



# วิทยานิพนธ์

การศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ด้วย  
กระบวนการถ่ายแบบลายวงจรขั้นตอนเดียว โดยใช้กระจกต้นแบบชนิด  
ความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ

**A FEASIBILITY STUDY OF ONE-STEP LITHOGRAPHY FOR  
FABRICATION OF THREE-DIMENSIONAL  
MICROSTRUCTURES WITH MULTI-FILM THICKNESS  
MASK**

นายนิธิ อัจฉริ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551



# ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการวิศวกรรม)

ปริญญา

การจัดการวิศวกรรม

วิศวกรรมอุตสาหการ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ด้วยกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรถัดบนเดียว โดยใช้กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ

A Feasibility Study of One-step Lithography for Fabrication of Three-dimensional Microstructures with Multi-Film Thickness Mask

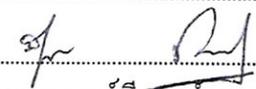
นามผู้วิจัย นายนิธิ อัคริ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

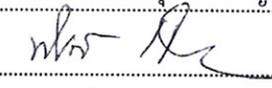
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(  อาจารย์จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์, Ph.D. )

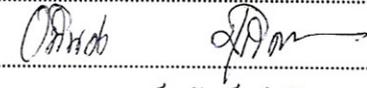
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(  รองศาสตราจารย์ปรัชญ์ ชาญเศรษฐิกุล, Ph.D. )

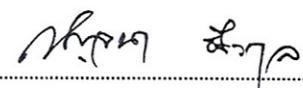
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(  รองศาสตราจารย์พัชราภรณ์ ญาณภีร์, D.Tech.Sc. )

หัวหน้าภาควิชา

(  รองศาสตราจารย์อนันต์ มุ่งวัฒนา, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(  รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 5 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2551

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ด้วยกระบวนการถ่ายภาพแบบลายวงจร  
ขั้นตอนเดียว โดยใช้กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ

A Feasibility Study of One-step Lithography for Fabrication of Three-dimensional  
Microstructures with Multi-Film Thickness Mask

โดย

นายนิธิ อัคริ

เสนอ

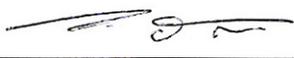
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการวิศวกรรม)

พ.ศ. 2551

นิธิ อัดถิ 2551: การศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ด้วยกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรชั้นคอนเด็คิว โดยใช้กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการวิศวกรรม) สาขาการจัดการวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์, Ph.D. 164 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาเทคนิคการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ด้วยเทคนิคที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ คือ กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ ซึ่งมีการปรับเปลี่ยนความหนาของชั้นฟิล์มโครเมียม โดยความหนาที่แตกต่างกันนี้จะทำให้การส่องผ่านของแสงนั้นแตกต่างกันด้วย นอกจากนี้ยังได้ทดลองเปรียบเทียบการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ กับเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจร โดยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสงด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารี และการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล ศึกษาและวิเคราะห์ต้นทุนในการสร้างโครงสร้างเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคที่มีผนังลายวงจรตั้งตรงจำนวน 1 ถึง 5 ชั้น ด้วยเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรทั้ง 6 ชนิด คือ (1) การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหนึ่งชั้น (2) การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น (3) การถ่ายแบบลายวงจรด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสงด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น (4) การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล (5) การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ และ (6) การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสง นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของเทคนิคการถ่ายแบบชนิดต่างๆด้วยการวิเคราะห์ SWOT

ผลการทดลองพบว่า ถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับสามารถสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ได้เช่นเดียวกับเทคนิคอื่นๆ โดยไม่ต้องใช้เครื่องจักรที่มีความละเอียดสูง ข้อจำกัดคือ สร้างได้เฉพาะ โครงสร้างที่มีผนังลายวงจรตั้งตรงเท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนและเวลาการผลิต พบว่าการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสงนั้น มีต้นทุนและเวลาการผลิตสำหรับโครงสร้างจุลภาคหลายชั้นน้อยที่สุด ซึ่งเทคนิคดังกล่าวมีความเหมาะสมทั้งในเชิงกายภาพและเศรษฐศาสตร์สำหรับการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ต่อไปในอนาคต

  
ลายมือชื่อนิติศ

  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

27 / พ.ค. / 51

Nithi Atthi 2008: A Feasibility Study of One-step Lithography for Fabrication of Three-dimensional Microstructures with Multi-Film Thickness Mask. Master of Engineering (Engineering Management), Major Field: Engineering Management, Department of Industrial Engineering. Thesis Advisor: Mr. Chuckaphun Aramphongphun, Ph.D. 164 pages.

