป็นสารประกอบเฉื่อยของเฮกซะเมทิลไดซิลิเดเซน จากนั้น HMDS จะผสมกับก๊าซออกซิเจนเพื่อสร้างไตรเมทิลซิลิล (Trimethylsilyl) เพื่อแทนที่หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) และออกไซด์ (Oxide) และจะได้หมู่ไตรเมทิลซิลิลามีน (Trimethylsilylamine) ที่ไม่เสถียรคอยยึดจับกับโมเลกุลของน้ำยาไวแสง ทำให้ผิวหน้าชิ้นงานมีพลังงานที่ผิวต่ำ (Low surface energy) และมีมุมสัมผัสของหยดน้ำสูง (High contact angle) ทำให้ผิวของเวเฟอร์กลายเป็นผิวที่ไม่เกาะน้ำ (Hydrophobic surface) และทำให้ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงเกิดการยึดเกาะกับชิ้นงานดีขึ้น ดังในรูปที่ 2.6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น **รูปที่ 2.6 การสร้างพันธะเพื่อเพิ่มการยึดเกาะของน้ำยา HMDS**

2.2.2 การเคลือบนำยาไวแสง

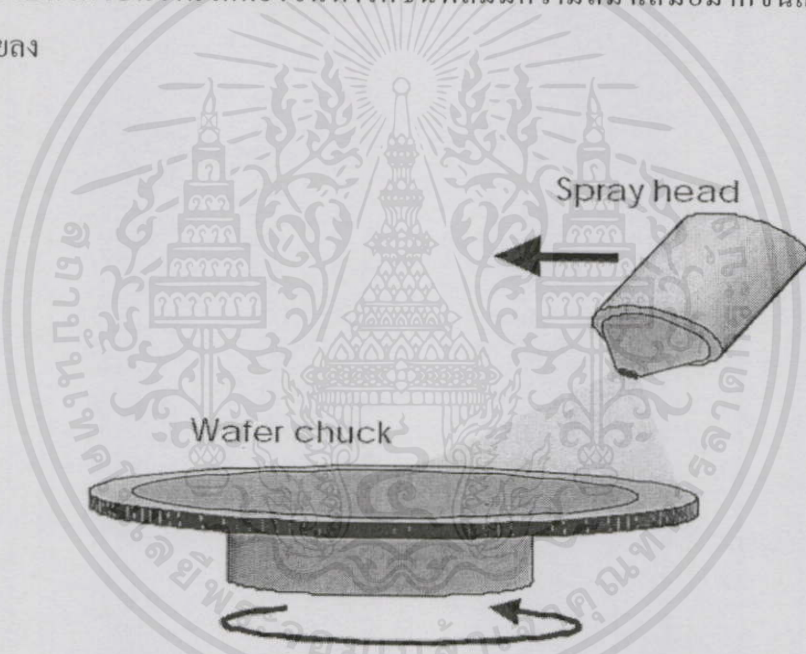
นำยาไวแสง (Photoresist) เป็นสารเคมีที่มีความไวต่อการทำปฏิกิริยากับแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) ที่ช่วงความยาวคลื่น 190 ถึง 442 นาโนเมตร มีองค์ประกอบหลักทางเคมี 4 ชนิด คือ (1) สารโพลีเมอร์ (Polymer) ทำหน้าที่กำหนดคุณสมบัติเชิงกลของนำยาไวแสง (2) ตัวทำละลาย (Solvent) ทำหน้าที่ละลายสารโพลีเมอร์เพื่อให้นำยาไวแสงมีสถานะของเหลวเพื่อสะดวกต่อการเคลือบลงบนผิวเวเฟอร์ นอกจากนี้ยังเป็นตัวกำหนดความหนืดของนำยาไวแสง (3) สารไวแสง (Sensitizers) ทำหน้าที่กำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยากับแสงที่ค่าความยาวคลื่นแสงที่ใช้ในการถ่ายแบบลายวงจร และ (4) สารเติมแต่ง (Additives) เป็นองค์ประกอบที่เพิ่มคุณสมบัติพิเศษ เช่น เม็ดสี เป็นต้น นำยาไวแสงสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ตามคุณสมบัติการละลายในตัวทำละลาย คือ นำยาไวแสงชนิดบวก ซึ่งส่วนที่ถูกฉายแสงจะอ่อนตัวและละลายไปกับน้ำยาล้างลาย ในขณะที่ส่วนที่ไม่ถูกฉายแสงจะแข็งตัวและคงเหลือเป็นลายวงจรอยู่ โดยลายวงจรที่เกิดขึ้นจะเหมือนกับลายวงจรที่ได้ออกแบบไว้บนแผ่นกระจกต้นแบบ และนำยาไวแสงชนิดลบ ส่วนที่ถูกฉายแสงจะแข็งตัวและไม่ละลายในน้ำยาล้างลาย ในขณะที่ส่วนที่ไม่ถูกฉายแสงจะอ่อนตัวและละลายออกไป ดังนั้นลายวงจรที่ปรากฏจะตรงข้ามกับลายวงจรที่ออกแบบไว้ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ลายวงจรที่เกิดบนนำยาไวแสงชนิดบวกและชนิดลบ

การเคลือบชั้นฟิล์มนำยาไวแสงลงบนผิวเวเฟอร์จะสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การพ่นเคลือบ (Spray coating) [13] ซึ่งเป็นการจ่ายนำยาไวแสงผ่านหัวจ่ายอัลตราโซนิก ดังแสดงในรูปที่ 2.8 เพื่อสร้างละอองของนำยาไวแสงให้มีขนาดเล็กระดับไมครอน ลงบนเวเฟอร์ที่หมุนอย่างต่อเนื่องด้วยความเร็วรอบ 30 ถึง 60 รอบต่อวินาที โดยนำยาไวแสงที่ใช้จะต้องมีความหนืดน้อยกว่า 20 cSt. เพื่อให้สามารถทำการพ่นได้ และต้องมีอัตราการระเหยตัวของสารละลายที่เร็วเพื่อไม่ให้น้ำยาไวแสงไหลลงไปที่หลุมและทำให้ขอบด้านบนไม่มีนำยาไวแสงปกคลุม (Flowing effect) ซึ่งเทคนิคการพ่นเคลือบมีข้อดี คือ ใช้ปริมาณนำยาไวแสงน้อยกว่าวิธีการหมุนเคลือบ (Spinner) ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ และสามารถเคลือบชั้นฟิล์มนำยาไวแสงลงไปบนแผ่นเวเฟอร์ที่มีลักษณะแบบหลุมที่ลึกได้ นอกจากนี้ยังมีเทคนิคการเคลือบแบบอิเล็กโทรดีโพสิชัน [14] ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีสมรรถภาพ

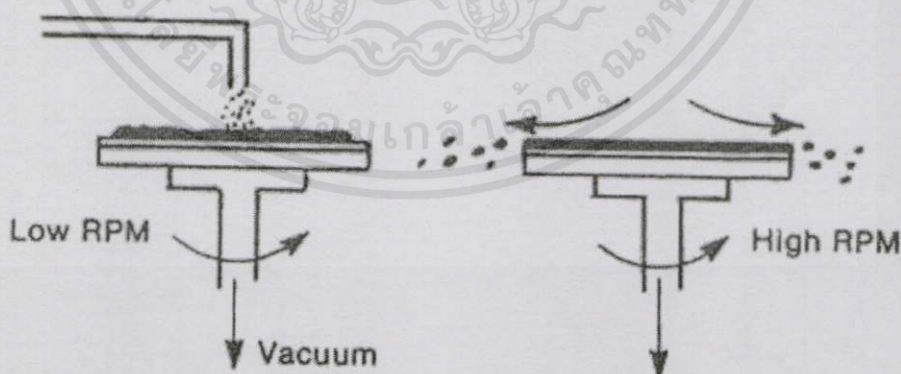
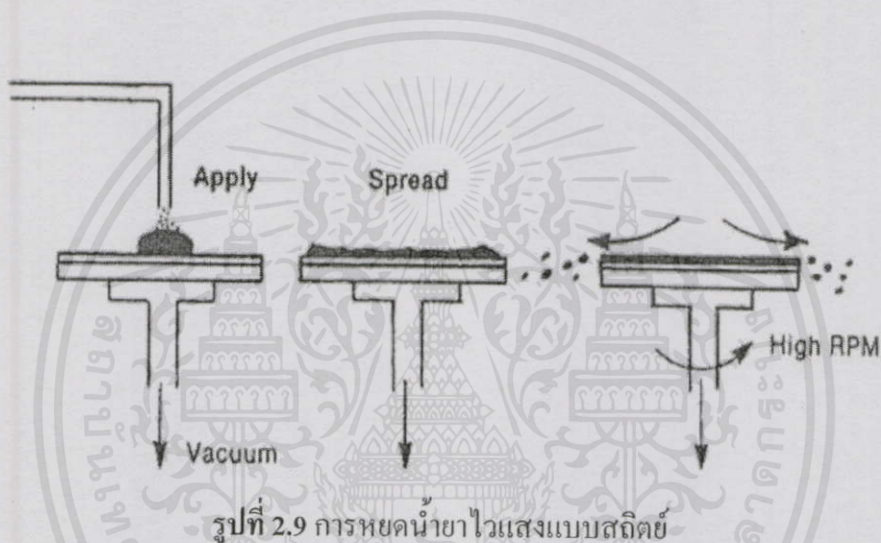
สูง ใช้ในการเคลือบน้ำยาไวแสงลงบนบนผิวโค้งและผิวขรุขระ โดยน้ำยาไวแสงที่ใช้จะต้องมีคุณสมบัติแบบคาทาโพรีติกและชั้นงานต้องมีพื้นผิวที่สามารถนำไฟฟ้า ซึ่งจะได้ความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงเท่ากันทุกพื้นผิว และไม่เกิดตามด (Pinhole) ขึ้นบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง แต่วิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดถึงแม้จะสามารถใช้น้ำยาไวแสงได้เพียงแค่ 2 เปอร์เซ็นต์ คือ การหมุนเคลือบ ซึ่งประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก คือการจ่ายน้ำยาไวแสง, การหมุนที่ความเร็วรอบต่ำสปีนออฟ, การเร่งไปสู่ความเร็วรอบสูงสปีนออฟ, และการหมุนที่ความเร็วรอบสูงเพื่อปั่นระเหย โดยเริ่มจากการหยคน้ำยาไวแสงผ่านหัวจ่ายไปยังผิวชิ้นงานซึ่งอาจเป็นแบบสถิตย์ (Static dispense) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 คือ หยคน้ำยาไวแสงลงไปบนผิวชิ้นงานที่หยุดนิ่ง หรือแบบจลน์ (Dynamic dispense) ดังแสดงรูปที่ 2.10 โดยหยคน้ำยาไวแสงไปยังผิวชิ้นงานเวเฟอร์ในขณะที่ชิ้นงานหมุนด้วยความเร็วรอบไม่เกิน 500 รอบต่อนาที โดยการหยคน้ำยาไวแสงแบบจลน์นี้จะช่วยให้ น้ำยาไวแสงกระจายไปทั่วผิวชิ้นงานได้ดียิ่งขึ้นทำให้ชั้นฟิล์มมีความสม่ำเสมอมากขึ้นและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายน้อยลง



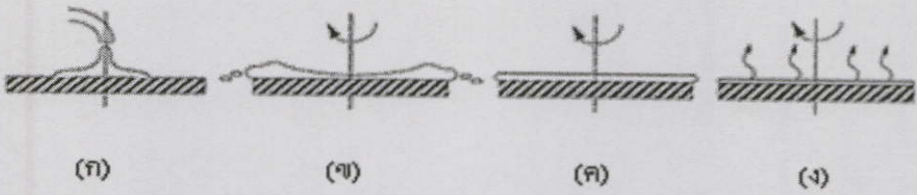
รูปที่ 2.8 การเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยเทคนิคสเปรย์

หลังจากน้ำยาไวแสงถูกจ่ายลงบนแผ่นเวเฟอร์แล้ว แผ่นเวเฟอร์จะถูกเร่งด้วยความเร่งไปยังความเร็วแรก (First spin speed) ซึ่งเป็นความเร็วรอบต่ำ เพื่อทำให้น้ำยาไวแสงกระจายจากกึ่งกลางไปยังขอบของชิ้นงานตามแรงหนีศูนย์กลาง โดยถ้าอัตราเร่งสูงจะทำให้ได้ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่มีความสม่ำเสมอมากกว่าอัตราเร่งต่ำ แต่ถ้าใช้เวลาในขั้นตอนสปีนออฟนานเกินไปจะทำให้ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงมีความไม่สม่ำเสมอมากขึ้น จากนั้นชิ้นงานจะถูกเร่งจากความเร็วรอบต่ำไปยังความเร็วรอบสูง (Second spin speed) เป็นการเข้าสู่ขั้นตอนสปีนออฟเพื่อให้น้ำยาไวแสงส่วนเกินถูกขับออกจากผิวหน้าชิ้นงาน และเป็นขั้นตอนที่กำหนดความหนาของชั้นฟิล์ม โดยความเร็วรอบที่สูงขึ้นจะ

ทำให้ได้ชั้นฟิล์มที่บางลง และชิ้นงานจะถูกหมุนที่ความเร็วรอบสูงอย่างต่อเนื่องตามเวลาที่กำหนด ขั้นตอนการระเหย ตัวทำละลายในน้ำยาไวแสงจะถูกขับออกไปเพื่อให้ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงเกิดการแข็งตัวและเพื่อกำหนดความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงโดยปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนาและความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงของเทคนิคการหมุนเคลือบ คือ อุณหภูมิของน้ำยาไวแสง (Photoresist temperature), ปริมาณน้ำยาไวแสง (Photoresist volume), อุณหภูมิห้อง (Room temperature), อัตราเร่งในการหมุน (Acceleration rate), ความเร็วในการหมุน (Spin velocity), เวลาในการหมุนเคลือบ (Spin time), แรงดูดไอเสีย (Exhaust force) และความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ส่วนในรูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ของเครื่องแบบหมุนเคลือบ

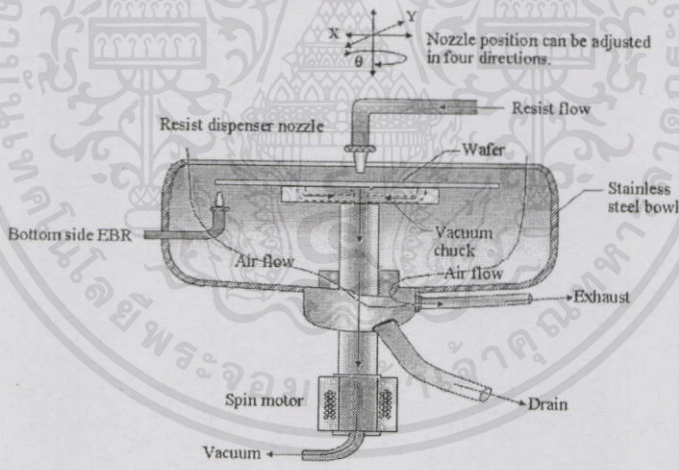


เอกสารนี้เป็นการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงจะนิยมใช้การออกแบบการทดลองเพื่อหาพารามิเตอร์ที่จะใช้ในการเคลือบแบบหมุนเคลือบซึ่งจะถูกกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ โดยวิศวกรกระบวนการ



รูปที่ 2.11 การสร้างชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงด้วยเทคนิคการหมุนเคลือบ (ก) การจ่ายน้ำยาไวแสง (ข) การหมุนที่ความเร็วรอบต่ำ (ค) การเร่งไปสู่ความเร็วรอบสูง (ง) การหมุนที่ความเร็วรอบสูง

การเคลือบน้ำยาไวแสงแบบหมุนเคลือบด้วยเทคนิคสแตติกเวเฟอร์จะเริ่มถูกทำให้หมุนใน ที่ความเร็วรอบต่ำเพื่อกระจายออกของน้ำยาอย่างสม่ำเสมอ เมื่อน้ำยาไวแสงกระจายออกใกล้ขอบ ของเวเฟอร์ มอเตอร์จะสั่งให้เร่งความเร็วขึ้นยังความเร็วสุดท้าย ซึ่งปริมาณของน้ำยาไวแสงที่จ่าย นั้นจะขึ้นอยู่กับค่าความหนืดของน้ำยาไวแสง (Viscosity) ความหนาและความสม่ำเสมอของชั้น น้ำยาไวแสงบนเวเฟอร์จะถูกวัดคุณภาพที่สำคัญซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วรอบการหมุนในขั้นตอนสปิน ออฟและค่าความหนืดของน้ำยาไวแสง โดยทั่วไปค่าชั้นความหนาของฟิล์มน้ำยาไวแสงสามารถหา ได้จากการเปลี่ยนค่าความเร็วรอบของการหมุนมอเตอร์

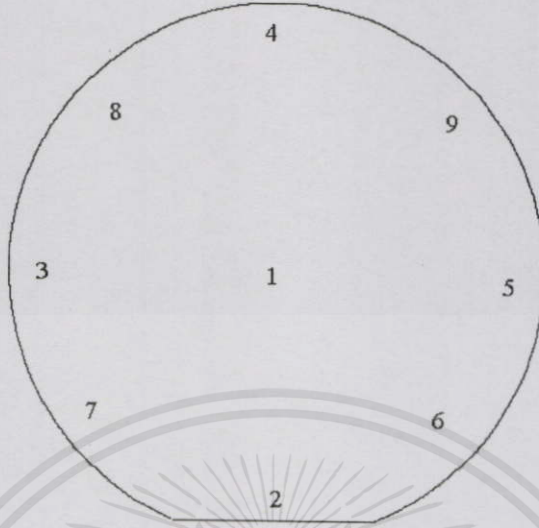


รูปที่ 2.12 โครงสร้างของระบบเครื่องหมุนเคลือบ

$$Resist_{Thickness} \propto \frac{1}{\sqrt{Rpm}} \tag{2.1}$$

โดยที่ $Resist_{Thickness}$ คือ ค่าความหนาน้ำยาไวแสง
 Rpm คือ ความเร็วของมอเตอร์ (รอบต่อนาที)

จากนั้นทำการวัดความหนาของฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เคลือบบนแผ่นเวเฟอร์โดยทำการวัดความหนาที่ตำแหน่งต่างๆ กันรวม 9 จุด ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ตำแหน่ง 9 จุดบนเวเฟอร์ที่ใช้วัดความหนาของฟิล์มน้ำยาไวแสง

นำวัดที่วัดได้หาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของฟิล์มน้ำยาไวแสงเพื่อทดสอบค่าสม่ำเสมอของฟิล์มน้ำยาไวแสง โดยใช้สมการ (2.2-2.4)

$$T_{av} = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + \dots + T_N}{N} \quad (2.2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(T_1 + T_{av})^2 + (T_2 + T_{av})^2 + (T_3 + T_{av})^2 + \dots + (T_N + T_{av})^2}{N-1}} \quad (2.3)$$

$$\%Dev = \frac{\sigma}{T_{av}} \times 100 \quad (2.4)$$

โดยที่

T_{av} คือ ความหนาเฉลี่ยของน้ำยาไวแสง (μm)

T_1, \dots, T_N คือ ความหนาฟิล์มน้ำยาไวแสงที่วัดได้ที่ตำแหน่งที่ 1 ถึงตำแหน่ง N (μm)

σ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)

$\%Dev$ คือ ค่าเปอร์เซ็นต์เบี่ยงเบนความหนาน้ำยาไวแสง (%)

N คือ จำนวนที่ทำการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

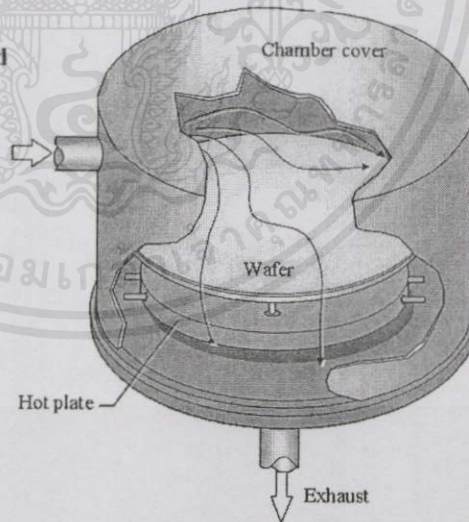
ปัจจัยอื่นๆ ที่สำคัญต่อการเคลือบน้ำยาไวแสง คือ การควบคุมสิ่งแวดล้อมของระบบการเคลือบน้ำยาไวแสง เช่น การทำงานในที่สิ่งแวดล้อมปิดซึ่งจะต้องควบคุมอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ หรือปริมาณฝุ่นสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ในขณะที่ทำการเคลือบน้ำยาไวแสง

2.2.3 การอบน้ำยาไวแสง

หลังการเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงแล้ว ชิ้นงานจะถูกรอบ (Soft bake) เพื่อให้ตัวทำละลายในน้ำยาไวแสงให้ระเหยออกไปเพื่อทำให้ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงมีความแห้ง แข็งตัว และคงรูปอยู่ได้ เมื่อผ่านกระบวนการฉายแสง อีกทั้งยังช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างผิวของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงกับผิวของเวเฟอร์ นอกจากนี้ยังเป็นกระบวนการทางความร้อนเพื่อลดความเครียดที่เกิดขึ้นในชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง (Annealing) โดยปัจจัยที่ต้องควบคุม คือ อุณหภูมิและเวลาในการอบ ซึ่งโดยปกติจะใช้ อุณหภูมิในการอบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงในช่วง 85 ถึง 120 องศาเซลเซียส ซึ่งการอบในขั้นตอนนี้จะไล่ส่วนของเหลวของตัวทำละลายที่ 10 ถึง 20% หลังจากการเคลือบน้ำยาไวแสงลดลงเหลือ 4 ถึง 7% เครื่องมือที่นิยมใช้ในการอบน้ำยาไวแสง เช่น แท่นความร้อน (Hot plate) ซึ่งใช้เวลาในการอบเพียง 30 ถึง 60 วินาที ดังรูปที่ 2.14 เป็นลักษณะ โครงสร้างของเครื่องอบแบบแท่นความร้อนที่ทำงานในระบบห้องปิดและมีระบบดูดไอเสีย (Exhaust) เพื่อทำหน้าที่ดูดไอระเหยออกจากห้องปิด ในระหว่างการอบน้ำยาไวแสง

Process Summary:

- Dehydration bake in enclosed chamber with exhaust
- Hexamethyldisilazane (HMDS)
- Clean and dry wafer surface (hydrophobic)
- Temp ~ 200 to 250°C
- Time ~ 60 sec.



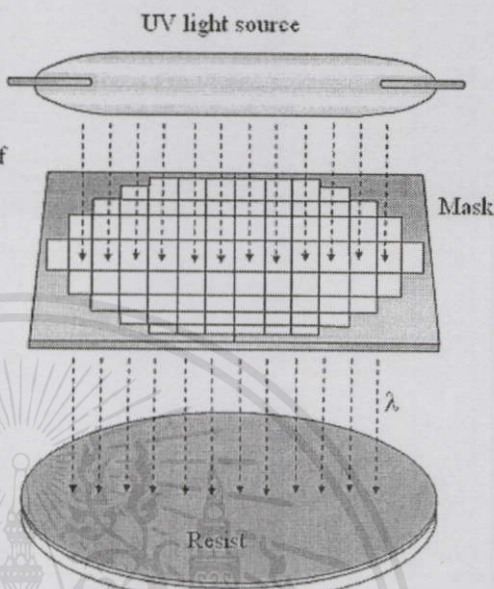
รูปที่ 2.14 เครื่องอบแบบแท่นความร้อน

เอกสารนี้ 2.2.4 การฉายแสง (Exposure) งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีขั้นตอนการฉายแสงเป็นขั้นตอนเพื่อทำการถ่ายแบบลายวงจรจากสไลด์ต้นแบบบนแผ่นกระจกโฟโตมาส์กลงสู่บนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ถูกเคลือบบนแผ่นเวเฟอร์โดยทั่วไปจะใช้แสง

อัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet light) ที่ความยาวคลื่นต่างๆ กัน เช่น 248 นาโนเมตร (Deep-UV, DUV), 365 นาโนเมตร (I-line), 405 นาโนเมตร (H-line) และ 436 นาโนเมตร (G-line) การฉายแสงแสดงดังรูปที่ 2.15 โดยทั่วไปจะใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดไอปรอท (Mercury vapor lamp)

Process Summary:

- Transfers the mask image to the resist-coated wafer
- Activates photo-sensitive components of photoresist
- Quality measures:
 - linewidth resolution
 - overlay accuracy
 - particles and defects



รูปที่ 2.15 การถ่ายแบบลายวงจร

2.2.5 การล้างลายน้ำยาไวแสง

เมื่อชิ้นงานผ่านการฉายแสงแล้วจะต้องทำการล้างลายวงจรด้วยน้ำยาล้างลายเพื่อให้ลายวงจรปรากฏขึ้น สำหรับน้ำยาไวแสงชนิดบวกนั้นส่วนที่ถูกฉายแสงจะเกิดการทำให้ลายวงจรของสารโพลีเมอร์ภายในเนื้อของน้ำยาไวแสงทำให้เกิดการอ่อนตัว ในขณะที่ส่วนที่ไม่ถูกฉายแสงพื้นระของน้ำยาไวแสงจะคงแข็งแรงอยู่ เมื่อนำชิ้นงานไปแช่ในน้ำยาล้างลาย ส่วนของน้ำยาไวแสงที่อ่อนตัวจะหลุดลอกไปกับน้ำยาล้างลายในขณะที่ส่วนที่แข็งตัวยังคงเหลืออยู่บนผิวชิ้นงาน ปรากฏเป็นลายวงจรขึ้น สำหรับน้ำยาไวแสงชนิดลบส่วนที่ถูกฉายแสงจะแข็งตัวในขณะที่ส่วนที่ไม่ถูกฉายแสงนั้นจะเกิดการอ่อนตัว เมื่อนำชิ้นงานไปแช่ในน้ำยาล้างลายส่วนของน้ำยาไวแสงที่อ่อนตัวจะหลุดลอกไปกับน้ำยาล้างลายในขณะที่ส่วนที่แข็งตัวยังคงเหลืออยู่บนผิวชิ้นงาน เกิดเป็นลายวงจรขึ้นแต่มีลักษณะของลายวงจรตรงข้ามกับน้ำยาไวแสงชนิดบวก โดยตัวแปรที่ต้องควบคุมในขั้นตอนการล้างลายวงจร คือ เวลาในการล้างลาย ซึ่งจะสัมพันธ์กับชนิดของน้ำยาไวแสงและชนิดของน้ำยาล้างลาย จากนั้นอบชิ้นงาน เพื่อไล่ความชื้นและก่อให้เกิดการเชื่อมพันธะกันระหว่างโมเลกุลของน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่บนชิ้นงาน ทำให้ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะทนต่อการกัดลายวงจรได้ โดยเงื่อนไขที่ต้องควบคุมในขั้นตอนการอบชิ้นงาน คือ อุณหภูมิและเวลาในการอบ

2.2.6 การตรวจสอบคุณภาพหลังจากการล้างลายน้ำยาไวแสง

เมื่อชิ้นงานผ่านกระบวนการล้างลายน้ำยาไวแสงแล้วจากนั้นชิ้นงานจะปรากฏลายวงจรขึ้น เช่นเดียวกับลวดลายบนแผ่นกระจกโฟโตมาส์กต้นแบบ ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของลวดลายโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ทางแสง เพื่อทำการตรวจสอบลักษณะของลายวงจรเบื้องต้นที่ได้ หรือใช้เครื่องวัดความหนาโครงสร้างฟิล์มน้ำยาไวแสงของลายวงจรเหล่านั้น ภายหลังจากการล้างลายวงจรว่ามีความถูกต้องเป็นไปตามที่กำหนดไว้หรือไม่ เพื่อใช้เป็นตัวบ่งชี้ปริมาณงานเสียในการกระบวนการผลิตโฟโตลิโธกราฟี เพื่อทำการแก้ไขสาเหตุของปัญหาที่ก่อให้เกิดการเสียของชิ้นงานเวเฟอร์นั้นๆ โดยที่ผู้ผลิตส่วนใหญ่มักจะใช้เปอร์เซ็นต์งานเสียเป็นตัวกำหนดคุณภาพของกระบวนการที่ได้ เช่น อาจใช้ที่ 2 เปอร์เซ็นต์เพื่อส่งชิ้นงานเวเฟอร์ไปทำการกัดหรือกระบวนการฝังประจุแบบอออน หรือถ้าหากมีปริมาณงานเสียมากกว่า 4 เปอร์เซ็นต์จะต้องทำการแก้ไขปัญหาก่อน โดยการปรับปรุงกระบวนการผลิตเป็นต้น ซึ่งลักษณะงานเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตโฟโตลิโธกราฟีนั้นพอสรุปได้ ดังตารางที่ 2.2

2.3 เครื่องถ่ายแบบลายวงจร [7,9]

เทคโนโลยีของเครื่องถ่ายแบบลายวงจรสามารถแบ่งแยกประเภทได้เป็น 3 แบบหลักด้วยกัน ซึ่งแต่ละแบบนั้นมีลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันและจะขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้งานที่ต้องการทำการผลิต เช่น ความละเอียดสูงสุดของลายวงจรในอุปกรณ์ที่จะทำการสร้าง โดยทั่วไปจะแบ่งแยกตามลักษณะการถ่ายแบบลายวงจร คือ (1) การถ่ายแบบลายวงจรแบบสัมผัสโดยตรง (Contact printing) แสดงในรูปที่ 2.16 (ก) แบบนี้จะมีการสัมผัสโดยตรงระหว่างลวดลายโฟโตมาส์กต้นแบบและชิ้นงานเวเฟอร์ ทำให้ลวดลายที่ถูกถ่ายแบบไปยังเวเฟอร์นั้นมีความละเอียดที่สูงมากแต่มีข้อเสียเนื่องจากการสัมผัสโดยตรงระหว่างแผ่นโฟโตมาส์กต้นแบบและแผ่นเวเฟอร์ซึ่งทำให้เกิดรอยขีดข่วนยังชั้นฟิล์มของน้ำยาไวแสงและทำให้เกิดงานเสียจากสาเหตุนี้ได้ นอกจากนี้ยังมีปัญหาเกี่ยวกับสิ่งสกปรกต่างๆ จากชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ขึ้นไปติดกับผิวของแผ่นกระจกโฟโตมาส์กทำให้ต้องการทำความสะอาดแผ่นโฟโตมาส์กทุกครั้งที่มีการนำไปใช้งาน เครื่องถ่ายแบบลายวงจรด้วยวิธีการนี้ไม่เป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (2) การถ่ายแบบลายวงจรแบบแนบสัมผัสชิด (Proximity printing) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (ข) แบบนี้เป็นที่นิยมใช้งานแบบหนึ่งในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความละเอียดของลายวงจรตั้งแต่ 2 ไมครอนขึ้นไป ซึ่งช่วยลดปัญหาของเครื่องถ่ายแบบลายวงจรในแบบแรก เนื่องจากไม่มีการสัมผัสโดยตรง และสามารถทำการคัดลอกลายวงจรได้เป็นจำนวนมากโดยการฉายแสงเพียงครั้งเดียวตามขนาดของเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

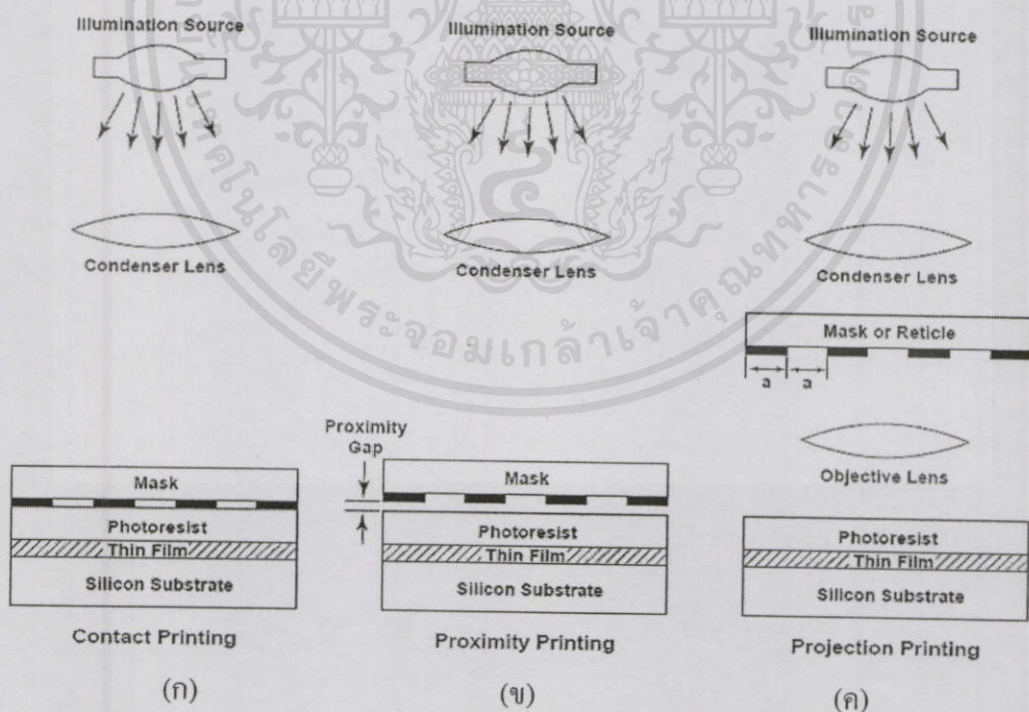
แผ่นเวเฟอร์ด้วยการช้อนมาส์กเพียงครั้งเดียว ซึ่งระยะห่างของแผ่นโฟโตมาส์กต้นแบบและผิวของเวเฟอร์นั้นอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 มิลลิเมตร และต้องระวังไม่ให้เวเฟอร์สัมผัสกับแผ่นเวเฟอร์ที่ใช้งานที่ 2.5 ถึง 25 ไมครอน

ตารางที่ 2.2 ลักษณะงานเสียในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี [13]

Quality Parameter	Types of defects	Remarks
1. Critical dimensions.	A. Wider CDs than normal.	<ul style="list-style-type: none"> - Improper focus. - Not enough time or energy during exposure. - Not enough develop time or weak developer solution. - Incorrect process recipes during exposure or develop steps.
	B. Narrower CDs than normal.	<ul style="list-style-type: none"> - Excessive time or energy during exposure. - Excessive develop time or strength of developer solution. - Incorrect process recipes during exposure or develop step.
2. Contamination.	A. Particle and foreign contamination on the resist surface.	<ul style="list-style-type: none"> - Equipment needs to be kept clean, with special focus on the track equipment. - Inadequate cleaning and rinsing of wafers. - Developer chemicals and rinse wafer require point-of-use filters to remove contaminants
3. Surface defects.	A. Scratches in the resist surface.	- Wafer handling errors or tool misadjustments related to cassette indexers and robotic handling systems.
	B. Particle, Spots and stains.	- Chamber exhaust flow, dispenser alignment, dispense pressure, wafer leveling, splash backs, drips, spin speed, are all possible contributors.
	C. Missing resist, extra resist, or scrumming	<ul style="list-style-type: none"> - Incorrect puddle time. - Incorrect dispense volume or position. - Improper rinsing after develop process. - Improper or uneven baking.
	D. Striations in photoresist along the sidewalls of the resist feature.	<ul style="list-style-type: none"> - Standing wave or reflective notch - Improper or no antireflective coating.
4. Overlay registration.	A. Improper alignment or overlaying of one layer over a previous layer.	<ul style="list-style-type: none"> - This is not a problem caused by the develop process. - It is more likely a stepper-induced problem. - Wrong process recipe or reticle was used. - Poor temperature and humidity control.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

แต่เนื่องจากเครื่องถ่ายแบบลายวงจรแบบนี้เป็นการคัดลอกวาดลายวงจรต้นแบบไปยังพื้นที่บนแผ่นเวเฟอร์แบบเต็มพื้นที่ใช้งานทำให้เกิดปัญหาความสม่ำเสมอของลายวงจรที่ได้ไม่ค่อยดีนักโดยมีสาเหตุหลักมาจากความสม่ำเสมอของความเข้มแสงอัลตราไวโอเลตที่ใช้งานและความราบเรียบของชั้นฟิล์มนำยาไวแสงที่ถูกเคลือบบนแผ่นเวเฟอร์ ส่วนแบบที่ (3) คือ เครื่องถ่ายแบบลายวงจรแบบโปรเจคชัน (Projection printing) แสดงในรูปที่ 2.16 (ค) เครื่องถ่ายแบบลายวงจรชนิดนี้เป็นที่นิยมอย่างกว้างขวางในการนำไปใช้งานกระบวนการผลิตเชิงอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์โดยมีการจำแนกเครื่องจักรออกเป็นชนิดต่างๆ ตามลักษณะวิธีการการซ็อนมาส์ก (Alignment method) ได้แก่ เครื่องถ่ายแบบลายวงจรแบบสแกนเนอร์ (Scanning projection) เครื่องถ่ายแบบลายวงจรแบบสเต็ปเปอร์ (Step and repeat projection) ดังรูปที่ 2.17 เครื่องถ่ายแบบลายวงจรแบบโปรเจคชันนี้จะแยกส่วนกันทางโครงสร้างฮาร์ดแวร์ในส่วนของระบบการไหลคแผ่นโฟโตมาส์กต้นแบบและแผ่นชิ้นงานเวเฟอร์ซึ่งจะแยกส่วนพื้นที่กันและใช้เทคนิควิธีการโฟกัสภาพจากลวดลายต้นแบบบนแผ่นโฟโตมาส์กผ่านระบบโปรเจคชันเลนส์ไปยังจุดโฟกัสแสงปลายทางที่ชิ้นงานแผ่นเวเฟอร์ เช่นเดียวกับระบบของกล้องจุลทรรศน์แสง ด้วยคุณสมบัติของระบบโปรเจคชันเลนส์นี้ สามารถที่จะทำการย่อส่วนของลวดลายวงจรที่ถูกถ่ายแบบยังแผ่นเวเฟอร์ได้เป็นอย่างดีซึ่งทำให้สามารถสร้างลายวงจรที่ขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอนได้

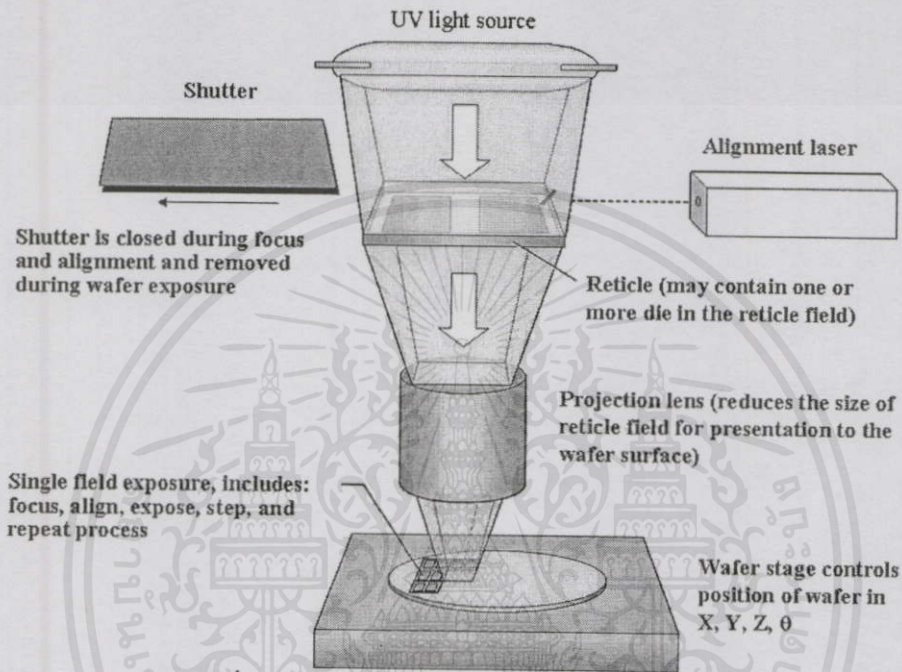


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า รูปที่ 2.16 รูปแบบลักษณะการถ่ายแบบลายวงจร (ก) การถ่ายแบบลายวงจรแบบสัมผัสโดยตรง

(ข) การถ่ายแบบลายวงจรแบบแนบสัมผัสชิด (ค) การถ่ายแบบลายวงจรแบบโปรเจคชัน

2.4 ระบบโปรเจกชันและข้อจำกัดของเครื่องฉายแบบฉายวงจรรวม

ระบบโปรเจกชันของเครื่องฉายแบบฉายวงจรรวมเป็นข้อจำกัดหลักในการลดขนาดของฉายวงจรรวมในอุตสาหกรรมผลิตแผ่นวงจรรวม หรือตามทฤษฎีการคาดการณ์ของ Moore [11] ซึ่งเทคโนโลยีปัจจุบันของระบบออฟติกคอลสามารถสร้างฉายวงจรรวมที่มีขนาดเล็กที่ 0.1 ไมครอน และยังเป็นเทคโนโลยีที่นิยมใช้งานอยู่ในปัจจุบันซึ่งเกี่ยวเนื่องมาจากต้นทุนการผลิต



รูปที่ 2.17 เครื่องฉายแบบฉายวงจรรวมแบบสเตปเปอร์

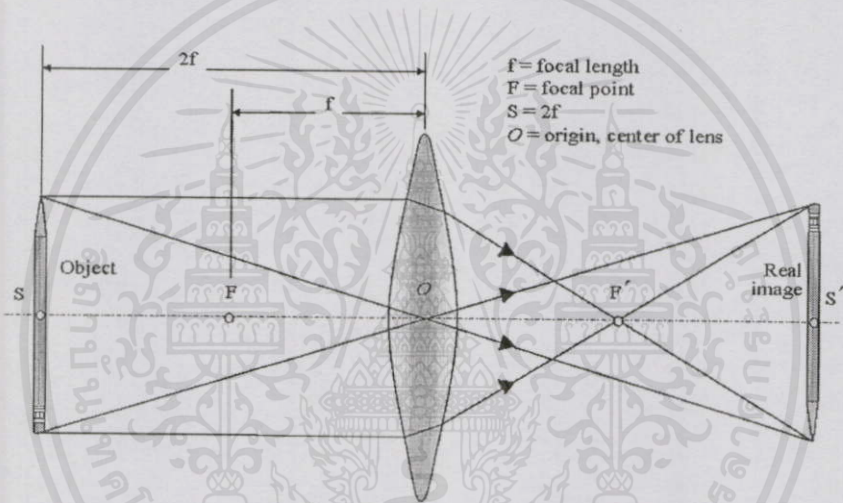
2.4.1 ระบบเลนส์ของเครื่องฉายแบบฉายวงจรรวม

ระบบเลนส์ (Lens) ใช้เป็นส่วนประกอบหลักของระบบโปรเจกชันในเครื่องฉายแบบฉายวงจรรวม โดยที่ระบบเลนส์มีความสำคัญอย่างมากในระบบเครื่องฉายแบบฉายวงจรรวม เนื่องจากเครื่องฉายแบบฉายวงจรรวมโปรเจกชันจะต้องเปลี่ยนลวดลายจากออฟเจตหรือลวดลายต้นแบบจากแผ่นกระจกโฟโตมาส์ทำให้เปลี่ยนเป็นลวดลายภาพบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง ซึ่งลวดลายวงจรรวมที่จะถูกถ่ายแบบยังชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงนั้นๆ จึงต้องมีความถูกต้องทั้งความละเอียด, ขนาด, ระยะ, การทับซ้อนกันของฉายวงจรรวม, และความสม่ำเสมอของลวดลายวงจรรวมเหล่านั้นบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง โดยทั่วไปพื้นฐานของเลนส์มีการใช้งานอยู่สองชนิด คือ เลนส์นูน (Converging) และเลนส์เว้า (Diverging) แสดงในรูปที่ 2.18 และ 2.19 ซึ่งหลักการพื้นฐานระบบโฟกัสทางแสงถั่ว คือ รังสีลำแสงจะถูกหักเหและถูกเปลี่ยนกลายเป็นภาพเสมือนซึ่งเกิดจากการนำพาจากแสงที่แหล่งกำเนิดแสง ไปยัง ณ จุดที่มีความชัดเจนที่สุด ซึ่งระยะทางจากจุดศูนย์กลางเลนส์ถึงจุดโฟกัสแสงเรียกว่า ระยะการโฟกัส (Focus range) ส่วนระบบเลนส์ที่ใช้ในเครื่องฉายแบบฉายวงจรรวมนั้นจะมีความ

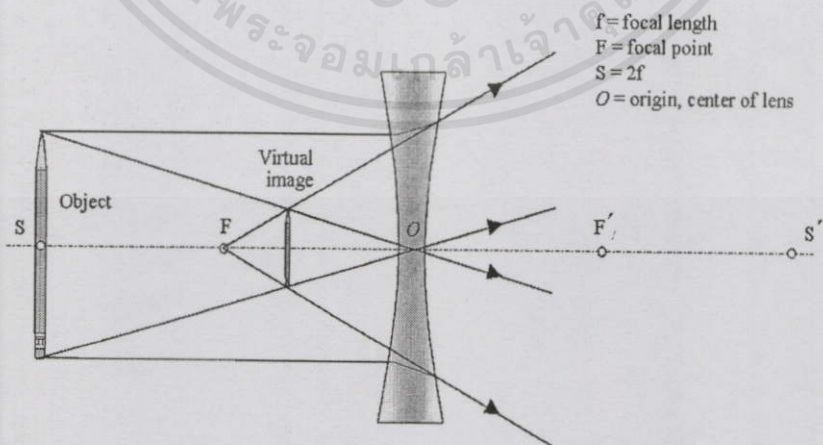
ซับซ้อนมากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ซึ่งเป็นระบบโปรเจกชันเลนส์ของเครื่องสตีปเปอร์รี่ห้อ Ultratech รุ่น Nano Tech 190 มีความละเอียดของระบบโปรเจกชันเลนส์ที่ 2.0 ไมครอน เป็นต้น

2.4.2 ความละเอียดของระบบโปรเจกชัน

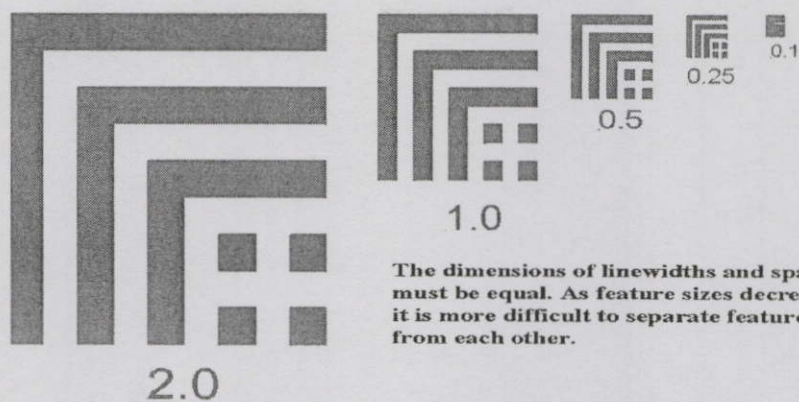
ในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ค่าความละเอียดของลายวงจรเป็นตัวกำหนดความสามารถในการสร้างลวดลายที่เล็กที่สุดและใช้เป็นตัวกำหนดเทคโนโลยีกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ซึ่งค่าความละเอียดนี้เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดในการกำหนดความสามารถของเครื่องถ่ายแบบลายวงจรแบบโปรเจกชัน ดังตัวอย่างรูปที่ 2.20 แสดงลายวงจรที่สร้างได้ จะเห็นได้ว่าลายวงจรเล็กที่สุดที่สามารถสร้างได้ คือ 0.25 ไมครอน โดยพิจารณาจากความคมชัดและขนาดลวดลายวงจรถ่ายแบบได้ ซึ่งมีขนาดลายเส้น (Line width) และลายระหว่างลายเส้น (Space) มีระยะขนาดที่เท่ากัน