This research work studies a 3-D microstructure forming technique by developing a new photomask making technique. This new mask is called Multi-Film Thickness mask (MFT mask) which varies Chromium thickness or other opaque films on the mask. Different film thickness possesses different light transmissibility level. This work also includes experiments by other two techniques of 3-D microstructure forming: (i) Multi-Exposure dose lithography using Binary Intensity Mask and (ii) Gray Scale Lithography mask. In addition, this work studies the cost and time analysis of Micro Electro Mechanical System (MEMS) fabrication with vertical sidewalls from 1 to 5 lithography steps by processing through a cycle of the lithography step and the etching step using six different photolithography techniques, which are (1) Exposure with Single Layer Binary Intensity Mask (BIM-SLR), (2) Exposure with Multi Layer Binary Intensity Mask (BIM-MLR), (3) Exposure with Multi Exposure dose using Multi Layer Binary Intensity Mask (ME-BIM-MLR), (4) Exposure with Gray Scale Lithography Mask (GSL mask), (5) Exposure with Multi-Film Thickness Mask (MFT mask) and (6) Exposure with Vary Dose using Multi-Film Thickness Mask (VD-MFT mask). Moreover, this work compares the advantages and disadvantages of the MFT mask with the other techniques by using SWOT analysis.

It was found that the MFT mask technique could create similar results to that produced by the BIM and GSL mask techniques; however, only vertical sidewall slope profile can be produced. The advantage of the MFT mask technique over the GSL mask is that the MFT mask technique does not need to have a higher resolution exposure tool than the resolution of the desired pattern. In the analysis of cost and time, the VD-MFT mask technique offers the lowest cost and shortest fabrication time for the multiple lithography steps while the GSL mask is not suitable for one lithography step due to the highest cost. The VD-MFT mask is then proved to be feasible and economical for the lithography process of 3-D microstructure forming in the future.



Student's signature



Thesis Advisor's signature

27 / 05 / 2008

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ดร.จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำในด้านการวางแผนงานวิจัย แก้ไขข้อบกพร่องในด้านต่างๆ และเรียบเรียงวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา รศ.ดร.พัชรภรณ์ ญาณภีร์ และ รศ.ดร.พิรุทธิ์ ชาญเศรษฐิกุล ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำในด้านการวิเคราะห์ผลและการเรียบเรียงการเขียน เพื่อให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ดร.อัมพร โพธิ์ไย ผู้อำนวยการศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่สนับสนุนข้าพเจ้าในทุกๆ ด้านตลอดมา ดร.วุฒินันท์ เกียมศักดิ์ศิริ นักวิจัย ที่ให้คำปรึกษาและเรียบเรียงการเขียนบทความวิชาการต่างๆ และคุณจิระวัฒน์ จันต๊ะวงศ์ ที่ร่วมคิดค้นและผลักดันเทคนิคใหม่ๆ เพื่อแก้ปัญหาและลดต้นทุนการผลิตในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรเพื่อสร้าง โครงสร้างจุลภาค 3 มิติ รวมถึงบุคลากรท่านอื่นๆ ของศูนย์ฯ ที่ไม่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือข้าพเจ้าตลอดมา

ขอขอบพระคุณ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติที่สนับสนุนทุนวิจัย และบริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวัดและเครื่องมือวิจัยบางชนิด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา คุณตา คุณยาย ที่เลี้ยงดูและอบรมสั่งสอน ข้าพเจ้ามา และบุคคลอื่นๆ ที่สนับสนุนและเป็นกำลังใจให้แก่ผู้เขียนจนสำเร็จการศึกษา อาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่อบรมสั่งสอนความรู้ให้แก่ข้าพเจ้ามา รวมถึงเพื่อนๆ นิสิตรุ่นที่ 3 ของสาขาการจัดการวิศวกรรม (ภาคพิเศษ) ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ที่ร่วมฝ่าฟันอุปสรรคและเป็นกำลังใจให้กันตลอดมา

นิธิ อັตถิ

พฤษภาคม 2551

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(3)
สารบัญภาพ	(10)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	6
อุปกรณ์และวิธีการ	36
อุปกรณ์	36
วิธีการ	37
ผลและวิจารณ์	55
สรุปและข้อเสนอแนะ	84
สรุป	84
ข้อเสนอแนะ	86
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	87
ภาคผนวก	93
ภาคผนวก ก ข้อมูลและการวิเคราะห์ผลสำหรับความหนาและความสม่ำเสมอ ของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง	94
ภาคผนวก ข ข้อมูลและการวิเคราะห์ผลสำหรับความหนาของชั้นฟิล์ม โครเมียม ต่อคุณสมบัติด้านต่างๆ	101
ภาคผนวก ค ค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงและพลังงานในการฉายแสง ผ่านกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล	109
ภาคผนวก ง ประเภทของการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบ และบนแผ่นซิลิกอน	111

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก จ ข้อมูลต้นทุนในแต่ละขั้นตอนสำหรับกระบวนการสร้าง แผ่นกระจกต้นแบบชนิดต่างๆ	114
ภาคผนวก ฉ ข้อมูลต้นทุนสำหรับกระบวนการสร้างลายวงจรมันแต่ละขั้นตอน บนแผ่นซิลิกอนเทคนิคต่างๆ	120
ภาคผนวก ช รหัสของขั้นตอนการผลิตแผ่นกระจกต้นแบบลำดับขั้นต่างๆ สำหรับการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ	126
ภาคผนวก ซ ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิตขั้นตอนต่างๆ ในการสร้าง ลายวงจรมันแผ่นกระจกต้นแบบประเภทต่างๆ	132
ภาคผนวก ฌ รหัสของขั้นตอนการผลิตสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ลงบนแผ่นซิลิกอน	138
ภาคผนวก ฎ ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิตขั้นตอนต่างๆ ในการสร้าง ลายวงจรมันแผ่นกระจกต้นแบบและบนแผ่นซิลิกอนเพื่อสร้าง โครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น	142
ภาคผนวก ฏ การคำนวณเวลาในกระบวนการผลิตขั้นตอนต่างๆ ในการสร้างลายวงจรมันแผ่นกระจกต้นแบบและบนแผ่นซิลิกอน เพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น	149
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	164

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านต่างๆของกระจกตันแบบชนิดความเข้มแสง ไบนารีและกระจกตันแบบชนิดเกรย์สเกล	13
2	ปัจจัยและระดับในการเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงชนิดบวกเบอร์ AZ-P4620	38
<b>ตารางผนวกที่</b>		
ก1	เงื่อนไขในการเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงชนิดบวกเบอร์ AZ-P4620 จากการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคทฤษฎีแบบ $L_{16}(2^7)$	95
ก2	ความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงของชุดการทดลองที่ 1 ถึง 8	96
ก3	ความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงของชุดการทดลองที่ 9 ถึง 16	97
ก4	อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง เมื่อพิจารณาด้วยแบบจำลองชนิดใหญ่กว่าดีกว่า	98
ก5	อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์ม น้ำยาไวแสงเมื่อพิจารณาด้วยแบบจำลองชนิดเล็กกว่าดีกว่า	98
ก6	ผลรวมของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของความหนาและ ความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง	99
ก7	ค่าเฉลี่ยของความหนาและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนา ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ระดับการทดลองของปัจจัยต่างๆ	100
ข1	ความหนาชั้นฟิล์ม โครเมียมที่ถูกกัดออกไปจากการวัดด้วย เครื่องวัดแรงอะตอมของชิ้นงานแผ่นที่ 1	102
ข2	ความหนาชั้นฟิล์ม โครเมียมที่ถูกกัดออกไปจากการวัดด้วย เครื่องวัดแรงอะตอมของชิ้นงานแผ่นที่ 2	103