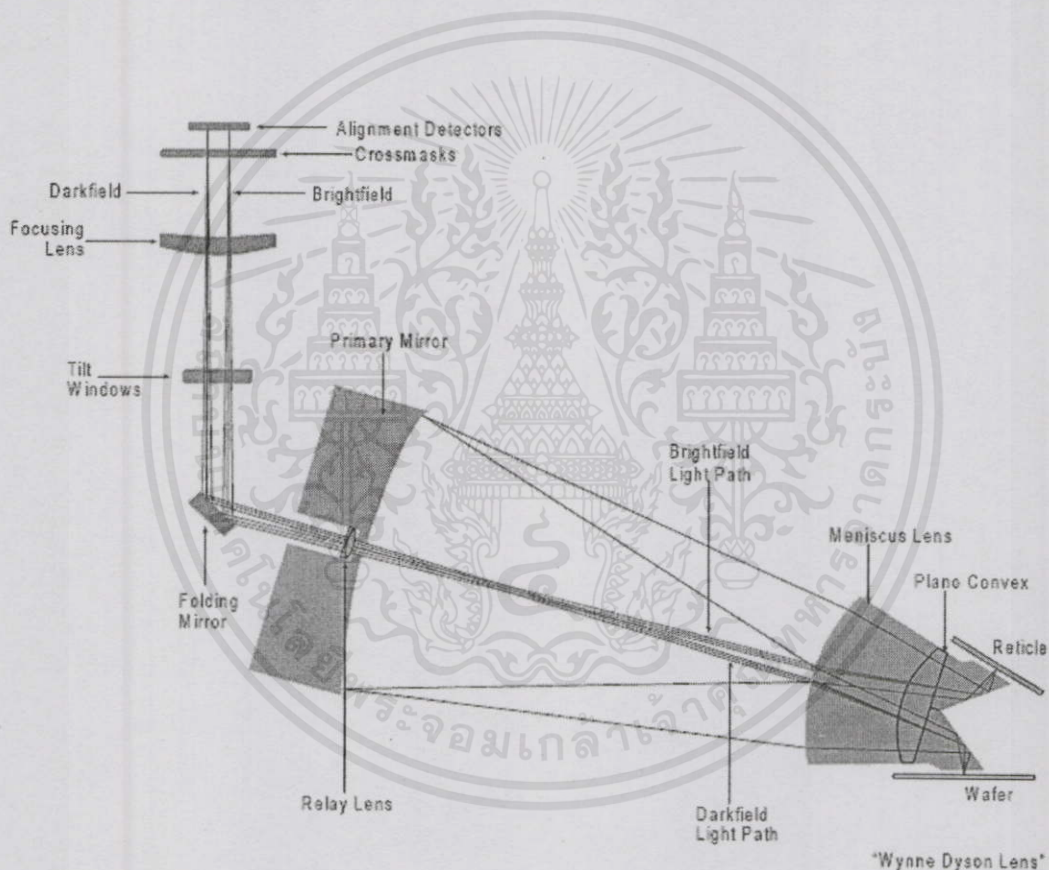
รูปที่ 2.18 โครงสร้างเลนส์นูน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.19 โครงสร้างเลนส์เว้า อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 ลายวงจรถ่ายสำหรับใช้ทดสอบหาค่าความละเอียดในเครื่องถ่ายแบบลายวงจรถ่าย



รูปที่ 2.21 ระบบโปรเจกชันของเครื่องถ่ายแบบลายวงจรถ่ายสเตปเปอร์ ยี่ห้อ Ultratech รุ่น Nano Tech -190 [10]

2.4.3 ช่องเปิดแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัทเอกชนที่เผยแพร่โดยไม่หวังผลกำไร
 ช่องเปิดแสง (Numerical Aperture, NA) นี้ใช้สำหรับควบคุมการกระจายแสงในระบบโปรเจกชัน ซึ่งโดยปกติจะเกิดการแทรกสอดแสงจากลวดลายตรงขอบที่มีความคม (Sharp edge) บน

แผ่นโฟโตมาส์ก ซึ่งให้เกิดภาพเงาและถูกถ่ายแบบไปยังเวเฟอร์ ช่องเปิดแสงนี้สามารถจะช่วยลดการกระเจิงของรังสีแสงในระบบของโปรเจคชั่นได้ ค่า NA หาได้จากสมการดังนี้

$$NA = (n) \sin \theta_m \approx (n) \frac{\text{radius of lens}}{\text{focal length of lens}} \quad (2.5)$$

โดยที่ n = ดัชนีการหักเหของภาพในวัสดุ

θ_m = มุมระหว่างเส้นแกนมุมสำคัญและลำแสงระดับขอบเลนส์

สมการของค่าความละเอียดของระบบโปรเจคชั่น สามารถหาได้จาก

$$R = \frac{k\lambda}{NA} \quad (2.6)$$

โดยที่

R = ความละเอียดระบบโปรเจคชั่น

K = ค่าคงที่ระบบโปรเจคชั่น

λ = ความยาวคลื่นแสงที่ใช้งาน

NA = ช่องเปิดแสงระบบโปรเจคชั่น

2.4.4 ความลึกกระยะโฟกัส

ความลึกกระยะโฟกัส (Depth of focus) คือ ค่าระยะห่างระหว่างช่วงบนและล่างของจุดโฟกัสแสงซึ่งภาพลายวงจรที่ได้ยังมีความคมชัดเจนนั่นเอง โดยทั่วไปในการปรับแต่งเครื่องถ่ายแบบลายวงจรจะปรับจุดโฟกัสแสงของเครื่องให้อยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง ดังในรูปที่ 2.22 การหาค่าความลึกกระยะโฟกัสสามารถคำนวณได้จาก

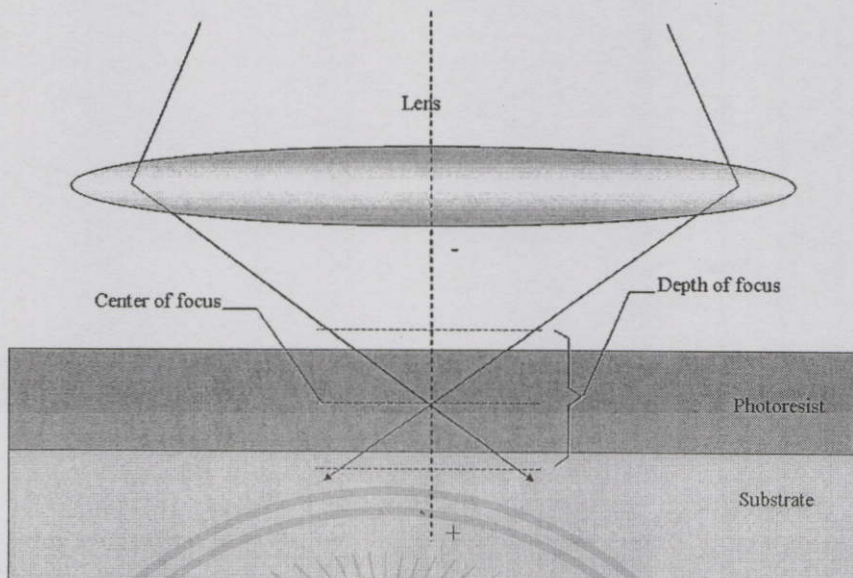
$$DOF = \frac{\lambda}{2(NA)^2} \quad (2.7)$$

โดยที่

นี่เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

λ = ความยาวแสงที่ใช้งาน

NA = ช่องเปิดแสงของระบบโปรเจคชั่น



รูปที่ 2.22 แสดงระยะความลึกของโฟกัส

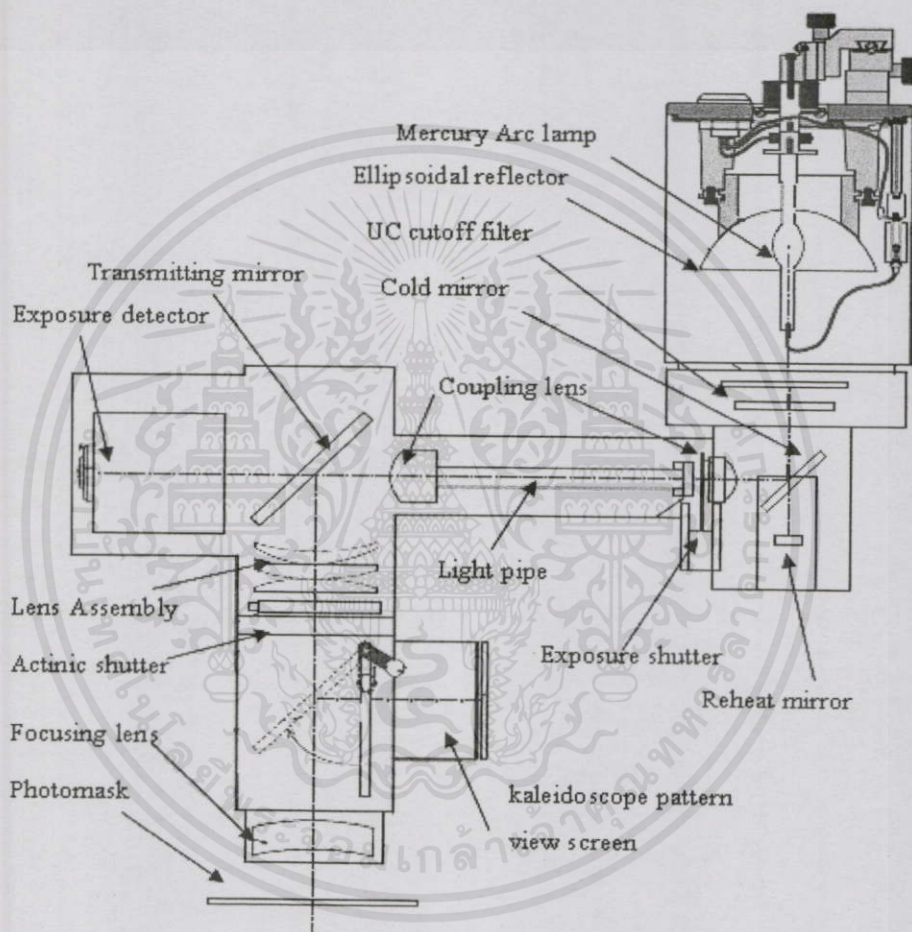
2.4.5 แหล่งจ่ายแสงของเครื่องถ่ายแบบลายวงจรถ (Exposure illuminator)

เมื่อฟิล์มน้ำยาไวแสงถูกฉายแสงภายในโครงสร้างน้ำยาไวแสงจะเกิดปฏิกิริยาเคมีแสงเปลี่ยนแปลงสถานะตามชนิดประเภทของน้ำยาไวแสงนั้นๆ ซึ่งจะเป็นไปตามปริมาณค่าโคซแสงและความยาวคลื่นแสงที่ได้รับจากแหล่งจ่ายแสงนั้นๆ ดังนั้นระบบของแหล่งจ่ายแสงจึงต้องพิจารณาคุณสมบัติทางฟิสิกส์แสง เช่น ความยาวคลื่นหรือสเปกตรัมแสง ทั้งนี้เพื่อให้ถูกต้องเหมาะสมกับประเภทชนิดน้ำยาไวแสงตามคุณสมบัติทางเคมีที่ใช้งาน โดยทั่วไปแหล่งจ่ายแสงในเครื่องถ่ายแบบลายวงจรถแบบโปรเจกชันที่นิยมใช้งานในปัจจุบันได้แก่ แหล่งจ่ายแสงด้วยหลอดเมอร์คิวรี (Mercury Lamp) และแหล่งจ่ายแสงแบบเอ็กไซเมอร์เลเซอร์ (Excimer laser)

แหล่งจ่ายแบบหลอดเมอร์คิวรีเป็นที่นิยมใช้งานในระบบเครื่องถ่ายแบบลายวงจรถมากกว่า เนื่องจากเทคโนโลยีโฟโตลิโธกราฟีที่สูงกว่า 365 นาโนเมตรยังเหมาะแก่การใช้งานในสภาวะปัจจุบันอยู่ เช่น ระบบแหล่งจ่ายแสงของเครื่องโปรเจกชันสเตปเปอร์ดังรูปที่ 2.23 แสดงถึงโครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ของเครื่องถ่ายแบบลายวงจรถของบริษัท Ultratech stepper รุ่น Nanotech 190 ลักษณะการทำงานของหลอดชนิดนี้คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านหลอดซึ่งบรรจุด้วยสารเมอร์คิวรีและซีนอนจะเกิดการสร้างประจุจากไฟฟ้าและทำให้เกิดแสงย่านอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นแสงโดยประมาณที่ 200 ถึง 700 นาโนเมตรความยาวคลื่นแสงในช่วงนี้จะมีมีความหนาแน่นสูง บางช่วงความยาวคลื่นแสง เช่น ที่ 436, 405 และ 365 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.24 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำยาไวแสงโดยทั่วไปจะมีการตอบสนองของสเปกตรัมแสงอัลตราไวโอเล็ตเฉพาะย่านที่ใช้งาน เช่น DNQ novalak น้ำยาไวแสง I-line สามารถสร้างความละเอียดของลายวงจรถ

ได้ที่ 0.3 ไมครอน น้ำยาไวแสงชนิดนี้จะตอบสนองได้ดีที่ความยาวคลื่นแสง 356 นาโนเมตร เป็นต้น[9]

ส่วนแหล่งจ่ายแบบอิเล็กซิเมอร์เลเซอร์มีการเริ่มใช้งานในระบบของเครื่องถ่ายแบบลายวงจรเมื่อราวปี 1990 โดยมีจุดประสงค์หลัก คือ เพื่อเป็นแหล่งจ่ายแสงสำหรับความยาวแสงช่วง DUV (Deep ultraviolet) หรือต่ำกว่านั้น หลอดอิเล็กซิเมอร์เลเซอร์จะเกิดจากการกระตุ้น โมเลกุลจากอะตอมของก๊าซโมเมิล (Moble) และฮาโลเจน (Halogen) เช่น อาร์กอนฟลูออไรด์ (Argon fluoride, ArF)

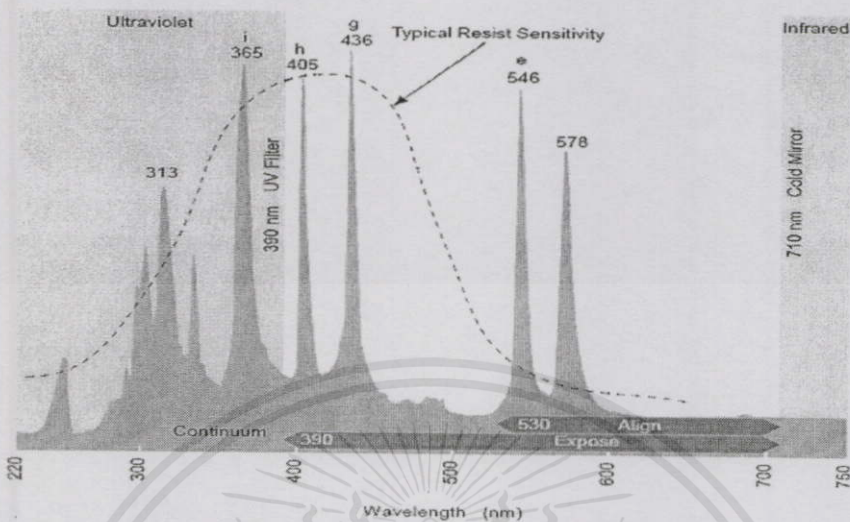


รูปที่ 2.23 แหล่งจ่ายแบบหลอดเมอร์คิวรีของเครื่องถ่ายลายวงจรสตีปเปอร์ [10]

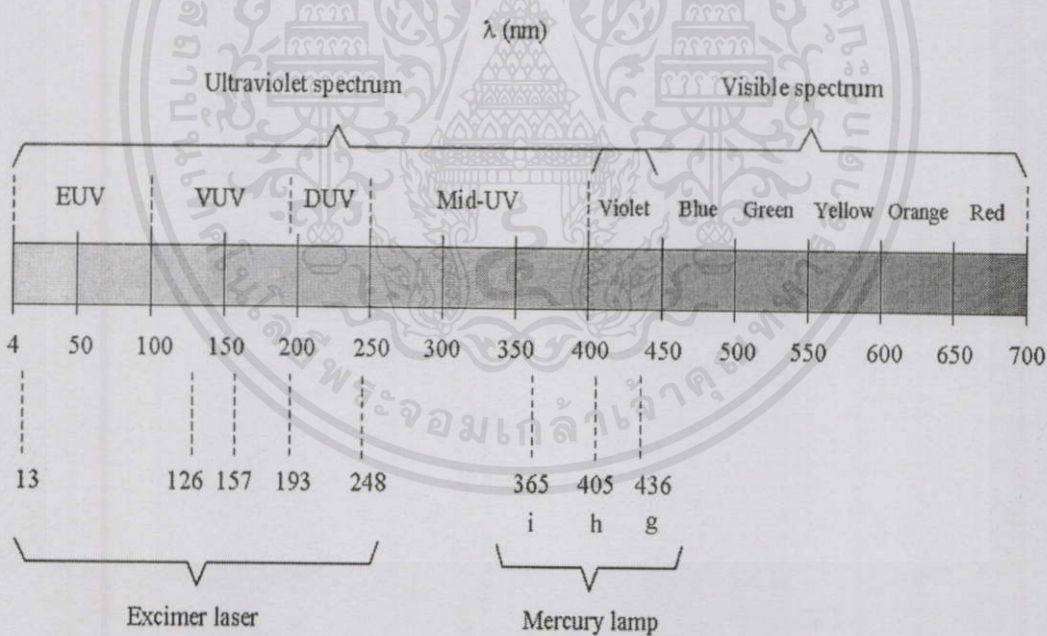
2.4.6 สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า

สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic spectrum) หมายถึงกลุ่มคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งหมดที่สามารถมองเห็นและมองไม่เห็นซึ่งพิจารณาตามความยาวของคลื่นแสงนั้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.25 จากรูปแสดงถึงช่วงความยาวคลื่นแสงยาวที่ 390 ถึง 780 นาโนเมตรเป็นระดับคลื่นแสงที่สายตาคนเราสามารถมองเห็นได้ ส่วนความยาวคลื่นช่วงอัลตราไวโอเล็ตจะอยู่ช่วง

ระหว่าง 4 ถึง 450 นาโนเมตร และระบบของเครื่องถ่ายแบบลายวงจรมันจะใช้ความยาวคลื่นแสงที่ 240 ถึง 540 นาโนเมตร ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบฮาร์ดแวร์ของแหล่งจ่ายแสงเป็นต้น



รูปที่ 2.24 สเปกตรัมแสงของหลอดเมอคิวรีที่ใช้ในงานในระบบเครื่องถ่ายแบบลายวงจรถัดปีเปอร์ [10]



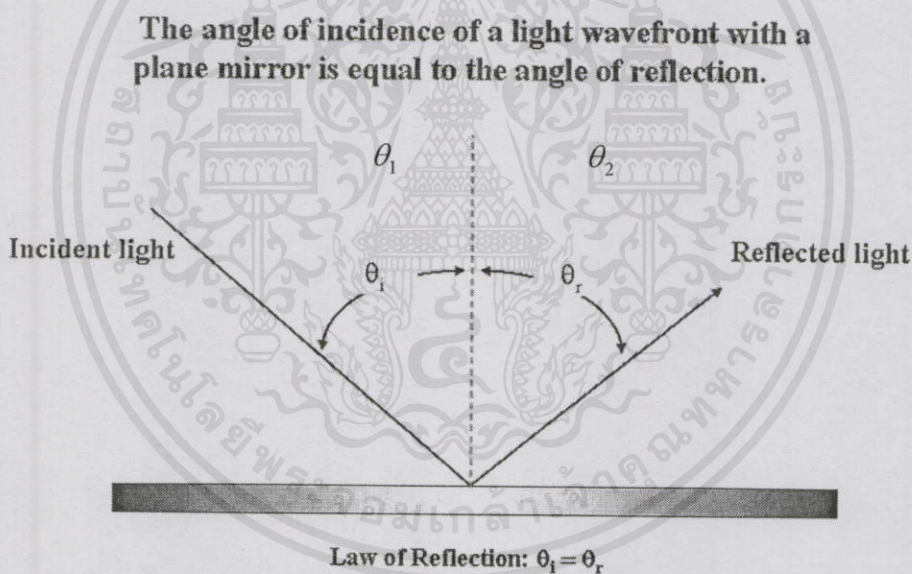
รูปที่ 2.25 สเปกตรัมแสงย่านอัลตราไวโอเล็ตและย่านสายตา

2.5 คุณสมบัติทางกายภาพของแสงที่เกี่ยวข้องกับระบบเครื่องถ่ายแบบลายวงจรมันคือการที่ไม่ว่าคลื่นแสง (Light) สามารถมีประพัตต์ตัวเป็นได้ทั้งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) และอนุภาค (Particle) ซึ่งแสงมีความสำคัญในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรมัน โดยทำหน้าที่เป็น

ตัวกลางในการถ่ายแบบลายวงจรถงบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง ทำให้การเข้าใจสมบัติทางกายภาพของแสงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการที่จะทราบถึงกลไกของแสงต่อคุณภาพของลายวงจรถงที่ถ่ายแบบได้ โดยคุณสมบัติทางกายภาพของแสงที่มีอิทธิพลต่อความสมบูรณ์และขนาดของลายวงจรถง คือ การสะท้อนของแสง (Reflection), การหักเหของแสง (Refraction) และการเลี้ยวเบนของแสง (Diffraction) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.5.22.5.1 การสะท้อนของแสง

เกิดจากการที่แสงตกกระทบไปบนพื้นผิวที่สามารถสะท้อนแสงได้ โดยถ้าเป็นพื้นผิวที่เรียบ มุมตกกระทบ (θ_1) จะเท่ากับมุมสะท้อน (θ_2) ดังแสดงในรูปที่ 2.26 ซึ่งในกระบวนการถ่ายย่อแบบ ถ้าชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่แสงตกกระทบมีความเรียบผิวไม่เพียงพอ จะทำให้มุมสะท้อนของแสงไม่เท่ากับมุมตกกระทบ ถ้าแสงสะท้อนเกิดการสะท้อนไปโดนน้ำยาไวแสงส่วนที่ไม่ต้องการให้ถูกแสง ก็จะส่งผลกระทบต่อลายวงจรถงที่ได้



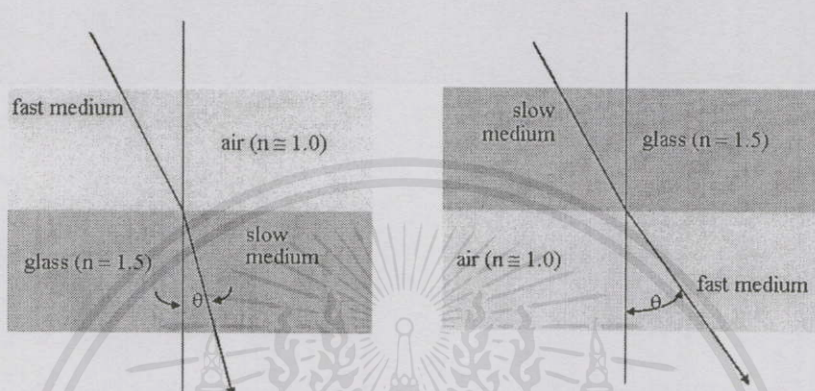
รูปที่ 2.26 การสะท้อนของแสง เมื่อแสงตกกระทบบนพื้นผิวเรียบ

2.5.3 การหักเหของแสง

เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางต่างชนิดที่มีความหนาแน่นต่างกันและมีดัชนีการหักเหของแสงที่ต่างกันทำให้ความเร็วของแสงเปลี่ยนแปลงส่งผลให้มีการหักเหของแสงเกิดขึ้นทำให้ทิศทางของแสงเบี่ยงเบนออกไปจากทิศทางเดิม โดยการเบี่ยงเบนออกไปของแสงนั้นถูกกำหนดด้วยความแตกต่างของค่าดัชนีหักเห (n) ในตัวกลางแต่ละชนิดโดยมุมหักเหของแสงสามารถหาได้จากสมการตามกฎของสเนลล์ (Snell's Law) โดย $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ ดังรูปที่ 2.27 โดยสภาวะที่กล่าวมานี้จะเกิดขึ้นในกระบวนการถ่ายย่อแบบที่ใช้กระจกต้นแบบในการถ่ายย่อแบบ โดยกระจกเป็น

ตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1.5 ในขณะที่อากาศมีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1 ดังนั้นแสงที่ฉายผ่านกระจกต้นแบบจะเกิดการหักเหของแสงก่อนที่จะกระทบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง ซึ่งอาจทำให้เกิดการฉายแสงในบริเวณที่ไม่ต้องการ ซึ่งส่งผลต่อการควบคุมขนาดของเส้นลายวงจรที่ได้

- Snell's Law: $\sin \theta_i = n \sin \theta_r$
- Index of refraction, $n = \sin \theta_i / \sin \theta_r$



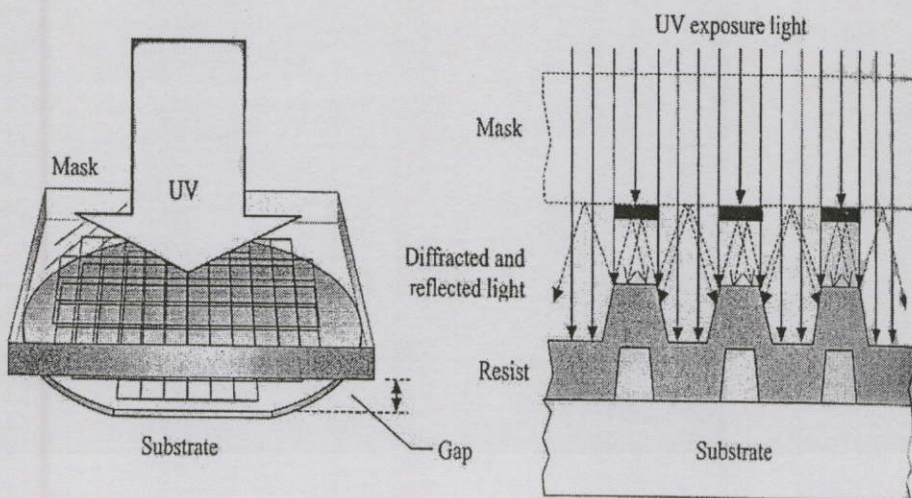
รูปที่ 2.27 การหักเหของแสงเมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน

2.5.4 การเลี้ยวเบนของแสง

โดยปกติแสงจะเดินทางเป็นเส้นตรง แต่เมื่อแสงเดินทางผ่านช่องแคบๆ (Narrow opening) หรือขอบที่มีความคมจะเกิดการเลี้ยวเบนของแสงขึ้น สำหรับกระบวนการถ่ายเย็บนั้น ถ้าแสงที่ผ่านช่องเปิดของกระจกต้นแบบเกิดการเลี้ยวเบนจะทำให้เกิดลวดลายจากการแทรกสอด (Interference pattern) ของแสงขึ้น ซึ่งถ้าแสงที่เกิดการเลี้ยวเบนมีค่าพลังงานมากพอที่จะทำปฏิกิริยากับน้ำยาไวแสง ก็จะทำให้เกิดการฉายแสงในบริเวณที่ไม่ต้องการขึ้น ทำให้ลักษณะเส้นลายวงจรที่เกิดขึ้นมีความคลาดเคลื่อนไปจากต้นแบบ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.28

2.6 น้ำยาไวแสง [7,9]

น้ำยาไวแสงมีส่วนประกอบของสารเคมีที่สามารถเปลี่ยนแปลงสถานะได้ เช่น การอ่อนตัวหรือแข็งตัวของน้ำยาไวแสงหลังจากการล้างลายน้ำยา เมื่อถูกฉายแสงด้วยแสงอัลตราไวโอเลต น้ำยาไวแสงที่มีการใช้งานในสายการผลิตโดยทั่วไป มีจุดประสงค์หลักเพื่อใช้คัดลอกลวดลายต้นแบบชั่วคราวจากลายวงจรแผ่นโฟโตมาส์กไปยังชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ถูกเคลือบอยู่บนผิวของแผ่นเวเฟอร์ เพื่อเป็นชั้นป้องกันการกัดเซาะหรือการยิงฝังประจุอออน ซึ่งจะเป็นการสร้างลายวงจรแบบถาวรบนชั้นผิวของเวเฟอร์นั้นๆ ภายหลังจากกระบวนการกัดเซาะหรือการยิงฝังประจุอออน



รูปที่ 2.28 ผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบของกระจกต้นแบบต่อลายวงจรที่ได้

2.6.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของน้ำยาไวแสง

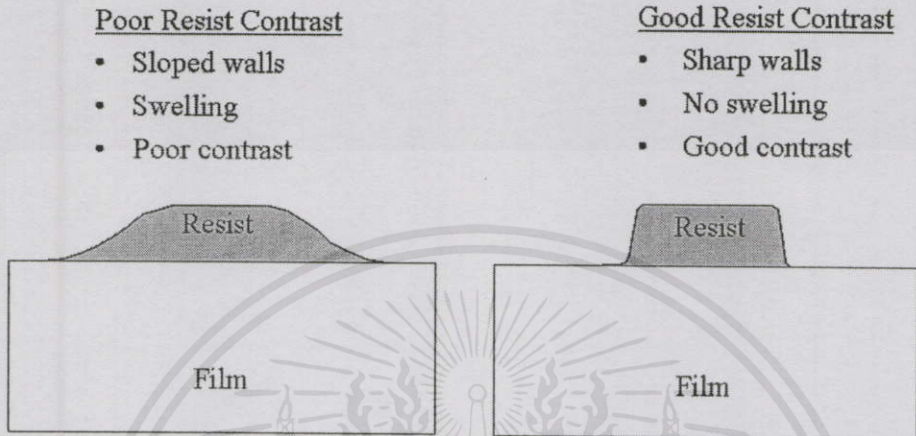
รากฐานเดิมของน้ำยาไวแสง คือ สารโพลีเมอร์ (Polymer) ในตัวทำละลาย การใช้งานของน้ำยาไวแสงจะเป็นผลดีได้นั้นจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของกระบวนการที่หลากหลาย เช่น ขั้นตอนการทำความสะอาดและเคลือบผิวแผ่นเวเฟอร์, ขั้นตอนการเคลือบน้ำยาไวแสง, การอบ, การถ่ายแบบลายวงจร, การล้างลายน้ำยาไวแสง, การกัด, หรือการยิงฝังประจุไอออน เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของน้ำยาไวแสงมีความเกี่ยวพันโดยตรงกับกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี การใช้งานนั้นมีการเลือกใช้งานโดยยึดหลักของคุณสมบัติทางฟิสิกส์ เช่น ค่าความละเอียด, ค่าความคมชัด, ค่าความไวแสง, ค่าความหนืดของน้ำยาไวแสง, การยึดเกาะผิวของน้ำยาไวแสง, ความต้านทานต่อการกัดกร่อน, ความตึงผิว, การจัดเก็บและบรรจุภัณฑ์

ความละเอียด (Resolution) เป็นความสามารถที่จะจำแนกความแตกต่างระหว่างสองพื้นที่ของลายวงจรที่มีระยะใกล้กันบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง หรือความสามารถในการสร้างลายวงจรที่ระยะวิกฤตขนาดเล็กที่สุดของน้ำยาไวแสง ค่าความละเอียดจะขึ้นอยู่กับสองตัวแปรหลักได้แก่กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี และน้ำยาไวแสง

ความคมชัด (Contrast) แสดงถึงความสามารถในการรักษาสภาพโครงสร้างชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงตามลวดลายจากต้นแบบโฟโตมาสก์ดังแสดงในรูปที่ 2.29

ความไวแสง (Sensitivity) คือ ความไวต่อพลังงานแสง ณ ความยาวคลื่นแสงที่แน่นอนด้วยปริมาณแสงน้อยที่สุดซึ่งสามารถเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาแสงเพื่อทำให้เกิดลวดลายวงจรที่สมบูรณ์แก่ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เคลือบอยู่บนผิวของเวเฟอร์ โดยที่ปริมาณพลังงานแสงที่ถูกฉายแสงให้แก่ น้ำยาไวแสงนั้น ถูกเรียกว่า เอกซ์โพสเชอร์โดส (Exposure dose) หรือปริมาณพลังงานที่ใช้ในการฉายแสงนั่นเอง ค่าความไวแสงของน้ำยาไวแสงมีความสำคัญอย่างมาก โดยเฉพาะน้ำยาไว

แสงซึ่งผลิตขึ้นใหม่ เพราะว่าน้ำยาไวแสงใหม่จะมีความไวต่อคลื่นแสงที่ใช้ในการฉายแสงนั้นๆ มากกว่าน้ำยาเก่า ดังนั้นโดยทั่วไปผู้ผลิตน้ำยาไวแสงจะเลือกผลิตค่าความไวต่อแสงของน้ำยาไวแสงจากหลักเกณฑ์ตามค่าความดูดกลืนแสงที่ดีที่สุดของความยาวคลื่นแสงที่ใช้งาน เช่น ย่าน I-line (365nm) จากแหล่งจ่ายพลังงานแสง



รูปที่ 2.29 ลักษณะความคมชัดของน้ำยาไวแสง

ความหนืด (Viscosity) คือ ค่าที่แสดงถึงคุณสมบัติการไหลของน้ำยาไวแสง ค่าความหนืดจะขึ้นอยู่กับปริมาณสัดส่วนของสาร โพลีเมอร์และตัวทำละลาย โดยที่ตัวทำละลายจะเกิดการระเหยในระหว่างการใช้งานในขั้นตอนการเคลือบและการอบฟิล์มน้ำยาไวแสง ด้วยเหตุนี้ค่าความหนืดมีความสำคัญมากเพราะว่าเป็นตัวแปรที่จะส่งต่อความหนาและความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงในขณะกระบวนการเคลือบน้ำยาไวแสงบนผิวเวเฟอร์ หากค่าความหนืดของน้ำยาสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความหนาของน้ำยาไวแสงสูงขึ้นตามด้วย แต่ถ้าค่าความหนืดของน้ำยาไวแสงมีค่าต่ำจะทำให้การเคลือบน้ำยาไวแสงได้ชั้นฟิล์มที่บางกว่าบนพื้นผิวเวเฟอร์

การยึดเกาะ (Adhesion) คือ ความสามารถในการยึดเกาะของน้ำยาไวแสงต่อพื้นผิวต่างๆ สิ่งนี้บ่งบอกถึงความสามารถเกาะติดของน้ำยาไวแสงว่ามีความแข็งแรงอย่างไรบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์ ซึ่งน้ำยาไวแสงจะต้องสามารถเกาะติดกับพื้นผิวที่หลากหลายชนิด เช่น ซิลิคอน, โพลีซิลิคอน, ซิลิคอนไดออกไซด์, ซิลิคอนไนไตรด์ หรือโลหะชนิดอื่นๆ

ความทนทานต่อการกัด (Etch resistance) น้ำยาไวแสงจะต้องรักษาความสามารถการยึดเกาะของชั้นฟิล์มบนพื้นผิวเวเฟอร์เพื่อเป็นชั้นป้องกันจากกระบวนการอื่นเนื่องด้วยการกัดทั้งแบบแห้งและเปียก เช่น ในกระบวนการกัดแบบแห้ง ซึ่งจะถูกทำงานภายใต้กระบวนการการกัดที่ใช้อุณหภูมิสูงเท่ากับ 150°C และต้องการให้น้ำยาไวแสงที่ถูกเคลือบอยู่นั้นมีการรักษาความร้อนอย่างสม่ำเสมอเพื่อรักษารูปร่างของลวดลายวงจรไว้ในระหว่างกระบวนการกัด

ความตึงผิว (Surface tension) ของไหลทุกชนิดจะมีคุณสมบัติของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล 2 ชนิด คือ (1) แรงยึดติด (Cohesion force) คือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของของไหลชนิดเดียวกันแรงนี้สามารถรับความเค้นดึง (Tensile stress) ได้เล็กน้อย (2) แรงเกาะติด (Adhesion force) คือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของของไหลกับสารชนิดอื่น เช่น น้ำกับแก้วปรอทกับแก้ว เป็นต้น แรงตึงผิว คือ แรงที่เกิดขึ้นบริเวณที่ผิวของของไหลสัมผัสกับของไหลอื่นหรือกับผิวของแข็งโดยมีพลังงานเพียงพอต่อการยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ซึ่งมีขนาดสัมพันธ์กับแรงยึดติดและแรงเกาะติดทำให้เกิดเป็นลักษณะคล้ายๆ กับแผ่นบางๆ ที่สามารถต้านแรงดึงได้เล็กน้อย แรงตึงผิวมีค่าเฉพาะที่เปลี่ยนแปลงได้ตามชนิดของของไหลนั้นๆ

การจัดเก็บและบรรจุภัณฑ์ (Storage and handling) ปฏิบัติทางเคมีโดยทั่วไปของน้ำยาไวแสงจะเกิดปฏิกิริยาเคมีได้นั้นจะต้องเกี่ยวข้องกับพลังงานแสงหรือความร้อน ซึ่งจะต้องให้ความระมัดระวังอย่างมากในการจัดเก็บรักษาและเงื่อนไขการใช้งานน้ำยาไวแสง อุณหภูมิของห้องที่จัดเก็บน้ำยาไวแสงจะต้องมีความเหมาะสมกับชนิดน้ำยาไวแสงนั้นเช่นเดียวอุณหภูมิของห้องปฏิบัติการที่ 20 ± 2 องศาเซลเซียสเป็นต้น ส่วนภาชนะบรรจุภัณฑ์ต้องมีลักษณะทึบแสงเพื่อเป็นชั้นป้องกันแสงจากแหล่งแสงภายนอกเข้าสู่ภาชนะบรรจุน้ำยาไวแสง และเป็นการรักษาสภาพคุณสมบัติทางเคมีของน้ำยาไวแสงตลอดจนการยืดอายุการใช้งานน้ำยาไวแสงนั้นๆ

2.6.2 น้ำยาไวแสงแบบ I-line (Convention I-line photoresist)

น้ำยาไวแสงสำหรับงานอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์โดยเฉพาะในส่วนกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยทั่วไปยังมีความเหมาะสมสำหรับการเลือกใช้งานที่ย่านความยาวคลื่นแสง I-line (365 nm) ซึ่งสามารถสร้างลายวงจรได้ถึง 0.35 ไมครอน คุณสมบัติของน้ำยาไวแสงแบบ I-line มีคุณสมบัติพื้นฐานองค์ประกอบของน้ำยาไวแสงแบบ G-line (463nm) และ h-line (405 nm) โดยที่น้ำยาไวแสงแบบ I-line มีส่วนประกอบหลักอยู่ 4 ส่วน คือ เรซิน, สารไวแสง, ตัวทำละลาย, และส่วนสารเติมแต่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.30

เรซิน มีส่วนผสมหลักของสาร โพลีเมอร์ ซึ่งมีประกอบโมเลกุลของ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน จับยึดกันระดับโมเลกุลซึ่งกันและกันในเมื่อน้ำยาไวแสง เรซินนี้จะให้คุณสมบัติทางกลและเคมี เช่น การยึดเกาะในระดับโมเลกุล ความสามารถทนทานการกัดกร่อน ความสามารถการเปลี่ยนแปลงสถานะและเสถียรภาพของการส่งผ่านความร้อน เรซินเป็นวัสดุที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะเมื่อถูกฉายแสงด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

เซนซิไทเซอร์ หรือสารไวแสงเป็นส่วนที่มีปฏิกิริยาต่อการแผ่รังสีของแสง โดยเฉพาะแสงในย่านอัลตราไวโอเล็ต เซนซิไทเซอร์นี้จะเป็นตัวกระตุ้นโฟโตเคมีคอลเมื่อมีการรับพลังงานแสง

โซเวนท์ เป็นตัวละลายและเป็นตัวเก็บน้ำยาไวแสงให้อยู่ในรูปของของเหลวจนกว่าจะถูกเคลือบยังแผ่นเวเฟอร์ จากนั้นตัวทำละลายนี้จะถูกทำให้ระเหยออกจากฟิล์มน้ำยาไวแสงก่อนการฉายแสงเพื่อถ่ายแบบลายวงจร และอาจมีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อสารไวแสงของน้ำยาไวแสง โดยที่สารละลายที่ใช้ในน้ำยาไวแสงชนิดบวก คือ สารละลายอะซิเตท (Acetate solvents) และสารละลายที่ถูกใช้สำหรับน้ำยาไวแสงชนิดลบ คือ ไซลีน (Xylene, C_8H_{10})

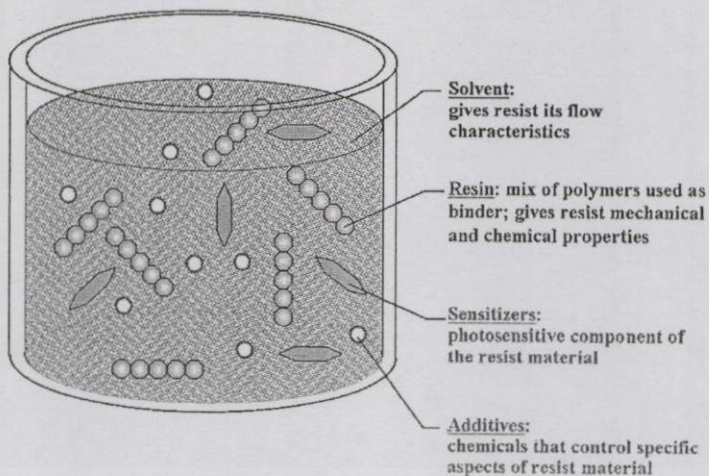
แอดดิทีฟ หรือสารเติมแต่งอื่นๆ ซึ่งเป็นคำหรับพิเศษทางเคมีของผู้ผลิตเพื่อใช้ในการควบคุมหรือปรับปรุงคุณภาพทางคุณสมบัติทางเคมีต่างๆ เช่นเพิ่มความสามารถการตอบสนองต่อแสงของวน้ำยาไวแสง

2.6.3 ชนิดของน้ำยาไวแสง

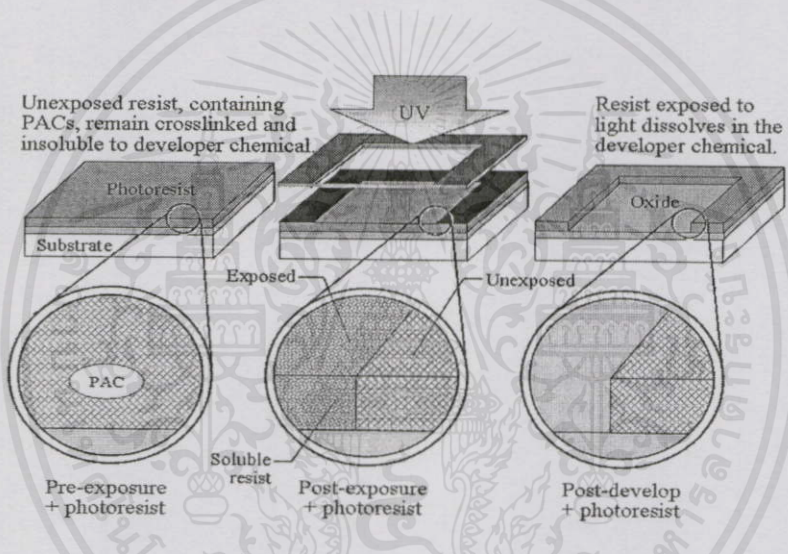
โดยทั่วไปน้ำยาไวแสงถูกแบ่งออกเป็นสองชนิด คือ น้ำยาไวแสงชนิดบวก และชนิดลบ ดังมีรายละเอียดดังนี้

(1) น้ำยาไวแสงชนิดบวก เป็นชนิดที่นิยมใช้งานมากที่สุดในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี โดยมีวัสดุที่เป็นส่วนของเรซิน คือ สารฟีนอลเฟอร์มาดีไฮน์ เรซิน (Phenolformaldehyde resin) หรือ โนวอลาค (Novolak) มีลักษณะการเกี่ยวพันในระดับโมเลกุลที่ยาว (Long chain polymer) และทำให้วัสดุเรซินนี้มีคุณสมบัติเฉพาะที่สามารถรักษาการเกาะยึดและทนทานต่อสารเคมีได้ดี ส่วนสารไวแสงในน้ำยาไวแสงชนิดบวก ได้แก่ โฟโตแอคทีฟคอมเปาด์ (Photoactive compound, PAC) มีรากฐานมาจาก ไดอะโซนาฟโทควิโนน (Diazonaphthoquinone, DNQ) ขณะยังไม่มีการฉายแสง DNQ จะรักษาสภาพของสารเรซินให้ยังคงแข็งตัวหรือยับยั้งการอ่อนตัว และเมื่อสารไวแสง PAC ถูกฉายแสงด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตจะทำให้ DNQ กลายสภาพเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการอ่อนตัวของเรซิน และละลายออกด้วยน้ำยาล้างลายแสดงในรูปที่ 2.31 ส่วนปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องดูรายละเอียดเพิ่มเติมในภาคผนวก ก

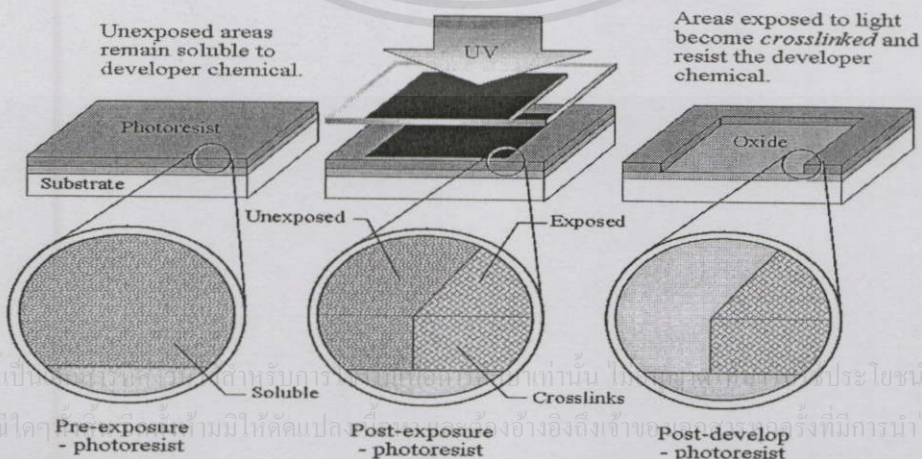
(2) น้ำยาไวแสงชนิดลบ มีส่วนประกอบเรซินหลัก ได้แก่ โพลีไอโซพรีน โพลีเมอร์ (Polyisoprene polymer) เช่น วัสดุยางตามธรรมชาติ สารโพลีไอโซพรีน เป็นสารแขวนลอยในตัวทำละลาย เช่น ไซลีน (Xylene) เป็นต้น ส่วนของสารไวแสงของน้ำยาไวแสงชนิดลบจะเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซในโตรเจน เมื่อทำการฉายแสงด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต และจะสร้างพันธะทางเคมีโดยการเกิดการเชื่อมโยงข้าม (Cross link) ระหว่างโมเลกุลและกลายเป็นส่วนที่แข็งตัวซึ่งจะไม่ถูกละลายโดยน้ำยาล้างลาย ในขณะที่ส่วนที่ไม่ถูกฉายแสงจะถูกล้างออกด้วยน้ำยาล้างลาย ดังในรูปที่ 2.32 ส่วนปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องดูรายละเอียดเพิ่มเติมในภาคผนวก ข



รูปที่ 2.30 ส่วนประกอบของน้ำยาไวแสงชนิดบวก



รูปที่ 2.31 PAC ในน้ำยาไวแสงชนิดบวก

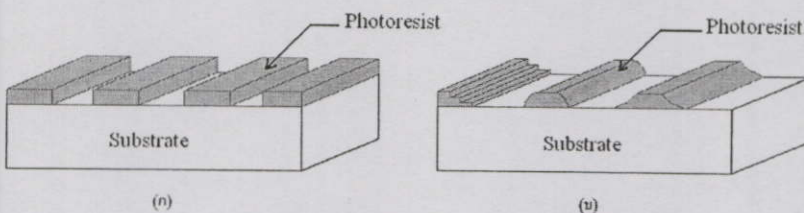


รูปที่ 2.32 ภาพแสดงการเกิด Cross links ในน้ำยาไวแสงชนิดลบ

2.7 โครงสร้างระดับจุลภาคโดยทั่วไปของน้ำยาไวแสง

เมื่อชิ้นงานเวเฟอร์ที่ถูกเคลือบด้วยน้ำยาไวแสงและผ่านการอบให้ตัวทำละลายละลายเหยออก จากฟิล์มน้ำยาไวแสงแล้ว ซึ่งขณะนี้ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงจะคงค้างเพียงแต่ส่วนประกอบหลัก ซึ่ง ได้แก่ สารเรซิน สารไวแสง และสารเติมแต่ง หลังจากนั้นแผ่นเวเฟอร์มีความเหมาะสมแก่การ นำไปใช้งานเพื่อถ่ายแบบลายวงจรในขั้นตอนกระบวนการฉายแสง