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ข3	ความหนาชั้นฟิล์มโครเมียมที่ถูกกัดออกไปจากการวัดด้วยเครื่องวัดแรงอะตอมของชิ้นงานแผ่นที่ 3	104
ข4	เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงต่อความหนาของชั้นฟิล์มโครเมียมที่เวลาต่างๆในการกัดชั้นฟิล์ม	105
ข5	ลอการิทึมฐานสิบของความหนาชั้นฟิล์มโครเมียมและการส่องผ่านของแสง	106
ข6	ค่าการส่องผ่านของแสงที่ได้จากการคำนวณตามกฎของกำลังต่อความหนาของชั้นฟิล์มโครเมียม	107
ข7	ความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงและความลึกของพื้นผิวซลิคอนที่ถูกกัดหลังจากการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานในการฉายแสง	108
ค1	ค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงและพลังงานในการฉายแสงเมื่อฉายแสงผ่านกระจกตันแบบชนิดเกรย์สเกล	110
ง1	ประเภทของการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกตันแบบสำหรับเทคนิคต่างๆในการถ่ายแบบเพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ	112
ง2	ประเภทของการสร้างลายวงจรบนแผ่นซลิคอนสำหรับเทคนิคต่างๆในการถ่ายแบบเพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ	113
จ1	การคำนวณต้นทุนรวมของเครื่องจักรในแต่ละขั้นตอนการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกตันแบบ	115
จ2	การคำนวณผลผลิตรวมของเครื่องจักรในแต่ละขั้นตอนการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกตันแบบ	116
จ3	การคำนวณต้นทุนกระบวนการและต้นทุนวัตถุดิบของเครื่องจักรในแต่ละขั้นตอนการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกตัน	117
จ4	การคำนวณต้นทุนแรงงานในแต่ละขั้นตอนการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกตันแบบ	118
จ5	ต้นทุนรวมในแต่ละขั้นตอนการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกตันแบบ	119

## สารบัญญัตินำ (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ฅ1	การคำนวณต้นทุนรวมของเครื่องจักรในแต่ละขั้นตอนการสร้างลายวงจรบนแผ่นซิลิกอน	121
ฅ2	การคำนวณผลผลิตรวมของเครื่องจักรในแต่ละขั้นตอนการสร้างลายวงจรบนแผ่นซิลิกอน	122
ฅ3	การคำนวณต้นทุนกระบวนการและต้นทุนวัตถุดิบของเครื่องจักรในแต่ละขั้นตอนการสร้างลายวงจรบนแผ่นซิลิกอน	123
ฅ4	การคำนวณต้นทุนแรงงานในแต่ละขั้นตอนการสร้างลายวงจรบนแผ่นซิลิกอน	124
ฅ5	ต้นทุนรวมในแต่ละขั้นตอนการสร้างลายวงจรบนแผ่นซิลิกอน	125
ช1	รหัสของขั้นตอนการผลิตในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ลำดับชั้นต่างๆ ในกระบวนการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหนึ่งชั้น	127
ช2	รหัสของขั้นตอนการผลิตในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ลำดับชั้นต่างๆ ในกระบวนการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น	128
ช3	รหัสของขั้นตอนการผลิตในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ลำดับชั้นต่างๆ ในกระบวนการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล	129
ช4	รหัสของขั้นตอนการผลิตในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ลำดับชั้นต่างๆ ในกระบวนการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ	130
ช5	รหัสของขั้นตอนการผลิตในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ลำดับชั้นต่างๆ ในกระบวนการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสง	131