การถ่ายแบบลายวงจรเป็นขั้นตอนหลักที่สำคัญในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเพื่อใช้สร้างลาย วงจรให้แก่ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงซึ่งจะเป็นตัวกำหนดรูปแบบโครงสร้างระดับจุลภาคแก่ชั้นฟิล์มน้ำ ยาไวแสงดังรูปที่ 2.33 อันได้แก่โครงสร้างแบบสองมิติ ดังรูปที่ 2.33(ก) โดยที่ลายวงจรมีเพียงมิติสอง ระนาบ คือ ระยะเวลากว้าง และความยาวของลายวงจรเท่านั้น โดยจุดประสงค์หลักของชั้นฟิล์ม น้ำยาไวแสงแบบนี้ คือ เพื่อใช้เป็นชั้นแนวป้องกันการกัดเซาะจากกระบวนการกัดทั้ง แบบแห้งและ เปียก ซึ่งในกระบวนการกัดแบบแห้งนั้นชั้นความหนาฟิล์มน้ำยาไวแสงบางส่วนจะถูกกัดออกด้วย ทิศทางเดียวกันกับพื้นเปิดบนพื้นผิวของแผ่นเวเฟอร์ ดังนั้น การเคลือบชั้นความหนาฟิล์มน้ำยาไว แสงจึงต้องมีความหนาเพียงพอ ต่ออัตรากัดบนพื้นผิวเวเฟอร์ด้วย ส่วนรูปที่ 2.33(ข) เป็นรูปแบบ โครงสร้างจุลภาคของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง ซึ่งมีผนังของลายวงจรมีลักษณะแบบชันบันได โค้งเว้า และลาดเอียง หรือเรียกว่าโครงสร้างนี้เป็นแบบจุลภาคสามมิติ ซึ่งมีมิติของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง ประกอบด้วยระนาบสามทิศทาง คือ ความกว้าง ความยาว และความสูง โดยที่วิธีการสร้างนั้นต้อง อาศัยเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรที่สามารถกำหนดระดับพลังแสงที่ฉายให้แก่ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง ซึ่งสามารถจะแปรเปลี่ยนระดับพลังงานค่าโคหแสงต่างๆ เพื่อสร้างผนังชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงให้เป็น แบบไม่ตั้งตรง (Non vertical side wall) แก่ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ระดับแตกต่างกัน เช่น การใช้ เทคนิคการฉายแสง โดยการแปรเปลี่ยนระดับพลังงานแสงโดยตรงจากแหล่งจ่ายแสง [12] เทคนิคโฟโตลิโธกราฟีแบบเกรย์สเกล [5-6] โดยที่เทคนิคเหล่านี้ทำให้เกิดการกรองพลังงานแสงที่ ถูกฉายให้แก่ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง โดยมีพลังงานแสงหลายระดับแตกต่างกันและเมื่อนำไปล้างลาย น้ำยาไวแสงจะทำให้เกิด โครงสร้างผิวฟิล์มน้ำยาไวแสงมีลักษณะรูปร่าง โค้งเว้าหรือชันบันได ตาม ปริมาณพลังแสงที่ถูกฉายซึ่งส่งต่อ โมเลกุลของสารไวแสงนั้นๆ

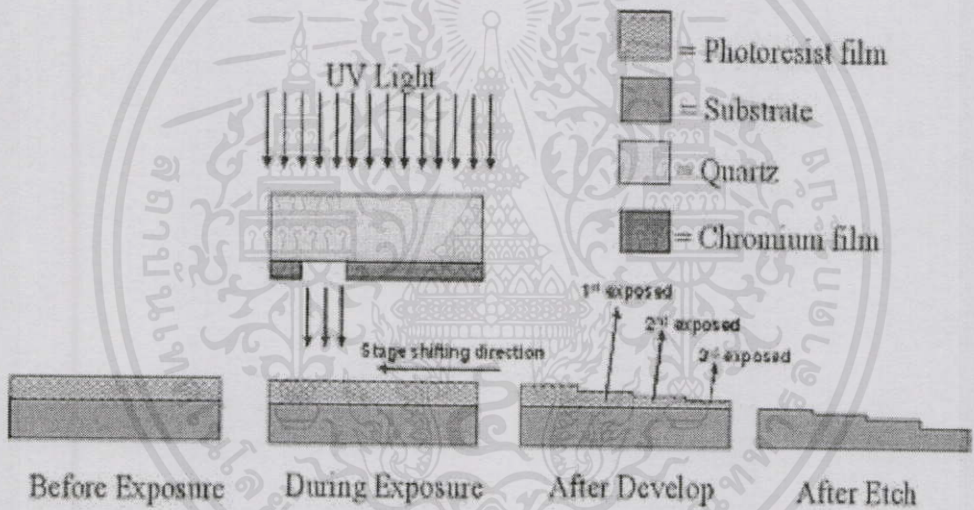


รูปที่ 2.33 โครงสร้างระดับจุลภาคน้ำยาไวแสง (ก) โครงสร้างน้ำยาไวแสงแบบทั่วไปหรือสองมิติ

(ข) โครงสร้างน้ำยาไวแสงที่มีรูปร่าง โค้งเว้าชันบันไดหรือมีโครงสร้างสามมิติ

2.8 เทคนิคการฉายแสงแบบแปรเปลี่ยนพลังงานแสงโดยตรงจากแหล่งแสง

ในการสร้างลวดลายวงจรสามมิติ ด้วยเทคนิคการแปรเปลี่ยนค่าพลังงานแสงโดยตรงจากแหล่งฉายแสงใช้หลักการอ้างอิงจากระบวนการถ่ายแบบลายวงจรโดยทั่วไป เพียงแต่จะแตกต่างกันโดยมีการฉายแสงเข้าไปในขั้นตอนการฉายแสงด้วยระดับค่าปริมาณ โขงแสงที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.34 เพื่อให้เกิดโครงสร้างสามมิติ เมื่อพลังงานที่ใช้ฉายแสงเพิ่มมากขึ้น ค่าความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงจะน้อยลงและเป็นสัดส่วนตามปริมาณของแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ถูกใช้ฉายแสง เมื่อนำชิ้นงานเวเฟอร์ที่ถูกถ่ายแบบลายวงจรด้วยเทคนิคนี้ไปสู่กระบวนการกัดแบบแห้ง พบว่าความลึกบนผิวเวเฟอร์ด้านล่างชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ถูกกัดเซาะนั้นมีความลึกที่แตกต่างกันโดยมีทิศทางการกัดเช่นเดียวกันกับความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง ส่วนการสร้างลวดลายจุดภาคสามมิติด้วยเทคนิคนี้จะต้องอาศัยการเคลื่อนที่ฐานรองเวเฟอร์ที่มีความแม่นยำสูงในการขับเคลื่อนฐานรองไปยังตำแหน่งที่กำหนดเพื่อทำการฉายแสง



รูปที่ 2.34 กระบวนการถ่ายแบบลายวงจรแบบแปรเปลี่ยนพลังงานแสงโดยตรงจากแหล่งฉายแสง

2.9 เทคนิคการฉายแสงแบบเกรย์สเกล

องค์ประกอบที่สำคัญในการสร้างโครงสร้างจุดภาคสามมิติ โดยเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรแบบเกรย์สเกล คือ กระจกโฟโตมาส์กต้นแบบชนิดเกรย์สเกล (Gray scale photomask) ซึ่งเป็นโครงสร้างลวดลาย สองมิติ ที่สามารถควบคุมการส่องผ่านของแสงผ่านลายวงจรที่ประกอบด้วยลวดลาย พิกเซล ซึ่งเป็นช่องเปิดให้แสงผ่าน และลวดลายพิทช์ คือ ส่วนที่เป็นโลหะ โครเมียมอยู่ระหว่างพิกเซล ทำหน้าที่กั้นไม่ให้แสงผ่านลงไปยังชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง โดยมีรูปแบบของลวดลาย ดังแสดงในรูปที่ 2.35 โดยที่ลวดลายพิกเซลและพิทช์ ต้องมีขนาดเล็กกว่าความละเอียดของเครื่อง

ถ่ายแบบลายวงจร ซึ่งขนาดของ พิกเซล ที่เล็กที่สุดจะมีความสัมพันธ์กับขนาด พิตช์ และความละเอียดของเครื่องถ่ายแบบลายวงจร ดังแสดงในสมการที่ 2.8

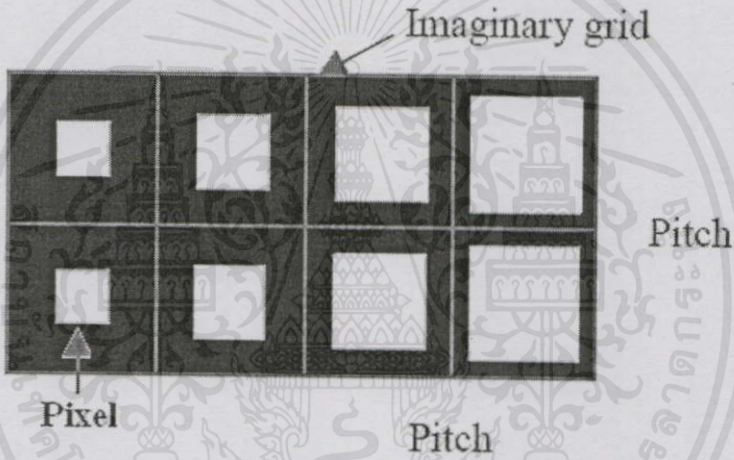
$$W_{Min} = P - \sqrt{\frac{P^2}{2}} \tag{2.8}$$

โดยที่

W_{Min} คือ ความกว้างที่เล็กที่สุดของพิกเซล

P คือ ขนาดของ พิตช์

P_c คือ ความละเอียดของเครื่องถ่ายแบบลายวงจร



รูปที่ 2.35 พิตช์ และพิกเซล บนกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล

เมื่อออกแบบลายวงจรโดยกำหนดขอบเขตของขนาดพิตช์และพิกเซล ให้เหมาะสมกับเครื่องจักรที่มีอยู่จะสามารถคำนวณหาค่าการส่องผ่านของแสง (Light transmission) ในรูปของความสัมพัทธ์ระหว่างพื้นที่ของพิกเซลและพิตช์ ดังแสดงในสมการที่ 2.9

$$Tr = \left(\frac{A_{Pixel}}{A_{Pitch}} \right) \times 100 \tag{2.9}$$

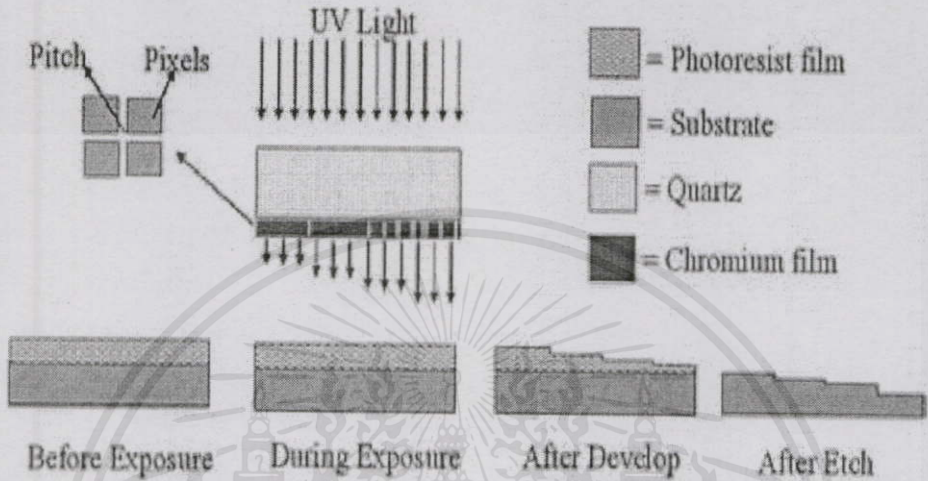
โดยที่

Tr คือ เปอร์เซนต์การส่องผ่านของแสง

A_{Pixel} คือ พื้นที่รวมของ พิกเซล

A_{Pitch} คือ พื้นที่รวมของ พิตช์

จากนั้นนำแผ่นกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกลมาถ่ายแบบลายวงจรลงบนผิวชิ้นงาน พบว่า ความเข้มและพลังงานแสงที่ผ่านกระจกต้นแบบจะขึ้นกับขนาดของพิกซ์และพิกเซล ซึ่งจะทำให้ ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ถูกฉายแสง และผ่านการล้างลายวงจรมีความหนาไม่เท่ากัน ดังกระบวนการ สร้างลายสามมิติแสดงในรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 กระบวนการ โฟโตลิโธกราฟีแบบเกรย์สเกล

2.10 ทฤษฎีและกระบวนการกัดแบบแห้ง [7,9]

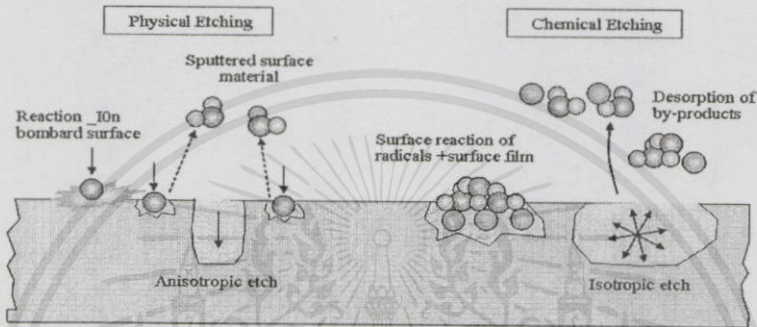
การกัดเป็นกระบวนการที่เลือกพื้นที่ของวัสดุที่ไม่ต้องการออกจากพื้นผิวเวเฟอร์โดยการ ใช้ การกัดแบบเคมี หรือแบบฟิสิกส์ ซึ่งมีชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงทำหน้าที่เป็นชั้นป้องกันในส่วนของลาย วงจร กระบวนการกัดนั้นมีสองกระบวนการพื้นฐานที่ใช้ในอุตสาหกรรมเซมิคอนดักเตอร์ ซึ่งได้แก่ การกัดแบบแห้ง (Dry etching) และการกัดแบบเปียก (Wet etching)

การกัดแบบแห้งนั้นเป็นการเปิดพื้นผิวเวเฟอร์ โดยใช้พลาสมา (Plasma) ซึ่งสร้างจากการ แฉกตัวของก๊าซ ผ่านเข้าไปยังพื้นที่เปิดบนพื้นผิวทำปฏิกิริยาเชิงฟิสิกส์ หรือ เคมีต่อพื้นผิวเวเฟอร์ นั้นๆ และทำให้เกิดการกัดลงยังพื้นผิวของเวเฟอร์ ส่วนการกัดแบบเปียกนั้นเป็นการใช้สารเคมี เหลวประเภทกรด (Acid), ด่าง (Bases) หรือ สารทำละลาย เป็นตัวกัดเพื่อนำพื้นผิวบนเวเฟอร์ใน ส่วนที่ไม่ต้องการออก ซึ่งการกัดแบบเปียกนั้น โดยทั่วไปมักนิยมใช้กับพื้นที่มีขนาดที่มากกว่า 3 ไมครอนขึ้นไปกระบวนการกัด คือ การกัดหรือลอกวัสดุออก อย่างเช่น ลอกออกไซด์หรือฟิล์ม บางอื่น ๆ โดยวิธีทางเคมี อิเล็กโตรไลติก หรือ การระดมยิงด้วยพลาสมา-ไอออน (Plasma-ion bombardment) หลังจากที่ถูกกัดด้วยวิธีใดก็ได้ถูกถ่ายแบบจากลวดลายต้นแบบ โฟโตมาสก์ ลงบน ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงแล้ว จะต้องมีการลอกหรือกัดชั้นฟิล์มที่ถูกปกคลุมด้วยน้ำยาไวแสงออก บางส่วน ณ บริเวณที่กำหนด ซึ่งชั้นฟิล์มดังกล่าวอาจเป็นออกไซด์ ไนไตรด์ โพลีซิลิคอน

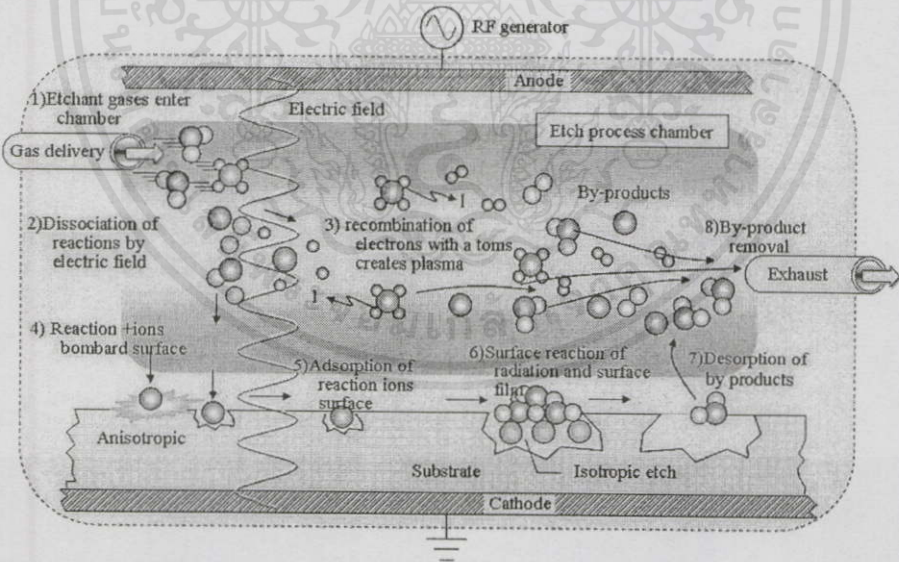
อะลูมิเนียม หรือ อาจเป็นชั้นซิลิคอนผลึกเดี่ยวก็ได้ โดยที่ชั้นนำยาไวแสงยังคงอยู่หลังจากผ่านกระบวนการกัดกร่อน และจะทำหน้าที่ป้องกันบริเวณชั้นฟิล์มที่อยู่ข้างใต้ โดยทั่วไปกระบวนการกัดจะต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่อไปนี้เป็นสำคัญ คือ ถ้าการกัดนั้นเป็นแบบไอโซทรอปิก (Isotropic) จะเป็นการกัดกร่อนที่เหมือนกันในทุกทิศทาง หรือถ้าเป็นแบบแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic) จะเป็นการกัดกร่อนในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง การกัดกร่อนทั้งสองแบบแสดงในรูปที่ 2.37 การกัดเป็นแบบเลือกเฟ้น (Selective) หรือไม่ หมายความว่าสารที่ใช้กัดกร่อนจะกัดชั้นป้องกันและชั้นอื่น ๆ ด้วยอัตราการกัดกร่อนที่ต่ำกว่าชั้นที่จะกัดมากน้อยเพียงใดอัตราการกัดกร่อนมีความสม่ำเสมอเพียงใดตลอดพื้นที่ผิวหน้าเวเฟอร์และหลังจากการกัดกร่อนแล้ว ชั้นที่อยู่ข้างใต้มีความเสียหายเกิดขึ้นหรือไม่

สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดในเทคโนโลยีการผลิตไอซีเป็นตัวแรก คือ สารเคมีพวกกรดบัฟเฟอร์ เช่น กรดบัฟเฟอร์ไฮโดรฟลูออริก (Buffered HF) เป็นต้น ซึ่งใช้ในการกัด SiO_2 และแก้ว การกัดด้วยสารเคมีประเภทเหล่านี้เรียกว่าเป็นการกัดแบบเปียก ซึ่งทำให้บริเวณที่ถูกกัดมีลักษณะไอโซทรอปิก และเกิดเป็นลักษณะอันเดอร์คัท (Undercut) อย่างมากข้างใต้แผ่นชั้นป้องกัน หรือชั้นนำยาไวแสงลักษณะผิวหน้าที่กัดด้วยน้ำยาเคมีจะขึ้นกับอุณหภูมิและอายุการใช้งานของส่วนผสมน้ำยากัดกร่อน เมื่อไรก็ตามที่ขนาดสิ่งประดิษฐ์ (Device feature) หรือ ขนาดของสายวงจรรวมที่ต้องการผลิตและการเปิดผิวหน้าชั้นป้องกันเพื่อทำการกัดกร่อนที่มีขนาดเล็กลง จะต้องหลีกเลี่ยงการกัดกร่อนด้วยน้ำยาเคมี ด้วยเหตุนี้ จึงได้มีการพัฒนากระบวนการกัดโดยใช้ปฏิกิริยาเคมีของโมเลกุลก๊าซที่แตกตัวเป็นไอออนหรือพลาสมาเข้ามาช่วย ซึ่งเรียกว่า การกัดแบบแห้ง กระบวนการดังกล่าวแสดงในรูปที่ 2.38 โดยการใช้อิทธิพลของก๊าซ เช่น CF_4 , CF_6 , CCl_4 และ O_2 ซึ่งลดความดันลงเหลือประมาณ 10 ถึง 4 มิลลิทอร์ จากนั้นป้อนคลื่นวิทยุที่ 13.56 เมกะเฮิร์ต ให้ระหว่างขั้วไฟฟ้าโลหะ 2 ขั้ว ขั้วหนึ่งเป็นแอโนดซึ่งต่อลงดิน และอีกขั้วหนึ่งเป็นแคโทดซึ่งแผ่นเวเฟอร์จะวางอยู่บนขั้วนี้แรงดันอาร์เอฟจะทำให้เกิดการคริสตัลไรซ์ที่ค่าความดันก๊าซต่ำและทำให้ก๊าซแตกตัวเป็นพลาสมาซึ่งประกอบด้วยอิเล็กตรอนที่มีประจุเป็นลบและไอออนบวกของฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon) หรือคลอโรคาร์บอน (Chlorocarbon) ทั้งนี้แล้วแต่กรณีวงจรไฟฟ้าที่ใช้จะถูกออกแบบเพื่อให้แคโทดมีศักย์เป็นลบ ซึ่งทำให้ไอออนบวกเคลื่อนที่เร่งตรงมายังขั้วแคโทดและวิ่งชนผิวหน้าเวเฟอร์อย่างแรงและหากศักย์ไฟตรงโดยเฉลี่ยของแคโทดมีค่าต่ำจะทำให้การกัดส่วนใหญ่เป็นแบบแอนไอโซทรอปิกชนิดของสารเจือที่ใส่กัดจะทำปฏิกิริยากับชั้นฟิล์มที่ถูกกัดและทำให้เกิดเป็นสารประกอบซึ่งระเหยเป็นไอออกจากห้องสุญญากาศไปพร้อมกับก๊าซพา ในกรณีที่แคโทดมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบมาก การวิ่งชนของไอออนอย่างแรงจะทำให้เกิดความเสียหายบนผิวหน้าสารด้วยลักษณะเช่นนี้จะเป็นการเพิ่มปฏิกิริยาเคมีในทิศทางที่ไอออนวิ่งชนผิวหน้าสารยังผลให้การกัดมีความเป็นแอนไอโซทรอปิกมากขึ้น ๆ ซึ่งลักษณะนี้เรียกว่าการกัดกร่อนด้วยปฏิกิริยาไอออน (Reactive ion etch, RIE) และใช้เป็นเทคนิคในการขุดชั้นร่อง (Trench) ที่ลึกได้ในเวเฟอร์ ซิลิคอนในกระบวนการผลิตไอซี โดยที่ชั้นร่องนี้จะมีการปลูกลงไปเพื่อใช้ในการแยกตัว

ถึงประดิษฐ์ในลำดับต่อไป หรือใช้สร้างตัวเก็บประจุที่เป็นพื้นที่ โดยไม่ต้องเสียพื้นที่ที่ผิวหน้าสารมาก ข้อเสียของกระบวนการ RIE ก็คือ ความเสียหายจากการแผ่พลังงาน ซึ่งเกิดจากการระดมยิงชนิดของสารเจืออย่างแรงจึงทำให้เกิดสิ่งปนเปื้อนฝังบนผิวหน้าซึ่งกินความลึกในระดับ 100 นาโนเมตร ลักษณะเช่นนี้จะเป็นการเพิ่มสเตตที่ผิวเพิ่มศูนย์กลางการจับและเพิ่มประจุออกไซด์บวกและอาจทำให้ออกไซด์เกิดการทลายก่อนถึงแรงดันอันควร ดังนั้นจึงต้องระมัดระวังเป็นพิเศษในระหว่างกระบวนการ RIE เพื่อพยายามลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นและในบางครั้งอาจต้องมีการนำแผ่นเวเฟอร์ไปแอนนัล (Anneal) ที่อุณหภูมิสูงหลังจากผ่านกระบวนการกัด



รูปที่ 2.37 ลักษณะการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกและการไอโซทรอปิก



รูปที่ 2.38 กระบวนการเกิดพลาสมา

พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการกัด (Etch parameter) ใช้เพื่อกำหนดคุณภาพของลวดลายวงจรจากการกัดและเพื่อเป็นตัวกำหนดค่าชั้นหนาฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ต้องการให้เป็นไปตาม

โครงสร้างสามมิติโดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญได้แก่ อัตราการกัด (Etch rate) และค่าความว่องไวของการกัด (Etch selectivity)

อัตราการกัด คือ ความเร็วในการกัดชั้นงาน ต่อ หน่วยเวลาทั้งนี้อัตราความเร็วการกัดจะขึ้นอยู่กับชนิดประเภทวัสดุเนื้อสารของแผ่นเวเฟอร์ หรือลักษณะพื้นผิวเวเฟอร์ที่จะทำการกัด นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการกัด และพารามิเตอร์ของเครื่องกัด โดยที่สมการที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกัดแบบแห้ง ดังที่สมการที่ 2.10 และ 2.11

$$\text{Etch rate} = \frac{\Delta T}{t} \quad (\text{Å/min}) \quad (2.10)$$

$$S_R = \frac{E_f}{E_r} \quad (2.11)$$

โดยที่ *Etch rate* คือ อัตราการกัดบนผิวซิลิคอน

ΔT คือ ความแตกต่างของความหนาพื้นผิวก่อนและหลังการกัด

t คือ เวลาที่ใช้ในการกัด

S_R คือ ความว่องไวในการกัด

E_f คือ อัตราการกัดพื้นผิวซิลิคอน

E_r คือ อัตราการกัดชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

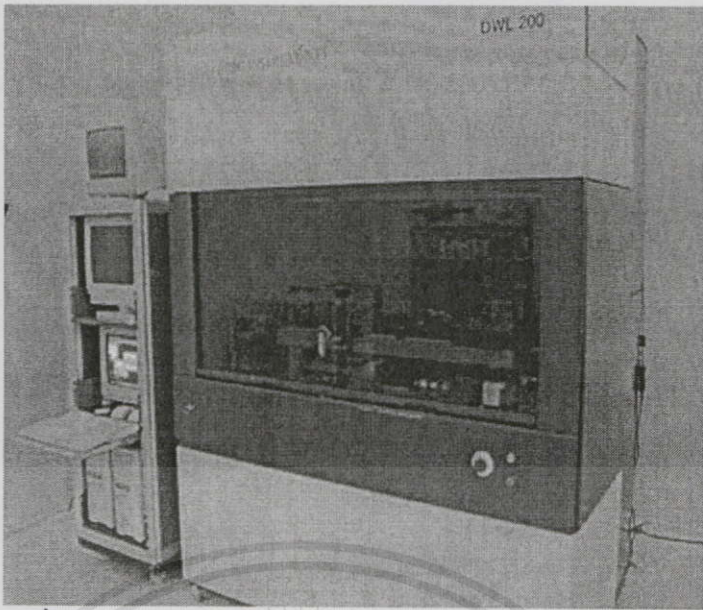
บทที่ 3

การออกแบบและการสร้างโฟโตมาส์กต้นแบบ

การออกแบบลวดลายต้นแบบ (Layout design) และการสร้างโฟโตมาส์ก (Photomask) สำหรับใช้ในการสร้างลวดลายโฟโตลิโธกราฟีแบบสามมิติทั้งเทคนิคการฉายแสงแบบแปรเปลี่ยนพลังงานแสงโดยตรงจากแหล่งจ่ายและเทคนิคแบบเกรย์สเกลนั้นจะยึดหลักกระบวนการออกแบบและสร้างโฟโตมาส์กแบบโดยทั่วไปที่เรียกว่า ไบนารีโฟโตมาส์ก (Binary Intensity Mask, BIM) [16,18] ซึ่งเป็นการสร้างแผ่นโฟโตมาส์กที่มีลักษณะ โครงสร้างลวดลายสองมิติที่ประกอบด้วยลวดลายของช่องเปิดแสงเพื่อให้แสงผ่าน (Clear region) และพื้นที่ที่ทึบแสง (Opaque region) เพื่อกั้นแสงไม่ให้ฉายผ่านกระจกต้นแบบโฟโตมาส์กไปยังชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงได้

ลวดลายของกระจกโฟโตมาส์กที่ใช้สำหรับการถ่ายแบบลายวงจรโฟโตลิโธกราฟีสามมิติด้วยเทคนิคการฉายแสงแบบแปรเปลี่ยนพลังงานแสงโดยตรงจากแหล่งจ่ายจะมีลวดลายโฟโตมาส์กมีลักษณะเช่นเดียวกับแผ่นกระจกโฟโตมาส์กโดยทั่วไปที่ใช้งานของวงจรรวม สำหรับลวดลายของโฟโตมาส์กแบบเกรย์สเกลนั้น [19] จะมีลักษณะลวดลายที่พิเศษเฉพาะแตกต่างจากลวดลายโฟโตมาส์กทั่วไป กล่าวคือ เป็นลวดลายแบบไบนารีโฟโตมาส์กหรือเป็นลวดลายสองมิติซึ่งประกอบด้วยลวดลายของกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดเล็กจำนวนมากที่เรียกว่า พิกเซล ประกอบกันเป็นลวดลายวงจรหลักเพื่อทำหน้าที่กรองพลังงานแสงอัลตราไวโอเล็ตที่จะถูกฉายแสงผ่านแผ่นกระจกโฟโตมาส์กและถ่ายแบบลายวงจรยังเวเฟอร์ด้วยระดับปริมาณแสงที่แตกต่างกันจากการฉายแสงเพียงครั้งเดียว การออกแบบลวดลายเกรย์สเกลนั้นจะต้องคำนึงถึงความละเอียดของระบบโปรเจกชันของเครื่องถ่ายแบบลายวงจรและความสามารถสูงสุดในกระบวนการสร้างลวดลายโฟโตมาส์ก โดยที่ขนาดลายของพิกเซลและพิทช์ที่จะถูกสร้างบนแผ่นโฟโตมาส์กนั้นๆ หมายถึงขนาดลวดลายที่เล็กที่สุดที่จะสามารถสร้างได้โดยเครื่องสร้างลายนั้นเอง สำหรับลวดลายต้นแบบโฟโตมาส์กที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการสร้างต้นแบบโฟโตมาส์กโดยใช้เครื่อง Direct Write Laser (DWL) ของบริษัท Heidelberg Instrument รุ่น DWL 200 ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ตั้งรูปที่ 3.1 ซึ่งใช้ลำแสงเลเซอร์ฮีเลียม-แคดเมียม ที่ความยาวคลื่น 442 นาโนเมตร มีความละเอียดของลายเล็กที่สุดเท่ากับ 1.0 ไมครอน ส่วนเครื่องถ่ายแบบลายวงจรเป็นการใช้งานเครื่องโปรเจกชันสเต็ปเปอร์ ของบริษัท Ultratech stepper รุ่น Nanotech 190 มีความละเอียดของระบบโปรเจกชันเลนส์ที่ 2.0 ไมครอน ฉะนั้นการออกแบบสำหรับการสร้างแผ่นโฟโตมาส์กจะต้องพิจารณาถึงข้อจำกัดเหล่านี้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



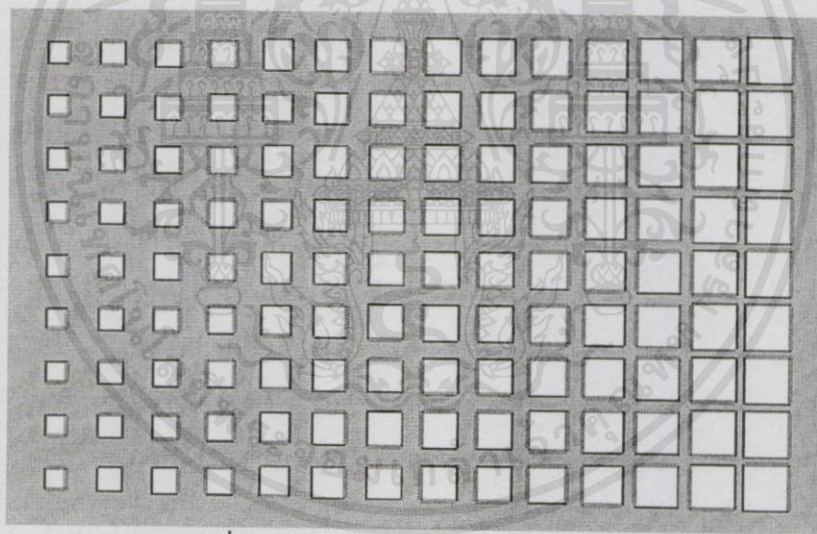
รูปที่ 3.1 เครื่อง DWL ของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์

3.1 การออกแบบลวดลายต้นแบบ

การออกแบบลวดลายสำหรับ โฟโตมาส์กต้นแบบชนิดเกรย์สเกลในงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม AutoCAD ซึ่งเป็นโปรแกรมทั่วไปที่ทำได้ตามที่ตลาด โดยเมื่อคำนวณขนาดของลวดลายพิกเซล และพิกซ์ที่ต้องการแล้ว จะต้องออกแบบลงบนกระดาษสองมิติ โดยต้องกำหนดหน่วยอ้างอิงทางขนาด (Dimension unit) ของโปรแกรม AutoCAD ให้สอดคล้องกับหน่วยอ้างอิงทางขนาดของเครื่องสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบ (Pattern Generator, PG) ซึ่งอาจเป็นหน่วยระดับมิลลิเมตร, ไมโครเมตร หรือนาโนเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของลายวงจรที่ต้องการและความละเอียดของเครื่อง PG (PG's resolution) โดยในการออกแบบจะสามารถกำหนดชั้น (Layer) ได้หลายชั้นขึ้นกับความซับซ้อนของลวดลายและรูปร่างของลายที่ออกแบบอาจเป็นรูปทรงเรขาคณิตต่างๆ เช่น วงกลม, สี่เหลี่ยม หรือหกเหลี่ยม เป็นต้น แต่รูปทรงเหล่านี้จะต้องเป็นลายเส้นแบบโพลิกอน (Polygon line) ซึ่งมีจุดเริ่มและจุดสิ้นสุดของเส้นต่อถึงกันเท่านั้น เนื่องจากเครื่อง PG จำเป็นต้องทราบพื้นที่ของลายที่ต้องการเขียน ซึ่งถ้าไม่เป็นลายแบบโพลิกอนแล้ว จะไม่สามารถแปลงไฟล์ (File conversion) เพื่อเขียนลายด้วยเครื่อง PG ได้ จากนั้นให้กำหนดจุดอ้างอิงที่ตำแหน่ง 0,0 ณ จุดกึ่งกลางของลวดลายทั้งหมด ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการสร้างกระจกต้นแบบ จากนั้นบันทึกข้อมูลในรูปแบบ DXF (Drawing Exchange Format) เท่านั้น เพื่อให้สามารถแปลงข้อมูลสำหรับสร้างลายวงจรด้วยเครื่อง DWL ของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ได้

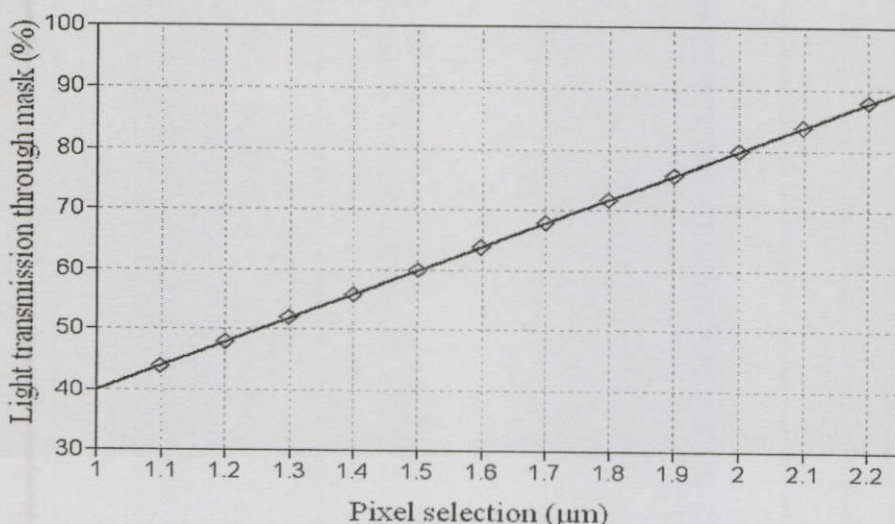
เอกสารนี้ สำหรับขนาดของพิกซ์ และพิกเซล ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะอยู่ในช่วงของความละเอียดของเครื่องถ่ายภาพลายวงจรโปรเจกชันสเต็ปเปอร์ คือ 2.0 ไมครอน และความละเอียดของเครื่อง DWL คือ 1.0 ไมครอน ทั้งนี้เพื่อให้เกิดระดับเกรย์สเกลของแสงอัลตราไวโอเลตขึ้นและส่งผลให้เกิด

ระดับค่าแสงที่แตกต่างกันจากการฉายแสงเพียงครั้งเดียว กล่าวคือ เมื่อดำแสงที่ฉายผ่านลวดลายโฟโตมาส์กชนิดเกรย์สเกลที่มีขนาดลวดลายพิทซ์และพิกเซลที่เล็กกว่าค่าความละเอียดระบบโปรเจกชันของเครื่องฉายแบบลายวงจร ความละเอียดของภาพที่ถูกถ่ายแบบลายวงจรนั้นจะมีลายที่ขาดความคมชัด (Blur) แตกต่างกันไปตามขนาดลวดลายพิทซ์และพิกเซลจากแผ่นโฟโตมาส์กต้นแบบจนกว่าลวดลายพิทซ์และพิกเซลของโฟโตมาส์กจะมีขนาดพื้นที่ที่มากกว่าค่าความละเอียดของระบบโปรเจกชันของเครื่องฉายแบบ แต่เนื่องจากความละเอียดของเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความใกล้เคียงกันมาก ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ไม่สามารถสร้างระดับเกรย์สเกลได้มากเพียงพอ จากการอ้างอิงการคำนวณขนาดที่เล็กที่สุดของพิกเซล ตามสมการ ที่ 2.8 ดังนั้นจึงกำหนดค่าระยะห่างระหว่างพิกเซลเท่ากับ 2.5 ไมครอนและแปรเปลี่ยนขนาดพิกเซล จาก 1.0 ถึง 2.2 ไมครอน จากนั้นปรับเปลี่ยนขนาดของพิกเซล ขึ้นครั้งละ 0.1 ไมครอน ดังการออกแบบลวดลายเกรย์สเกลต้นแบบ รูปที่ 3.2 เมื่อนำขนาดของพิทซ์และพิกเซลที่ทำการออกแบบและสร้างไปคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงตามสมการที่ 2.9 จะได้เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงต่อหน่วยพื้นที่ขนาดพิกเซล ดังแสดงในรูปที่ 3.3

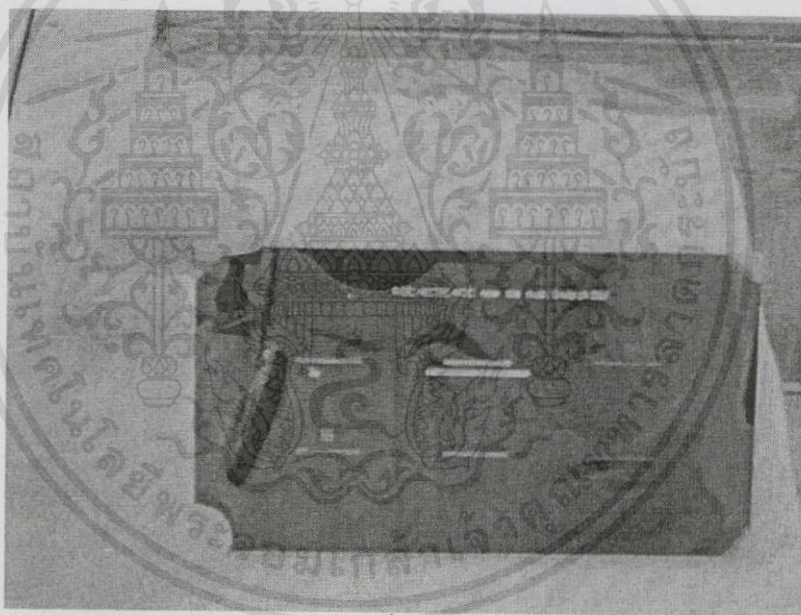


รูปที่ 3.2 ลวดลายเกรย์สเกลแบบลาดเอียง

เมื่อได้ไฟล์ข้อมูลในรูปแบบ DXF จากการออกแบบร่างโปรแกรม Autocad หลังจากนั้นนำไปสร้างแผ่นต้นแบบโฟโตมาส์ก ด้วยเครื่อง DWL ที่ศูนย์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ โดยสามารถสร้างลวดลายโฟโตมาส์กแบบเกรย์สเกลได้ ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งเป็นแผ่นโฟโตมาส์กต้นแบบ ขนาด 3 x 5 ตารางนิ้ว เพื่อใช้สำหรับการทดลองโดยใช้เครื่องฉายแบบลายวงจรของบริษัท Ultratech stepper ซึ่งมีฐานจับยึดแผ่นโฟโตมาส์ก (Mask stage) เพียงขนาด 3 x 5 ตารางนิ้วเท่านั้น ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นกระจกต้นแบบที่มีลวดลายพิกเซลขนาด 1.0 ถึง 2.2 ไมครอน และพิกซ์เท่ากับ 2.5 ไมครอน

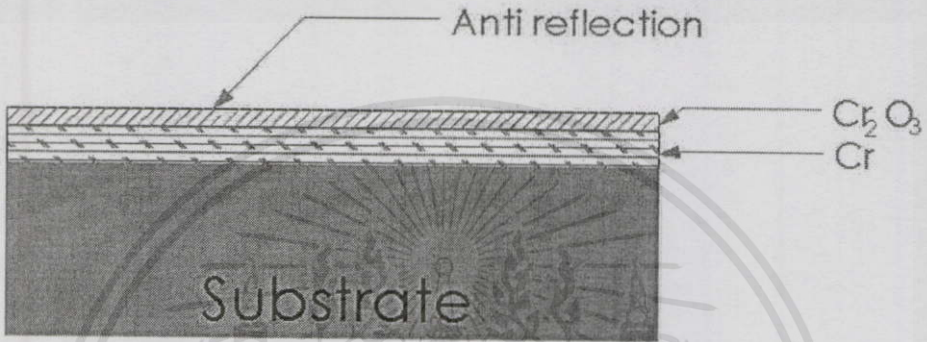


รูปที่ 3.4 ต้นแบบแผ่นโฟโตมาส์กขนาด 3x5 ตารางนิ้วที่สร้างโดยศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์

3.2 แผ่นโฟโตมาส์ก

แผ่นโฟโตมาส์กประกอบด้วยกระจกฐานรองโปร่งแสงซึ่งถูกเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางทึบแสงเพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นป้องกันการฉายแสงผ่าน โดยทั่วไปชั้นฟิล์มบางจะถูกสร้างโดยการเคลือบโลหะหนัก เช่น เหล็กออกไซด์, ซิลิคอน, ทอง, โครเมียม, และโครเมียมออกไซด์เป็นต้น โดยใช้เทคนิคการเคลือบแบบสปัตเตอร์ (Sputter) หรือ CVD (Chemical Vapor Deposition) เพื่อเป็นเครื่องมือเคลือบชั้นฟิล์มบางที่ความหนา 600 ถึง 1000 อังสตรอม [7]

ในปัจจุบัน โลหะ โครเมียมเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้สร้างโพโตมาส์กแบบฮาร์ดมาส์ก มากที่สุด เนื่องจากมีคุณสมบัติการสะท้อนแสงกลับได้ดีมาก (High reflective) และยังสามารถสร้างชั้นฟิล์มที่ทำหน้าที่เป็นชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับได้ดี (Anti-reflective) โดยการเคลือบชั้นฟิล์มโครเมียมอ็อกไซด์ นอกจากนี้ยังมีความทนทานต่อการกัดกร่อนสารเคมีได้ดีและทำให้อายุการใช้งานของแผ่นโพโตมาส์กสูง มีคุณสมบัติในการยึดติดต่อพื้นผิวกระจกสูงมาก และสามารถสร้างลายวงจรที่มีขนาดเล็กโดยทั่วไปได้ดี โครงสร้างหน้าตัดของโพโตมาส์กดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ภาพหน้าตัดของแผ่นโพโตมาส์ก

คุณสมบัติเฉพาะที่สำคัญของฐานรองกระจกโพโตมาส์กนั้น ต้องมีความราบเรียบสูง (High surface flatness) มีอัตราการดูดกลืนแสงน้อยที่สุด (Low refractive index) การขยายตัวเชิงความร้อนต่ำ (Low thermal expansion) และมีจุดบกพร่องของฐานรองน้อยที่สุด (Low defect density) ดังตารางที่ 3.1 แสดงถึงคุณสมบัติส่วนประกอบ ทางเคมีและฟิสิกส์ในเนื้อวัสดุที่ใช้ทำฐานรองโพโตมาส์ก และรูปที่ 3.6 เป็นเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านต่อชั้นสารวัสดุ โดยมีแกน x เป็นความยาวคลื่นแสงที่ความยาวคลื่นแสงต่างๆ ในช่วงสเปกตรัมของแหล่งจ่ายแบบหลอดไอระเหยปรอท ส่วนแกน y เป็นเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงที่ตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสง จากรูปจะเห็นได้ว่าวัสดุแบบกระจกควอทซ์ มีความสามารถการส่องผ่านแสงดีที่สุด แต่จะมีขั้นตอนการสร้างที่ซับซ้อนมากกว่าเนื่องจากต้องใช้อุณหภูมิในการหลอมเหลวมากถึง 1120 องศาเซลเซียส และเป็นวัสดุที่ทำมาจากสารซิลิคอนที่มีความบริสุทธิ์สูงมาก นอกจากนี้ยังมีต้นทุนการผลิตที่สูงกว่าแบบอื่นๆ

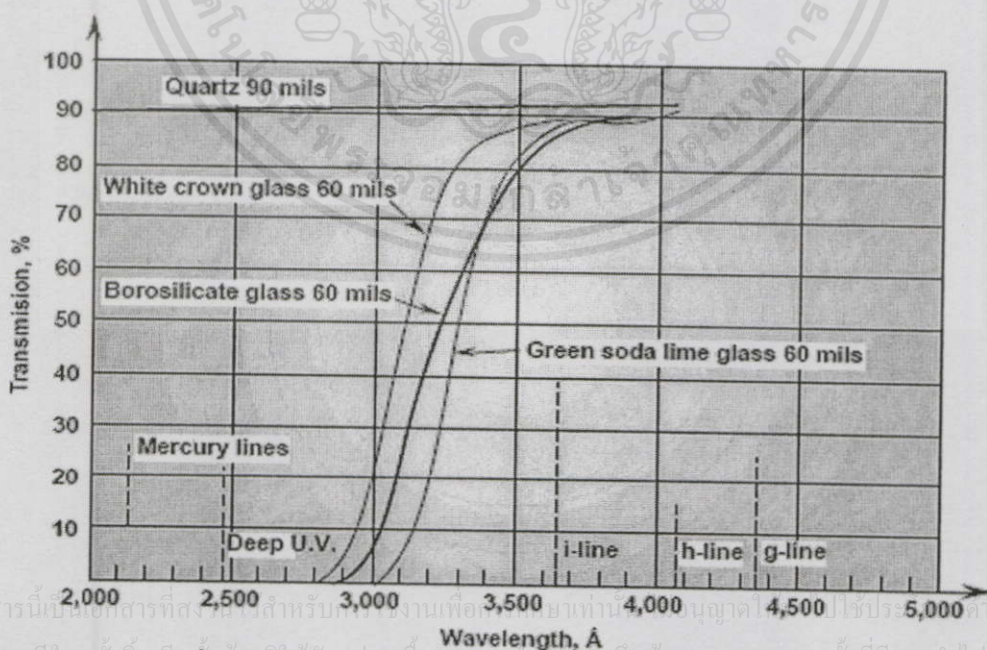
3.3 การสร้างต้นแบบลายวงจรโพโตมาส์ก

แผ่นโพโตมาส์กต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีขนาด 3×5 ตารางนิ้ว หนา 0.10 นิ้ว ทำมาจากแก้วควอทซ์ถูกเคลือบฟิล์มโลหะโครเมียมและโครเมียมอ็อกไซด์ ($\text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3$) หนา 800 อังสตรอมผลิตจากบริษัท Ulcoat Tokyo และเป็นขนาดที่สามารถใช้การได้เป็นอย่างดีสำหรับเครื่องถ่ายแบบ

ลายวงจรโปรเจกชันสเต็ปเปอร์รี่หรือ Ultratech รุ่น Nanotech 190 โดยที่กระบวนการผลิตกระจก ดันแบบโฟโตมาส์กของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์นั้นจะรวมถึงการเลือกใช้แผ่นกระจก ดันแบบตามขนาดต่างๆ ที่สั่งมาจากต่างประเทศ เพื่อให้เหมาะสมกับเครื่องถ่ายลายวงจรชนิดนั้นๆ สำหรับเครื่องจักรในกระบวนการสร้างกระจกดันแบบของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ นั้นสามารถรองรับการสร้างลายวงจรลงบนชิ้นงานขนาดตั้งแต่ 1 นิ้ว ถึง 6 นิ้ว ได้ และไม่มีข้อจำกัด ในรูปร่างของชิ้นงาน เช่น สี่เหลี่ยมหรือวงกลม เป็นต้น

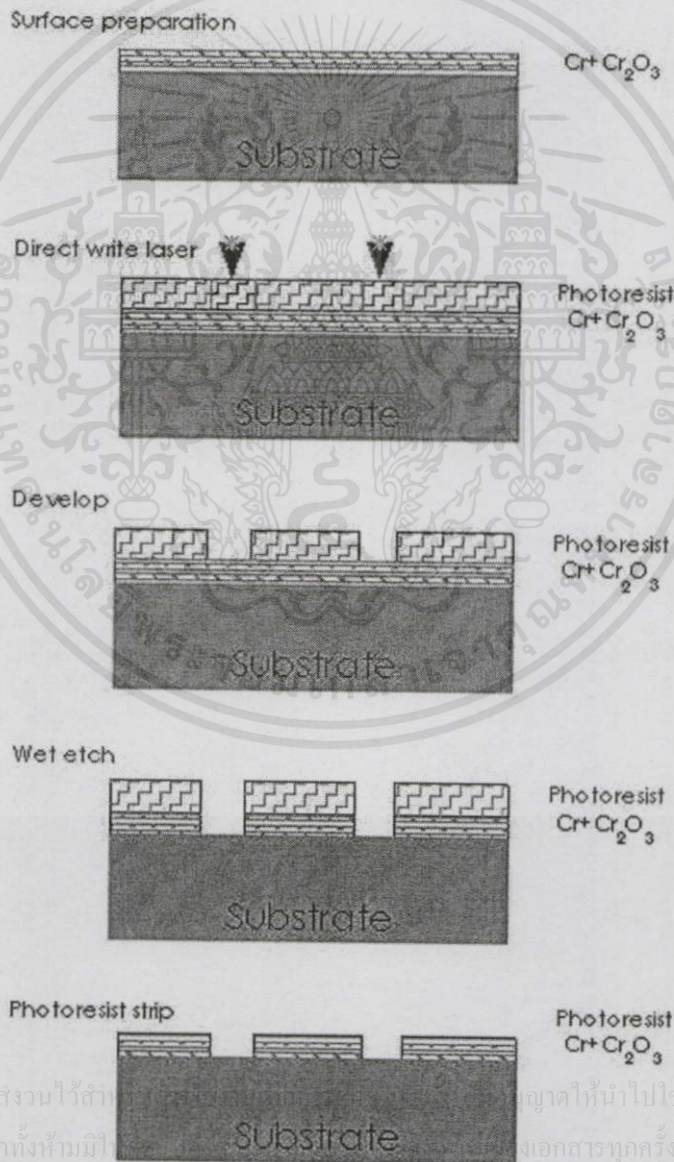
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติเฉพาะของฐานรองโฟโตมาส์ก

Characteristic	Type of Glass			
	SLW (Soda lime)	SL (White crown)	LE-30 (Low-expansion)	Qz (Fused quartz)
Chemical composition, %				
SiO ₂	73	70	60	100
B ₂ O ₃	1		5	
Al ₂ O ₃			15	
Na ₂ O	15	8		
K ₂ O	1	9		
CaO, MgO	10	12	20	
Others		1		
Physical properties				
Thermal expansion (10 ⁻⁶), inches/°C	9.4	9.3	3.7	0.5
Transformation temperature, °C	542	533	686	1120
Refractive index, N _D	1.52	1.52	1.53	1.46
Young modulus, kg/mm ²	7200	7340	7540	7410
Knoop hardness, kg/mm ²	540	530	657	615
Electric resistivity (Ω·cm)	1012	1015	1015	1018
Specific gravity	2.50	2.56	2.58	2.20



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานเพื่อการใช้งานเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้
 ปรากฏในสื่ออื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์
 รูปที่ 3.6 แสดงคุณสมบัติการส่องผ่านแสงของแต่ละชนิดวัสดุ

กระบวนการผลิตแผ่นโฟโตมาส์กโดยทั่วไปของศูนย์ TMEC ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก ดังนี้ การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นกระจกต้นแบบและเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงด้วยเครื่องเคลือบยี่ห้อ Polos รุ่น MCD-200 สามารถสร้างชั้นฟิล์มหนา 5000 อังสตรอม นอกจากนี้เมื่อสร้างชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงแล้ว จำเป็นต้องอบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงเพื่อให้สารละลายในชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงระเหยออกไปโดยใช้แทนความร้อน ยี่ห้อ EMS รุ่น 1000 ซึ่งสามารถสร้างอุณหภูมิได้ถึง 200 ± 1 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังสามารถรองรับชิ้นงานได้ถึงขนาด 6 นิ้ว จากนั้นทำการฉายแสงเลเซอร์ลงไปยังชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นกระจกต้นแบบเพื่อสร้างลายวงจร โดยใช้ เครื่องสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบ PG ยี่ห้อ Heidelberg Instrument รุ่น Direct Write Laser-200 (DWL-200)

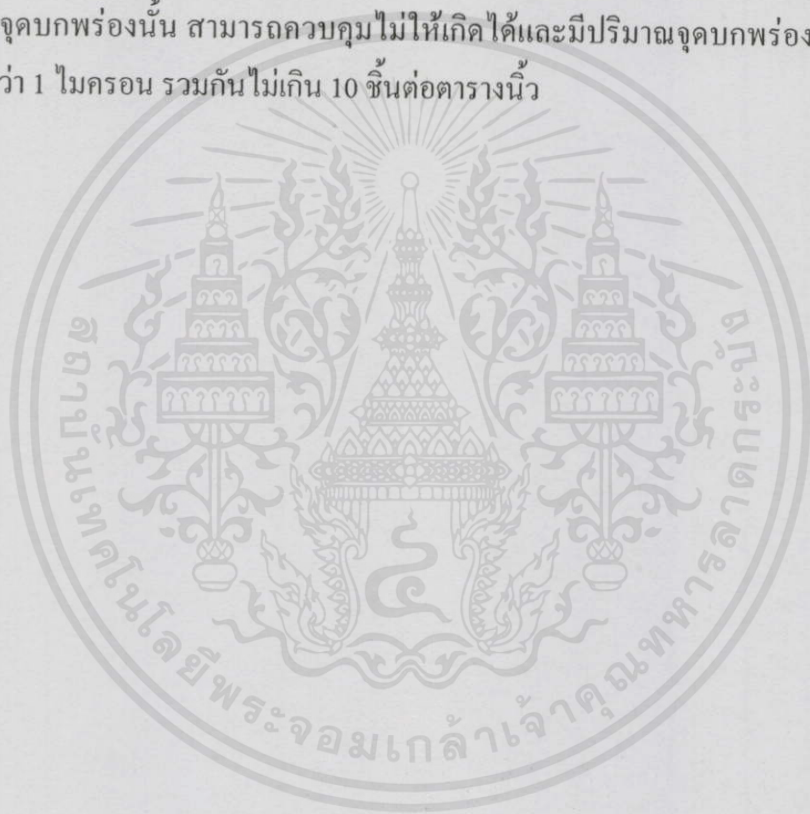


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้

ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.7 กระบวนการสร้างแผ่นโฟโตมาส์ก

โดยที่ เครื่อง DWL-200 นี้ สามารถรองรับลายวงจรจากการออกแบบด้วยโปรแกรมต่างๆ เช่น L-edit หรือ AutoCAD ในรูปแบบไฟล์ชนิด CIF, GDSII และ DXF เป็นต้น โดยสามารถสร้างลายวงจรได้เล็กที่สุด (Critical Dimension, CD) ได้คือ 1 ไมครอน มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ จากลวดลายที่ได้ออกแบบไว้และมีความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่ง ในช่วง ± 0.5 ไมครอน จากตำแหน่งอ้างอิง จากนั้นจะทำการล้างลายวงจร, กัดลายโลหะโครเมียม, ล้างชั้นฟิล์ม น้ำยาไวแสงส่วนที่เหลือออก และล้างทำความสะอาดแผ่นกระจกต้นแบบด้วยเครื่อง Develop-Etch-Strip-Clean 1 (DESC-1) ที่ทางศูนย์ TMEC ได้พัฒนาขึ้นมาเอง จากนั้นจะตรวจสอบขนาดและตำแหน่งของลายวงจรด้วยโปรแกรมการวัดในเครื่อง DWL-200 ในส่วนของจุดบกพร่องนั้น จะตรวจเทียบด้วยกล้องจุลทรรศน์ทางแสงโดยจะตรวจในทุกพื้นที่แบบ 100 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนของปริมาณของจุดบกพร่องนั้น สามารถควบคุมไม่ให้เกิดได้และมีปริมาณจุดบกพร่องชนิดอื่นๆ ที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน รวมกันไม่เกิน 10 ชิ้นต่อตารางนิ้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองและผลการทดลอง

จากพื้นฐานกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีที่มีพื้นฐานอยู่สองชนิด คือ ชนิดบวกและลบ ซึ่งแต่ชนิดนั้นมีจุดประสงค์การใช้งานที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับกระบวนการออกแบบลายวงจรที่ใช้งาน ส่วนโครงสร้างสามมิติของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงนั้นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับระดับพลังงานแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ใช้ในการฉายแสงยังชั้นน้ำยาไวแสงที่ถูกเคลือบบนเวเฟอร์นั้นๆ ความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงจะถูกแปรเปลี่ยนโครงสร้างซึ่งเป็นไปตามปฏิกิริยาแสง ฉะนั้นการเลือกใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก จึงมีเหมาะสมที่สุดในการสร้างลายวงจรที่ต้องการ โครงสร้างแบบจุลภาคสามมิติ เนื่องจากน้ำยาไวแสงชนิดบวกมีคุณสมบัติเฉพาะที่สามารถรักษาการเกาะยึดและทนทานต่อสารเคมีได้ดี ซึ่งสารไวแสงในน้ำยาไวแสงชนิดบวกได้แก่ PAC ซึ่งมีรากฐานมาจาก ไดอะโซเนพโทควิโนน ซึ่งขณะยังไม่มีการฉายแสง DNQ จะรักษาสภาพของสาร เรซินให้ยังคงแข็งตัวหรือยับยั้งการอ่อนตัวและเมื่อสารไวแสงถูกทำการฉายแสงด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตจะทำให้ DNQ กลายสภาพเป็นตัวเร่งการอ่อนตัวของเรซินนั้นๆ และเป็นไปตามระดับปริมาณพลังงานแสงที่ใช้ฉายแสงซึ่งจะสามารถทำการล้างลายด้วยน้ำยาล้างลายเพื่อให้เกิดโครงสร้างจุลภาคสามมิติบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงได้

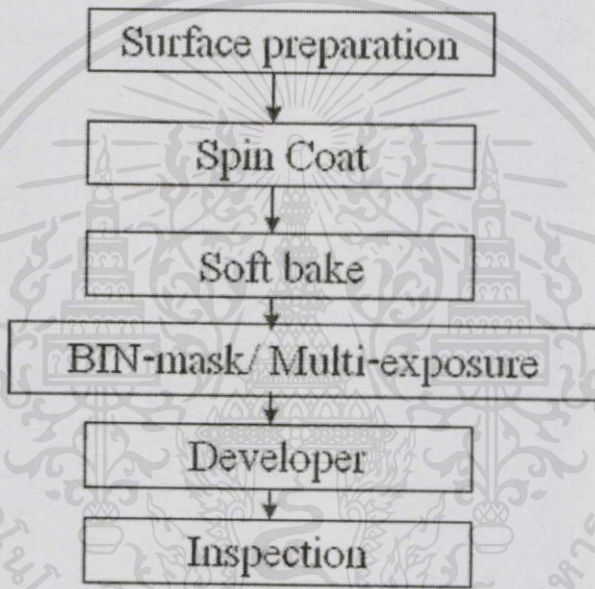
ในบทนี้จะกล่าวถึงการสร้างลวดลายโครงสร้างจุลภาคสามมิติบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงซึ่งประกอบด้วยสองเทคนิค คือ การฉายแสงซ้ำโดยเทคนิคแปรเปลี่ยนระดับพลังงานแสงโดยตรงจากแหล่งจ่ายแสง และการใช้เทคนิคโฟโตมาสก์แบบเกรย์สเกล

4.1 การสร้างลายจุลภาคสามมิติด้วยเทคนิคแปรเปลี่ยนพลังงานแสงโดยตรงจากแหล่งจ่ายแสง [12]

การสร้างลวดลายจุลภาคสามมิติบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง โดยใช้เทคนิคการแปรเปลี่ยนระดับพลังงานแสงโดยตรงจากแหล่งจ่ายพลังงานแสงนั้น เป็นวิธีการสร้างลายวงจรที่อ้างอิงจากกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรที่ใช้งานโดยทั่วไป [7, 17] รูปที่ 4.1 แสดงกระบวนการผลิตโฟโตลิโธกราฟี ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนกระบวนการหลักได้แก่ การเตรียมชิ้นงาน การเคลือบน้ำยาไวแสง การอบน้ำยาไวแสง การถ่ายแบบลายวงจร การล้างลายน้ำยาไวแสง และการตรวจสอบคุณภาพของลวดลายน้ำยาไวแสงหลังการล้างลายวงจร มีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2

กระบวนการสร้างลวดลายจุลภาคสามมิติด้วยเทคนิคนี้จะเน้นความสำคัญในส่วนกระบวนการเคลือบน้ำยาไวแสงและการฉายแสงเพื่อถ่ายแบบลายวงจร เนื่องจากเป็นกระบวนการหลักในการกำหนดค่าความหนาและความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่จะใช้งานได้อย่าง

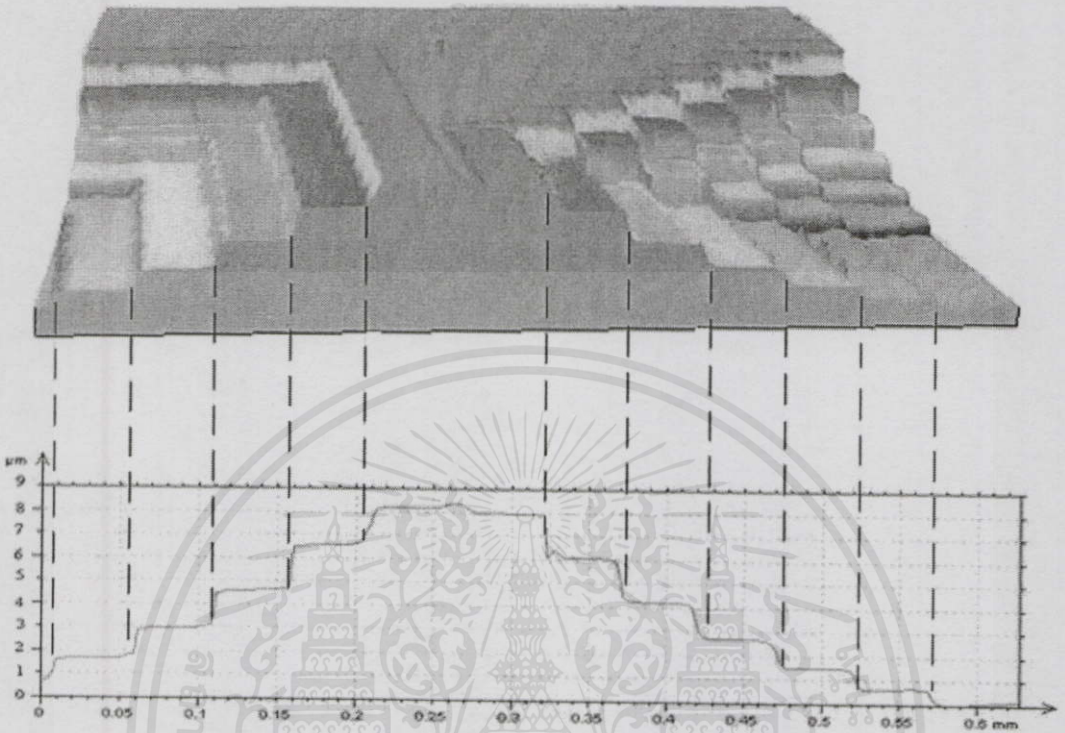
ถูกต้องตามที่ต้องการแล้วยังใช้เป็นตัวกำหนดโครงสร้างจุลภาคสามมิติให้แก่ชั้นฟิล์มนำยาไวแสงจากกระบวนการฉายแสง นอกจากนี้ความสามารถและประสิทธิภาพของเครื่องถ่ายแบบลายวงจรเป็นองค์ประกอบทางเครื่องจักรอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญในการควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่แทนฐานรองเวเฟอร์ในขณะทำการฉายแสงได้อย่างแม่นยำในระหว่างการควบคุมค่าโคซพลังงานแสงอัลตราไวโอเล็ตด้วยค่าโคซแสงต่างๆ ที่จะใช้ในการฉายแสงได้อย่างถูกต้อง งานวิจัยนี้ใช้เครื่องถ่ายแบบลายวงจรแบบโปรเจกชันสเต็ปเปอร์เป็นเครื่องมือหลัก โดยที่ระบบโปรเจกชันของเครื่องจักรนี้มีความละเอียดของระบบเลนส์เท่ากับ 2.0 ไมครอน มีความแม่นยำของระบบมอเตอร์ขับเคลื่อนฐานรองที่ 40 นาโนเมตร และความสามารถโดยรวมของระบบขับเคลื่อนฐานรองของเครื่องจักรอยู่ที่ 70 นาโนเมตร (System accuracy)



รูปที่ 4.1 กระบวนการ โฟโตลิโธกราฟีแบบทั่วไปและแบบแปรเปลี่ยนค่าพลังงานแสงโดยตรงจากแหล่งจ่ายแสง

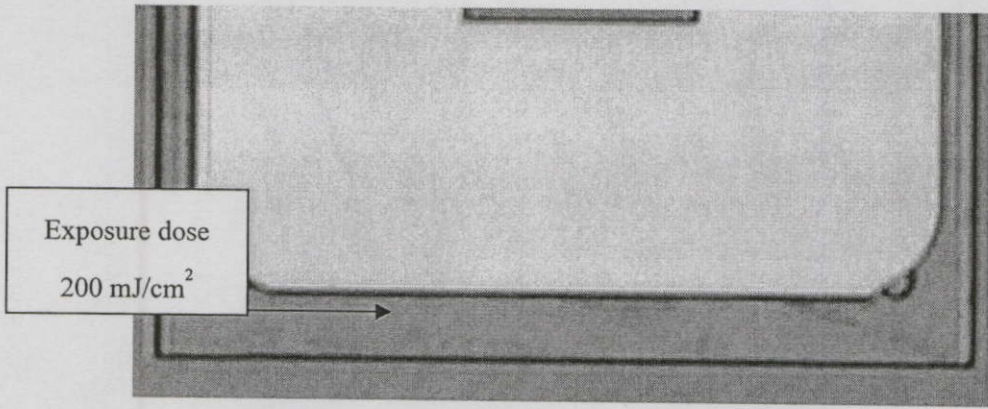
หลังจากได้ชั้นงานเวเฟอร์ที่ถูกเคลือบนำยาไวแสงด้วยค่าความหนาและค่าความสม่ำเสมอของนำยาไวแสงอย่างเหมาะสมและผ่านการอบนำยาไวแสงแล้ว นำมาทำการถ่ายแบบลายวงจรด้วยแผ่นกระจกโฟโตมาส์กต้นแบบเพื่อทำการถ่ายแบบลายวงจรยังแผ่นชั้นงานเวเฟอร์โดยอาศัยความแม่นยำของระบบเครื่องสเต็ปเปอร์เป็นตัวกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ควบคุมแทนฐานรองเพื่อกำหนดตำแหน่งการฉายแสงและควบคุมปริมาณค่าโคซพลังงานแสง เพื่อทำการฉายแสงซ้ำได้อย่างถูกต้องตามปริมาณค่าแสงตามที่กำหนดด้วยตำแหน่งการฉายแสงที่ต้องการให้เกิดการตอบสนองทางเคมีแสงทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับค่าความไวแสงของนำยาไวแสงแต่ละชนิดนำยาไวแสงนั้นๆ ความสัมพันธ์ของระดับพลังงานแสงซึ่งจะส่งผลต่อโครงสร้างชั้นความหนาฟิล์มที่ได้หลัง

ขั้นตอนการล้างลายน้ำยาไวแสงและผลที่ได้ของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงจะมีความหนาที่แตกต่างกันดังรูปที่ 4.2 จากรูปเป็นลวดลายชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงแบบขั้นบันไดซึ่งสามารถสร้างโดยเทคนิควิธีการนี้

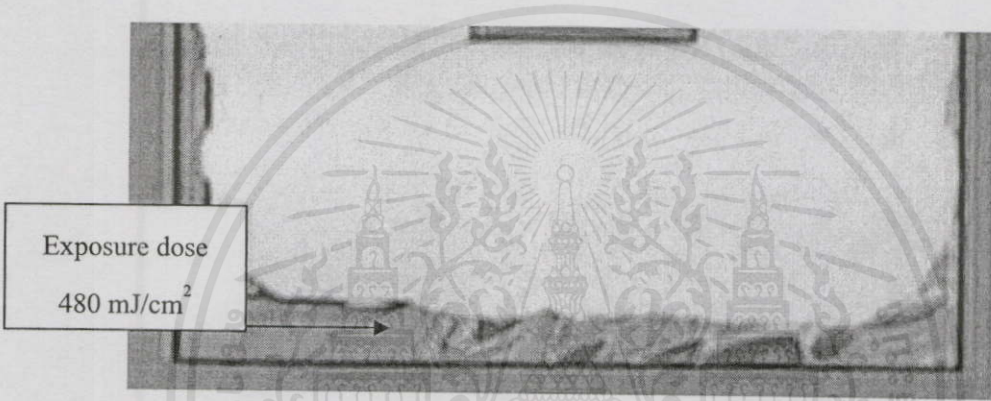


รูปที่ 4.2 ลวดลายจุดภาคสามมิติของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงแบบขั้นบันได

จากการทดลองเบื้องต้นพบว่าเมื่อพลังงานแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ใช้งานมีระดับปริมาณค่าแสงเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความหนาน้ำยาไวแสงน้อยลงเป็นไปตามปริมาณค่าแสงนั้นๆ และเมื่อระดับปริมาณค่าแสงมากขึ้นถึงระดับใกล้พื้นผิวของแผ่นเวเฟอร์จะพบว่าคุณภาพของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงมีความขรุขระมากขึ้นดังรูปที่ 4.3 (ข) ซึ่งเป็นการฉายแสงด้วยพลังงานที่ค่าโดสแสงเท่า 480 mJ/cm^2 และเมื่อเปรียบเทียบกับภาพในรูปที่ 4.3 (ก) จะพบว่าพื้นผิวฟิล์มน้ำยาไวแสงตรงส่วนที่ถูกฉายแสงนี้ จะมีความราบเรียบและสม่ำเสมอมากกว่าซึ่งถูกฉายแสงที่ค่าโดสแสงเท่ากับ 200 mJ/cm^2 ซึ่งจะได้ค่าความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงโดยประมาณเท่ากับ 5 ไมครอน จากความหนาน้ำยาไวแสงที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นเวเฟอร์หนาเท่ากับ 10 ไมครอน ทั้งนี้ปัจจัยหลักของปัญหาความขรุขระและความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงเกิดจากกระบวนการเคลือบน้ำยาไวแสงและประสิทธิภาพของเครื่องเคลือบน้ำยาไวแสงนั่นเอง ดังนั้นการควบคุมค่าความสม่ำเสมอและความหนาน้ำยาไวแสงนั้น จึงถือได้ว่ามีความสำคัญอย่างมากในการควบคุมคุณภาพของโครงสร้างจุดภาคสามมิติบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง ส่วนการสร้างโครงสร้างจุดภาคสามมิติที่มีรูปแบบรูปร่างโค้งและเว้าจะไม่สามารถสร้างโดยเทคนิควิธีการแบบนี้ได้ ดังนั้นจึงต้องอาศัยการถ่ายแบบลายวงจรแบบเทคนิคกรย์สเกล



(ก)



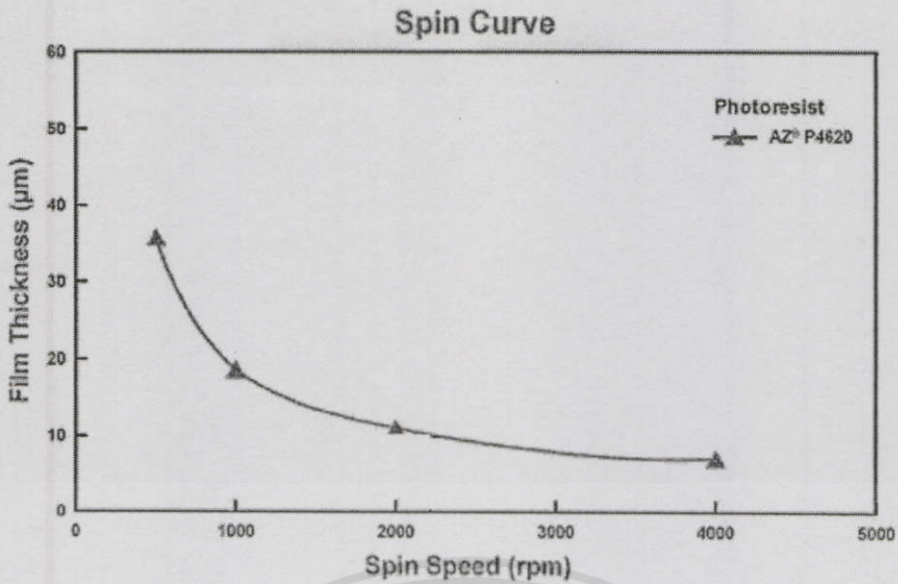
(ข)

รูปที่ 4.3 ลักษณะพื้นผิวของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง (ก) ภาพลวดลายน้ำยาไวแสงที่ถูกฉายแสงที่โดสแสงเท่ากับ 200 mJ/cm^2 (ข) ภาพลวดลายน้ำยาไวแสงที่ถูกฉายแสงที่โดสแสงเท่ากับ 480 mJ/cm^2

4.1.1 การเตรียมชั้นงานเวเฟอร์และการเคลือบน้ำยาไวแสง

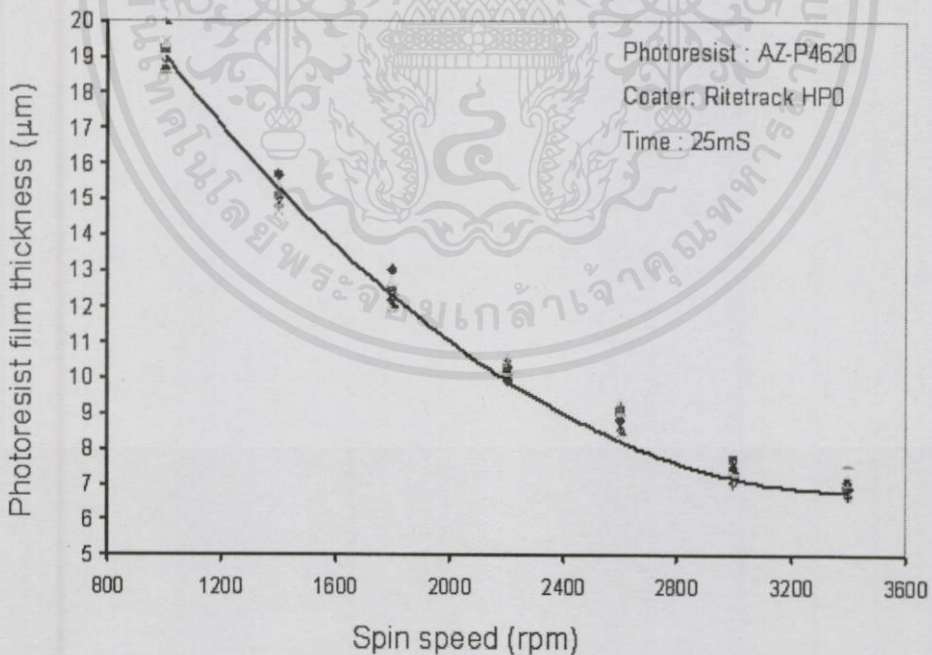
งานวิจัยนี้ เลือกใช้เวเฟอร์แบบซิลิคอนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 3 นิ้ว ระยะเวลาของผิวเวเฟอร์ที่ระนาบ (100) ทำความสะอาดผิวหน้าเวเฟอร์โดยใช้ น้ำยาอะซิโตน (Acetone) ด้วยเทคนิคหมุนปั่นแห้งด้วยความเร็วสูงซึ่งวิธีการทำความสะอาดแบบนี้จะทำให้แผ่นเวเฟอร์มีความสะอาดสูง หลังจากนั้นนำเวเฟอร์ไปทำการเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยน้ำยาไวแสงยี่ห้อ Clariantz เบอร์ AZ-P4620 [20] ซึ่งเป็นน้ำยาไวแสงชนิดบวกแบบหนาที่สามารถควบคุมความหนาของน้ำยาไวแสงโดยการหมุนเคลือบที่ความหนาดั้งแต่ 8 ไมครอนถึง 35 ไมครอนดังแสดงที่รูปที่ 4.4 แสดงถึงความหนาของน้ำยาไวแสงซึ่งจะถูกแปรเปลี่ยนไปตามความเร็วรอบของเครื่องเคลือบแบบหมุนเคลือบ

ในการวิจัยนี้ทำการทดลองเพื่อหาค่าความหนาฟิล์มของน้ำยาไวแสงที่ความเร็วรอบมอเตอร์ที่สอง โดยกำหนดความเร็วรอบต่างๆ กันดังนี้ คือ 1000, 1400, 1800, 2200, 2600, 3000 และ 3400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 25 วินาที



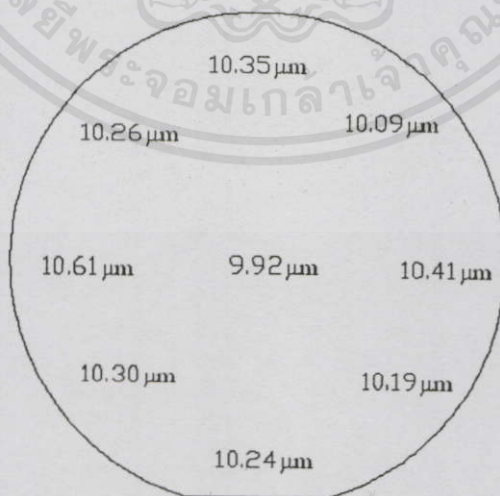
รูปที่ 4.4 ความหนาชั้นฟิล์มจากการกระบวนการหมุนเคลือบของน้ำยาไวแสงเบอร์ AZ-P4620 [20]

จากนั้นนำแผ่นเวเฟอร์ที่ทำกรทดลองตามเงื่อนไขความเร็วรอบต่างๆ ไปวัดค่าความหนา ณ จุดต่างๆ 9 จุด โดยเครื่องวัดความหนาเทนคอร์รุ่น P12 (Tencor-P12) และนำค่าที่วัดได้จากจุดวัดต่างๆ หาค่าความหนาเฉลี่ยและค่าความสม่ำเสมอของความหนาน้ำยาไวแสงของแต่ละแผ่นเวเฟอร์ดังรูปที่ 4.5 เพื่อหาเงื่อนไขพารามิเตอร์ของเครื่องหมุนเคลือบที่เหมาะสมต่อไป



รูปที่ 4.5 ค่าความหนาน้ำยาไวแสงเบอร์ AZ-P4620 ที่ได้จากความเร็วรอบที่สองของเครื่องหมุนเคลือบที่ความเร็วรอบ 1000 rpm ถึง 3400 rpm

ผลการทดลองจากกราฟที่ 4.5 โดยใช้หน้ายาไวแสงเบอร์ AZ-P4620 พบว่าเมื่อความเร็วรอบของมอเตอร์สูงขึ้นทำให้ความหนาของฟิล์มหน้ายาไวแสงมีความหนาน้อยลงและถึงจุดอิมพัลส์ที่ความเร็วรอบที่ 3400 รอบต่อวินาที ที่ค่าความหนาดำสุดที่ 8 ไมครอนโดยประมาณ นอกจากนี้ยังพบค่าความสม่ำเสมอและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละเวเฟอร์จะมีความแปรปรวนมากในช่วงความเร็วรอบมอเตอร์ที่ต่ำกว่า 1500 รอบต่อวินาที และช่วงความเร็วรอบสูง และพบค่าความหนาที่เหมาะสมสำหรับการนำไปสร้างลวดลายโฟโตลิโธกราฟีแบบสามมิติที่ความหนาเท่า 10 ไมครอนหรือที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่สองเท่ากับ 2200 รอบต่อวินาที ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงกำหนดความหนาของชั้นฟิล์มหน้ายาไวแสงที่ 10 ไมครอนเป็นมาตรฐานค่าความหนาของชั้นฟิล์มหน้ายาไวแสงที่ใช้สำหรับงานวิจัย และทำการอบโดยใช้ตู้อบแบบคอนเวกชัน (Convection oven) ที่อุณหภูมิตู้อบเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาทีซึ่งเป็นเวลาที่เหมาะสมที่สุดในขั้นตอนการเคลือบหน้ายาไวแสงนี้เป็นกระบวนการหนึ่งที่สำคัญต่อชั้นหน้าฟิล์มหน้ายาไวแสงที่ได้ เนื่องจากค่าความสม่ำเสมอของหน้ายาไวแสงที่ได้นั้นจะมีผลโดยตรงต่อโครงสร้างจุลภาคสามมิติหลังจากการถ่ายแบบลายวงจรการล้างลวดลาย และหลังจากการกัดแบบแห้ง ฉะนั้น พารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับหน้ายาไวแสง เช่น ค่าเฉลี่ย ความสม่ำเสมอ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของหน้ายาไวแสง จึงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากเพื่อใช้เป็นตัวกำหนดคุณภาพของชั้นฟิล์มหน้ายาไวแสงที่ได้หลังการเคลือบ ตัวอย่างจากผลการทดลองนี้ที่ความเร็วรอบที่สองเท่ากับ 2200 รอบต่อวินาที พบว่าความหนาของหน้ายาไวแสงที่วัดจำนวน 9 จุด ได้ค่าความหนา ณ จุดต่างๆ ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งสามารถทำความหนาเฉลี่ยได้ที่ 10.26 ไมครอน ค่าความสม่ำเสมอเท่ากับ 3.4% และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้เท่ากับ 0.195 เพื่อเตรียมงานสำหรับการถ่ายแบบลายวงจรด้วยเครื่องสตีปเปอร์ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.6 ตำแหน่ง 9 จุดที่ทำการวัดค่าความหนาของหน้ายาไวแสงเบอร์ AZ-P4620 ที่ความเร็วเท่ากับ 2200 รอบต่อวินาที

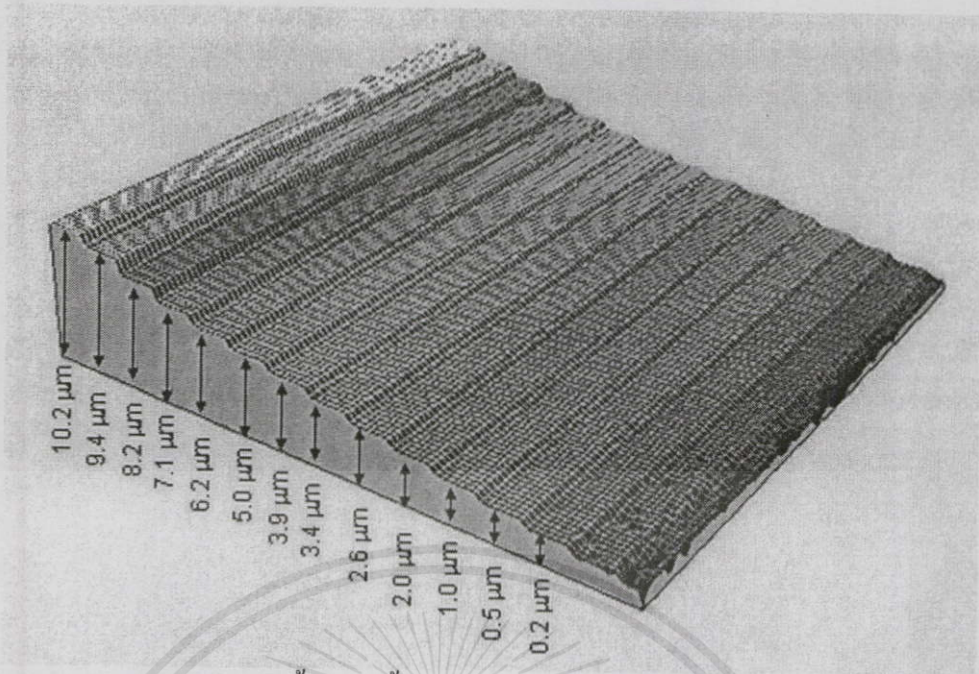
4.1.2 การหาความสัมพันธ์ค่าความหนาฟิล์มน้ำยาไวแสงกับระดับพลังงานแสงที่ใช้ฉาย

แสง

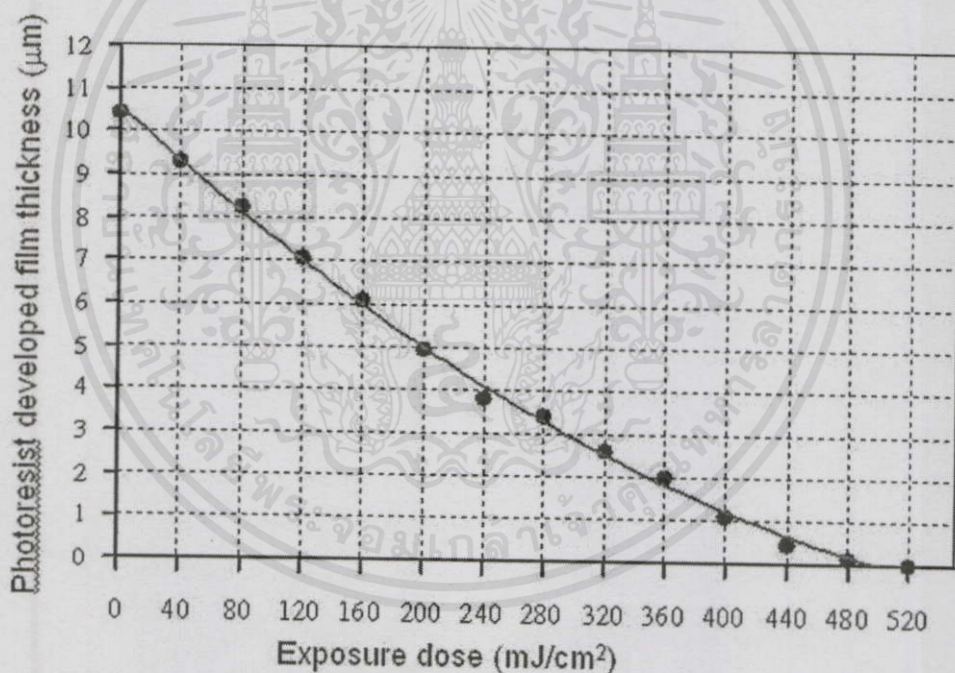
เมื่อชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ถูกฉายแสงด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นแสงที่เหมาะสมจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีแสงและอ่อนตัวในน้ำยาไวแสงชนิดบวกหลังจากการล้างลายน้ำยาไวแสงและก่อให้เกิดชั้นความหนาฟิล์มน้ำยาไวแสงที่มีระดับความหนาแตกต่างกันตามปริมาณค่าพลังงานแสงที่ใช้งานนั้นๆ ในขั้นตอนนี้เป็นารหาความสัมพันธ์ของค่าพลังงานแสงที่จะส่งต่อค่าความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ได้ โดยเริ่มจากการนำแผ่นเวเฟอร์ที่ถูกเคลือบน้ำยาไวแสงที่มีความหนาเท่ากับ 10 ไมครอน ไปทำการฉายแสงแบบชั้นบันไดและควบคุมปริมาณค่าโดสแสงโดยตรงจากแหล่งจ่ายแสงของเครื่องฉายแบบลายวงจรสเต็ปเปอร์ เป็นจำนวน 13 ลำดับ โดยการควบคุมปริมาณโดสแสงเพิ่มขึ้นในแต่ละลำดับที่ 40 mJ/cm^2 แล้วจึงนำเวเฟอร์ที่ได้ไปทำการล้างลายน้ำยาไวแสงด้วยน้ำยาล้างลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide, KOH) ต่อจากนั้นนำไปวัดค่าความหนาฟิล์มน้ำยาไวแสงโดยใช้เครื่อง Coherence Correlation Interferometer (CCI) [24] ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดความหนาระนาบพื้นผิวแบบไม่สัมผัสซึ่งงานโดยใช้เทคนิคทางแสงที่มีความละเอียดสูง ดังรูปที่ 4.7 เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าแสงที่ระดับพลังงานแสงต่างๆ ที่ใช้ในการฉายแสงยังชั้นฟิล์มของน้ำยาไวแสง ดังแสดงรูปที่ 4.8 เป็นจำลองสามมิติที่ถูกวัดโดยเครื่อง CCI และรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ค่าความหนาฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ได้ต่อปริมาณพลังงานแสงที่ใช้งาน



รูปที่ 4.7 เครื่องมือวัดความหนาระนาบพื้นผิวแบบไม่สัมผัสซึ่งงาน CCI รุ่น 3000 Å ของบริษัท Taylor Hobson precision.



รูปที่ 4.8 ภาพจำลองสามมิติของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงเบอร์ AZ-P4620 ที่วัดได้จากเครื่อง CCI



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์พลังงานแสงอัลตราไวโอเล็ต ต่อค่าความหนาน้ำยาไวแสง

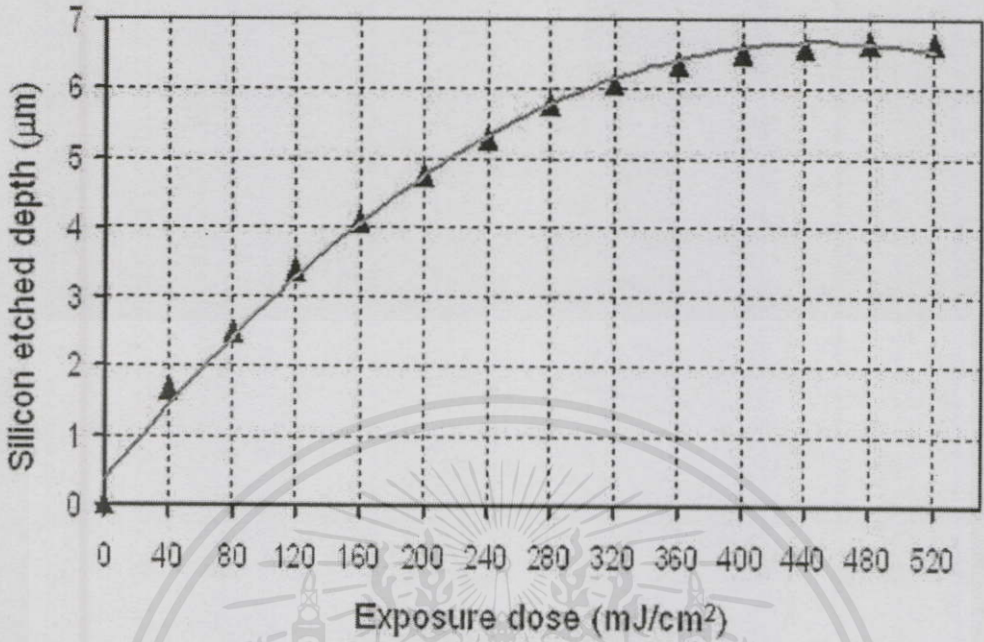
ผลการทดลองในกราฟรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าค่าความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงจะมีค่าความหนาที่น้อยลงเมื่อมีการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตด้วยพลังงานแสงที่ค่าโดสแสงมากขึ้นตามลำดับ โดยเริ่มจากความหนาฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ถูกเคลือบบนเวเฟอร์ชนิดซิลิคอนเท่ากับ 10 ไมครอน และเมื่อทำการฉายแสงด้วยโดสแสงเท่ากับ 40 mJ/cm² และเพิ่มค่าโดสแสงตามค่าทางด้านแกน x แบบเชิงเส้นตามลำดับจนถึง 520 mJ/cm² และเมื่อตรวจสอบผลค่าความหนาของ

ชั้นฟิล์มนำยาไวแสงที่ถูกฉายแสงตามแนวแกน y จะพบว่าความหนาหน้ายาไวแสงเริ่มมีค่าความหนาที่ลดลงเมื่อมีการฉายแสงด้วยโดสแสงที่โดสเท่ากับ 240 mJ/cm^2 หรือที่ความหนาหน้ายาไวแสงโดยประมาณที่ 3.8 ไมครอน จะพบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของหน้ายาไวแสงต่อจำนวนพลังงานแสงเริ่มลดน้อยลงและเริ่มอิมิตัวที่ระดับพลังงานแสงที่ 520 mJ/cm^2 เป็นต้นไป ซึ่งกรณีนี้หมายถึงระดับพลังงานแสงที่ใช้ในการฉายแสงมีค่ามากพอที่จะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีแสงต่อสารไวแสงจนถึงพื้นผิวบนเวเฟอร์ได้โดยสมบูรณ์ ส่วนค่าความหนาหน้ายาไวแสงตามแนวแกน y ที่ไม่ตอบสนองอย่างเชิงเส้นต่อค่าแสงตามค่าแสงแนวแกน x ทั้งนี้เกิดจากปฏิกิริยาแสงที่เกิดบนชั้นฟิล์มนำยาไวแสงนั้นๆ เป็นการเกิดจากปริมาณสัดส่วน โมเลกุลของสารไวแสงต่อปริมาณโปรตรอนของรังสีแสงอัลตราไวโอเล็ต [9] ซึ่งจะมีความหนาแน่นมากที่สุดตรงส่วนบนพื้นผิวของหน้ายาไวแสง จากนั้นจะเริ่มมีสัดส่วนที่น้อยลงตามความหนาชั้นฟิล์มนำยาไวแสง

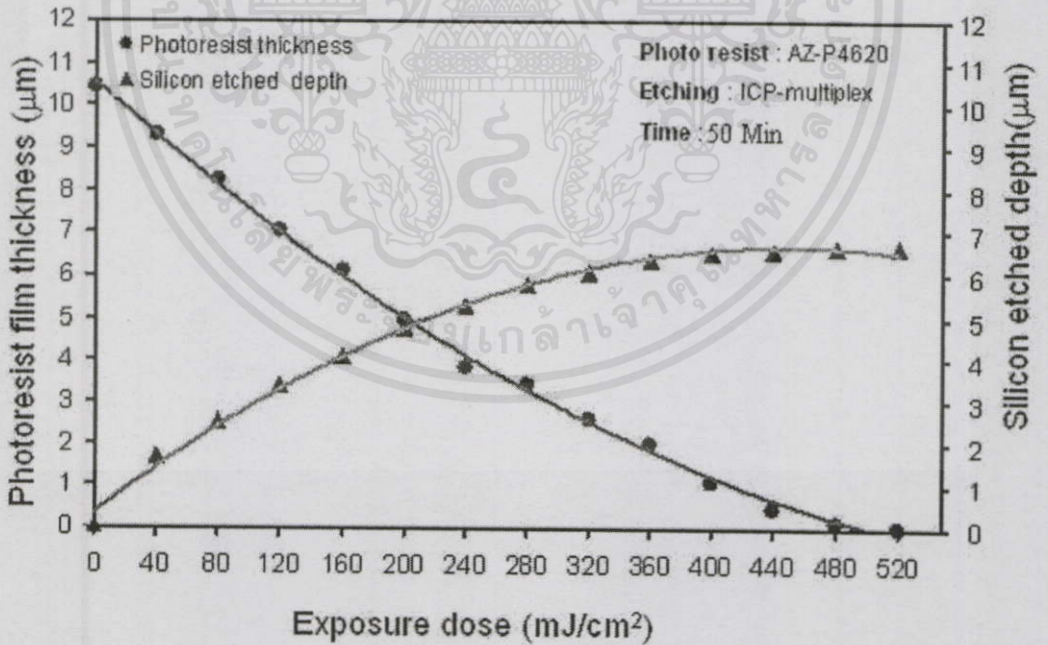
4.1.3 การหาความสัมพันธ์สัดส่วนการกัดแบบแห้งบนเวเฟอร์ชนิดซิลิคอนต่อชั้นหนาของนำยาไวแสง

เมื่อนำเวเฟอร์ที่ได้จากการฉายแสงเข้าแบบขั้นบันไดจากหัวข้อ 4.1.2 และผ่านการล้าง ลวดลายนำยาไวแสงแล้วนำไปทำการกัดลายวงจรด้วยเทคนิคการกัดแบบแห้งด้วยพลาสมาโดยใช้เครื่อง RIE ซึ่งจะเป็นกระบวนการทำงานในระบบสุญญากาศที่มีความดันประมาณ 4 มิลลิทอร์ ด้วย การเกิดปฏิกิริยาพาสมาของก๊าซ เตตระฟลูออริคาร์บอน (CF_4) ที่อัตราการไหล 20 Scm ในกระบวนการนี้ใช้กำลังงานของคอลย์ เท่ากับ 500 วัตต์ ที่ช่วงความถี่วิทยุ 13.56 เมกะเฮิร์ตซ์ และ กำลังงานความถี่ด้านเพลดท์เท่น เท่ากับ 550 วัตต์ เป็นเวลา 50 นาที จากนั้นนำเวเฟอร์ที่ได้ไปวัดหาค่าความลึกของเวเฟอร์ชนิดซิลิคอนที่ได้โดยใช้เครื่อง CCI นำผลค่าความลึกมาเปรียบเทียบกับผลของค่าความหนาหน้ายาไวแสงซึ่งเกิดจากการฉายแสงด้วยค่าโดสแสงอัลตราไวโอเล็ต ดังรูปที่ 4.10 เพื่อหาความสัมพันธ์อัตราการกัดบนเวเฟอร์ชนิดซิลิคอนและค่าความว่องไวการกัด ซึ่งผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่าค่าความลึกที่เกิดจากการกัดแบบแห้งนั้นเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่าความหนาหน้ายาไวแสง กล่าวคือ ค่าความลึกของพื้นผิวเวเฟอร์ที่ถูกกัดเซาะลงไปได้มากที่สุดนั้น โดยเฉพาะส่วนพื้นที่ๆ ไม่มีชั้นฟิล์มนำยาไวแสงปกคลุมอยู่และจะมีความลึกที่น้อยลงตามลำดับตามค่าความหนาของหน้ายาไวแสงที่มากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเวเฟอร์แบบซิลิคอน เมื่อทำการกัดแบบแห้งโดยใช้เวลาการกัดเท่ากับ 50 นาที พบว่ายังคงมีส่วนชั้นฟิล์มนำยาไวแสงเหลือปกคลุมพื้นผิวเวเฟอร์วัดได้เท่ากับ 0.5 ไมครอนจากความหนาหน้ายาไวแสงเฉลี่ยทั้งหมดเท่ากับ 10.28 ไมครอน และความลึกที่เกิดจากการกัดเซาะบนพื้นผิวเวเฟอร์ซิลิคอนที่ 6.5 ไมครอน และเมื่อนำไปหาค่าอัตราการกัดของเวเฟอร์ชนิดซิลิคอนและชั้นฟิล์มนำยาไวแสงตามสมการ 2.11 จะได้ค่าอัตราการกัดของเวเฟอร์เท่ากับ 0.13 ไมครอนต่อนาที และอัตราการกัดของชั้นฟิล์มนำยาไวแสง AZ-P4620 เท่ากับ 0.195 ไมครอนต่อนาที ส่วนความว่องไวของการกัดบนพื้นผิวเวเฟอร์ซิลิคอนต่อชั้นฟิล์มนำยาไวแสงตามสมการที่ 2.11

ได้เท่ากับ 0.66 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาหน้ายาไวแสงและความลึกของเวเฟอร์ซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 4.11

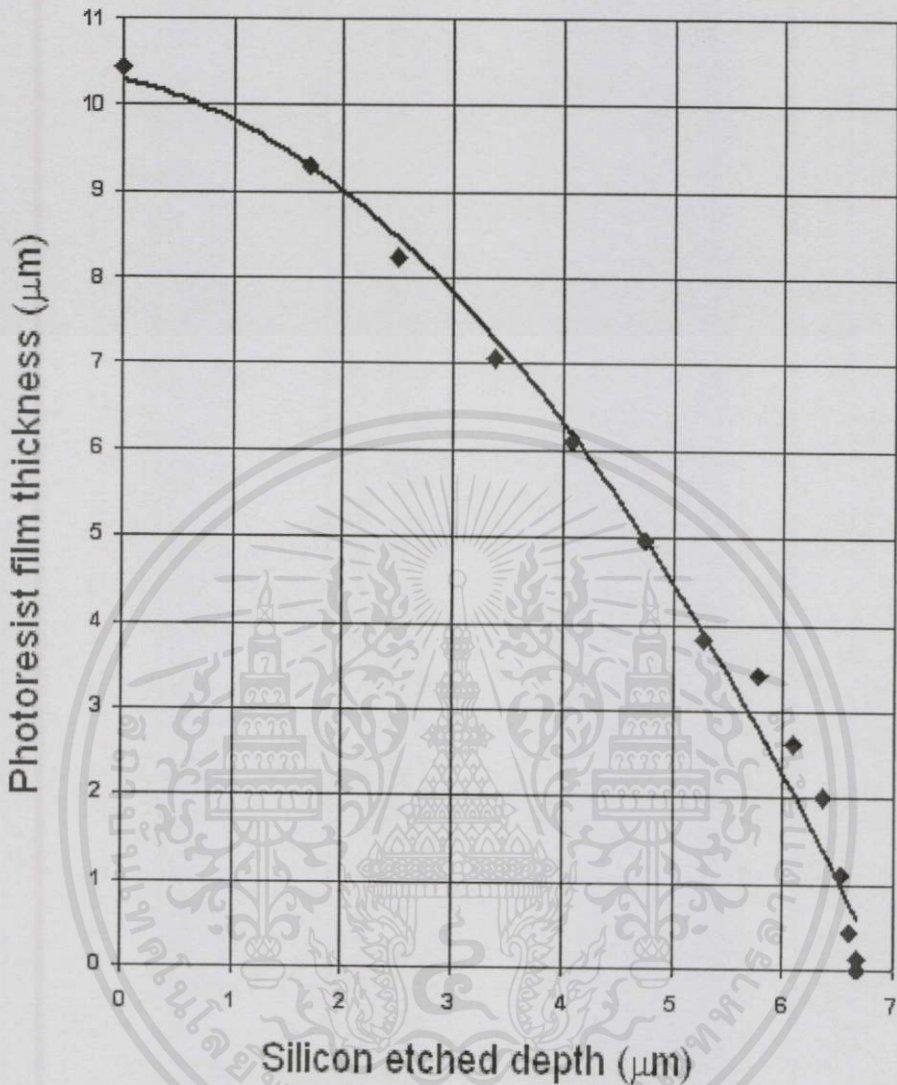


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์พลังงานแสงอัลตราไวโอเล็ตและค่าความหนาของหน้ายาไวแสง



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์พลังงานแสงอัลตราไวโอเล็ตต่อค่าความหนาฟิล์มหน้ายาไวแสง เอกสารนี้เป็น AZ-P4620 และค่าความลึกบนพื้นผิวเวเฟอร์ซิลิคอน ไม่ผ่านการใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำผลค่าความลึกจากการกัดแบบแห้งด้วยเครื่อง RIE มาเปรียบเทียบกับค่าความหนา
น้ำยาไวแสง หรือค่าความว่องไวการกัดดังแสดงดังรูปที่ 4.12

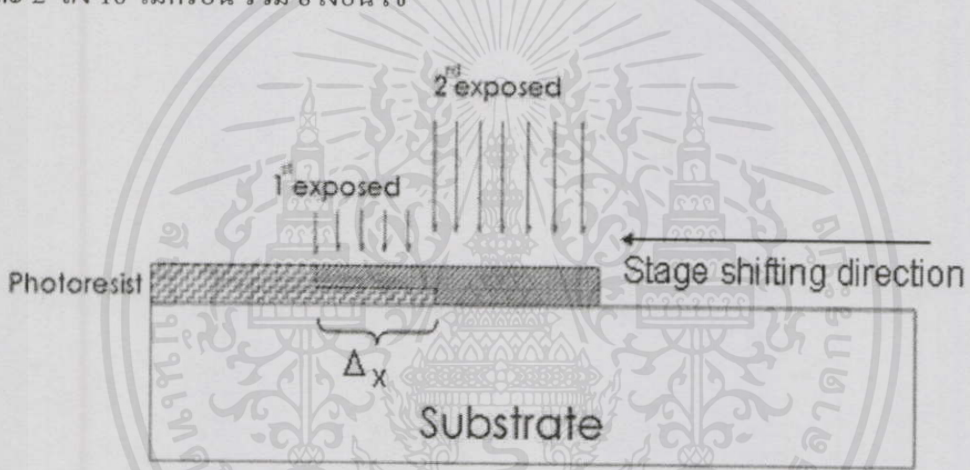


รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ของความว่องไวการกัดบนเวเฟอร์ซิลิคอนต่อชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง AZ-P4620

4.1.4 การศึกษาผลกระทบการแทรกสอดทางแสงในระบบโปรเจกชัน

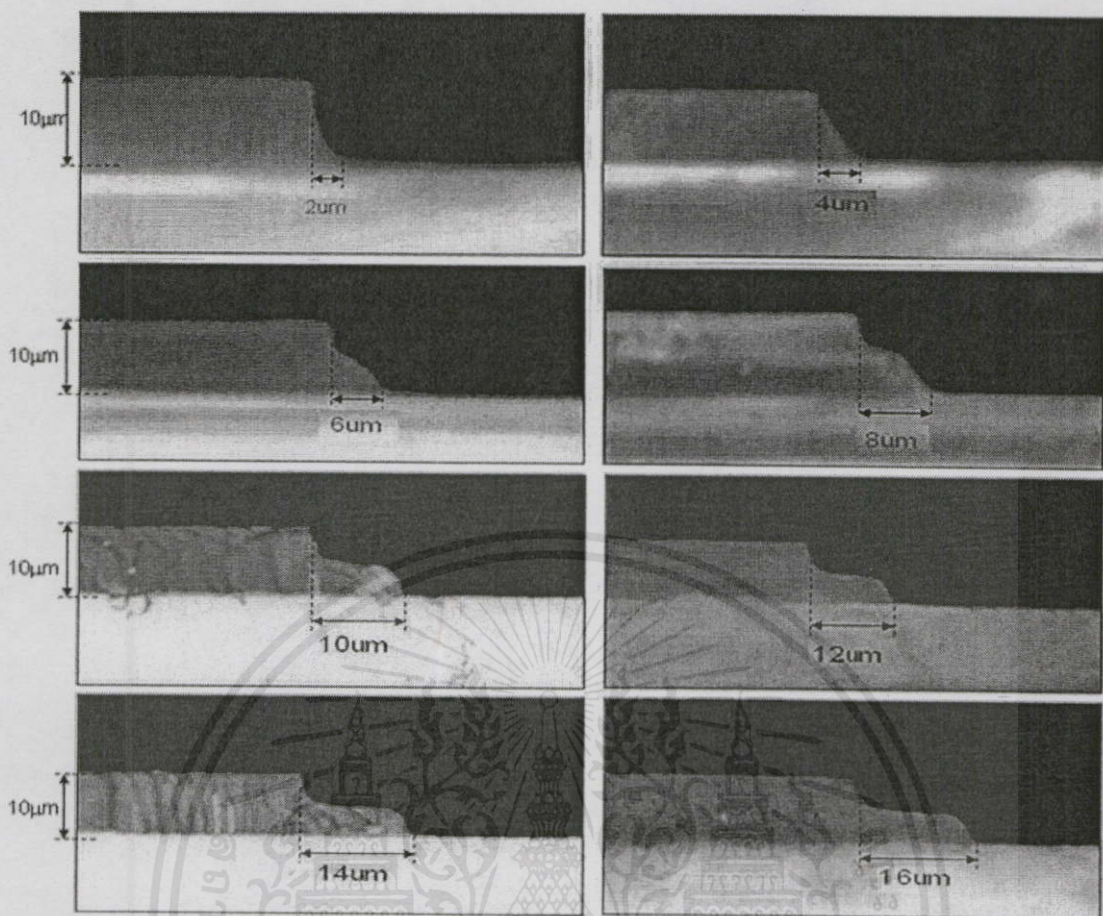
กระบวนการถ่ายแบบลายวงจรที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นการทำการวิจัยโดยใช้เครื่องถ่ายแบบลายวงจรโปรเจกชันสเต็ปเปอร์เป็นเครื่องมือหลัก ซึ่งระบบโปรเจกชันของเครื่องถ่ายแบบลายวงจรมีส่วนประกอบของเลนส์และกระจกแสงเป็นจำนวนมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.23 ในบทที่ 2 เมื่อรังสีแสงอัลตราไวโอเล็ตถูกฉายผ่านตามแนวขอบของลวดลายหรือช่องสลิตที่มีขนาดเล็กบนลวดลายแผ่นดินแบบโฟโตมาส์จะทำให้เกิดภาพเงาของลวดลายเหล่านั้นซึ่งเกิดจากการโค้งงอของลำแสงเหล่านั้นและถูกถ่ายแบบไปยังฟิล์มน้ำยาไวแสง หรือเรียกว่าปรากฏการณ์นี้ว่าผลกระทบดิฟเฟรคชัน (Diffraction effect) และอาจจะส่งผลกระทบต่อการสร้างลายวงจรที่มีขนาดเล็กในแนว

ระนาบของลวดลายบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองโดยใช้เทคนิคการฉายแสงซ้ำแบบขั้นบันได โดยกำหนดให้มีสองระดับดังรูปที่ 4.13 เพื่อศึกษาว่าระยะห่างของลายวงจรที่เล็กที่สุดตามแนวระนาบที่ซ้อนทับกันของทั้งสองลายวงจรที่จะถูกสร้างได้นั้นมีขนาดลายวงจรได้เล็กที่สุดเท่ากับเท่าไร จากเครื่องถ่ายแบบลายวงจร โปรเจคชันสเตปเปอร์ที่มีความละเอียดของระบบเลนส์ที่ 2.0 ไมครอน โดยการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตที่แสงครั้งแรกเท่ากับ 200 mJ/cm^2 ยังชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่มีความหนาเท่ากับ 10 ไมครอนซึ่งถูกเคลือบบนเวเฟอร์ชนิดซิลิคอน ด้วยการฉายแสงครั้งแรกนี้จะทำให้เกิดความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงโดยประมาณที่ 5 ไมครอนจากนั้นจึงทำการฉายแสงครั้งที่สองที่โคซแสงเท่ากับ 700 mJ/cm^2 เพื่อจะทำให้ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงถูกล้างลายจนทะลุถึงพื้นผิวบนเวเฟอร์ซึ่ง โครงสร้างจุลภาคจะปรากฏภายหลังการล้างลายน้ำยาไวแสง และการทดลองนี้เป็นการเคลื่อนฐานรองแผ่นเวเฟอร์ (Stage) ออกจากระยะการฉายแสงครั้งแรก ΔX ออกครั้งละ 2 ถึง 16 ไมครอน รวม 8 เงื่อนไข



รูปที่ 4.13 ภาพแสดงการถ่ายแบบลายวงจรแบบขั้นบันไดด้วยสองระดับขั้นเพื่อศึกษาผลกระทบจากการแทรกสอดแสง

จากผลการทดลองและทำการตรวจสอบลักษณะภาพหน้าตัดลวดลายด้วยกล้องจุลทรรศน์ทางแสงที่อัตราขยายภาพ 150 เท่าดังรูปที่ 4.14 พบว่าที่ระยะออฟเฟตจากการซ้อนมาส์กและฉายแสงซ้ำครั้งที่สองที่ค่าระยะออฟเฟต ΔX ซึ่งน้อยกว่า 4 ไมครอน พบว่าโครงสร้างภาพหน้าตัดของน้ำยาไวแสงมีลักษณะไม่เป็นขั้นบันไดซึ่งเกิดจากผลกระทบจากการแทรกสอดแสงในระบบโปรเจคชันนั่นเอง ดังนั้นในการสร้างลวดลายโครงสร้างสามมิติบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงโดยเทคนิคการฉายแสงซ้ำแบบแปรเปลี่ยนระดับพลังงานแสงจากแหล่งจ่ายโดยใช้เครื่องถ่ายแบบลายวงจร โปรเจคชันสเตปเปอร์ที่มีความละเอียดของระบบเลนส์เท่ากับ 2.0 ไมครอนจะต้องคำนึงขอบระยะห่างของลวดลายวงจรที่จะทำการฉายแสงในแต่ละครั้ง ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายของลวดลายวงจรเหล่านั้น



รูปที่ 4.14 ภาพหน้าตัดของฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ความหนาฟิล์มเท่ากับ 10 ไมครอน ด้วยอัตราขยายของกล้องจุลทรรศน์ทางแสงที่ 150 เท่า

4.2 การศึกษาการลดขั้นตอนการกัดด้วยเทคนิคโฟโตลิโธกราฟีแบบแปรเปลี่ยนระดับพลังงานแสงโดยตรงจากแหล่งจ่ายแสง

ในการผลิตวงจรรวมโดยทั่วไป กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีถือว่าเป็นกระบวนการที่มีการใช้เทคโนโลยีของเครื่องจักรขั้นสูง ตลอดจนมีการใช้สารเคมีและวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก เช่น น้ำยาไวแสง น้ำยาล้างลาย และสารเคมีอื่นๆ เป็นต้น เมื่อคิดเป็นค่าต้นทุนที่ใช้จ่ายในกระบวนการผลิตโดยอ้อม (Indirect material cost) เป็นต้นทุนโดยประมาณถึง 30 ถึง 35 เปอร์เซ็นต์ของค่าใช้จ่ายในสายการผลิตวงจรรวมทั้งหมด ดังนั้นการลดขั้นตอนการผลิตในส่วนการกัดที่มีหลายระดับความลึกของชั้นฟิล์มบนแผ่นเวเฟอร์โดยการสร้างลวดลายสามมิติแบบขั้นบันไดแล้วนำไปกัดแบบแห้งเพียงครั้งเดียวนั้นจะสามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตและเวลาการผลิตที่สิ้นลงในงานวิจัยนี้เป็นตัวอย่างหนึ่งในการประยุกต์ใช้งานเพื่อลดขั้นตอนการกัดจากสองกระบวนการให้เหลือเพียงการกัดแบบแห้งเพียงครั้งเดียว โดยการประยุกต์จากเทคนิคการแปรเปลี่ยนระดับพลังงานแสงจากแหล่งจ่ายแสงโดยตรง เริ่มจากการทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นซิลิคอนขนาด 3 นิ้วและทำการ

เคลือบน้ำยาแสงชนิดบวกแบบหนาเบอร์ Clariantz AZ-P4620 ด้วยเครื่องหมุนเคลือบรุ่น HP0 ของบริษัท RiteTrack เพื่อให้ได้ชั้นหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง เท่ากับ 10 ไมครอน อบชิ้นงานด้วยตู้อบแบบคอนเวกชัน ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ฉายแสงด้วยเครื่องฉายแบบลายวงจรสเต็ปเปอร์รุ่น Nanotech190 ของบริษัท Ultratech stepper ซึ่งมีความแม่นยำในการเคลื่อนที่ของระบบขับเคลื่อนฐานรองชิ้นงานเท่ากับ 70 นาโนเมตร มีความละเอียดของระบบเลนส์ที่ 2.0 ไมครอน โดยมีการแปรเปลี่ยนค่าพลังงานจากแหล่งจ่ายแสง ทำการฉายแสงครั้งแรกที่โคซพลังงานเท่ากับ 280 mJ/cm^2 และทำการฉายแสงครั้งที่สองที่ 700 mJ/cm^2 โดยให้มีการออฟเซตจากระยะการฉายแสงครั้งแรกที่ 50 ไมครอน เพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาคสามมิติแบบขั้นบันไดแบบสองชั้น จากนั้นล้างลายน้ำยาไวแสงด้วยน้ำยา KOH ด้วยเครื่องล้างจลกลายแบบสเปรย์ เป็นเวลา 80 วินาที และล้างด้วยน้ำ DI เป็นเวลา 30 วินาที ปั่นแห้งเป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นวัดค่าความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงด้วยเครื่อง CCI ทำการกัดผิวเวเฟอร์ชนิดซิลิคอนด้วยกระบวนการกัดแบบแห้งโดยใช้เครื่อง RIE รุ่น ICP Multiplex ของ บริษัท Surface Technology Systems โดยมีความดันในห้องสุญญากาศประมาณ 4 มิลลิทอร์ ที่อัตราการไหลของก๊าซ CF_4 เท่ากับ 20 sccm ที่กำลังงานความถี่ของคอลด์ เท่ากับ 530 วัตต์ และกำลังงานความถี่ด้านเพลตที่เทนเท่ากับ 550 วัตต์ เป็นเวลา 50 นาที หลังจากนั้นลอกน้ำยาไวแสงส่วนที่เหลือออกด้วยน้ำยาอะซิโตน และวัดค่าความลึกของพื้นผิวเวเฟอร์ ดังรูปที่ 4.16 และ 4.17 เพื่อศึกษาหาค่าความสัมพันธ์ต่างๆ

การสร้างจลกลายจุลภาคสามมิติ โดยการประยุกต์จากเทคนิคการแปรเปลี่ยนพลังงานแสง โดยตรงจากแหล่งจ่ายแสงและทำการฉายแสงซ้ำในขั้นตอนการฉายแบบลายวงจรถัดไปจะเป็นการลดขั้นตอนการล้างและการกัดลายให้เหลือเพียงครั้งเดียวได้ (Single develop and Etch) เทคนิคการแปรเปลี่ยนค่าพลังงานแสงเป็นการใช้กระจัดต้นแบบชนิดธรรมดา หรือ BIM เช่นเดียวกับกับกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยทั่วไป

จากการทดลองในหัวข้อ 4.1.2 และ 4.1.3 ทำให้เราทราบถึงค่าโคซพลังงานแสงที่ส่งผลต่อค่าความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงและทราบถึงอัตราการกัดแบบแห้งต่อชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงและต่อชั้นผิวเวเฟอร์ชนิดซิลิคอน นอกจากนั้นยังทราบถึงค่าความว่องไวการกัดแบบแห้งด้วยเครื่องกัด RIE ดังนั้นเราจึงสามารถที่จะคาดการณ์ค่าความลึกของเวเฟอร์แบบซิลิคอนได้ทั้งความลึกในระดับที่ 1 และระดับที่ 2 ซึ่งเกิดจากกระบวนการกัดเพียงครั้งเดียว จากรูปที่ 4.15 ค่าความลึกที่ 1 ของชั้นผิวซิลิคอนซึ่งเกิดจากการกัดแบบแห้งโดยการฉายครั้งสองด้วยโคซพลังงานแสงเท่ากับ 700 mJ/cm^2 และความลึกชั้นผิวเวเฟอร์ที่ 2 ด้วยโคซพลังงานแสงที่ 280 mJ/cm^2 ซึ่งจะยังคงมีชั้นหนาฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ 3.5 ไมครอน ดังรูปที่ 4.15(ข) และ (ค) ฉะนั้นค่าความลึกที่ 1 บนเวเฟอร์จะแตกต่างกันเป็นอัตราที่สว่างไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการรักษาเท่านั้น มีขนาดให้มา ไป ประโยชน์ด้านการค้าเท่ากับผลคูณของเวลากับอัตราการกัดของเวเฟอร์ชนิดซิลิคอนนั่นเอง ส่วนความลึกบนเวเฟอร์ที่ 2 เกิดจากผลต่างของอัตราการกัดของน้ำยาไวแสงและชั้นผิวของเวเฟอร์ซิลิคอนดังตัวอย่างการหาค่า

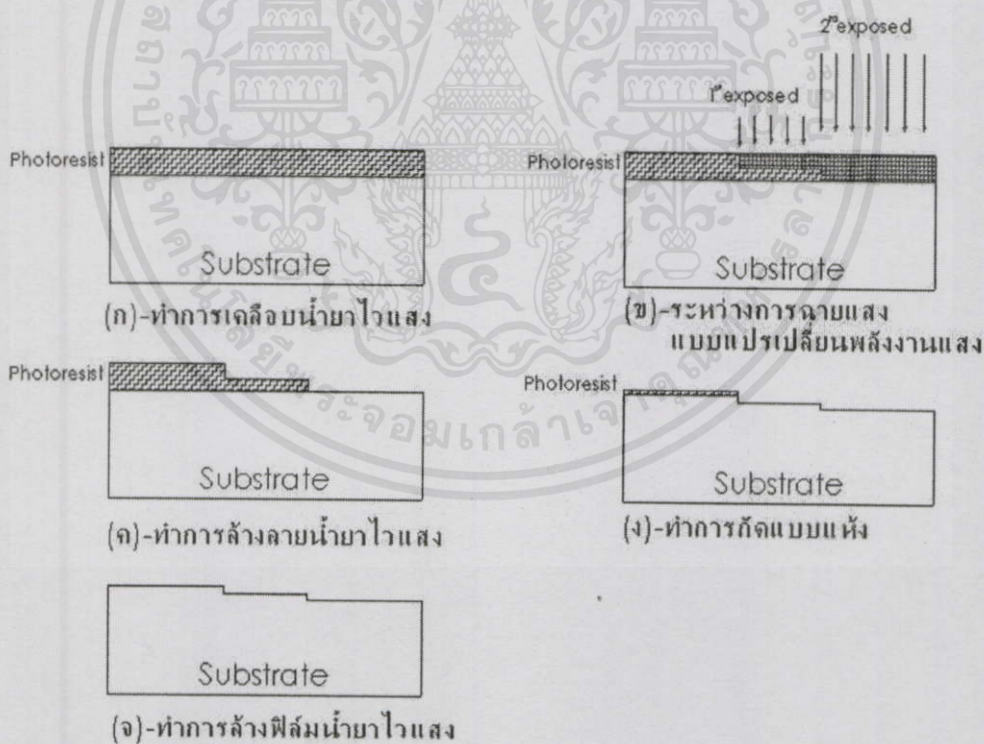
ความลึกจากจำนวนการกัดและผลที่ได้จริงของความลึกบนชั้นผิวเวเฟอร์ซิลิคอนหลังจากผ่านกระบวนการกัดแบบแห้งเพียงครั้งเดียวดังแสดงในรูปที่ 4.17

$$\begin{aligned} \text{Etched Depth \#1} &= \text{อัตราการกัดผิวซิลิคอน} \times \text{เวลาที่ใช้กัด} \\ &= 0.13 \times 50 \\ &= 6.5 \text{ ไมครอน} \end{aligned}$$

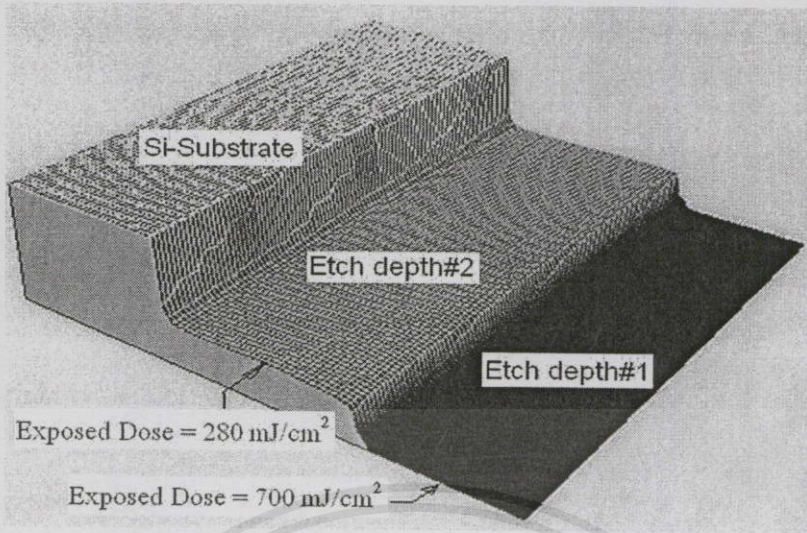
$$\begin{aligned} \text{Etched Depth\#2} &= [\text{เวลาที่ใช้กัด} - (\text{PR/อัตราการกัดของ PR})] \times \text{อัตราการกัดผิวซิลิคอน} \\ &= [50 - (3.5/0.195)] \times 0.13 \\ &= 4.16 \text{ ไมครอน} \end{aligned}$$

โดยที่

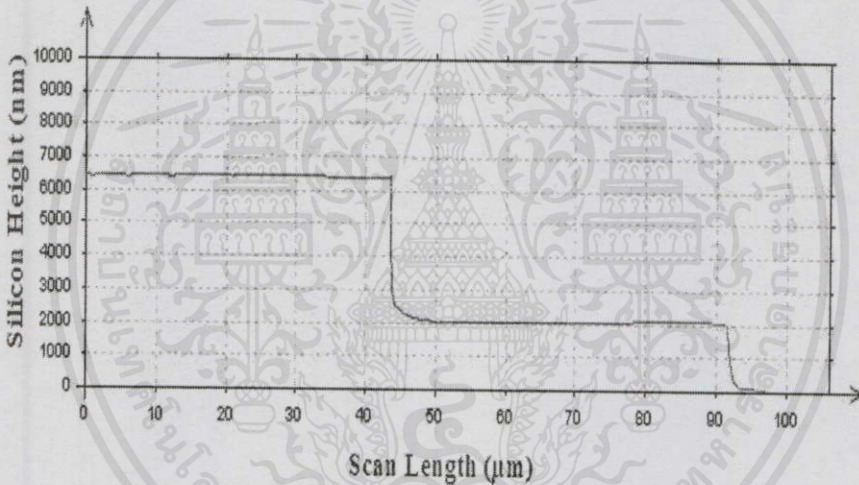
PR คือ ความหนาของชั้นน้ำยาไวแสงที่ได้จากการฉายแสงด้วยแสงเท่ากับ 280 mJ/cm^2



รูปที่ 4.15 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแบบแปรเปลี่ยนค่าพลังงานแสงโดยตรงจากแหล่งจ่าย
 อีกรสารถเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์การค้า
 พลังงานแสง (ก) เวเฟอร์ก่อนการฉายแสง (ข) เวเฟอร์ระหว่างการฉายแสง (ค) เวเฟอร์
 หลังจากการล้างลาย (ง) เวเฟอร์หลังจากการกัดแบบแห้ง (จ) เวเฟอร์หลังจากการล้าง
 ฟิล์มน้ำยาไวแสง



รูปที่ 4.16 ภาพจุลภาคสามมิติหลังการกัดแบบแห้งด้วยเครื่องวัด CCI

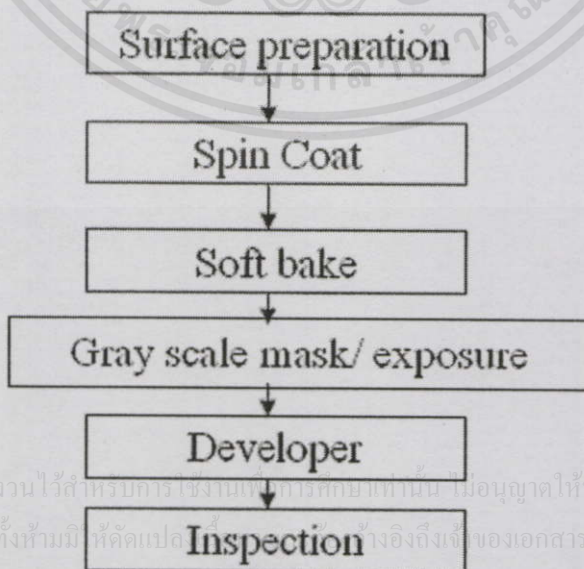


รูปที่ 4.17 ผลจากการวัดด้วยเครื่องวัด CCI

4.3 การสร้างโครงสร้างจุลภาคสามมิติบนฟิล์มน้ำยาไวแสงด้วยเทคนิคโฟโตลิโธกราฟีแบบเกรย์สเกล

เครื่องจักรกลไฟฟ้าจุลภาคเป็นอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างจุลภาคแบบสามมิติ กล่าวคือ นอกจากจะประกอบด้วยความกว้างและความยาวของลายวงจรแล้ว ความสูงของลายวงจรในแต่ละพื้นที่จะต้องไม่เท่ากัน โดยอาจเป็นลำดับขั้น ลาดเอียง หรือเป็นรูปร่างโค้ง ทั้งนี้เพื่อตอบสนองสมบัติทางด้านฟิสิกส์หรือทางกลศาสตร์ได้เป็นอย่างดี เช่น ระบบแสงระดับไมครอน (Micro-Optical system) และระบบกลไกระดับไมครอน (Micro Mechanical system, MMS) ซึ่งการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ นี้ สามารถสร้างได้ด้วยหลายเทคนิค เช่น เทคนิคมัลติโฟโตลิโธกราฟี, เทคนิคการฉายแสงแบบแปรเปลี่ยนระดับพลังงานโดยตรงจากแหล่งจ่ายในกระบวนการโฟโต

ลิโธกราฟี ในหัวข้อ 4.1 หรือเทคนิคการใช้กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ (Multi-Film Thickness Mask, MFT-Mask) [21] ซึ่งเทคนิคเหล่านี้ล้วนแต่ให้โครงสร้างจุลภาคสามมิติแบบโครงสร้างขั้นบันไดเท่านั้น ซึ่งไม่สามารถสร้างโครงสร้างจุลภาคสามมิติของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงให้เป็นรูปร่างโค้งเว้าได้ เทคนิคโฟโตลิโธกราฟีแบบเกรย์สเกลเป็นเทคนิคเดียวที่สามารถสร้างโครงสร้างที่มีลวดลายจุลภาคสามมิติของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงได้ทั้งแบบขั้นบันได ลาดเอียง หรือแบบรูปร่างโค้งเว้า นอกจากนี้ยังเป็นกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเดียวที่สามารถจะทำการฉายแสงเพียงครั้งเดียวผ่านแผ่นโฟโตมาส์กและเกิดการกรองพลังงานแสงจากช่องเปิดพิกเซลและช่องปิดพิกเซลของลวดลายโฟโตมาส์กที่มีขนาดเล็กกว่าความละเอียดของระบบเลนส์ของเครื่องถ่ายภาพลายวงจร โปรเจกชันสเต็ปเปอร์ ทำให้แสงเกิดการแทรกสอดและค่าพลังงานจะแปรเปลี่ยนไปตามขนาดของพิกเซลและพิกเซลนั้นๆ การสร้างโครงสร้างในระดับจุลภาคสามมิตินี้จะผ่านกระบวนการถ่ายภาพลายวงจรลงบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงชนิดบวกและกัดผิวหน้าแผ่นเวเฟอร์ซิลิคอนแบบแห้งเพียงขั้นตอนเดียว นอกจากนี้ยังมีส่วนช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมากอีกด้วย ส่วนการออกแบบโครงสร้างจุลภาคสามมิติสำหรับเทคนิคแบบเกรย์สเกลนั้นขนาดพิกเซลและพิกเซลของลวดลายวงจรบนแผ่นโฟโตมาส์กจะต้องเล็กกว่าความละเอียดระบบโปรเจกชันของเครื่องถ่ายภาพลายวงจร ตามความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 2.8 ในบทที่ 2 ส่วนความละเอียดของเครื่องถ่ายภาพลายวงจรจะมีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นของแสงที่ใช้ในการฉายแสงดังแสดงในสมการที่ 2.6 เมื่อทำการออกแบบลายวงจรโดยกำหนดขอบเขตของขนาดพิกเซลและพิกเซลให้เหมาะสมกับเครื่องถ่ายภาพลายวงจรโดยใช้สมการที่ 2.9 แล้วจะสามารถคำนวณหาค่าการส่องผ่านของแสงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของพิกเซลและพิกเซล ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ในบทที่ 3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลหรือทำซ้ำของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.18 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแบบเทคนิคเกรย์สเกล

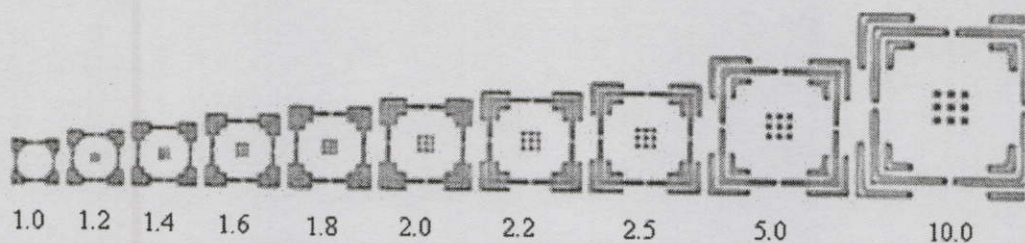
การสร้างลายวงจรสามมิติด้วยเทคนิคเกรย์สเกลมีกระบวนการดังรูปที่ 4.18 ซึ่งมีขั้นตอนกระบวนการสร้างลวดลายวงจรเช่นเดียวกับกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรโดยทั่วไปเพียงแต่ลวดลายของโฟโตมาส์กจะต้องสัมพันธ์กับเครื่องถ่ายแบบลายวงจรโปรเจกชันดังรายละเอียดขั้นตอน ดังนั้นเพื่อเป็นการกำหนดระดับเกรย์สเกลที่จะใช้ในการออกแบบลวดลายโฟโตมาส์และเพื่อให้เกิดการกรองพลังงานแสงอย่างมีประสิทธิภาพ จึงต้องทำการทดสอบหาค่าความละเอียดที่แท้จริงของเครื่องถ่ายแบบลายวงจรที่จะใช้ในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจร

4.3.1 การทดสอบหาความละเอียดระบบโปรเจกชันเลนส์ของเครื่องถ่ายแบบลายวงจร

แผ่นกระจกโฟโตมาส์กชนิดเกรย์สเกลที่จะทำการออกแบบและสร้างนั้นจำเป็นต้องทราบขีดความสามารถในการสร้างลวดลายวงจรที่มีขนาดเล็กที่สุดของเครื่อง DWL และค่าความละเอียดสูงสุดสำหรับเครื่องถ่ายแบบลายวงจรก่อนจากนั้นจึงจะทำการออกแบบลวดลายพิกเซลและพิทช์บนแผ่นโฟโตมาส์กให้เหมาะสมทั้งนี้เพื่อให้เกิดการกรองพลังงานที่สมบูรณ์และเกิดโครงสร้างจุลภาคสามมิติบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงหลังจากกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรโดยที่เครื่อง DWL ของศูนย์ TMEC สามารถสร้างลวดลายโฟโตมาส์กที่มีลายวงจรขนาดเล็กที่สุดเท่ากับ 1.0 ไมครอน ดังนั้นจึงได้ออกแบบลวดลายโฟโตมาส์กที่มีขนาดลายเส้นและช่องว่าง (Line and space) จาก 1.0 ถึง 10 ไมครอน เพื่อใช้ทดสอบในการหาค่าความละเอียดที่แท้จริงระบบโปรเจกชันเลนส์ของเครื่องถ่ายแบบลายวงจรสเต็ปเปอร์ โดยที่ความละเอียดของระบบโปรเจกชันตามสเปกของเครื่องจักรเท่ากับ 2.0 ไมครอน ทั้งนี้เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับกระบวนการออกแบบลวดลายโฟโตมาส์กแบบเกรย์สเกล จากนั้นนำไปทำการทดสอบโดยการถ่ายแบบลายวงจรด้วยเครื่องโปรเจกชันสเต็ปเปอร์ได้ผลดังรูปที่ 4.19 และตารางที่ 4.1 จากผลการลวดลายน้ำยาไวแสงพบว่าลวดลายที่มีขนาดลายเส้นและช่องว่างของลายที่เล็กกว่า 2.0 ไมครอน ไม่มีความคมชัดของลวดลายน้ำยาไวแสงหลังจากการล้างลายน้ำยา ดังนั้นการกำหนดขนาดของพิกเซลบนแผ่นโฟโตมาส์กจึงสามารถสร้างได้มากที่สุดเพียง 12 ระดับเท่านั้น โดยมีระดับเกรย์สเกลซึ่งเกิดจากลวดลายพิกเซลมีระยะห่างกันเท่ากับ 0.1 ไมครอน ดังรายละเอียดในการออกแบบลวดลายโฟโตมาส์กบทที่ 3 เมื่อใช้ในการวิจัยครั้งนี้

4.3.2 การหาเงื่อนไขค่าโดสแสงที่เหมาะสมในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรแบบเกรย์สเกล

เมื่อทำการสร้างแผ่นต้นแบบโฟโตมาส์กแบบเกรย์สเกลแล้วจากนั้นจึงนำไปทดสอบในกระบวนการสร้างลวดลายวงจรจุลภาคสามมิติด้วยเทคนิคเกรย์สเกล โดยเริ่มจากการเตรียมชิ้นงานเวเฟอร์ชนิดซิลิคอนโดยทำความสะอาดผิวหน้าเวเฟอร์ด้วยน้ำยาอะซิโตน โดยเทคนิคหมุนปั่นแห้ง

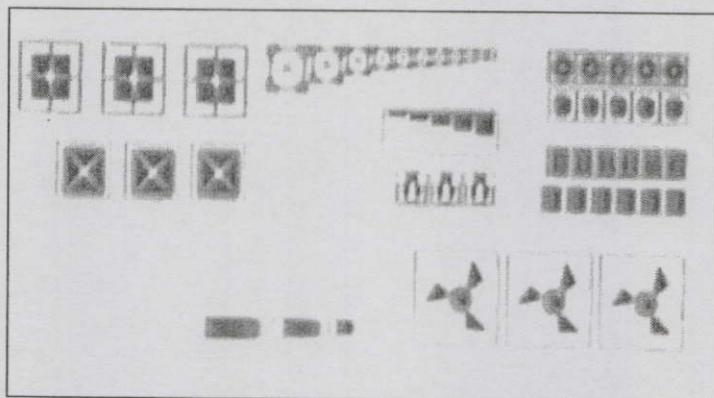


รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายลายวงจรหลังการล้างน้ำยาไวแสงเพื่อทดสอบหาความละเอียดของระบบโปรเจคชั่น

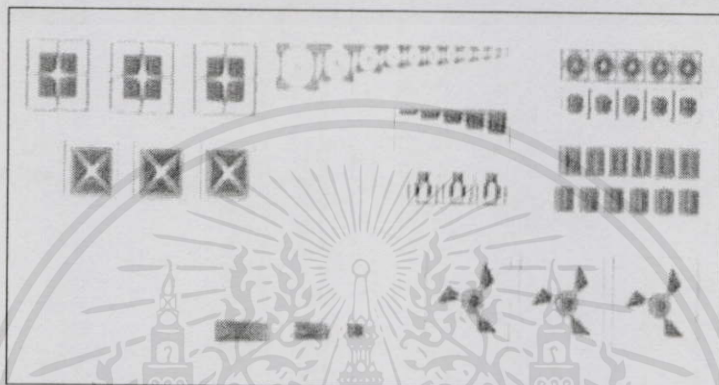
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบค่าความละเอียดของระบบโปรเจคชั่นสเตปเปอร์

ขนาดลายสั้น (μm)	ขนาดช่องว่าง (μm)	ผลการล้างลายน้ำยาไวแสง	
1.0	1.0	ลายเส้นไม่คมชัด	ขนาดช่องว่างไม่คมชัด
1.2	1.2	ลายเส้นไม่คมชัด	ขนาดช่องว่างไม่คมชัด
1.4	1.4	ลายเส้นไม่คมชัด	ขนาดช่องว่างไม่คมชัด
1.6	1.6	ลายเส้นไม่คมชัด	ขนาดช่องว่างไม่คมชัด
1.8	1.8	ลายเส้นไม่คมชัด	ขนาดช่องว่างไม่คมชัด
2.0	2.0	ลายเส้นคมชัด	ขนาดช่องว่างไม่คมชัด
2.2	2.2	ลายเส้นคมชัด	ขนาดช่องว่างคมชัด
2.5	2.5	ลายเส้นคมชัด	ขนาดช่องว่างคมชัด
10.0	10.0	ลายเส้นคมชัด	ขนาดช่องว่างคมชัด

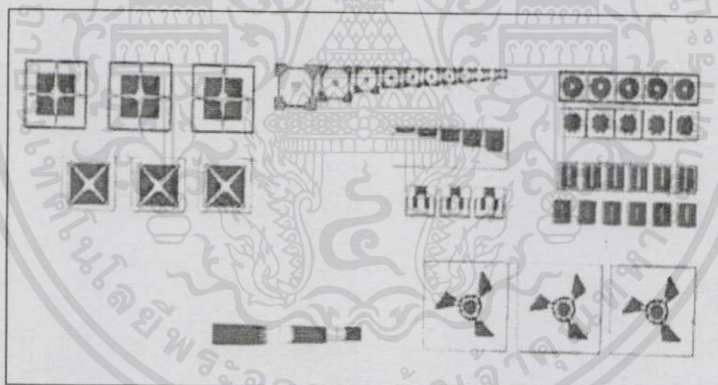
ด้วยความเร็วสูงจากนั้นนำเวเฟอร์ไปทำการเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยน้ำยาไวแสงยี่ห้อ Clariantz เบอร์ AZ-P4620 และอบน้ำยาไวแสงด้วยตู้อบแบบคอนเวคชั่นที่อุณหภูมิเท่า 60 องศาเซลเซียสจากนั้นนำไปทำการทดสอบการฉายแสงด้วยเครื่องโปรเจคชั่นสเตปเปอร์ และหาค่าพลังงานแสงใช้งานที่เหมาะสมต่อโครงสร้างจุลภาคสามมิติบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง งานวิจัยนี้ทำการฉายแสงโดยกำหนดค่าโดสแสงเบื้องต้นที่ 350, 400, 450 และ 500 mJ/cm^2 จากนั้นทำการล้างลายน้ำยาไวแสงและได้ผลการลายวงจรของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงดังรูปที่ 4.20 จากรูปผลของค่าโดสแสงที่ต่ำกว่า 400 mJ/cm^2 ไม่เหมาะสมต่อความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่มีความหนาเท่ากับ 10 ไมครอน และค่าโดสแสงที่มากกว่า 500 mJ/cm^2 มีค่าพลังงานแสงที่มากเกินไปซึ่งส่งผลให้ลายวงจรบางส่วนเกิดการหลุดออกจากฐานเวเฟอร์ซิลิคอนหลังจากขั้นตอนการล้างลายน้ำยาไวแสง



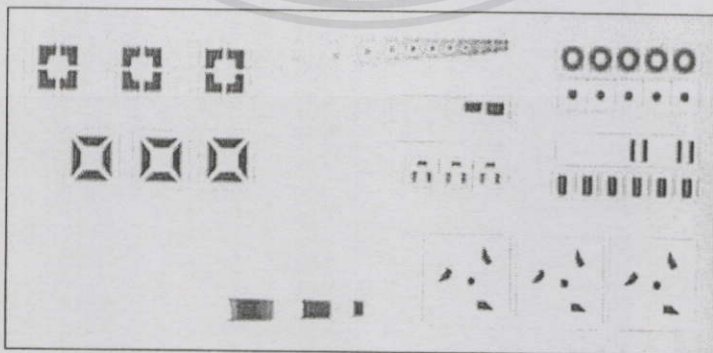
(ก)



(ข)



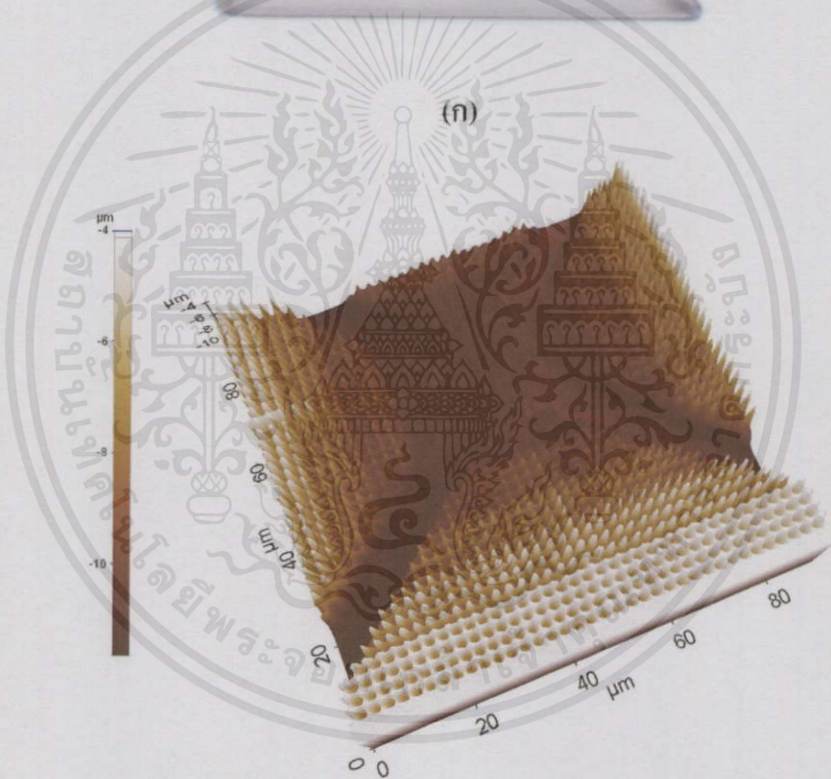
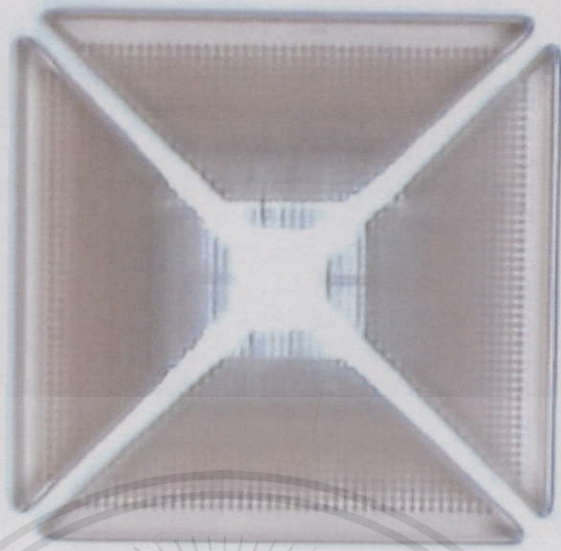
(ค)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4.20 การทดสอบหาค่าโดสพลังงานแสงที่เหมาะสมสำหรับแผ่นโฟโตมาส์กแบบเกรย์สเกล

(ก) 350 mJ/cm² (ข) 400 mJ/cm² (ค) 450 mJ/cm² (ง) 500 mJ/cm²



(ข)

รูปที่ 4.21 ภาพลวดลายจุดภาคสามมิติแบบลาดเอียงหลังจากการล้างลายน้ำยาไวแสง

(ก) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ทางแสงที่ 50 เท่า (ข) ภาพถ่ายจากเครื่อง AFM

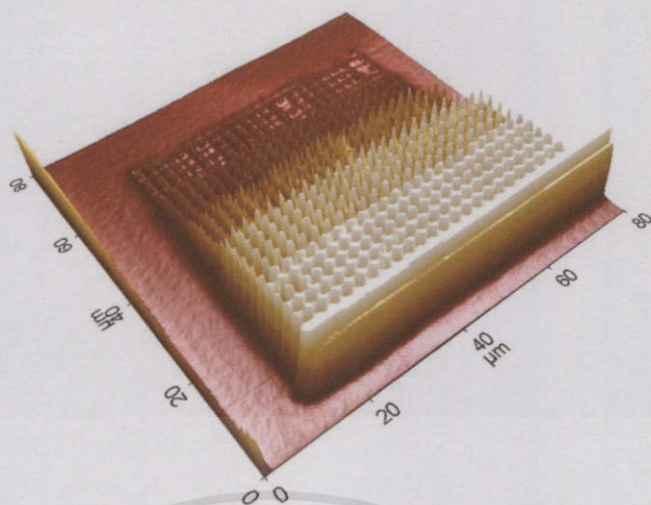
4.3.3 การตรวจสอบภาพลายจุดภาคสามมิติหลังจากการล้างลายน้ำยาไวแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ภายหลังได้ค่าโคซแสงที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพแบบลายวงจรถึ่งใช้แผ่นกระจกโฟโต
 ไม่วากรณ์ โคซทางสน ออกทงห้ามมให้คิดเบลงเนอหวิ และตองอององตั้งเจงของเอกสารที่กรังหมกรนนี้เชย
 มาส์กแบบเกรย์สเกลดิงในหัวข้อ 4.3.2 จากนั้นกำหนดเป็นค่าโคซพลังงานแสงสำหรับกระบวนการ

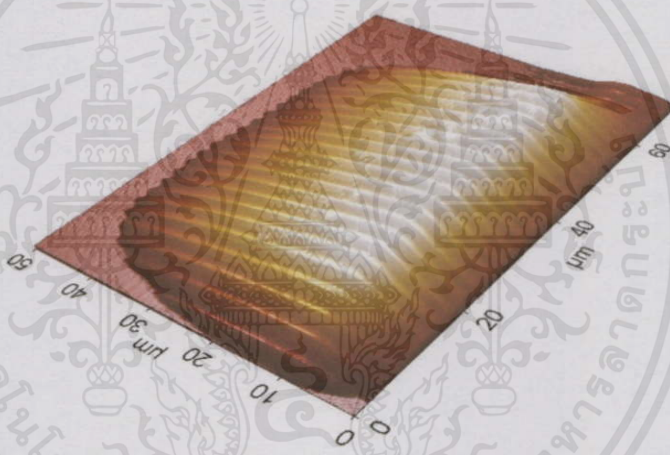
สร้างโฟโตลิโธกราฟีสามมิติด้วยเทคนิคเกรย์สเกลเพื่อใช้สร้าง โครงสร้างจุลภาคสามมิติบนชั้นฟิล์ม น้ำยาไวแสงสำหรับงานวิจัยนี้ต่อไป หลังจากนั้นนำลวดลายน้ำยาไวแสงซึ่งเป็น โครงสร้างจุลภาค สามมิติภายหลังจากระบวนการล้างลายเพื่อตรวจสอบคุณภาพ โครงสร้างชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ได้ โดยใช้เครื่องมือตรวจสอบพื้นผิวซึ่งให้กำลังขยายสูง (Atomic Force Measurement, AFM) ดังรูป ที่ 4.21 จากภาพ AFM เป็นลวดลายจุลภาคสามมิติแบบลาดเอียงของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงพบว่าผิว โครงสร้างชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงมีความขรุขระมาก ซึ่งมีสาเหตุมาจากขนาดของระยะพิทช์และขนาด พิกเซลที่มีขนาดใหญ่กว่าความละเอียดของระบบ โปรเจคชันเลนส์ในเครื่องถ่ายแบบลายวงจร นั้นเอง สังเกตได้จากส่วนผิวด้านบนสุดของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงซึ่งมีขนาดของพิกเซลที่ 1.0 ไมครอน จะพบว่ามีส่วนของน้ำยาไวแสงที่ไม่ถูกฉายแสงเลยเนื่องจากเป็นพื้นที่ของลวดลาย พิตช์ จึงไม่เกิดการอ่อนตัวของน้ำยาไวแสงหลังถูกล้างลายน้ำยาไวแสงในลักษณะเดียวกันถ้า พิจารณาตรงบริเวณด้านล่างของลายวงจรซึ่งเป็นพื้นที่ๆ เกิดจากการฉายแสงผ่านลวดลายพิกเซล ขนาดเท่ากับ 2.2 ไมครอนและพิทช์เท่ากับ 0.4 ไมครอนจะเห็นได้ว่าชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงถูกล้าง ออกจนหมด นอกจากนี้ยังพบว่าลวดลายโดยรวมของ โครงสร้างลวดลายจุลภาคสามมิติมีความ ขรุขระค่อนข้างสูงมากเมื่อเทียบกับ โครงสร้างจุลภาคสามมิติแบบชั้นบันได โดยเทคนิคแปรเปลี่ยน พลังงานแสงโดยตรงจากแหล่งจ่ายแสง สิ่งนี้จึงเป็นปัญหาหลักของกระบวนการสร้างลวดลายโฟโต ลิโธกราฟีแบบเกรย์สเกล การปรับปรุงสภาพพื้นผิวให้ดีขึ้นนั้นสามารถกระทำได้โดยการอบให้ความ ร้อนสูงยังชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงซึ่งที่จะส่งผลแก่ชั้นฟิล์ม โพลีเมอร์เกิดการอ่อนตัวจากความร้อนและ เกิดการไหลอีกครั้งหนึ่ง โดยที่อุณหภูมิใช้งานนี้จะต้องมากกว่าจุดอ่อนตัวของสาร โพลีเมอร์ของ น้ำยาไวแสง กระบวนการนี้ถูกเรียกว่าการแอนนิล (Annealing)

4.3.4 กระบวนการอบเพื่อปรับปรุงผิวฟิล์มน้ำยาไวแสง

จากปัญหาความขรุขระของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ได้จากการสร้างลายวงจร โฟโตลิโธกราฟี แบบเกรย์สเกล ดังนั้นจึงต้องทำการปรับปรุงสภาพผิวที่ขรุขระของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงโดยการอบ แอนนิลแก่ฟิล์มน้ำยาไวแสง งานวิจัยนี้ใช้แทนความร้อนเครื่องมือเพื่อใช้หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ซึ่งได้แก่อุณหภูมิและเวลาที่จะใช้ในการอบ โดยในการทดลองนี้ทำการแปรเปลี่ยนค่าอุณหภูมิช่วง 110 ถึง 140 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการอบช่วง 1 ถึง 5 นาที ซึ่งผลการทดลองหาเงื่อนไขการ อบแอนนิลแก่น้ำยาไวแสงนี้ พบว่าอุณหภูมิที่ 120 องศาเซลเซียสและเวลาที่ใช้ออบที่ 3 นาที เป็น เงื่อนไขที่ดีที่สุดดังรูปที่ 4.22 จากภาพถ่าย AFM ในรูปที่ 4.22 (ก) ซึ่งเป็นภาพโครงสร้างจุลภาคสาม มิติของน้ำยาไวแสงก่อนการอบแอนนิล ส่วนภาพในรูปที่ 4.22 (ข) เป็นภาพถ่าย AFM ของ โครงสร้างเป็นเอกสารที่ส่งไป สำหรับการใช้งานที่ภาคการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า โครงสร้างจุลภาคสามมิติที่ผ่านการอบแอนนิลซึ่งเห็นได้ชัดว่าชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงเกิดการยุบตัวอีก ี่ว่ากว่าครึ่ง โดยทั้งส่วน อีกทั้งหัวมุมให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหมการนไปใช้ ครึ่งหนึ่งตามทิศแนวแรงโน้มถ่วงของโลก โดยสังเกตจากยอดแหลมที่เกิดจากลวดลายพิทช์และ พิกเซลหายไป



(ก)



(ข)

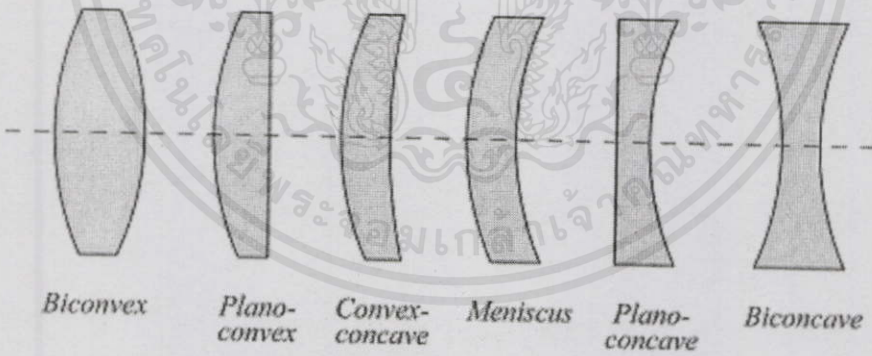
รูปที่ 4.22 ภาพถ่าย AFM ลวดลายจุดภาคสามมิติแบบลาดเอียงหลังการล้างน้ำยาไวแสง (ก) ไม่ผ่านการอบแอนนิว (ข) ผ่านการอบแอนนิลที่อุณหภูมิที่ 120 องศาเซลเซียส เวลา 3 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการสร้างต้นแบบเลนส์จุดภาค โดยเทคนิคเกรย์สเกล

ในบทนี้จะกล่าวถึงการนำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแบบเกลย์สเกลไปประยุกต์ใช้สร้างเลนส์ระดับจุดภาค [22] โครงสร้างของเลนส์แบบทั่วไปจะมีรูปแบบโครงสร้างรูปทรงกลมที่มีสองผิวสัมผัสทำมุมซึ่งกันและกันจากจุดศูนย์กลางวงกลมถึงผิวสัมผัสด้านนอกเลนส์ ส่วนพื้นผิวนอกของเลนส์นั้นอาจมีรูปร่างโค้งเว้าในลักษณะต่างๆ กัน เช่น รูปทรงผิวโค้งนูน (Convex surface) ผิวโค้งเว้า (Concave) หรือมีผิวเรียบ (Planar surface) ดังรูปที่ 5.1[23] แสดงถึงโครงสร้างโดยพื้นฐานแบบทั่วไปของผิวเลนส์รูปทรงต่างๆ แบ่งแยกตามลักษณะของพื้นผิวเลนส์

ในงานวิจัยนี้เป็นการนำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแบบสามมิติโดยใช้เทคนิคแบบเกรย์สเกล ซึ่งสามารถสร้างลายวงจรบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่มีรูปร่างโค้งเว้าได้ดี เลนส์ที่มีรูปร่างแบบเพโนคอนเวกซ์ (Plano-convex) และแบบเพโนคอนเคฟ (Plano-concave) ซึ่งมีผิวเลนส์ด้านนอกโค้งเว้าส่วนอีกด้านมีลักษณะแบนราบจึงมีความเหมาะสมและง่ายต่อการศึกษาเพื่อประยุกต์ใช้งานกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีด้วยเทคนิคเกรย์สเกลอันเป็นเครื่องมือที่ใช้สร้างเลนส์ที่มีขนาดเล็กในระดับไมครอนบนฐานรองเวเฟอร์ชนิดซิลิคอนได้



รูปที่ 5.1 ลักษณะของชนิดเลนส์โดยทั่วไป

5.1 การออกแบบเลนส์

การออกแบบเลนส์จุดภาคเพื่อเป็นอุปกรณ์ทางแสง ซึ่งเป็นการสร้างผิวของเลนส์ให้เป็นรูปร่างโค้งเว้าด้วยวัสดุโปร่งแสงที่สามารถส่งผ่านแสงได้ดี เช่น กระจกควอทซ์ (Quartz) ทั้งนี้เพื่อใช้เป็นตัวกำหนดจุดรวมแสง (Focal range) และตอบสนองอัตราขยายภาพได้ดี ดังรูปที่ 5.2 แสดงระยะโฟกัสในอากาศของเลนส์ซึ่งหาได้จากสมการที่ 5.1 และ 5.2

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n-1)d}{nR_1R_2} \right] \quad (5.1)$$

สำหรับเลนส์ชนิดบางหาได้จาก

$$\frac{1}{f} \approx (n-1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right] \quad (5.2)$$

โดยที่

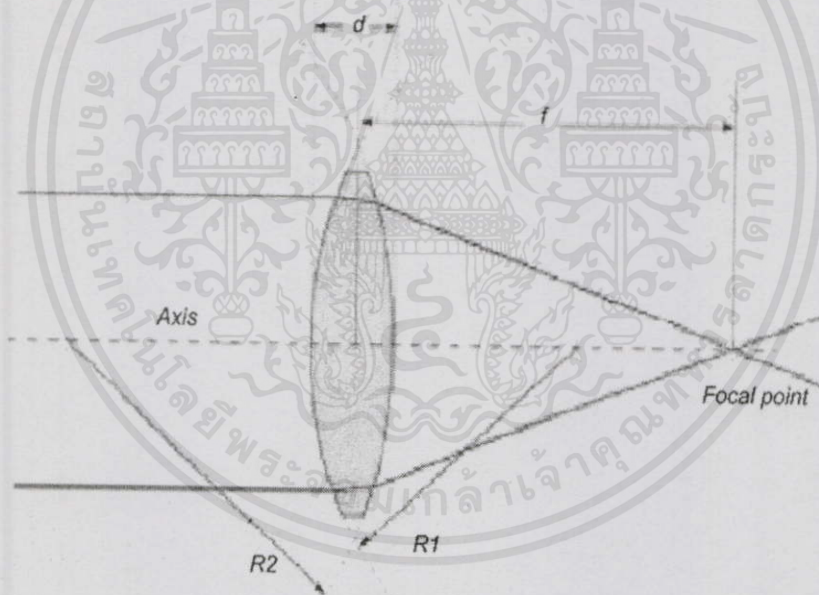
f คือ ระยะโฟกัสเลนส์

n คือ ค่าดัชนีการหักเหแสงของวัสดุเลนส์

R_1 คือ รัศมีผิวโค้งของเลนส์ด้านใกล้แหล่งกำเนิดแสง

R_2 คือ รัศมีผิวโค้งของเลนส์ด้านไกลแหล่งกำเนิดแสง

d คือ ความหนาของเลนส์

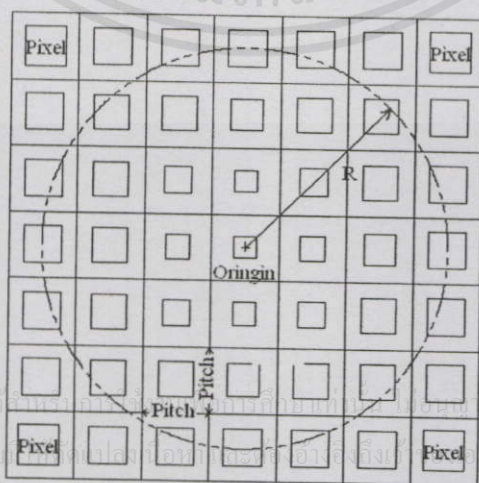


รูปที่ 5.2 โครงสร้างแบบจำลองเลนส์นูน

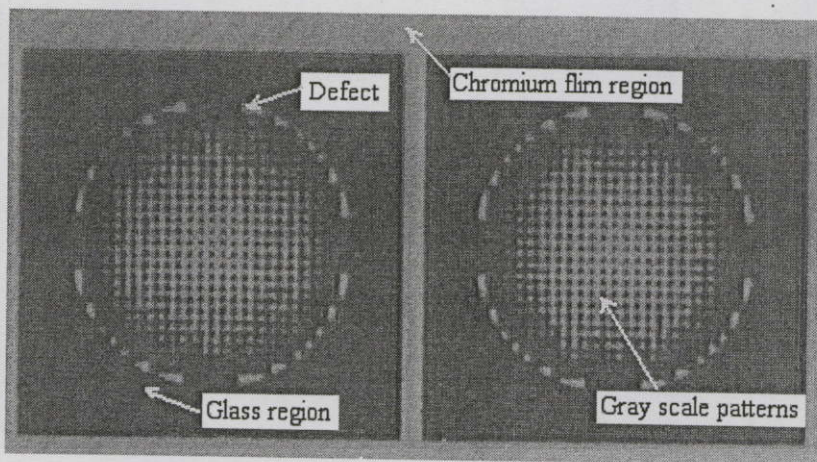
ด้วยข้อดีของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแบบเกรย์สเกลซึ่งความสามารถสร้างพื้นผิวของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงแบบสามมิติที่ลักษณะโค้งเว้าได้ดี จึงเป็นจุดเด่นที่น่าสนใจในการประยุกต์ใช้งานเพื่อใช้สร้างเลนส์จุลภาคในงานวิจัยนี้ แต่น่าเสียดายที่เครื่องมือหลักที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้มีข้อจำกัดของความละเอียดของระบบเครื่องจักรหลัก คือ เครื่อง DWL ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีขีดความสามารถในการสร้างลายโฟโตมาส์กขนาดเล็กที่สุดเพียง 1.0 ไมครอน

และเครื่องถ่ายภาพแบบฉายวงจร โปรเจกชันสแตปเปอร์ที่ใช้ทดสอบมีความละเอียดของระบบโปรเจกชันเลนส์ที่ 2.0 ไมครอน ทำให้ไม่สามารถที่จะกำหนดระดับเกรย์สเกลได้มากพอ

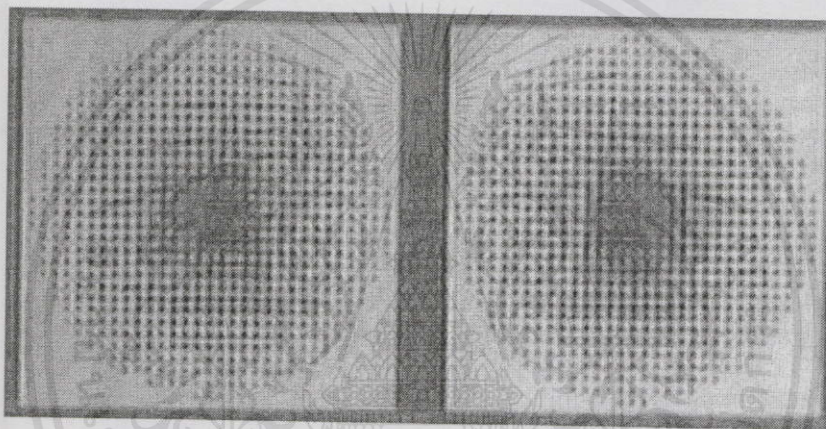
ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบลวดลายกระจกโฟโตมาส์กแบบเกรย์สเกลที่ขอบเขตจำกัดด้วยความสามารถสูงสุดของเครื่องจักรที่ใช้ในการทดสอบตามเงื่อนไขการออกแบบในเนื้อหาบทที่ 2 และบทที่ 3 กล่าวคือ ลวดลายเกรย์สเกลบนกระจกโฟโตมาส์กที่ถูกออกแบบโดยใช้โปรแกรม AutoCAD กำหนดค่าระยะห่างระหว่างพิกเซลเท่ากับ 2.5 ไมครอน จากนั้นแปรเปลี่ยนขนาดพิกเซลจาก 1.0 ถึง 2.2 ไมครอนซึ่งป็นจำนวนระดับเกรย์ทั้งหมดเท่ากับ 12 ระดับเท่านั้น จากนั้นแปรเปลี่ยนขนาดพิกเซลจากน้อยไปหามากตามแนวรัศมีวงกลมดังรูปที่ 5.3 ซึ่งเป็นลวดลายเกรย์สเกลของเลนส์นูน ส่วนการออกแบบเลนส์เว้านั้นเป็นการแปรเปลี่ยนขนาดพิกเซลจากมากไปหาน้อยตามแนวรัศมีวงกลมเช่นเดียวกัน การออกแบบลวดลายเกรย์สเกลนี้สามารถที่จะสร้างเลนส์จุลภาคที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 60 ไมครอน เมื่อได้ไฟล์ข้อมูลในรูปแบบ DXF จากการออกแบบร่างโปรแกรม Autocad จากนั้นนำไปสร้างแผ่นต้นแบบโฟโตมาส์ก โดยเครื่อง DWL ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์โดยสามารถสร้างลวดลายกระจกโฟโตมาส์กแบบเกรย์สเกลได้ดังรูปที่ 5.4 เป็นลวดลายโฟโตมาส์กของเลนส์นูน ส่วนในรูปที่ 5.5 เป็นลวดลายโฟโตมาส์กของเลนส์เว้า จากการตรวจสอบคุณภาพของลายโฟโตมาส์กต้นแบบสำหรับใช้สร้างโครงสร้างจุลภาคสามมิติของเลนส์จุลภาคแบบนูนและเว้าด้วยกล้องจุลทรรศน์ทางแสง (Optical Microscope, OM) พบว่าที่ตำแหน่งขอบนอกของลายเลนส์นูนนั้นฟิล์มโครเมียมหายไปหมด สังเกตได้จากการที่ไม่มีแสงที่ตกกระทบบนโลหะโครเมียมทำให้ไม่มีแสงสะท้อนกลับมายัง OM จึงเห็นบริเวณนี้เป็นสีดำ และเมื่อพิจารณาตรงช่วงกึ่งกลางลายเลนส์นูนซึ่งเป็นพื้นที่พิกเซลขนาด 1.0 ถึง 1.9 ไมครอน นั้นมีลักษณะเป็นระดับเกรย์สเกลที่สมบูรณ์ ส่วนตรงที่ขนาดพิกเซลตั้งแต่ที่ 2.0 ถึง 2.2 ไมครอนซึ่งมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้พื้นที่ของพิกเซลลดน้อยลงจนเกินกว่าค่าความละเอียดเครื่อง DWL และทำให้พื้นที่ตรงส่วนนี้ไม่มีส่วนของชั้นฟิล์มโครเมียมปกคลุมดังแสดงในรูปภาพที่ 5.4



รูปที่ 5.3 ตัวอย่างรูปแบบการออกแบบร่างลายเกรย์สเกลสำหรับลวดลายสร้างเลนส์นูน



รูปที่ 5.4 ภาพลวดลายเกรย์สเกลสำหรับเลนส์ฐานที่กำลังขยายของกล้องจุลทรรศน์ที่ 20 เท่า



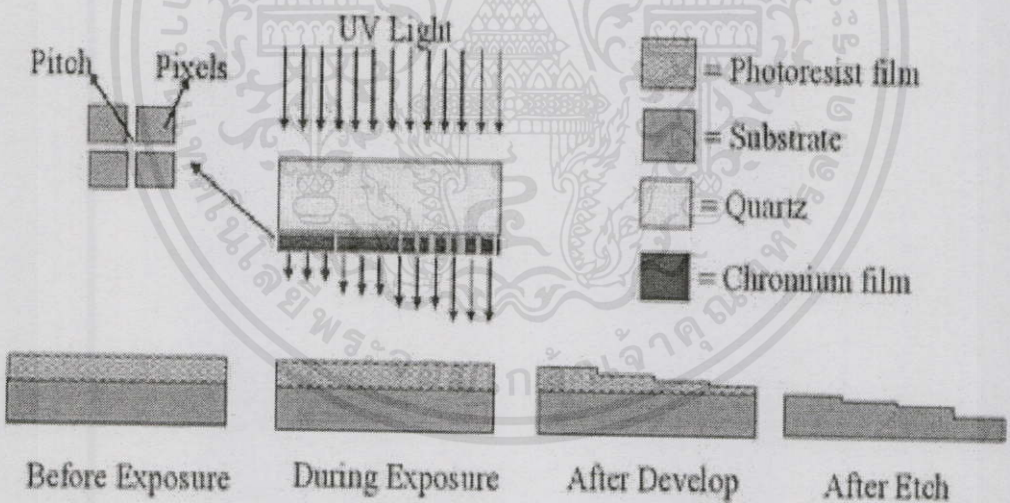
รูปที่ 5.5 ภาพลวดลายเกรย์สเกลสำหรับเลนส์เว้าที่กำลังขยายของกล้องจุลทรรศน์ที่ 20 เท่า

นอกจากนี้ในรูปที่ 5.4 ยังพบว่ามีลวดลายส่วนเกินบางส่วนซึ่งเกิดจากปัญหาทางเทคนิคในการออกแบบซึ่งเป็นสาเหตุมาจากการวางซ้อนแบบร่างของลายเส้นออฟเจตท์โพลิคอนโดยโปรแกรม AutoCAD ในส่วนของพื้นที่เกรย์สเกลและพื้นที่กระจกที่ไม่ดีพอจึงทำให้เกิดลายโครเมียมส่วนเกินหลังจากกระบวนการสร้างแผ่นโฟโตมาส์กต้นแบบ รูปที่ 5.5 เป็นภาพของลวดลายโฟโตมาส์กแบบเกรย์สเกลของเลนส์เว้าตรงตำแหน่งจุดกึ่งกลางเลนส์จะสังเกตเห็นว่าลวดลายฟิล์มโครเมียมหายไปหมดทั้งนี้ก็เป็นสาเหตุเพราะลวดลายของฟิสิกเซลที่มีขนาด 2.0 ถึง 2.2 ซึ่งทำให้ระยะห่างของฟิสิกเซลเหลือน้อย 0.5 ไมครอนจึงทำให้กลายเป็นพื้นที่ของกระจกเช่นเดียวลวดลายของเลนส์ฐาน

5.2 กระบวนการสร้างเลนส์ระดับจุลภาค

จากการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
งานวิจัยนี้สร้างโครงสร้างจุลภาคลงบนแผ่นซิลิคอนขนาด 3 นิ้ว โดยเริ่มจากการทำความสะอาดผิวหน้าชิ้นงานด้วยอะซิโตน จากนั้นเคลือบน้ำยาไวแสงแบบหนาชนิดบวกเบอร์ Clariantz

AZ-P4620 ด้วยเครื่องหมุนเคลือบรุ่น HP0 ของบริษัท Rite-Track และอบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงด้วยตู้อบ Convection Oven ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที โดยชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ได้จะมีความหนาเท่ากับ 10 ไมครอน จากนั้นฉายแสงด้วยเครื่องฉายแบบลายวงจรสเต็ปเปอร์ รุ่น Nanotech190 ที่มีค่าความละเอียดของระบบเลนส์ คือ 2.0 ไมครอน ด้วยค่าพลังงานแสงเท่ากับ 480 mJ/cm^2 โดยจะฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกลดังที่ได้ออกแบบไว้ดังได้กล่าวแล้วข้างต้น จากนั้นนำแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการฉายแสงไปล้างลายวงจรด้วยเครื่องล้างแบบสเปรย์ด้วยน้ำยา KOH เป็นเวลา 80 วินาที แล้วล้างด้วยน้ำ DI เป็นเวลา 30 วินาที และปั่นแห้งเป็นเวลา 30 วินาทีและทำการอบเพื่อแอนนิลแก่ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงด้วยอุณหภูมิเท่ากับ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปกัดลายด้วยเทคนิคการกัดแบบแห้งด้วยพลาสมา RIE โดยจะทำในระบบสุญญากาศที่มีความดันประมาณ 4 มิลลิทอร์ ด้วยการเกิดปฏิกิริยาพลาสมาของก๊าซ CF_4 ที่อัตราการไหล 20 sccm โดยใช้กำลังงานของคอลด์เท่ากับ 500 วัตต์ ที่ช่วงความถี่วิทยุ 13.56 MHz และกำลังงานความถี่ด้านเพดท์เทนเท่ากับ 550 วัตต์ ใช้เวลาในการกัดที่ 55 นาที จากนั้นนำชิ้นงานไปล้างด้วยอะซิโตนเพื่อล้างเอาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงส่วนที่ไม่ต้องการออกคังกระบวนการในรูปแบบที่ 5.6



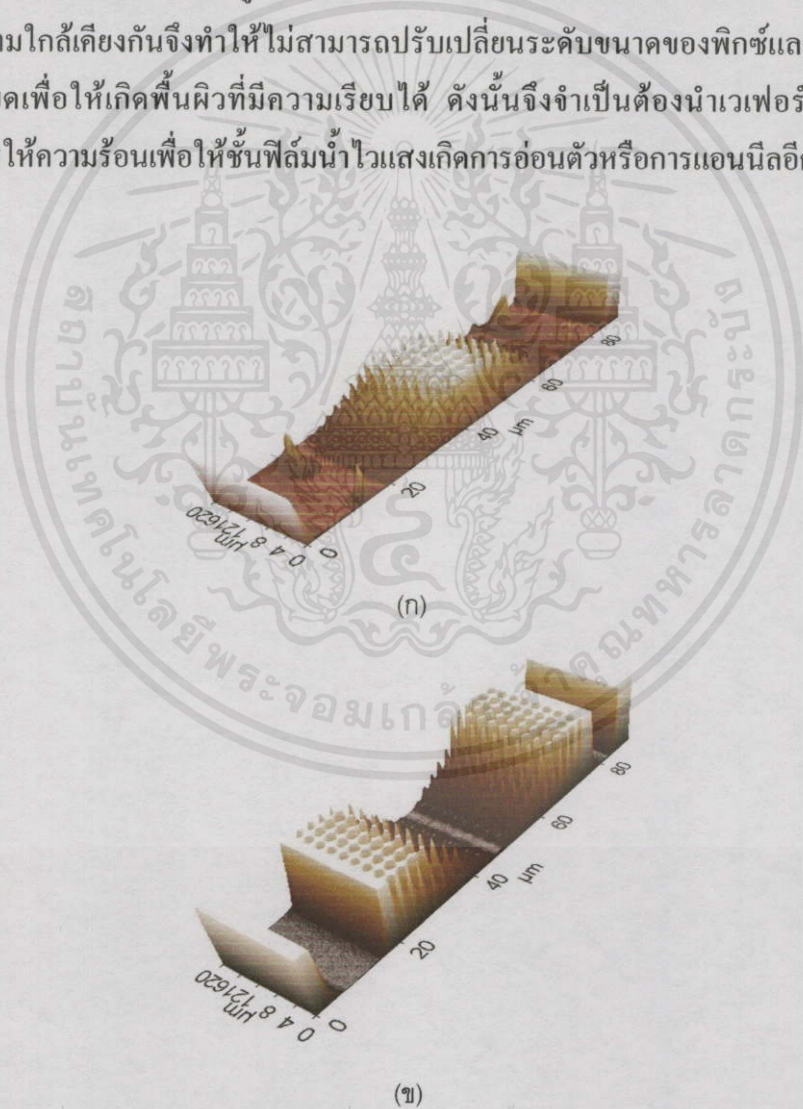
รูปที่ 5.6 กระบวนการสร้างลายวงจรโดยเทคนิคเกรย์สเกล

5.3 การวิเคราะห์ผลการสร้างเลนส์ระดับจุลภาค

5.3.1 โครงสร้างจุลภาคสามมิติของเลนส์จุลภาคต้นแบบบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง

เมื่อนำแผ่นเวเฟอร์ซิลิคอนที่ผ่านการฉายแสงเพื่อถ่ายแบบลายวงจรด้วยเทคนิคเกรย์สเกลแล้วล้างลายน้ำยาไวแสง จากนั้นนำลวดลายจุลภาคสามมิติไปทำการถ่ายภาพ AFM ดังรูปที่ 5.7 เพื่อตรวจสอบคุณภาพของโครงสร้างจุลภาคสามมิติบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงเพื่อวิเคราะห์ผล ซึ่งผลจาก

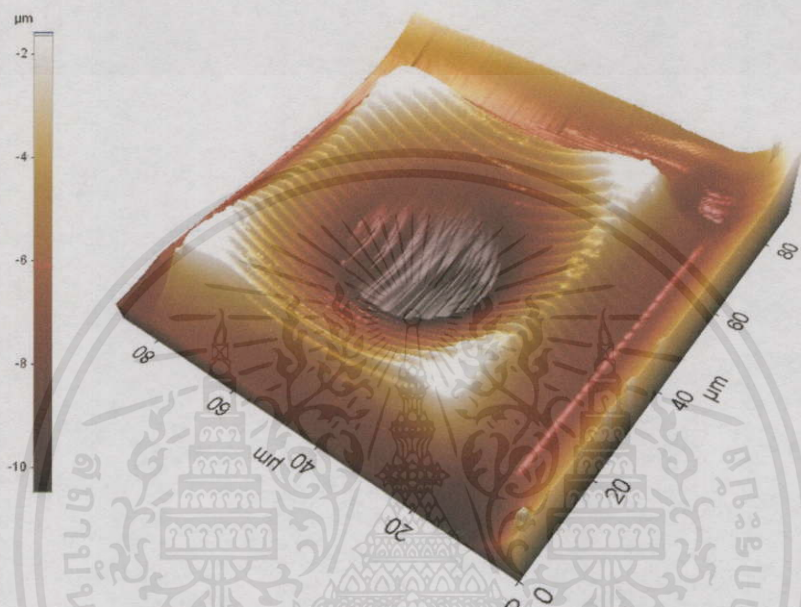
การทดลองพบว่าผิวหนังชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เป็น โครงสร้างจุลภาคสามมิติของเลนส์นูนและเว้า นั้นขรุขระมาก ในรูปที่ 5.7(ก) พบว่าตรงจุดกึ่งกลางเลนส์นูนมีพื้นที่บางส่วนของผิวฟิล์มน้ำยาไวแสงไม่ถูกฉายแสง เมื่อพิจารณา ณ จุดนี้เปรียบเทียบกับลวดลายโฟโตมาส์กต้นแบบจะพบว่า เป็นตรงกับขนาดลวดลายของฟิสิกเซลเท่ากับ 1.0 และ 1.1 ไมครอนและเป็นพื้นที่ช่องว่างของฟิสิกส์เท่ากับ 2.0 ถึง 2.4 ไมครอนหรือเป็นชั้นฟิล์มโครเมียมที่หน้าที่ป้องกันการส่องผ่านแสงบนแผ่นกระจกโฟโตมาส์กนั่นเองซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าความละเอียดของเครื่องถ่ายแบบลายวงจร โปรเจคชันสเต็ปเปอร์ จึงเป็นสาเหตุทำให้ไม่เกิดการกรองพลังงานแสงที่มากเพียงพอ นอกจากนี้ยังพบว่าพื้นผิวของเลนส์แบบนูนมีความขรุขระมาก โดยมีลักษณะเหมือนการเกิดเป็นลายของแต่ละฟิสิกส์และฟิสิกเซลนั่นเอง ขณะเดียวกัน โครงสร้างของเลนส์เว้าในรูปที่ 5.7(ข) มีลักษณะของพื้นผิวเช่นเดียวกันแต่เป็นไปในทิศตรงข้ามกับลักษณะของเลนส์นูน ทั้งนี้เนื่องจากความละเอียดของเครื่องสเต็ปเปอร์ และเครื่อง DWL มีความใกล้เคียงกันจึงทำให้ไม่สามารถปรับเปลี่ยนระดับขนาดของฟิสิกส์และฟิสิกเซล ให้ความละเอียดเพื่อให้เกิดพื้นผิวที่มีความเรียบได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำเวเฟอร์ที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการให้ความร้อนเพื่อให้ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงเกิดการอ่อนตัวหรือการแอนนิลอีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 5.7 ภาพถ่าย AFM ลวดลายของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงหลังจากการล้างลายวงจร (ก) รูปร่างเลนส์นูน (ข) รูปร่างเลนส์เว้า

5.3.2 โครงสร้างจุลภาคสามมิติของเลนส์จุดภาคต้นแบบบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงหลังการให้ความร้อนเพื่อแอนนิลแก่ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง

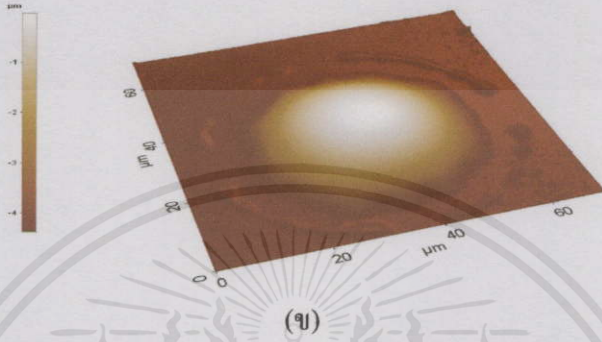
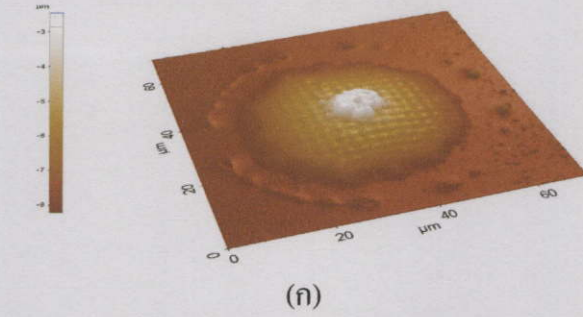
กระบวนการแอนนิลแก่ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงหลังการล้างลายน้ำยาไวแสงเป็นการให้ความร้อนโดยการวางชิ้นงานบนแท่นความร้อนที่อุณหภูมิสูงที่ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 นาที พบว่าโครงสร้างผนังผิวของเลนส์เว้ามีความเรียบมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความร้อนทำให้น้ำยาไวแสงเกิดการอ่อนตัวและเกิดการไหลอีกครั้ง ดังรูปที่ 5.8



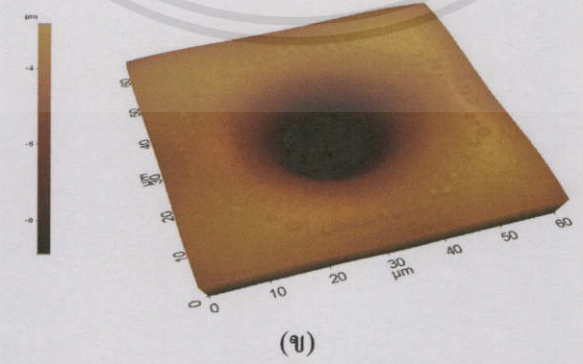
รูปที่ 5.8 ภาพถ่าย AFM ลวดลายของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงของเลนส์เว้าหลังจากการล้างลายและผ่านการแอนนิล

5.3.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคสามมิติของเลนส์จุดภาคต้นแบบบนเวเฟอร์ชนิดซิลิคอนหลังการกัดแบบแห้ง

ผลจากการนำเวเฟอร์ชนิดซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแบบสามมิติเพื่อสร้างลายวงจรของเลนส์ระดับจุดภาคทั้งสองแบบแล้ว จากนั้นนำไปทำการอบแอนนิลหลังการล้างน้ำยาไวแสงด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด โดยเครื่องอบแบบแท่นความร้อนและนำแผ่นเวเฟอร์ที่ได้ไปทำการกัดแบบแห้ง RIE ด้วยเวลา 55 นาที ซึ่งจะเป็นเวลาการกัดที่ถึงชั้นผิวบนเวเฟอร์ซิลิคอนพอดีจากความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงเท่ากับ 10 ไมครอน โดยที่อัตราการกัดของฟิล์มน้ำยาไวแสงเท่ากับ 0.195 ไมครอนต่อนาที ดังรูปที่ 5.9 และรูปที่ 5.10 จากภาพถ่ายสามมิติของเลนส์ระดับจุดภาคพบว่าเลนส์ที่สร้างได้นั้นมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 45 ไมครอน ทั้งนี้เกิดจากความละเอียดของเครื่อง DWL และเครื่องถ่ายภาพลายวงจร โปรเจคชันสเต็ปเปอร์มีความใกล้เคียงกันมาก ทำให้ลายของโฟโตมาส์บางส่วนขาดหาย

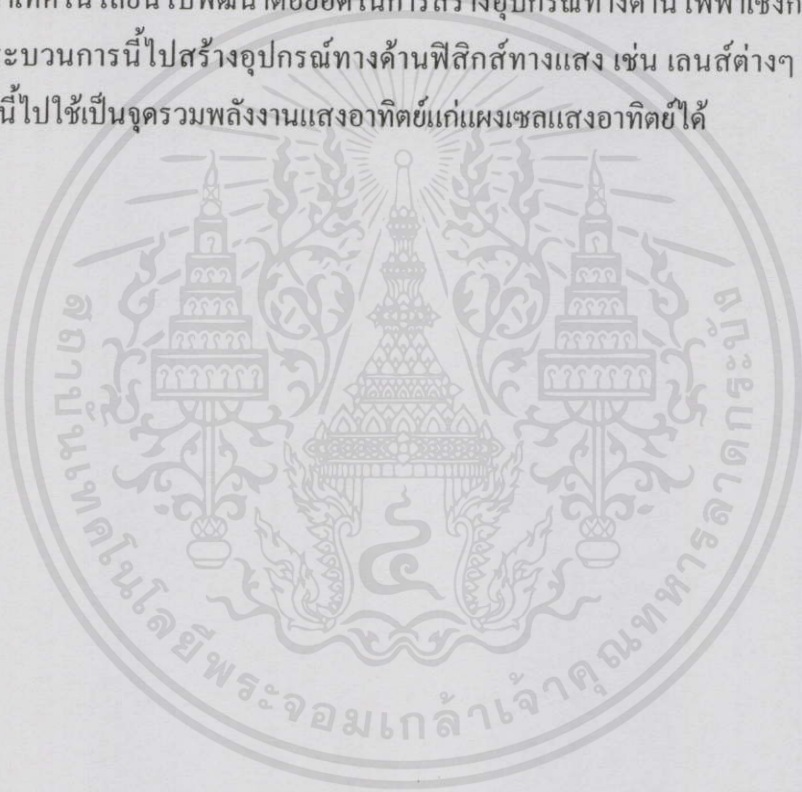


รูปที่ 5.9 ภาพถ่าย AFM เปรียบเทียบ โครงสร้างเลนส์จุลภาคแบบนูนหลังการกัดแบบแห้ง (ก) ไม่ผ่านการอบแอนีลนํ้ายาไวแสงหลังล้างลาย (ข) ผ่านการอบแอนีลนํ้ายาไวแสงหลังล้างลาย



รูปที่ 5.10 ภาพถ่าย AFM เปรียบเทียบ โครงสร้างเลนส์จุลภาคแบบเว้าหลังการกัดแบบแห้ง (ก) ไม่ผ่านการอบแอนีลนํ้ายาไวแสงหลังล้างลาย (ข) ผ่านการอบแอนีลนํ้ายาไวแสงหลังล้างลาย

จากประยุกต์ใช้งานจากกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแบบเกรย์สเกลเพื่อสร้างเลนส์ที่มีขนาดเล็กมากในระดับไมครอนนั้น มีข้อจำกัด คือ ขนาดของพิกเซลและพิทช์บนแผ่นกระจกโฟโตมาส์กั้นแบบจะต้องมีขนาดเล็กกว่าความละเอียดของเครื่องถ่ายแบบลายวงจรที่ใช้ในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจร ส่วนการออกแบบลวดลายของโฟโตมาส์กั้นนั้นสามารถใช้โปรแกรมAutoCAD ที่มีอยู่ในท้องตลาดได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังพบว่าความยากในการผลิตจะอยู่ที่การควบคุมกระบวนการสร้างแผ่นกระจกโฟโตมาส์กั้น พารามิเตอร์ต่างๆ ของการเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงบนชิ้นงาน ความละเอียดของระบบโปรเจกชันเลนส์ในเครื่องถ่ายแบบลายวงจร ตลอดจนค่าอัตราการกัดของแผ่นชิ้นงานเวเฟอร์ด้วยเทคนิคเครื่องกัดแบบแห้ง งานวิจัยในบทนี้ให้ผลเป็นที่น่าพอใจซึ่งสามารถนำเทคโนโลยีนี้ไปพัฒนาต่อยอดในการสร้างอุปกรณ์ทางด้านไฟฟ้าเชิงกลได้ เช่น การนำเทคนิคกระบวนการนี้ไปสร้างอุปกรณ์ทางด้านฟิสิกส์ทางแสง เช่น เลนส์ต่างๆ หรือนำเลนส์ระดับจุลภาคนี้ไปใช้เป็นจตุรวมพลังงานแสงอาทิตย์แก่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุป

งานวิจัยทั้งหมดที่ได้นำเสนอไว้ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ โดยมีเนื้อหาที่สอดคล้องกับความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษาที่ได้ถูกกำหนดไว้แต่แรก (ในบทที่ 1) ซึ่งเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการสร้างลายวงจรโฟโตลิโธกราฟีแบบสามมิติบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง โดยเป็นการนำเทคนิคกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแบบแปรเปลี่ยนระดับพลังงานแสง โดยตรงจากแหล่งจ่ายแสงกับกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีแบบเทคนิคเกรย์สเกล เพื่อใช้สร้างลวดลายโครงสร้างจุลภาคสามมิติ ซึ่งจะมีความสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีต่อ ยอดในการสร้างอุปกรณ์ทางด้านไฟฟ้าจุลภาคเชิงกลในอนาคต ซึ่งสรุปสาระสำคัญทั้งสองเทคนิคดังต่อไปนี้

1. การสร้างลายวงจรโฟโตลิโธกราฟีสามมิติด้วยเทคนิคแบบแปรเปลี่ยนระดับพลังงานแสง โดยตรงจากแหล่งจ่ายแสงนั้นเป็นการสร้างโครงสร้างจุลภาคสามมิติบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง โดยอาศัยความแม่นยำในการซึ่ดนามาสึกและการเคลื่อนที่ของฐานรองเวเฟอร์ไปยังตำแหน่งการฉายแสงที่ถูกต้องและแม่นยำ จากนั้นกำหนดค่าโดสแสงที่ใช้ฉายแสงด้วยค่าที่เหมาะสมต่อความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงทั้งนี้เพื่อให้เกิด โครงสร้างจุลภาคสามมิติแก่ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ถูกทำการฉายแสง ซึ่งลักษณะ โครงสร้างจุลภาคสามมิติของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงนั้นจะมีลักษณะเป็นแบบขั้นบันไดเท่านั้น

งานวิจัยพบว่าเทคนิคนี้มีโครงสร้างสามมิติของฟิล์มน้ำยาไวแสงแบบขั้นบันไดสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการลดขั้นตอนการผลิตที่มีความลึกของพื้นผิวเวเฟอร์หรือชิ้นงานที่มีหลายระดับความลึกได้เป็นอย่างดี ซึ่งจะส่งผลให้สามารถลดเวลาและกระบวนการผลิตลงตลอดจนเป็นการลดการใช้ของวัสดุดิบ เช่น สารเคมีต่างๆ ในสายการผลิตกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีลงได้ จึงทำให้สามารถเพิ่มความสามารถในการแข่งขันเชิงต้นทุนอุตสาหกรรมได้ ผลจากการทดลองพบว่าปัจจัยหลักที่จะส่งผลต่อการสร้าง โครงสร้างจุลภาคสามมิติในขั้นตอนการสร้างลายวงจรนั้น ได้แก่ ขั้นตอนการเคลื่อนน้ำยาไวแสงจะต้องมีความเสถียรภาพและความสม่ำเสมอของฟิล์มน้ำยาไวแสงที่สูง เนื่องจากน้ำยาไวแสงซึ่งถูกเคลือบยังแผ่นเวเฟอร์จะเป็นตัวกำหนดคุณภาพพื้นผิว โครงสร้างจุลภาคสามมิตินั้นเอง นอกจากนี้ความว่องไวต่อการกัดของตัวน้ำยาไวแสงจะเป็นส่วนกำหนดความลึกบนพื้นผิวเวเฟอร์หลังจากกระบวนการกัดแบบแห้ง นอกจากนี้ยังพบว่าความสามารถในการซึ่ดนามาสึกที่สมบูรณ์และการกำหนดค่าโดสแสงของเครื่องฉายแบบลายวงจรก็เป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญในการกำหนด โครงสร้างจุลภาคสามมิติของน้ำยาไวแสงเพื่อให้ได้รูปร่างลวดลายวงจรต่างๆ ที่ความถูกต้องและสมบูรณ์ตามที่ได้ออกแบบนั้นๆ ได้ การสร้างลวดลายวงจรโฟโตลิโธกราฟีแบบสามมิติด้วยเทคนิคนี้ถือได้ว่าเป็นจุดเด่นประการ

หนึ่งของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ กล่าวคือ เทคนิคนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในกระบวนการผลิตโฟโตลิโธกราฟีได้โดยตรงซึ่งไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงระบบการผลิตที่มีอยู่แล้วในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมากนัก

2. การสร้างลายวงจรโฟโตลิโธกราฟีสามมิติด้วยเทคนิคเกรย์สเกล เทคนิคนี้สามารถสร้างลายวงจรที่มีลักษณะผนังโครงสร้างลายวงจรแบบโค้งเว้าได้เป็นอย่างดี ซึ่งโครงสร้างลักษณะนี้ สามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์ทางด้านเครื่องจักรกลไฟฟ้าอุตสาหกรรมได้อย่างเหมาะสมและมีขั้นตอนกระบวนการผลิตที่สั้นกว่าเทคนิคการสร้างลายวงจรสามมิติแบบแปรเปลี่ยนระดับพลังงานแสงโดยตรงจากแหล่งจ่ายแสง แต่เทคนิคนี้จะมีต้นทุนการผลิตแผ่นโฟโตมาส์กที่แพงมาก เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคสามมิติที่เกิดขึ้นบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงนั้นเป็นผลซึ่งเกิดจากกรองระดับพลังงานแสงของแผ่นโฟโตมาส์ก ลวดลายต้นแบบโฟโตมาส์กชนิดเกรย์สเกลนี้จะประกอบด้วยลวดลายขนาดเล็กจำนวนมากของลายพิกเซลและพิทช์เพื่อทำหน้าที่ช่องเปิดให้แสงผ่านและเป็นส่วนป้องกันไม่ให้แสงผ่าน ดังนั้นเมื่อมีการฉายแสงผ่านกระจกโฟโตมาส์กชนิดนี้จึงทำให้เกิดการแทรกสอดแสงและเกิดการกรองพลังงานแสงเป็นระดับพลังงานแสงที่ค่าโคซต่าง ๆ กันจากการฉายแสงเพียงครั้งเดียว ทั้งนี้การกรองระดับพลังงานแสงจะเกิดขึ้นได้นั้นก็ต่อเมื่อลวดลายของพิกเซลและพิทช์จะต้องขนาดที่เล็กกว่าค่าความละเอียดของเครื่องถ่ายภาพลายวงจรที่ใช้ในกระบวนการถ่ายภาพลายวงจรโฟโตลิโธกราฟี ดังนั้นแผ่นกระจกโฟโตมาส์กชนิดนี้จึงมีราคาต้นทุนการผลิตที่สูงมากเมื่อเทียบกับแผ่นโฟโตมาส์กชนิดอื่นๆ งานวิจัยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้มีการนำเทคนิค เกรย์สเกลไปประยุกต์ใช้สร้างเลนส์ระดับจุลภาคที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 45 ไมครอน (ในบทที่ 5) บนฐานรองซิลิคอนเพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคสามมิติของเลนส์นูนและเว้าที่ถูกสร้างได้และเป็นอีกจุดเด่นหลักของงานวิจัยนี้ เนื่องจากเทคนิคเกรย์สเกลนี้มีประสิทธิภาพในสร้างลายวงจรสามมิติได้มากกว่าเทคนิคแรก ซึ่งการสร้างลายวงจรนี้สามารถที่จะสร้างลายวงจรสามมิติที่โครงสร้างสามมิติที่สมบูรณ์ได้จากการถ่ายภาพลายวงจรเพียงครั้งเดียว ผลจากการทดลองสร้างเลนส์ต้นแบบพบว่าลักษณะพื้นผิวของลวดลายสามมิติของชั้นน้ำยาไวแสงมีความขรุขระค่อนข้างสูงมากเนื่องจากความละเอียดของเครื่องสร้างแผ่นกระจกโฟโตมาส์ก (DWL) และเครื่องถ่ายภาพลายวงจรมีความใกล้เคียงกันจึงเป็นปัญหาหลักของกระบวนการถ่ายภาพลายวงจรด้วยเทคนิคนี้นั่นเอง ส่วนแนวทางการแก้ปัญหาในส่วนของความขรุขระของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงนั้นสามารถจะกระทำโดยการให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิสูงเพื่อแอนนิลแก่ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง โดยใช้อุณหภูมิประมาณ 120-140 องศาเซลเซียสซึ่งจะทำให้ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงเกิดการอ่อนตัวแล้วไหลอีกครั้งตามทิศทางแรงโน้มถ่วงของโลกซึ่งส่งผลให้พื้นผิวของน้ำยาไวแสงเกิดความราบเรียบตามสภาพความโค้งเว้าของพื้นผิวของฟิล์มน้ำยาไวแสงได้ดียิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้มีเนื้อหาหลักซึ่งกล่าวถึงทั้งสองเทคนิค โดยละเอียด ด้วยการวิจัยเพื่อศึกษาการ สร้างลายวงจรรโฟโตลิโธกราฟีแบบสามมิติซึ่งกล่าวโดยสรุปคือ การสร้างลายวงจรรสามมิติแบบ เทคนิคแปรเปลี่ยนพลังงานแสง โดยตรงจากแหล่งจ่ายแสงนั้นสามารถสร้างลายวงจรรที่ให้ค่าความ ราบเรียบของพื้นผิวชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงแบบชั้นบันไดที่ดีกว่าเทคนิคอื่นๆ ส่วนเทคนิคแบบเกรย์ สเกลสามารถสร้าง โครงสร้างลักษณะพื้นผิวของน้ำยาไวแสงที่มีความโค้งเว้าได้ดีกว่า เมื่อนำ เวเฟอร์ที่ถูกสร้างลายวงจรรแบบสามมิติบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงไปสู่กระบวนการกัดแบบแห้งซึ่งจะ สามารถถ่ายทอดลวดลายวงจรรชั่วคราวของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงยังลายวงจรรแบบถาวรบนแผ่น เวเฟอร์หรือชิ้นงานเป้าหมายได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการพัฒนาเทคโนโลยีที่สำคัญ ในอนาคต

วิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นการศึกษาที่เกี่ยวกับกระบวนการสร้าง โครงสร้างลวดลายจุดภาค สามมิติบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง โดยที่เครื่องมือในการออกแบบลวดลายโฟโตมาส์จากศูนย์วิจัย TMEC และเครื่องมือที่ใช้ในทดลองเกี่ยวกับกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรรและการกัดเวเฟอร์ แบบแห้งนั้นๆ เป็นการใช้เครื่องมือของบริษัทแห่งหนึ่ง ฉะนั้นกระบวนการทดลองทั้งหมดนี้ จึง ยึดหลักกระบวนการผลิตโดยอ้างอิงจากระบวนการพื้นฐานจากศูนย์วิจัย TMEC และ กระบวนการผลิตโดยทั่วของกระบวนการ โฟโตลิโธกราฟีจากบริษัทที่ให้การอนุเคราะห์ในครั้งนี้ ด้วยเหตุนี้ปัจจัยอื่นๆ ที่อาจเกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตโฟโตลิโธกราฟีแบบสามมิติ เช่น ปัจจัย ของสภาพแวดล้อม ดังเช่น อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของห้องปฏิบัติการ ส่วนผสมของ สารเคมีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต ความผันแปรของเครื่องจักรที่ใช้ทดสอบ จึง ไม่มี การทดสอบเพื่อหาผลกระทบในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Christopher M. Snowden. "Introduction to Semiconductor Device Modelling." World Scientific, 1986
- [2] รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช. "เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์." พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร :แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์ พระจอมเกล้าลาดกระบัง. 2549
- [3] C.Denis Mee and Eric D, Daniel. "Magnetic Recording Technology." :McGraw-Hill Professional , 1996
- [4] Clyde F. Coombs, Printed Circuits Handbook : McGraw-Hill Professional, 2001
- [5] James J. Allen. "Micro Electro Mechanical System Design." : CRC Press, 1995
- [6] Waits, C.M, A. Modafe and R. Ghodssi. "Investigation of gray-scale technology for large area 3D silicon MEMs structures." Journal of Micromechanics and Microengineer, Vol.13, pp.170-177, 2003
- [7] Micheal Quirk and Julian Serda. "Semiconductor Manufacturing Technology" : Pretice-Hell Inc.Upper Saddle River, New Jersey .2001
- [8] Syed A. Rizvi, " Handbook of Photomask Manufacturing Technology", CRC Press, 2005
- [9] Larrt F. Thompson, C.Grant Willson, and Murrac J.Bowdon "Introduction to microlithography" :2nd Edition, ACS Professional reference book, 1991
- [10] Ultratech stepper Inc, "1000 Series PC Products Operations Manual", San Jose, CA 95134: the United States of America, 2002
- [11] Gordon E. Moore, "Cramming more components onto integrated circuits." Electronics, Volume 38, 1965
- [12] J.Jantawong, N. Atthi, S. Niemcharoen, K.Siangchaew, W. Jeamsaksiri, and A. Poyai. "Three Dimension Microstructure Fabrication by Using Energy Dose Variation Lithography Technique." International Conference on Engineering, Applied sciences and Technology (ICEAST), 2007
- [13] N.P.Pham, P.M.Sarro, J.N.Burghartz. "Spray coating of AZ4562 photoresist for MEMS applications." Proceedings of SAFE 2001, Veldhoven, The Netherlands, 2001
- [14] Nga P, Pham, E.Boellard, Pasqualina M. Sarro and Joachim N. Burghartz. "Spin, Spray and Electroplating of Photoresist for MEMS Structures A Comparison." Proc. SAFE 2002, Veldhoven, The Netherlands, Publ. STW, ISBN 90-73461-33-2, pp. 81-86, 2002

- [15] P. Rai-Choudhury. "Handbook of Microlithography, Micromachining, and Microfabrication", 1997
- [16] ชลิดา กุหาเรือง และคณะ "กระบวนการสร้างโฟโตมาส์สำหรับวงจรรวมซีมอส ขนาด 5 ไมครอน" การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 26 .ปีที่ 26. หน้า 1365-1370, 2546
- [17] ชลิดา กุหาเรือง, วีระ เพ็งจันทร์, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, สมเกียรติ สุขเดช. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีบนชั้นฟิล์มออกไซด์ สำหรับสร้างลวดลายวงจรรวม แบบเทคโนโลยีซีมอส ขนาด 5 ไมครอน."วิศวกรรมลาดกระบัง .ปีที่ 21. หน้า 1-6, 2547
- [18] ธิปไตย ตัณฑ์ประพันธ์, ภาวัน สยามชัย, อธิธิ ฤทธาภรณ์ .” การสร้างมาส์สำหรับกระบวนการลิโธกราฟีระดับไมครอน.” การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 25. ปีที่ 25. หน้า 149-152, 2545
- [19] D. C. O'Shea and W. S. Rockward. "Gray-scale masks for diffractive-optics fabrication: II. Spatially filtered halftone screens." Appl. Opt. 34, pp.7507-7518, 1995
- [20] Clariant Corporation AZ Electronic Materials. "AZ P4000 Photoresist datasheet." [online] available: www.azresist.com, 2003
- [21] N.Atthi,W.Jeamsaksiri, C.Aramphongphun, J.Jantawong,C.Hruanun,C and A.Poyai "The Influence of Chromium Film Thickness on Photomask on Light Transmission for 3D-Lithography Application." Nanoscience and Nanotechnology, German-Thai Symposium, 2007
- [22] จิรวัดน์ จันต๊ะวงศ์, นิธิ อัดติ, ชูพงษ์ ภาคภูมิ, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ กฤษฎา เสียงแจ้ว "การศึกษาการสร้างไมโครเลนส์โดยเทคนิคโฟโตลิโธกราฟีแบบเกรย์สเกล." การประชุม วิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 30, 2550
- [23] Wikipedia the free encyclopedia. "Lens (optics)." [online] available : http://en.wikipedia.org/wiki/Convex_lens#Types_of_lenses, 2007
- [24] Talor Hobson precision. "Talysurf 3000 Å non-contact 3D surface profiler" [online] available : http://taylor-hobson.pl/taylor_hobson_files/pdf/talycci3000a.pdf, 2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

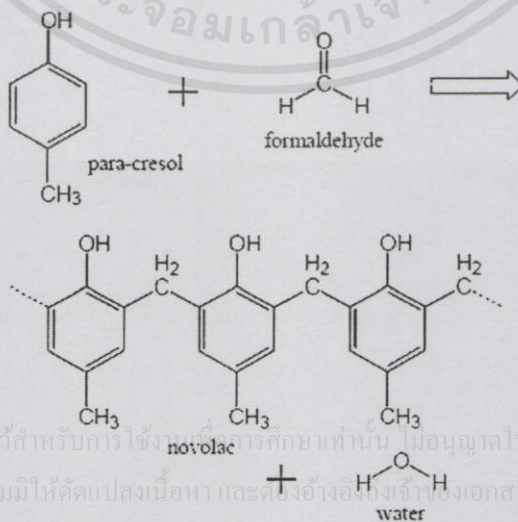
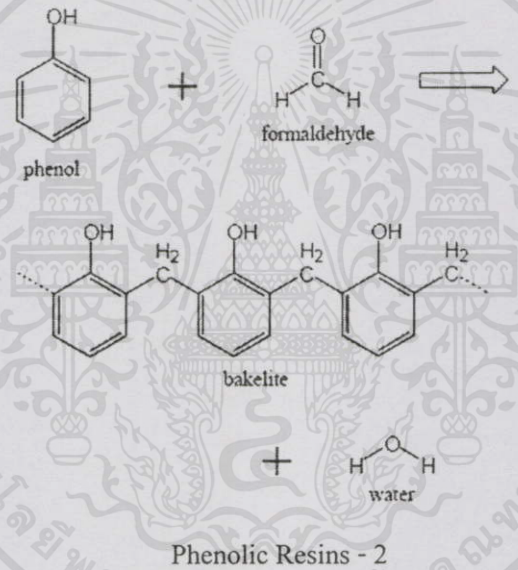
ภาคผนวก ก.

คุณสมบัติทางเคมีของน้ำยาไวแสงชนิดบวก

ภาคผนวก ก จะกล่าวถึง ข้อมูลซึ่งกับปฏิกิริยาเคมีของน้ำยาไวแสงชนิดบวก

Advantages of Positive Photoresists

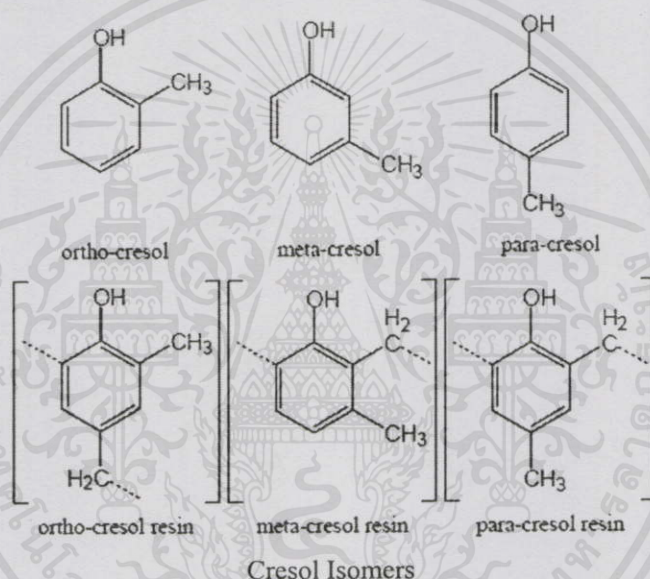
- Most commonly used in the IC industry.
- Superior to negative photoresists because:
 - a. They do not swell during development.
 - b. They are capable of finer resolution.
 - c. They are reasonably resistant to plasma processing operations.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Important Properties of the Base Phenolic Resin

- average molecular weight
 - typically in the range of 1000 to 3000 g/mole
 - (8 to 25 repeating units in the polymer chain)
- dispersity of the molecular weights
- isomeric composition of the cresols
 - ortho-cresol
 - meta-cresol
 - para-cresol
- relative position of the methylene linkages (--CH₂--)

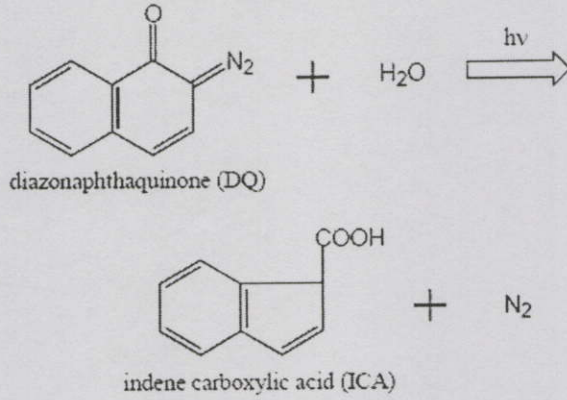


Cresol Isomer Properties

- Single isomers and smaller molecular weights are desirable
- Manufacture of positive photoresist relies heavily upon obtaining only a single isomer of the resin, usually paracresol.
- Each monomer is [C₈H₈O] (120.151 g/mole)

Isomer	Methylene Link	Molecular Weight	Dissolution Rate	Plastic Flow Temp.
ortho-cresol	3	2100 g/mole	2.7 A/sec	85 C
meta-cresol	1	15000 g/mole	0.7 A/sec	73 C
para-cresol	1	1600 g/mole	3.0 A/sec	119 C

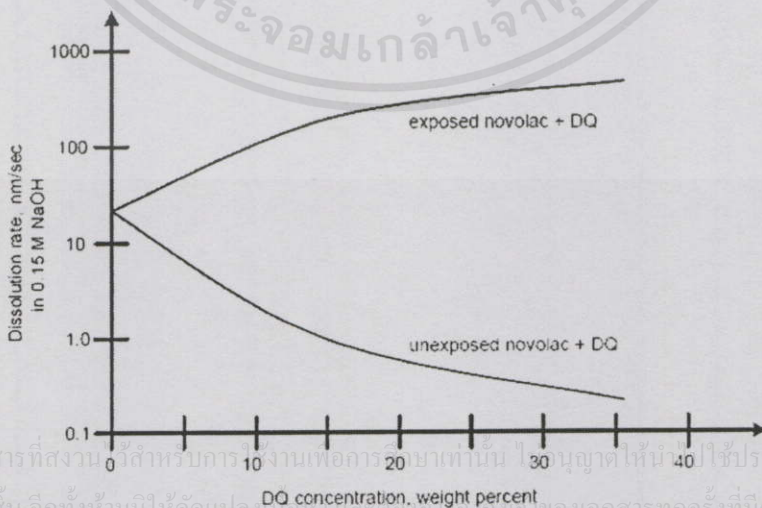
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นใดได้
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



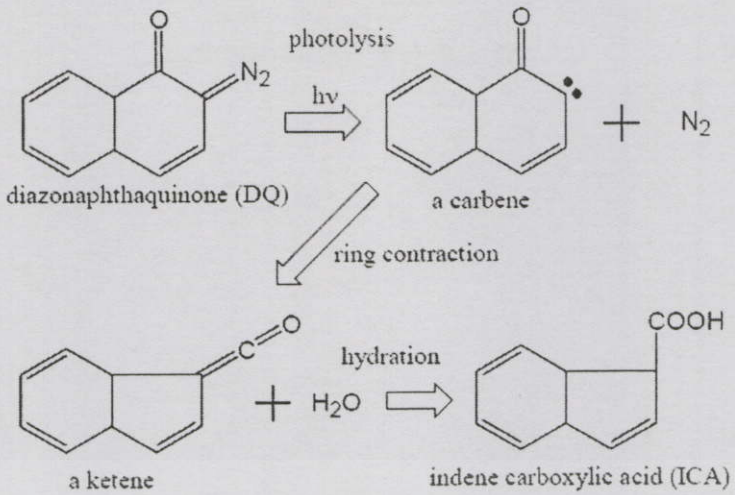
Photoreaction in a Positive Photoresist

Dissolution of Phenolic Resins - 1

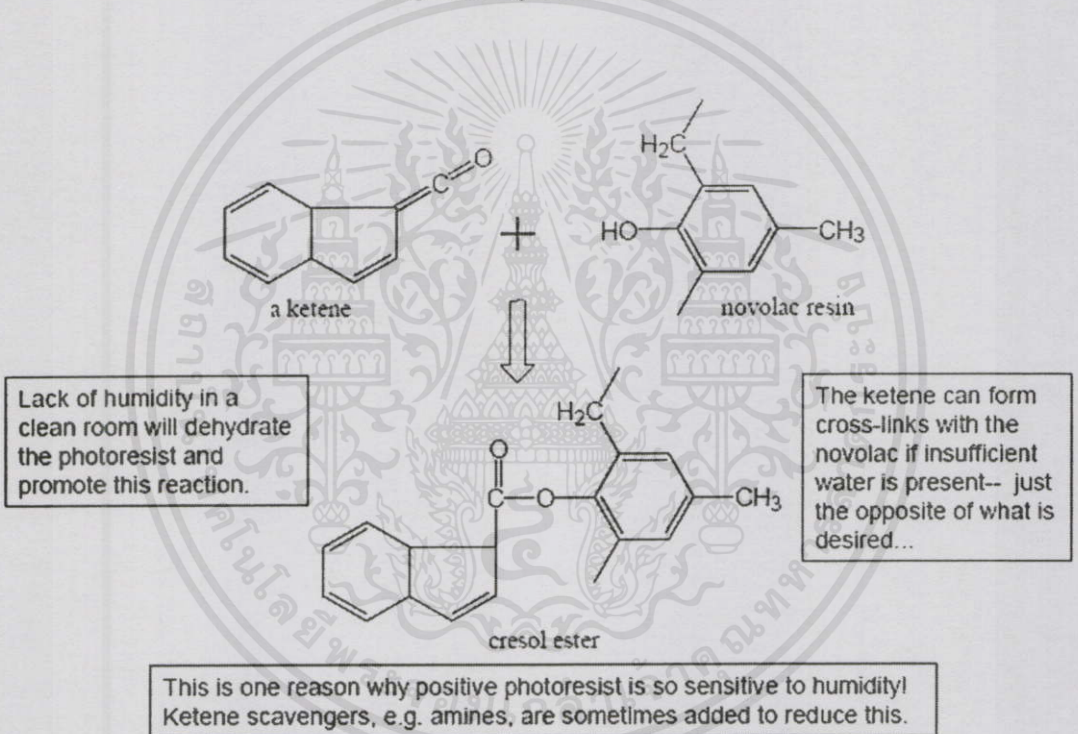
- Because of the OH groups, phenolic resins are hydrophilic and are readily dissolved by aqueous alkaline solutions.
- Diazonaphthaquinone (DQ) is a hydrophobic and nonionizable compound.
- When phenolic resins are impregnated with DQ, they become hydrophobic and their dissolution is greatly inhibited.
- After exposure, DQ is converted into indene carboxylic acid (ICA) which is hydrophilic and very ionizable.
 - This allows the developer to wet and penetrate the novolac resin.
- Phenolic resins which contain ICA instead of DQ are readily dissolved by aqueous alkaline developers



Dissolution of Phenolic Resins - 2



DQ Primary Photoreaction



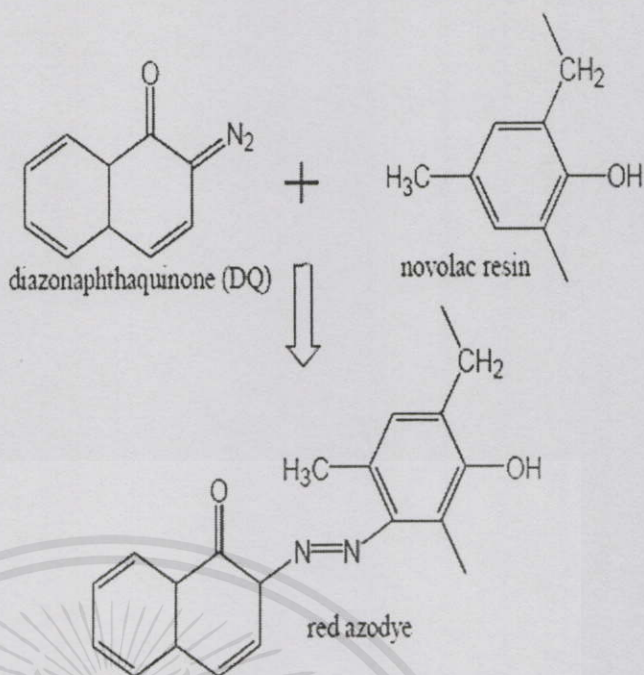
DQ Side Reactions - 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This reaction always occurs to some extent, it causes the red color of photoresist, and it is benign as long as the DQ content is not overly depleted.

This reaction is more prevalent in the unirradiated areas where the DQ has not been consumed by the photolysis reaction.

This reaction is one of the basic shelf-life limits to positive photoresist.

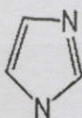
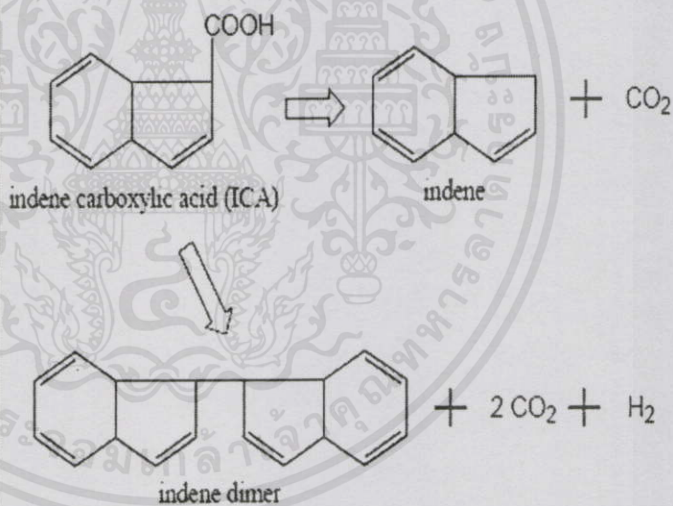


DQ Side Reactions - 2

Decarboxylation of ICA occurs when the exposed photoresist is heated, and this usually occurs as a normal part of the process during postbake.

The decarboxylated indene or its dimer are both hydrophobic and non-ionizable, so these once again act as a dissolution inhibitor, although now they are no longer photosensitive.

This reaction can be used as the basis for an image reversal process, especially when it is catalyzed by a compound such as imidazole.



imidazole ($\text{C}_3\text{H}_3\text{N}_2$)

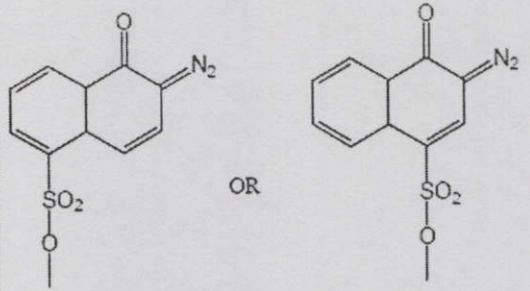
R. B. Darling / EE-527

DQ Side Reactions - 3

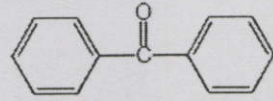
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Most positive photoresists use a derivative of the basic DQ photosensitive dissolution inhibitor. Diazoquinone sulfonyl groups (DQO) are added to a "ballast" compound such as dibenzoketone to produce a higher molecular weight compound such as tri-diazonaphthaquinone sulfonyl benzophenone.

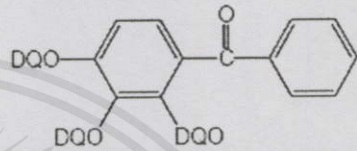
This is the most common photosensitive dissolution inhibitor which is used in common photoresist families such as AZ-1300, AZ-1500, AZ-4000, Microposit 1300, Microposit 1400, and Microposit 1800.



diazoquinone sulfonyl groups (DQO-)



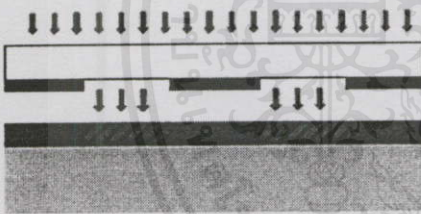
polyhydroxybenzophenone (dibenzoketone)



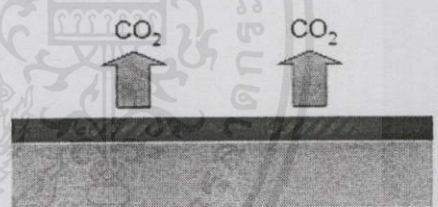
tri-diazonaphthaquinone sulfonyl benzophenone

DQ Ballasting

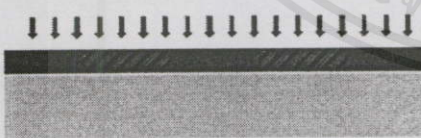
1. Standard masked exposure and conversion of DQ into ICA:



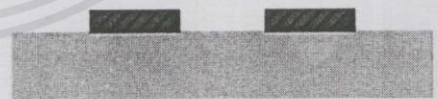
2. Baking and imidazole catalyst decarboxylates the ICA into indene:



3. Flood expose to convert the remaining DQ into ICA:



4. Development will dissolve away the regions which still contain ICA:



This is very useful when a negative image and an undercut resist profile are desired.

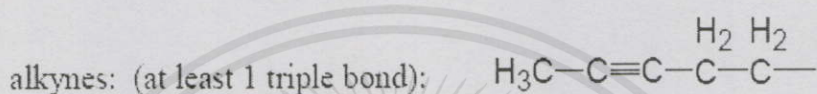
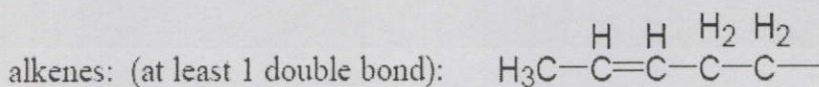
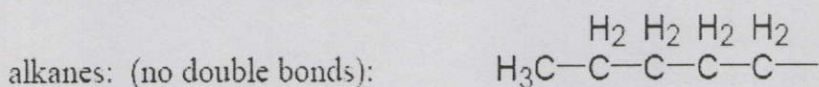
Positive Photoresist Image Reversal Process

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

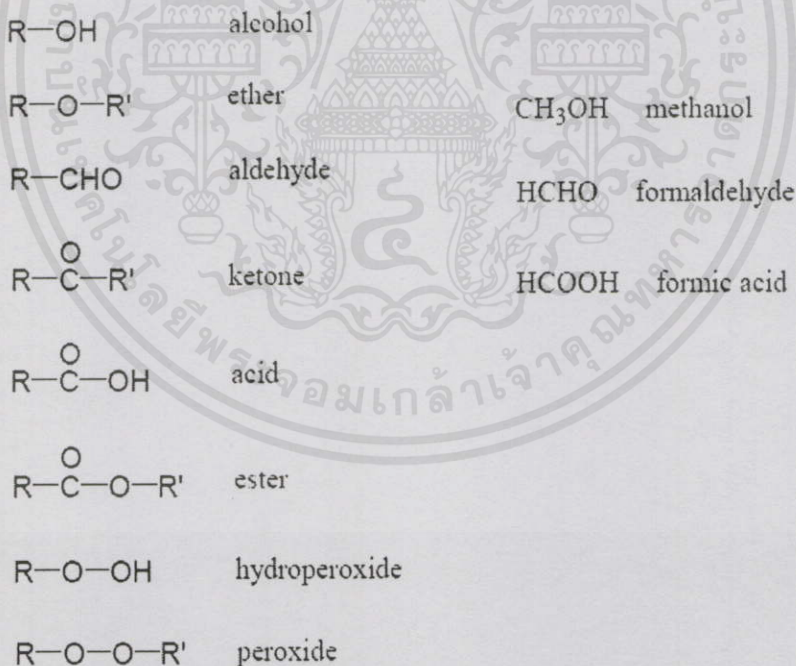
คุณสมบัติทางเคมีของน้ำยาไวแสงชนิดลบ

ภาคผนวก ข จะกล่าวถึง ข้อมูลซึ่งกับปฏิกิริยาเคมีของน้ำยาไวแสงชนิดลบ



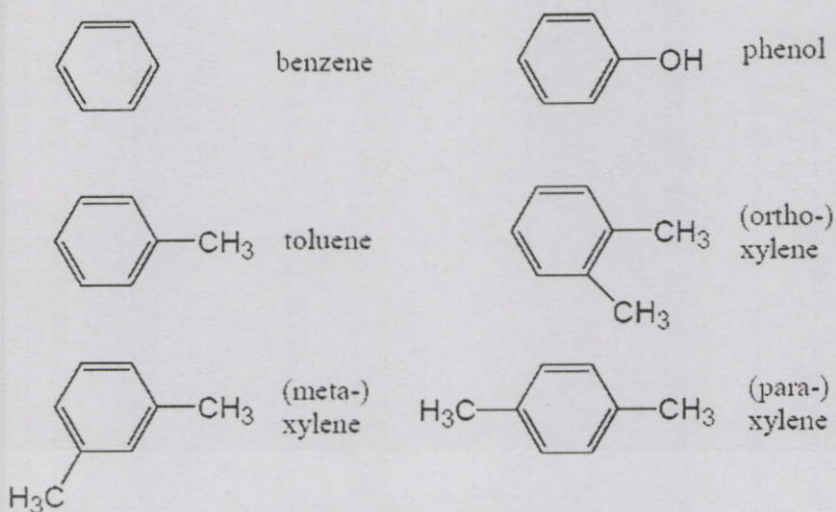
[alkenes and alkynes are unsaturated hydrocarbons.]

A Little Structural Organic Chemistry - 1



A Little Structural Organic Chemistry - 2

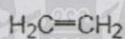
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



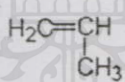
ortho-	means straight out
meta-	means beyond
para-	means opposite

A Little Structural Organic Chemistry - 3

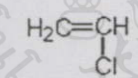
MONOMER



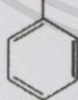
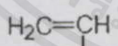
ethylene



propylene

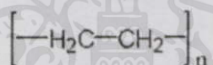


vinyl chloride

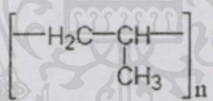


styrene

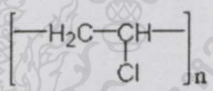
POLYMER



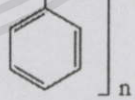
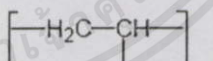
polyethylene (PE)



polypropylene (PP)



polyvinyl chloride (PVC)

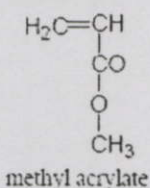


polystyrene (PS)

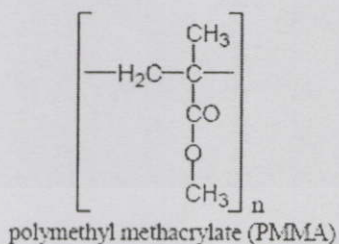
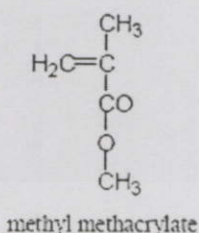
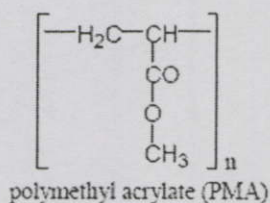
Common Monomers and Their Polymers - 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

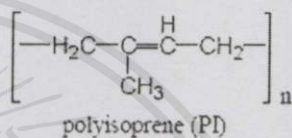
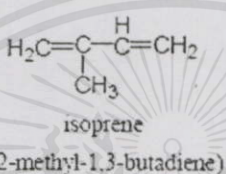
MONOMER



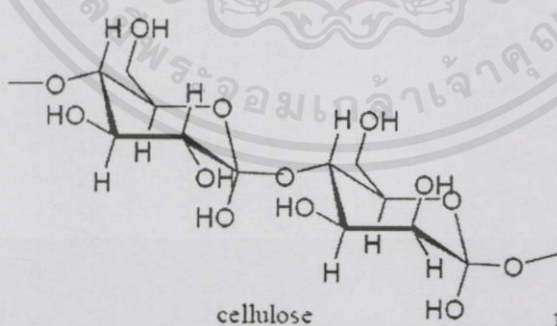
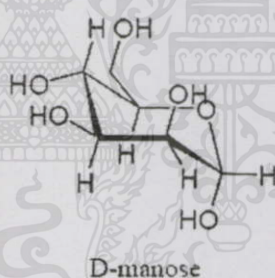
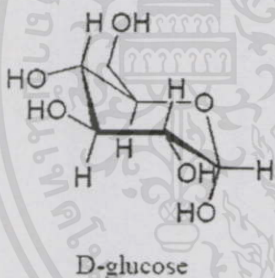
POLYMER



All rubbers are diene polymers



Common Monomers and Their Polymers - 2



R. B. Darling / EE-527

Common Monomers and Their Polymers - 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

hydrogen	1.0079
carbon	12.011
nitrogen	14.0067
oxygen	15.9994
silicon	28.0855
sulfur	32.06
chlorine	35.453

(distribution of isotopes gives rise to fractional atomic weights)

Atomic Weights

ethylene	C_2H_4	$2(12.011) + 4(1.0079) = 28.05 \text{ g/mole}$
propylene	C_3H_6	$3(12.011) + 6(1.0079) = 42.08 \text{ g/mole}$
vinyl chloride	C_2H_3Cl	$2(12.011) + 3(1.0079) + 35.453 = 62.50 \text{ g/mole}$
styrene	C_8H_8	$8(12.011) + 8(1.0079) = 105.16 \text{ g/mole}$
methyl acrylate	$C_4H_6O_2$	$4(12.011) + 6(1.0079) + 2(15.9994) = 86.09 \text{ g/mole}$
methyl methacrylate	$C_5H_8O_2$	$5(12.011) + 8(1.0079) + 2(15.9994) = 100.12 \text{ g/mole}$
isoprene	C_5H_8	$5(12.011) + 8(1.0079) = 68.12 \text{ g/mole}$

1 mole is Avogadro's number of particles: $N_A = 6.023 \times 10^{23}$

Molecular Weights

Molecular Weight of a Polymer

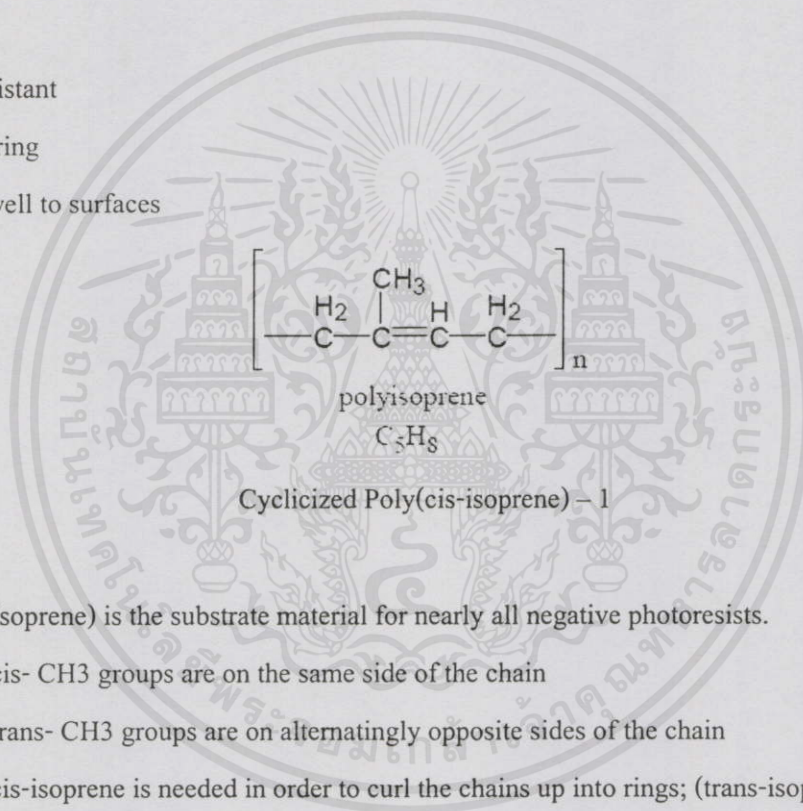
- $M_p = nM_m$
- n = number of units
- M_m = molecular weight of monomer
- M_p = molecular weight of polymer
- For use in a photoresist resin, need a molecular weight of around 100,000 - 200,000 for proper viscosity, melting point, softening point, and stiffness.
- Example:

- To get $M_p = 100,000$ using isoprene ($M_m = 68.12 \text{ g/mole}$), need to get chains of average length of $n = 100,000/68.12 = 1468$ units.

– This would lead to a molecule that is too long for proper photolithographic resolution, so need to coil the chains to make the lengths shorter and to increase the mechanical stiffness.

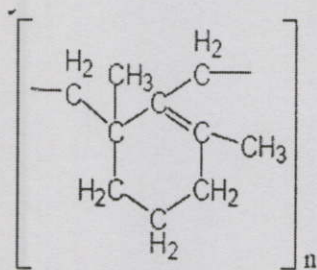
Polyisoprene Rubber

- 2-methyl-1,3-butadiene (isoprene) spontaneously polymerizes into natural latex rubber (polyisoprene).
- Polyisoprene becomes sticky and loses its shape at warm temperatures.
- Natural latex rubber is the only known polymer which is simultaneously:
 - elastic
 - air-tight
 - water-resistant
 - long wearing
 - adheres well to surfaces



- Poly(cis-isoprene) is the substrate material for nearly all negative photoresists.
 - cis- CH₃ groups are on the same side of the chain
 - trans- CH₃ groups are on alternatingly opposite sides of the chain
 - cis-isoprene is needed in order to curl the chains up into rings; (trans-isoprene will not work; CH₃ groups would hit each other).
- Two protons are added to cis-isoprene to further saturate the polymer and induce curling into cyclicized versions.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



monocyclic poly(cis-isoprene)



Bicyclic and tricyclic forms are also possible.
(This is usually part of the proprietary part of photoresist manufacture.)

R. B. Darling / EE-527

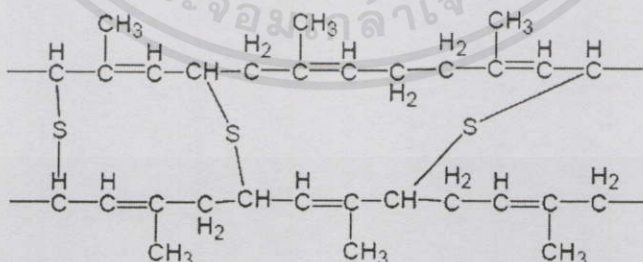
Cyclicized Poly(cis-isoprene) – 2

- Cyclicized poly(cis-isoprene) allows greater solids content in coating solutions and is less subject to thermal crosslinking.

Property	Uncyclicized	Cyclicized
Average Molecular Weight	$\sim 10^8$	$\sim 10^4$
Density	0.92 g/mL	0.99 g/mL
Softening Point	28 C	50-65 C
Intrinsic Viscosity	3-4	0.36-0.49
Unsaturation	14.7 mmole/g	4-8 mmole/g

Vulcanization (Cross-Linking) of Rubber

- Vulcanization of rubber uses sulfur atoms to form bridging bonds (cross-links) between polymer chains.
- Sulfur is thermally activated; it is not photosensitive.



Components of a Negative Photoresist

- 1. Non-photosensitive substrate material เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด – About 80 % of solids content
– Usually cyclicized poly(cis-isoprene)

- 2. Photosensitive cross-linking agent

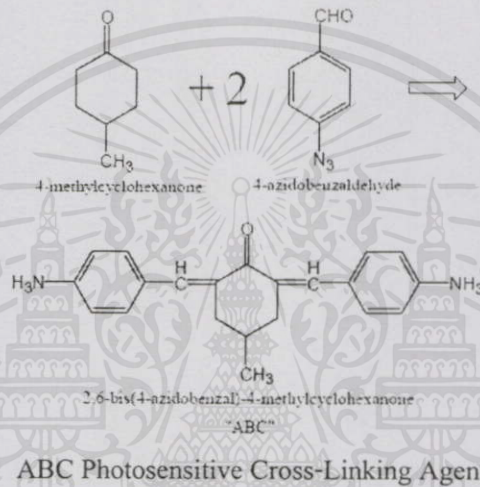
- About 20 % of solids content
- Usually a bis-azide ABC compound

- 3. Coating solvent

- Fraction varies
- Usually a mixture of n-butyl acetate, n-hexyl acetate, and 2-butanol

- Example: Kodak KTFR thin film resist:

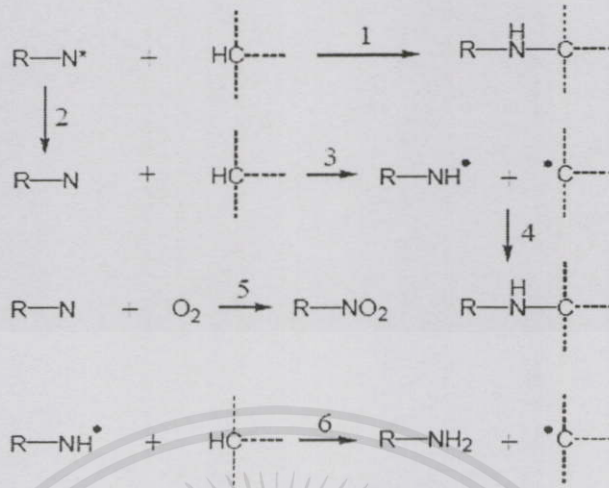
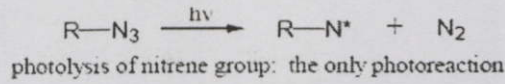
- work horse of the semiconductor industry from 1957 to 1972.



Bis-Azide Cross-Linking Agents

- “bis” means oppositely oriented---needed to attach both ends of the cross linker to two different substrate strands.
- It plays the same role as sulfur in vulcanization of rubber.
- The ABC bis-azide compound is photosensitive instead of being thermally activated.
- Photosensitivity arises from explosophore groups on ends:
 - N₃ azide group
 - NO₂ nitro group
 - Lead azide Pb(N₃)₂ is a primary explosive...
- Nitrenes are photoionized azide groups with a triplet ground state and a singlet excited state

which is extremely reactive and capable of bonding to hydrocarbon chains. ไปด้วยประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Bis-Azide Cross-Linking Chemistry - 1

Bis-Azide Cross-Linking Chemistry - 2

- Photolysis of nitrene group by ultraviolet light is the only photoreaction.
- Reaction 1 is the desired pathway which leads to one end of the ABC compound being cross-linked to an isoprene strand.
- Reactions 2, 3, and 4 are an alternative pathway to the same result, involving an intermediate ground state and a radical state of the nitrene.
- The ground state nitrene can combine with O₂. (Reaction 5)
- This competes with cross-linking.
- This can be used in an image reversal process.
 - The radical state nitrene can steal an additional proton from an isoprene strand and terminate the ABC compound without forming a cross link. (Reaction 6)
- This competes with cross-linking, also.

Cross-Linking Efficiency

- c is the efficiency of thermal cross-linking of nitrene groups to isoprene strands, set by the rates of reactions 1,2,3,4 versus 5,6.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

- f is the quantum efficiency of photolysis of the azide groups, set by the wavelength and the absorption of the resist.
 - ไม่วางกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $F = fc$ is the quantum yield of cross-link bond formation.

- For a bis-azide resist, two bonds are needed (one on each end) to form a cross-link between isoprene strands; thus:

- $F = f2c2$

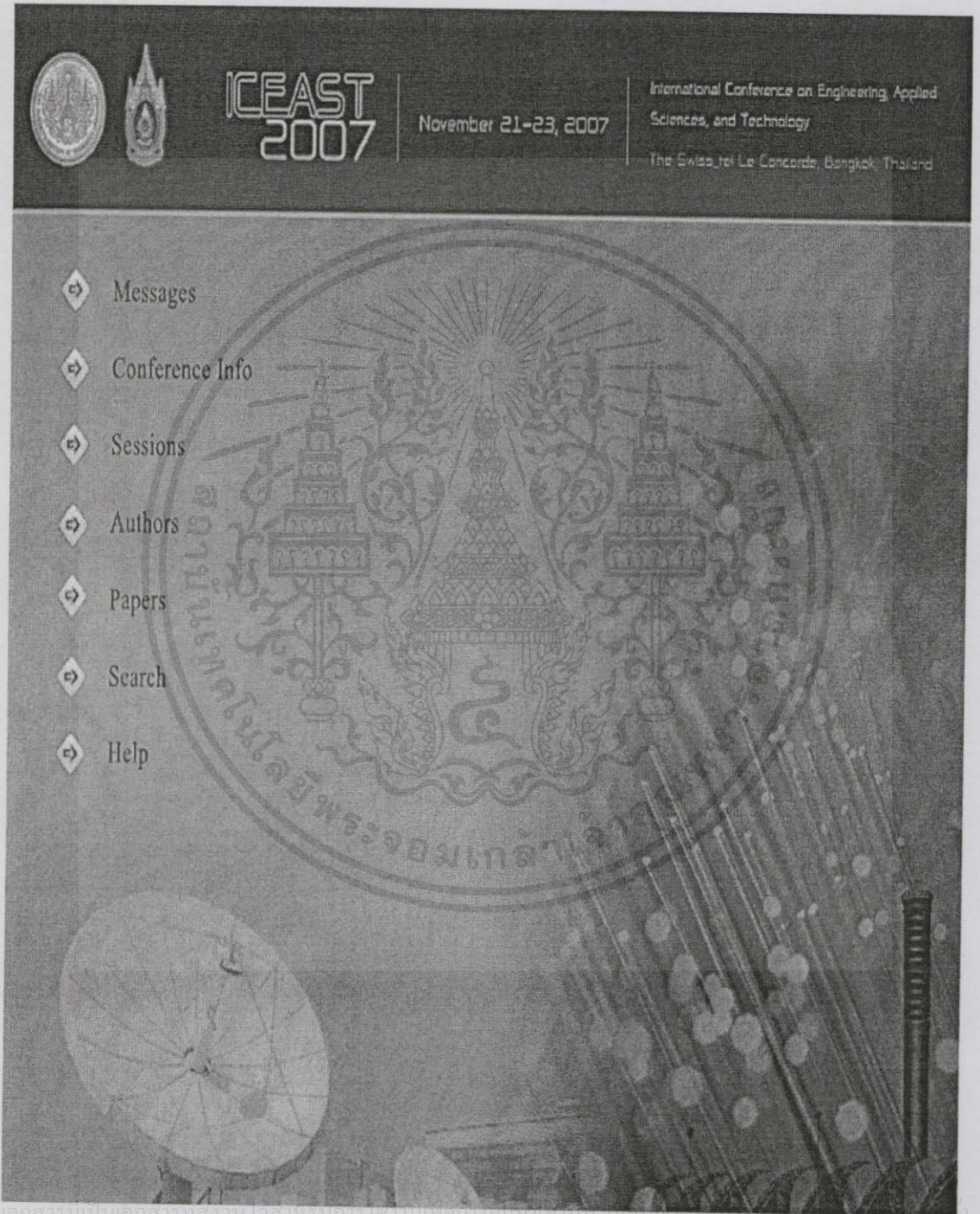
- This requires two photons per cross-link, and thus has very low photographic speed.
- This allows great variety in the substrate polymer chains.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3D-Microstructure Fabrication by Using Energy Dose Variation Lithography Technique

Jirawat Jantawong¹ Nithi Atthi² Surasak Niemcharoen¹ Krisda Siangchaew³
Wutthinan Jeamsaksiri² and Ampom Poyai²

¹Electronics Research Center (ERC), Department of Electronics, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
3 Moo 2, Chaloangkrung Rd. Ladkrabang, Bangkok THAILAND 10520

²Thai Microelectronics Center (TMEC),
National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC)
51/4 Moo 1, Wang Takien District, Amphur Muang, Chacheongsao, THAILAND 24000

³Western Digital (BangPa-In) Co.,Ltd
140 Moo 2 Klongjig, Bang Pa-In. Ayuthaya, THAILAND 13160

Abstract— The three dimension microstructure can be produced on the photoresist film by using multi exposure technique with controllable the dose variation from the light source. The process is a common lithography process using standard Binary Intensity Mask (BIM), but with different dose exposed at different location of interest. The 3D pattern on the photoresist can then be transferred to the film under the photoresist by a single dry etching step. This proves to be economical, timewise and costwise. Moreover, the BIM is cheaper than the gray-scale mask, which requires higher resolution and more expensive tool to make for the same results.

Keywords— Multi exposure, 3-D lithography, MEMS, Non-vertical sidewall profile, Step-vertical side wall

I. INTRODUCTION

At present, formation of 3D structure Micro-Electro Mechanical System (MEMS) is done by using gray scale lithography technique. The gray scale technique is capable of forming step as Non-vertical sidewall profile and Curvature profile with a single photolithography step [1-6]. The lithography step in the technique is the common technique employed in Integrated Circuit patterning [7-8]. The only key difference is the Photomask on which the pattern spacing is smaller than the resolution of a Stepper being used. Therefore the cost of gray scale mask is higher than the mask generally used for making common lithography process. In order to reduce cost of such mask, a new technique is invented. The concept of the technique is by varying light dose in multiple lithography steps on the same BIM. This tends to be economical for making MEMS.

II. THEORY

Generally pattern transferring process on a deposited film comprises 4 sequential steps. Those are: 1. Sample preparation; 2. Photoresist coating; 3. Exposure and Develop the exposed photoresist; and 4. Etching of the film under the developed photoresist [7-8]. This general process can only form 2D pattern which has a difference linewidth on the same photoresist thickness. However if 3D structure which has a pattern on difference step of photoresist is desired, gray scale lithography technique is required. The gray scale lithography technique requires very high resolution mask hence high cost of investment. In order to reduce cost of such mask, a new technique is invented. The concept of the technique is higher exposure dose on positive photoresist results in thinner developed photoresist. This concept is then applied to form 3D structures by using the common lithography process as illustrated in Fig.1.

Regardless of photolithography mask and technique, Pattern linewidth must be well controlled. The parameters that directly affect the pattern linewidth are average thickness together with corresponding standard deviation and uniformity of the coated photoresist as refer to (1)-(3), respectively.

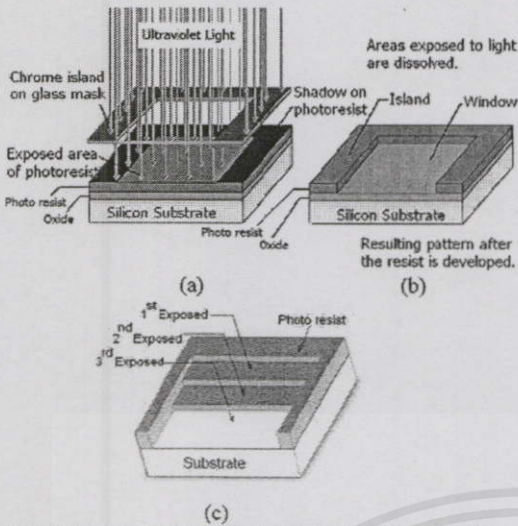


Fig.1. (a) Exposure (b) 2D structure (c) 3D structure with step profile

$$T_{av} = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + \dots + T_n}{N} \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(T_1 - T_{av})^2 + (T_2 - T_{av})^2 + (T_3 - T_{av})^2 + \dots + (T_n - T_{av})^2}{N-1}} \quad (2)$$

$$Uniformity = \frac{T_{Max} - T_{Min}}{T_{Max} + T_{Min}} \quad (3)$$

When T_{av} is average photoresist film thickness

$T_1 \dots T_n$ are local photoresist film thickness at different locations

σ is the standard deviation of the photoresist film thickness

N is the number of locations

$Uniformity$ is the uniformity of the photoresist

T_{max} is the thickness of the thickest photoresist film

T_{min} is the thickness of the thinnest photoresist film

Moreover for dry etching, the etch rate and etch selectivity must be considered as well as refer in (4) and (5), respectively.

$$Etch_{rate} = \frac{\Delta T}{t} \quad (4)$$

$$S_R = \frac{E_f}{E_r} \quad (5)$$

When $Etch_{rate}$ is etch rate

ΔT is the thickness of etched part of the film

t is etch time

S_R is etch selectivity

E_f etch rate on Silicon film

E_r is etch rate on photoresist film

III. EXPERIMENTS

1) Spin coat positive photoresist Clariantz AZ-P4620 on 3 Inch Silicon wafer with Rite-Track HP0 to obtain 10 μm thickness. Then bake the wafer in convection oven at 90 degrees Celsius for 60 minutes. The thickness of the film is then measured using a Tencor-P12 step profiler and Taly surf CCI3000A Coherence Correlation Interferometer (CCI).

2) Exposure the photoresist coated wafer with a Nanotech190 Ultratech's stepper with accuracy of stage at 70 nm and resolution of the projection lens is 2 μm . Light dose of the system ranges from 40 to 800 mJ/cm^2 with steps of 40 mJ/cm^2 . The stage is moved at 15 μm in each step at a time in order to form 3D step profile.

3) After exposure develop the photoresist with KOH (Potassium Hydroxide) in a spray type developer for 80 seconds. Then rinse in DI water for 30 seconds and dry spin for 30 seconds. Measure the developed photoresist thickness with TENCOR-P12 and CCI 3000A.

4) Etch the wafer with Deep-Reactive Ion Etch (DRIE) tool in ICP Multiplex under 4 mT pressure and CF_4 gas flow of 20 sccm at 500 W coil power and Platen power of 550 W for 50 minutes.

5) Strip the remaining photoresist with Acetone and measure the depth profile on the silicon wafer as depicted in Fig. 2.

The profile of the multiple light dose exposed photoresist after developed is steplike. The thinner photoresist film at a different location is corresponding to higher light dose exposed on the film as depicted in Fig. 4. The relation between the light dose and the film thickness is shown in Fig.5. At the dose level 13 or 520 mJ/cm^2 , complete film of photoresist can be thoroughly developed off the wafer. After etched, the remaining photoresist thickness was 0.5 μm . The etch selectivity can thus be calculated according to eq. 5, which is 0.66. The relation between the remaining photoresist film thickness and the depth of silicon hole is shown in Fig.6.

IV. RESULTS

The average thickness of the coated photoresist film is 10.25 μm with uniformity of 3.5%. The thickness of the film at different locations is shown in Fig.3. From the results in Fig.6, a 3D structure with 2 step profile is formed, using 2 different light doses of 250 and 700 mJ/cm^2 . The etching step is done once, the measurement from CCI 3000A and 3D simulation model are as shown in Fig.7 and Fig.8, respectively.

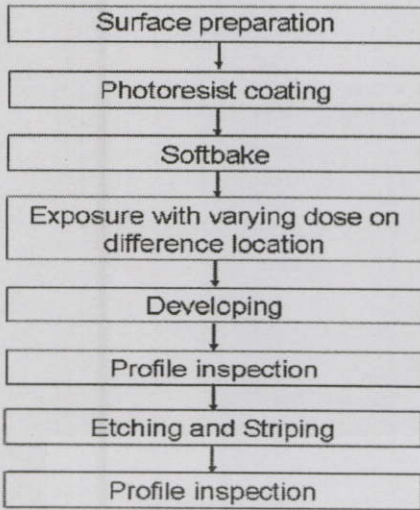


Fig.2. experiment procedure

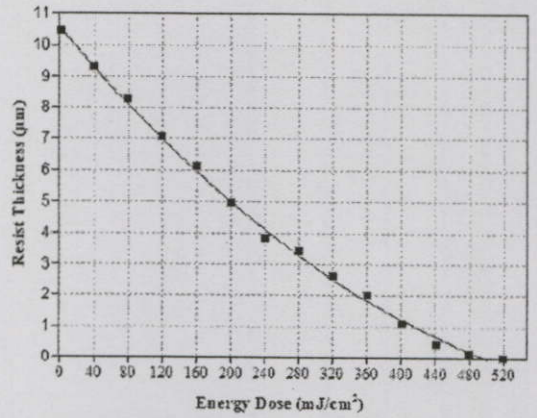
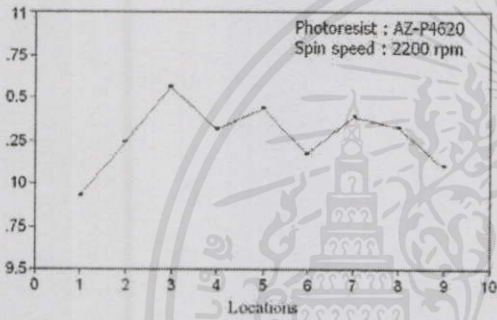


Fig.5. The relation between the photoresist film thickness after multiple dose lithography process and the exposure dose



The thickness of the coated photoresist AZ-P4620 at different locations

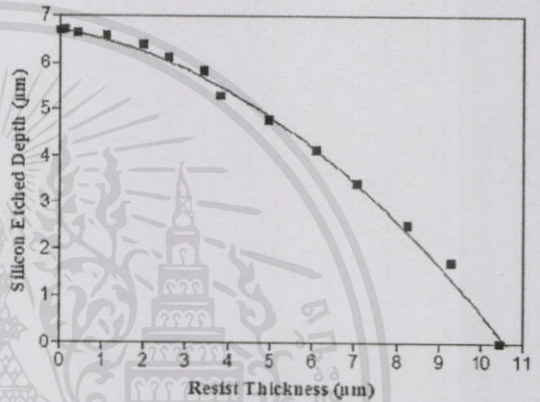


Fig.6. Relation between the photoresist film thickness and Silicon etch depth.

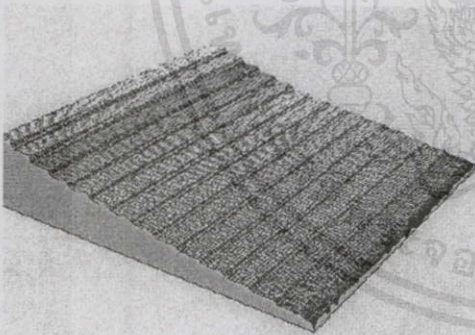


Fig. 3. 3D diagram of the remaining photoresist film after multiple dose photolithography process

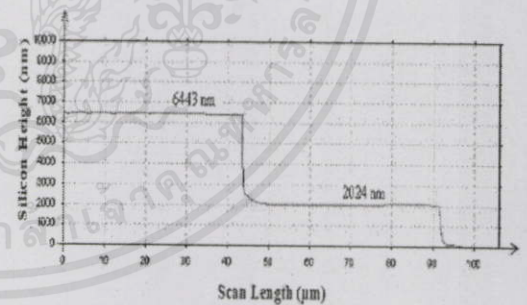


Fig.7. Etch depth after dry etching process

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

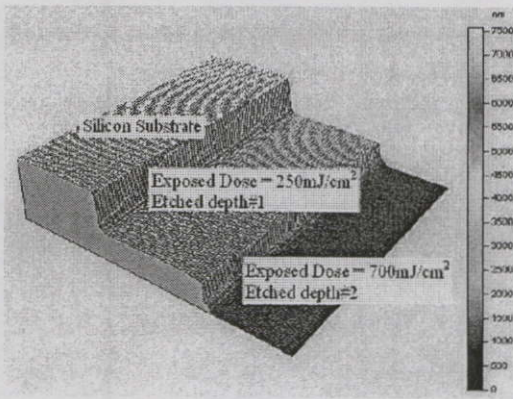


Fig.8. Simulated 3D structure on Silicon substrate using dose variation technique.

V. CONCLUSION

Dose variation photolithography technique enables 3D structure with vertical sidewall profile with a single photoresist film development process and a single etch process. This technique only requires a BIM. The key controlled parameters are the coated photoresist film thickness and uniformity. These parameters have direct impact on exposure dose and etch rate. Additionally the accuracy of the wafer stage is also very important for accurate positioning of the pattern while the stage is moved to expose different exposure dose, in turn to form 3D photoresist structure. However the limit of this technique is only vertical sidewall profile is possible, i.e. curvature profiles and slope profiles are not possible with this technique. Nevertheless this technique proves to be cost effective, less time consuming and it requires investment cost than gray scale technique. From the results, this technique could be applied to form 3D structures for MEMS in the future.

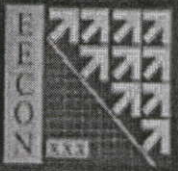
ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thanks the Western Digital (Bangpa-in) Co.,Ltd for financial and to used of those equipments in lithography process for this experiment.

REFERENCES

- [1] B. Wagner, H.J. Quenzer, W. Henke, W. Hoppe, W. Pilz, Microfabrication of complex surface topographies using grey-tone lithography (Periodical style), *Sensor. Actuators A* 46-47 (1995) pp.245-253.
- [2] J. Su, et al., A new method to design half-tone mask for the fabrication of continuous micro relief structures, *Proc. SPIE* 3680 (1999) 879-886.
- [3] M. LeCompte, X. Gao, D.W. Prather, Photoresist characterization and linearization procedure for the gray-scale fabrication of diffractive optical elements (Periodical style), *Appl. Opt.* 40 (2001) 5921-5927.

- [4] S. Nicolas, et al, Fabrication of gray-tone mask and pattern transfer in thick photoresists (Published conference Proceeding style), *J. Micromech. Microeng.* PP.95-98.
- [5] C.M. Waits, M. Kastantin, R. Ghodssi, Investigation of gray-scale technology for large area 3D silicon MEMS structures (Published conference Proceeding style), *J. Micromech. Microeng.* pp. 170-177.
- [6] C.M. Waits, B. Morgan, M. Kastantin, R. Ghodssi, Microfabrication of 3D silicon MEMS structures using gray-scale lithography and deep reactive ion etching (Published conference Proceeding style), "Sensors and Actuators" pp.245-253
- [7] F.Thommsom, G.Grant Willson, J.bowdon, "Introduction to Microlithography (book style),ACS Professional Reference Book, Washington, DC 1994, pp.21-81
- [8] M.Quirk, J.Serda, *Semiconductor Manufacturing Technology (Book style)*, Prentice-Hell2001, pp 335-474



The EECON-30 Conference Joins the Eightieth Birthday Anniversary

Celebration of His Majesty the King Bhumibol Adulyadej

30th Electrical Engineering Conference

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30

หนังสือรวบรวมบทความที่น่าสนใจในการประชุม เล่ม 2

- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- ระบบควบคุมและภาวทัศน์ (CT)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

Volume II

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
KING MONGKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBURI

โดย
 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม
 ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมและเครื่องมือวัด ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ณ โรงแรมเพล็กซ์ ริเวอร์แคว ธีสรอรัท กาญจนบุรี
 25 - 26 ตุลาคม 2550



FACULTY OF ENGINEERING
KMUTT
EECON - 30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการสร้างไมโครเลนส์ด้วยเทคนิคโฟโตลิโธกราฟีแบบเกรย์สเกล
Study of Microlens Fabrication by Using Gray-scale Photolithography Process

จิรวรรณ จันทร์ วงศ์ นธิ อัทธวี สุพงษ์ ภาคภูมิ สุวศักดิ์ เนียมเจริญ และ กฤษณา เกียงแจ้ว

ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ และภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 หมู่ 2 ถนน ลอดจกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทร 0-2587-3246 Email: j_jantawong@yahoo.com

ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (IMEC) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

51/4 หมู่ 1 วังตะเคียน อ. เมือง จะเขิงทราว 24000 Email: Nithi.atthi@nectec.or.th

บริษัท เวสต์เทิร์นดีจิตอล (บางปะอิน) ประเทศไทย จำกัด

140 หมู่ 2 คลองจิก อ.บางปะอิน พระนครศรีอยุธยา 13160

บทคัดย่อ

กระบวนการถ่ายแบบลายวงจรมแบบเกรย์สเกล (Gray scale lithography, GSL) จัดเป็นกระบวนการที่สำคัญที่ใช้ในการสร้างโครงสร้างจุลภาคสามมิติบนชั้นฟิล์มนำยาไวแสง โดยสามารถสร้างโครงสร้างที่มีผนังลายวงจรมที่ไม่ตั้งตรง (non-vertical sidewall profile) เช่น รูปร่างแบบโค้งเว้า ลาดเอียงหรือแบบขั้นบันได โดยโครงสร้างจุลภาค 3 มิตินี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์เครื่องจักรกลไฟฟ้าจุลภาค (Micro-Electro Mechanical System, MEMS) ได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิค GSL ในการสร้างไมโครเลนส์ชนิดนูนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 ไมครอน โดยปรับเปลี่ยนระดับความหนาชั้นฟิล์มนำยาไวแสงจำนวน 12 ระดับ คือกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรมและกระบวนการกัดเพียงครั้งเดียว และสามารถปรับปรุงพื้นที่ผิวของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ได้ด้วยการให้ความร้อนแก่ชั้นฟิล์มนำยาไวแสงภายหลังการล้างลายวงจรม ซึ่งไมโครเลนส์นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับรวมแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ได้ นอกจากนี้เทคนิค GSL นี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างโครงสร้างจุลภาครูปร่างอื่นๆ ทั้งนี้เพื่อประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายได้

คำสำคัญ: กระบวนการถ่ายแบบลายวงจรมแบบเกรย์สเกล, เครื่องจักรกลไฟฟ้าจุลภาค, โครงสร้างจุลภาคสามมิติ, ผนังลายวงจรมที่ไม่ตั้งตรง

Abstract

Gray scale lithography (GSL) is a lithography technique used to form 3D structures on photoresist film. The 3D structures that are formed from such technique comprise of non-vertical sidewall profile; curvature profile, slope profile and step profile. Therefore technique can be used to form Micro-Electro-Mechanical System, MEMS. In this paper, the technique was employed to form a microlens with diameter of 45 μm by forming 12 different thickness photoresist film after

developing with one single photolithography step using GSL. The developed resist was also treated under high temperature to condition the surface of the photoresist. The microlens can be apply to focus the light to Solar cell and the GSL proves to be very economical and consumes less time than conventional lithography step to form MEMS.

Keywords: Gray-scale photolithography, MEMS, 3D-Microstructures, Non-vertical sidewall profile

1. บทนำ

เครื่องจักรกลไฟฟ้าจุลภาค (Micro-Electro Mechanical System, MEMS) เป็นอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างจุลภาคแบบ 3 มิติ กล่าวคือ นอกจากจะประกอบด้วยความกว้างและความยาวของลายวงจรมแล้ว ความสูงของลายวงจรมในแต่ละพื้นที่จะต้องไม่เท่ากัน โดยอาจเป็นลำดับขั้น (Step profile), ลาดเอียง (Slope profile) หรือเป็นรูปร่างโค้ง (Curvature profile) ทั้งนี้เพื่อตอบสนองสมบัติทางด้านฟิสิกส์หรือทางกลศาสตร์ได้เป็นอย่างดี เช่น ระบบแสงระดับไมครอน (Micro-Optical system) [1], [2] และระบบกลไกระดับไมครอน (Micro-Mechanical system, MMS) [3] ซึ่งการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ นี้สามารถสร้างได้ด้วยหลายเทคนิค เช่น เทคนิคการใช้กระจกฉนวนแบบที่มีความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ (Multi-Film Thickness Mask, MFT-Mask) [4] และเทคนิคการฉายแสงซ้ำโดยการแปรเปลี่ยนระดับพลังงานจากแหล่งจ่าย (Multi-exposure variation technique) [5] แต่บทความนี้จะนำเสนอการสร้างเลนส์ระดับจุลภาคด้วยการใช้เทคนิคเกรย์สเกล (Gray-scale lithography, GSL) โดยการฉายแสงเพียงครั้งเดียวผ่านแผ่นกระจกฉนวนแบบ (Photomask) ที่ประกอบด้วยช่องเปิด (Pixels) และช่องเปิด (Pitches) ของแสง [6] ที่มีขนาดเล็กกว่าความละเอียดของระบบเลนส์ของเครื่องถ่ายแบบลายวงจรม (Exposure tool's sub-resolution)

ทำให้แสงเกิดการแทรกสอด (Light diffraction) และค่าพลังงานจะปรับเปลี่ยนไปตามขนาดของ Pitches และ Pixels โดยในการสร้างเลนส์ระดับจุลภาค 3 มิติ นี้จะผ่านกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรรอบบนชั้นฟิล์มนำยาไวแสงชนิดบวก (Positive photoresist) และกัดผิวหน้าแผ่นซิลิคอนเพียงชั้นคอนเดียว ทั้งนี้เพื่อประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิต โดยการออกแบบโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ สำหรับเทคนิคเกรดสเกลนั้นขนาดของ Pitches และ Pixels จะต้องเล็กกว่าความละเอียดของเครื่องถ่ายแบบลายวงจรร (Exposure tool) [6] ตามความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 1

$$W_{min} = P - \sqrt{\frac{Pc^2}{2}} \quad (1)$$

เมื่อ W_{min} คือ ความกว้างที่เล็กที่สุดของ pixels
 P คือ ขนาดของ pitches
 P_c คือ ความละเอียดของเครื่องถ่ายแบบลายวงจรร

โดยความละเอียดของเครื่องถ่ายแบบลายวงจรรจะมีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นของแสงที่ใช้ในการฉายแสงดังแสดงในสมการที่ 2

$$Pc = k \frac{\lambda}{NA} \quad (2)$$

เมื่อ Pc คือ ความละเอียดของเครื่องถ่ายแบบลายวงจรร
 k คือ ค่าคงที่ของกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรร
 λ คือ ความยาวคลื่นแสง
 NA คือ ค่า Numerical Aperture ของระบบเลนส์

เมื่อออกแบบลายวงจรร โดยกำหนดขอบเขตของขนาด Pitches และ Pixels ให้เหมาะสมกับเครื่องถ่ายแบบลายวงจรรที่มีอยู่ โดยใช้สมการที่ 1 และ 2 แล้ว จะสามารถคำนวณหาค่าการส่องผ่านของแสง (Light transmission) ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของ Pitch และ Pixel ดังแสดงในสมการที่ 3

$$Tr = \left(\frac{A_{pixel}}{A_{pitch}} \right) \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ Tr คือ เปอร์เซนต์การส่องผ่านของแสง
 A_{pixel} คือ พื้นที่รวมของ Pixels
 A_{pitch} คือ พื้นที่รวมของ Pitches

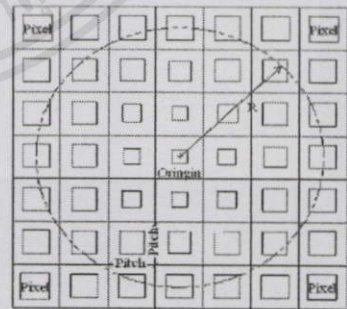
2. วิธีการทดลอง

2.1 การออกแบบและการสร้างกระจกต้นแบบชนิดเกรดสเกล

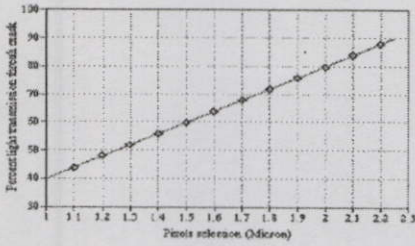
การออกแบบลายวงจรรสำหรับกระจกต้นแบบชนิดเกรดสเกลในงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม AutoCAD ซึ่งเป็นโปรแกรมทั่วไปที่หาได้ตามท้องตลาด โดยเมื่อคำนวณขนาดของลายวงจรรที่ต้องการแล้ว จะได้ออกแบบลงบนระนาบสองมิติ โดยต้องกำหนดหน่วยอ้างอิงทางขนาดการประมวลวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 (EECON-30) 25-26 ตุลาคม 2550 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

(Dimension unit) ของโปรแกรม AutoCAD ให้สอดคล้องกับหน่วยอ้างอิงทางขนาดของเครื่องสร้างลายวงจรรบนแผ่นกระจกต้นแบบ (Pattern Generator, PG) ซึ่งอาจเป็นหน่วยระดับมิลลิเมตร, ไมโครเมตรหรือนาโนเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของลายวงจรรที่ต้องการและความละเอียดของเครื่อง PG (PG's resolution) โดยในการออกแบบจะสามารถกำหนดชั้น (Layer) ได้หลายชั้นขึ้นกับความซับซ้อนของลายวงจรร 3 มิติ และรูปร่างของลายที่ออกแบบอาจเป็นรูปทรงเรขาคณิตต่างๆ เช่น วงกลม, สี่เหลี่ยมหรือหกเหลี่ยม เป็นต้น แต่รูปทรงเหล่านี้จะต้องเป็นลายเส้นแบบโพลีกอน (Polygon line) ซึ่งมีจุดเริ่มและจุดสิ้นสุดของเส้นต้องถึงกันเท่านั้น เนื่องจากเครื่อง PG จำเป็นต้องทราบพื้นที่ของลายที่ต้องการเขียน ซึ่งถ้าไม่เป็นลายเส้นแบบโพลีกอนแล้ว จะไม่สามารถแปลงไฟล์ (File conversion) เพื่อเขียนลายด้วยเครื่อง PG ได้ จากนั้นให้กำหนดจุดอ้างอิงที่ตำแหน่ง 0,0 ณ จุดกึ่งกลางของลายวงจรรทั้งหมด ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการสร้างกระจกต้นแบบ จากนั้นบันทึกข้อมูลในรูปแบบ DXF (Drawing Interchange Format) เท่านั้น เพื่อให้สามารถแปลงข้อมูลสำหรับสร้างลายวงจรรด้วยเครื่อง DWL (Direct Write Laser) ของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ได้

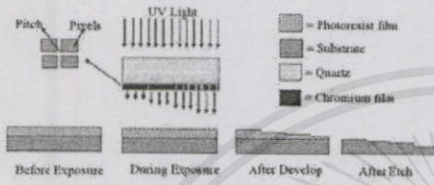
สำหรับขนาดของ Pitches และ Pixels ที่ใช้งานวิจัยนี้จะอยู่ในช่วงของความละเอียดของเครื่องถ่ายแบบลายวงจรร คือ 2.0 ไมครอน และความละเอียดของเครื่อง DWL คือ 1.0 ไมครอน ทั้งนี้เพื่อให้เกิดการแทรกสอดจากผลของลายแบบเกรดสเกลขึ้น แต่เนื่องจากความละเอียดที่ใกล้เคียงกันมากเป็นเหตุให้สามารถสร้างระดับเกรดสเกลได้เพียงไม่กี่ระดับและ ไม่เพียงพอสำหรับการสร้างเลนส์ที่มีผิวเรียบได้ จึงกำหนดระยะ pitches ที่ 2.5 ไมครอนและแปรเปลี่ยนขนาดของ pixels จาก 1.1 ถึง 2.2 ไมครอน โดยปรับเปลี่ยนขนาดครั้งละ 0.1 ไมครอน โดยตำแหน่งของลายวงจรรจะเรียงจากน้อยไปมากเริ่มจากจุดกึ่งกลางของเลนส์ไปตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 60 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเมื่อนำขนาดของ Pitches และ Pixels ไปคำนวณหาค่าเปอร์เซนต์การส่องผ่านของแสงตามสมการที่ 3 จะได้เปอร์เซนต์การส่องผ่านแสงต่อหน่วยพื้นที่ของขนาด pixels ดังแสดงในรูปที่ 2 จากนั้นสร้างลายวงจรรบนกระจกต้นแบบและ นำแผ่นกระจกต้นแบบ ไปฉายแสงเพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ คือไปดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 1 การออกแบบร่างรูปเลนส์บนพื้นที่มีขนาดของ Pixels ขยายออกตามแนวรัศมีวงกลม



รูปที่ 2 เปรียบเทียบการส่องผ่านของแสงผ่านแผ่นกระจกต้นแบบที่มี ลวดลาย pixels ขนาด 1.1 ถึง 2.2 ไมครอน และ pitches เท่ากับ 2.5 ไมครอน



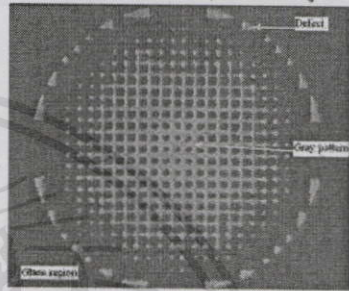
รูปที่ 3 การถ่ายแบบลายวงจรเพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ด้วย เทคนิคแควอส์เทค

2.2 การสร้างโครงสร้างไมโครเลนส์

งานวิจัยนี้สร้างโครงสร้างจุลภาคลงบนแผ่นซิลิกอน (Silicon wafer) ขนาด 3 นิ้ว โดยเริ่มจากการทำความสะอาดผิวหน้าชิ้นงาน ด้วยอะซิโตน (Acetone) จากนั้นกลั่นนํ้ายาไวแสงแบบหนาชนิดบวก เบอร์ Clariantz AZ-P4620 ด้วยเครื่องหมุนเคลือบรุ่น HP0 ของบริษัท Rite-Track และ อบชั้นฟิล์มด้วยตู้อบ (Convection Oven) ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที โดยชั้นฟิล์มนํ้ายาไวแสงที่ได้จะมีความหนาเท่ากับ 10 ± 0.25 ไมครอน จากนั้นฉายแสงด้วยเครื่องฉายแบบลายวงจร Stepper รุ่น Nanotech190 ที่มีค่าความละเอียดของระบบเลนส์ที่ 2.0 ไมครอน ด้วยค่าพลังงานแสงเท่ากับ 280 mJ/cm^2 โดยจะฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบชนิดเรซิสต์กลดซึ่งได้ออกแบบไว้ ดังได้กล่าวแล้วข้างต้น จากนั้นนำแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการฉายแสงไปล้างด้วยเครื่องล้างแบบสเปรย์ด้วยนํ้ายา KOH (Potassium Hydroxide) เป็นเวลา 80 วินาที แล้วล้างด้วยนํ้า DI (Deionized water) เป็นเวลา 30 วินาที และปั่นแห้งเป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นนำชิ้นงานไปกัดลายด้วยเทคนิคการกัดแบบแห้งด้วยพลาสมา (Reactive Ion Etching, RIE) โดยจะทำในระบบสุญญากาศที่มีความดันประมาณ 4 มิลลิทอร์ ด้วยการใช้ก๊าซ CF₄ (Tetra fluorocarbon) ที่อัตราการไหล 20 sccm โดยใช้กำลังงานของ Coil เท่ากับ 500 W ที่ช่วงความถี่วิทยุ 13.56 MHz และกำลังงานความถี่ด้าน Platen เท่ากับ 550 W จากนั้นนำชิ้นงานไปล้างด้วยอะซิโตนเพื่อล้างเอาชั้นฟิล์มนํ้ายาไวแสงส่วนที่ไม่ต้องการออก (Photoresist stripping)

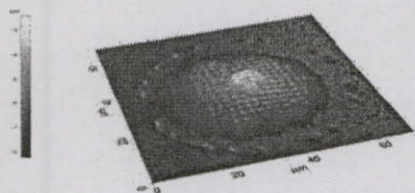
3. ผลการทดลองและการวิจารณ์

จากการตรวจสอบคุณภาพของกระจกต้นแบบสำหรับ โครงสร้างจุลภาค 3 มิติชนิดไมโครเลนส์แบบนูนด้วยกล้องจุลทรรศน์ทางแสง (Optical Microscope, OM) พบว่าที่ตำแหน่งขอบของลายของเลนส์นูนนั้นฟิล์มโครเมียมจะหายไปหมด สังเกตได้จาก การที่ไม่มีแสงที่ตกกระทบบนโครเมียมทำให้ไม่มีแสงสะท้อน กลับมาอีก OM จึงเห็นบริเวณนี้เป็นสีดำ และเมื่อพิจารณาที่กึ่งกลางของลายของเลนส์นูนซึ่งเป็นพื้นที่ที่ Pixels ขนาด 1.1 ถึง 1.9 นั้นมีลักษณะเป็นระนาบเรียบที่สมบูรณ์ ส่วนที่ขนาด Pixel ตั้งแต่ที่ 2.0 ถึง 2.2 ไมครอนซึ่งมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นทำให้พื้นที่ของ Pitch ลดน้อยลงจนเกินค่าความละเอียดของเครื่อง DWL และทำให้พื้นที่ตรงส่วนนี้ไม่มีส่วนของชั้นฟิล์มโครเมียมปกคลุมดังแสดงในรูปที่ 4

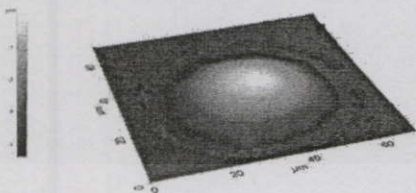


รูปที่ 4 Pitches และ Pixels บนกระจกต้นแบบสำหรับสร้าง โครงสร้างไมโครเลนส์ที่กำลังขยาย 50 เท่า

เมื่อนำกระจกต้นแบบไปสร้างโครงสร้างไมโครเลนส์แบบนูนบนแผ่นซิลิกอน และนำแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการกัดแล้วไปฉายภาพ 3 มิติ เพื่อศึกษาพื้นผิวด้วยเครื่อง AFM (Atomic Force Measurement) พบว่าผิวของซิลิกอนบริเวณขอบของเลนส์นูนนั้นจะถูกกัดกลิ้งลงไปเป็นระยะเท่ากับหมด ทั้งนี้เนื่องจากการที่ไม่มีลายโครเมียมบนกระจกต้นแบบทำให้ไม่มีชั้นฟิล์มนํ้ายาไวแสงกัน ในระหว่างขั้นตอนการกัด ในขณะที่บริเวณกึ่งกลางของไมโครเลนส์จะพบเป็นพื้นที่ที่มีความนูนของซิลิกอนมากกว่าบริเวณอื่น ทั้งนี้เนื่องจากบนกระจกต้นแบบมีชั้นฟิล์มโครเมียมปกคลุมทุกพื้นที่ ไม่เกิดเป็นช่องของ Pitches และ Pixels ทำให้ไม่เกิดการกร่อนพลังงานแสง นอกจากนี้ยังพบว่าพื้นผิวของไมโครเลนส์แบบนูนจะมีความขรุขระมากและมีลักษณะเหมือนเกิดเป็นลายของ Pitches และ Pixels ทั้งนี้เนื่องจากความละเอียดของเครื่อง Stepper และเครื่อง DWL มีความใกล้เคียงกัน ทำให้ไม่สามารถปรับเปลี่ยนระดับของ Pitches และ Pixels ให้มีความละเอียดเพื่อให้ได้พื้นผิวที่มีความเรียบได้ดังแสดงในรูปที่ 5 ดังนั้นจึงทดลองเพิ่มกระบวนการให้ความร้อนหลังการล้างลาย (Post bake) โดยวางชิ้นงานบนแท่นความร้อน (Hotplate) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 นาที พบว่าพื้นผิวของไมโครเลนส์นูนมีความเรียบมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความร้อนทำให้นํ้ายาไวแสงเกิดการอ่อนตัวและเกิดการไหลอีกครั้ง (Reflow) ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 5 ภาพถ่าย AFM สำหรับโครงสร้างไมโครเลนส์แบบหมุนหลังการกัดแบบแห้งโดยไม่ผ่านขั้นตอน Postbake



รูปที่ 6 ภาพถ่าย AFM สำหรับโครงสร้างไมโครเลนส์แบบหมุนหลังการกัดแบบแห้งที่ผ่านขั้นตอน Postbake ที่อุณหภูมิที่ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 นาที

4. สรุปผลการทดลอง

การสร้างเลนส์ที่มีขนาดเล็กมากในระดับไมครอนนั้นสามารถสร้างได้โดยอาศัยเทคนิคการฉายแบบลาเซอร์แบบเฟสแมสซึ่งมีข้อจำกัดคือ ขนาดของลาย Pitches และ Pixels บนแผ่นกระจกต้นแบบจะต้องมีขนาดเล็กกว่าความละเอียดของเครื่องฉายแบบลาเซอร์ที่ใช้ในกระบวนการผลิต โดยการออกแบบลวดลายสามารถใช้โปรแกรม AutoCAD ที่มีอยู่ในท้องตลาด นอกจากนี้ยังพบว่าความยากในการผลิตจะอยู่ที่การควบคุมขนาดของลวดลายบนแผ่นกระจกต้นแบบ ค่าความหนาของชั้นฟิล์มนำยาไวแสงบนชิ้นงาน รวมไปถึงค่าพลังงานในการฉายแสงและอัตราการกัดพื้นผิวซิลิคอน ทั้งนี้เพื่อให้โครงสร้างจุลภาค 3 มิติที่มีขนาดและรูปร่างตามที่ได้ออกแบบไว้ อีกทั้งการให้ความร้อนแก่ชั้นฟิล์มนำยาไวแสงภายหลังจากการล้างลาเซอร์จะสามารถปรับปรุงพื้นผิวของไมโครเลนส์แบบหมุนมีความขรุขระของพื้นผิวน้อยลง โดยไมโครเลนส์นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อรวมแสงบนพื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท เวสต์เทิร์นดีจिटอล (บางปะอิน) และ ศูนย์วิจัยไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้การสนับสนุนในการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] J. Krizmanic, B. Morgan, R. Streitmatter, N. Gehrels, K. Gendreau, and G. Skinner, "Development of Ground-testable Phase Fresnel Lenses in Silicon," Submitted to *Experimental Astronomy*, November 2005.

[2] C.Glasenapp, H.Zappe, A parallel, grey-scale direct-writer for micro-optics and microstructures *Institute of Microsystem Technology, University of Freiburg Laboratory for Micro-optics*

[3] C.M. Waits, B. Morgan, M. Kastantin, R. Ghodssi Microfabrication of 3D silicon MEMS structures using gray-scale lithography and deep reactive ion etching *MEMS Sensors and Actuators Laboratory (MSAL), Sensors and Actuators A 119 (2005) 245-253*

[4] N.Atthi, W.Jeamsaksiri, C.Aramphongphun, J.Jantawong, C.Hruaman, and A.Poyai, The Influence of Chromium Film Thickness on Photomask on Light Transmission for 3D-Lithography Application, German-Thai Symposium 2007

[5] J.Jantawong N.Atthi S.Niemcharoen K.Siangchaew, W.Jeamsaksiri and A.Poyai, 3D- Microstructure Fabrication by Using Energy Dose Variation Lithography Technique ICEAST2007

[6] C.M.Waits, A.Modafe and R.Ghodssi, Investigation of gray-scale technology for large area 3D silicon MEMS structures USA *Journal of Micromechanics and Microengineering 2003, pp 170-177.*



จิรวัดน์ จันตะวงศ์ อ.บ.วิศวกรรมไฟฟ้า ม.เชนด จอห์น วิศวกรฝ่ายเทคนิคบริษัท ด้าดีนาร์ (ประเทศไทย) จำกัด และนักศึกษา วท.ม ภาควิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.



นิรี อัดดี วท.บ. สาขาวิศวกรรมวัสดุ (เกียรตินิยม อันสืบสอง) มก. ตำแหน่ง ผู้ช่วยนักวิจัย 1 ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC)



พงษ์รช ภาควิชา วท.บ.สาขาฟิสิกส์ มช. และ วท.ม สาขาฟิสิกส์ นว.อัสสัมชัญ ปัจจุบัน วิศวกรฝ่ายพัฒนาผลิตภัณฑ์อาวุโส บริษัท เวสต์เทิร์นดีจिटอล (บางปะ อิน) ประเทศไทย จำกัด (WDB)



สุรศักดิ์ เนียมเจริญ วท.บ.สาขาฟิสิกส์ มช. วท.ม. และ วท.ด. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สจล. ปัจจุบัน อาจารย์ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สจล.



กัญญา เชียงแจ้ว วท.บ. Materials Science and Engineering Purdue University, M.Eng และ Ph.D. Stevens Institute of Technology, U.S.A. ปัจจุบัน ผู้จัดการฝ่ายพัฒนาผลิตภัณฑ์อาวุโส WDB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าจะโดยวิธีใด ๆ ทั้งสิ้น ทั้งนี้เป็นการสงวนลิขสิทธิ์ของงาน และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 (EECON-30) 25-26 ตุลาคม 2550 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นาย จิรวัดน์ จันตะวงค์
วัน เดือน ปีเกิด	03 ตุลาคม 2516
สถานที่เกิด	จังหวัดน่าน
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2545 อดุสาหกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเซนจอห์น
ความชำนาญเฉพาะด้าน	วิศวกรฝ่ายเทคนิคและกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

ประสบการณ์การทำงาน

พ.ศ. 2537- 2546	ช่างเทคนิคอาวุโส บริษัทรีทไรท์ (ประเทศไทย) จำกัด
พ.ศ. 2546-2546	วิศวกรฝ่ายผลิต บริษัทสมารถเทรด(ประเทศไทย) จำกัด
พ.ศ. 2546-2549	วิศวกรฝ่ายซ่อมบำรุง บริษัท เวสเทิร์นดิจिटอล (บางปะอิน) ประเทศไทย จำกัด
พ.ศ. 2549- ปัจจุบัน	วิศวกรฝ่ายเทคนิค บริษัทค้าตำมาร์ (ประเทศไทย) จำกัด

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิตยสารนี้

- [1] J.Jantawong , N. Atthi, S. Niemcharoen, K.Siangchaew, W. Jeamsaksiri, and A. Poyai. "Three Dimension Microstructure Fabrication by Using Energy Dose Variation Lithography Technique." International Conference on Engineering, Applied sciences and Technology (ICEAST), 2007
- [2] จิรวัดน์ จันตะวงค์ นิธิ อັตติ ชูพงษ์ ภาคภูมิ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ กฤษฎา เสียงแจ้ว. "การศึกษากการสร้างไมโครเลนส์โดยเทคนิคโฟโตลิโธกราฟีแบบเกรซัสเกล." การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 30, พ.ศ. 2550

ผลงานวิจัยด้านอื่นๆของผู้แต่ง

- [1] จิรวัดน์ จันตะวงค์ นิธิ อັตติ และ กฤษฎา เสียงแจ้ว. "กระบวนการถ่ายแบบลายวงจรแบบสามมิติ โดยเทคนิคการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสงจากแหล่งกำเนิด." ประเทศไทย. สิทธิบัตรไทย เลขที่ 0701001176, มีนาคม 2550.

เอกสารนี้เป็นเอกสารผลงาน วิชาบริหาร การเงินและการบัญชี คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [2] จีรวัดน์ จันดีะวงศ์ นิธิ อัดถิ. “กระจกคั่นแบบที่มีความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับสำหรับสร้างลาย 3 มิติ โดยการฉายแสงและกัดลายวงจรภายในครั้งเดียว. “ ประเทศไทย. สิทธิบัตรไทย เลขที่ 0701002029, เมษายน 2550
- [3] N.Atthi,W.Jeamsaksiri, C.Aramphongphun, J.Jantawong,C.Hruanun,C and A.Poyai, “The Influence of Chromium Film Thickness on Photomask on Light Transmission for 3D-Lithography Application.” Nanoscience and Nanotechnology, German-Thai Symposium 2007
- [4] N. Atthi, W. Jeamsaksiri ,C. Aramphongphun, J. Jantawong, A. Suponjit, and A. Poyai.” The Comparison of One-step lithography by using Multi-Film Thickness Mask with Grey-scale mask and Multiexposure technique.” Malaysia-Japan international symposium on advance , 2007.
- [5] N.Atthi, J.Jantawong,W.Jeamsaksiri ,C.Hruanun and A.Poyai “3-Dimensionals Lithography Techniques for Air Bearing Surface Patterning in Hard-Disk Drive Reading/Writing Head Manufacturing”, International Data Storage Technology. ,April 2008.
- [6] N.Atthi, J.Jantawong, W.Jeamsaksiri, A.Pankiew, and A.Poyai “Improvement Bar Sitting Process Step in Air Bearing Surface Patterning By using Micropallete.” International Data Storage Technology., April 2008.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้