## สารบัญญัตินำ (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ซ1	ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิตขั้นตอนต่างๆ ในการสร้างลายวงจบบนแผ่น กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสง ไปนารีที่มีลายวงจรมีหนึ่งชั้น ที่ลำดับชั้น ของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น	133
ซ2	ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิตขั้นตอนต่างๆ ในการสร้างลายวงจบบนแผ่น กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสง ไปนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น ที่ลำดับชั้น ของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น	134
ซ3	ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิตขั้นตอนต่างๆ ในการสร้างลายวงจบบนแผ่น กระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล ที่ลำดับชั้นของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น	135
ซ4	ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิตขั้นตอนต่างๆ ในการสร้างลายวงจบบนแผ่น กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ ที่ลำดับชั้นของโครงสร้าง จุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น	136
ซ5	ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิตขั้นตอนต่างๆ ในการสร้างลายวงจบบนแผ่น กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับที่สร้างด้วยการ เปลี่ยนแปลงพลังงานแสง ที่ลำดับชั้นของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น	137
ญ1	รหัสของขั้นตอนการผลิตในการสร้าง โครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ลำดับชั้นต่างๆ ในกระบวนการสร้างลายวงจบบนแผ่นซิลิกอน ด้วยเทคนิคการฉายแสงหนึ่ง ครั้งเพื่อสร้างลายวงจรมีหนึ่งชั้นในการกัดลายวงจรมีเพียงครั้งเดียว	138
ญ2	รหัสของขั้นตอนการผลิตในการสร้าง โครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ลำดับชั้นต่างๆ ในกระบวนการสร้างลายวงจบบนแผ่นซิลิกอน ด้วยเทคนิคการฉายแสงเพียง หนึ่งครั้งเพื่อสร้างลายวงจรหลายชั้นในการกัดลายวงจรมีเพียงครั้งเดียว	140
ญ3	รหัสของขั้นตอนการผลิตในการสร้าง โครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ลำดับชั้นต่างๆ ในกระบวนการสร้างลายวงจบบนแผ่นซิลิกอน ด้วยเทคนิคการฉายแสงหลาย ครั้งเพื่อสร้างลายวงจรหลายชั้นในการกัดลายวงจรมีเพียงครั้งเดียว	141

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ฎ1	ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิตขึ้นตอนต่างๆ ในการสร้างลายวงจบบนแผ่นซิลิกอนเพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น โดยเทคนิคการฉายแสงหนึ่งครั้งเพื่อสร้างลายวงจรเพียงหนึ่งชั้นในการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียว	143
ฎ2	ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิตขึ้นตอนต่างๆ ในการสร้างลายวงจบบนแผ่นซิลิกอนเพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น โดยเทคนิคการฉายแสงเพียงหนึ่งครั้งเพื่อสร้างลายวงจรหลายชั้นในการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียว	144
ฎ3	ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิตขึ้นตอนต่างๆ ในการสร้างลายวงจบบนแผ่นซิลิกอนเพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น โดยเทคนิคการฉายแสงหลายครั้งเพื่อสร้างลายวงจรหลายชั้นในการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียว	145
ฎ4	ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิตแผ่นกระจกต้นแบบหนึ่งแผ่นเพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ที่ลำดับชั้นที่ 1 ถึง ชั้นที่ 5 สำหรับกระจกต้นแบบประเภทต่างๆ	146
ฎ5	ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิตลายวงจบบนแผ่นซิลิกอนหนึ่งแผ่นเพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ที่ลำดับชั้นที่ 1 ถึง ชั้นที่ 5 สำหรับเทคนิคการถ่ายภาพลายวงจรประเภทต่างๆ	147
ฎ6	ต้นทุนรวมในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ต่อแผ่นซิลิกอนสำหรับเทคนิคการถ่ายภาพลายวงจรประเภทต่างๆ	148
ฎ1	เวลาการสร้างลายวงจรลงบนแผ่นกระจกต้นแบบสำหรับเครื่องจักรทุกตัวในแต่ละขั้นตอนการผลิต	150
ฎ2	เวลาการสร้างลายวงจรลงบนแผ่นซิลิกอนสำหรับเครื่องจักรทุกตัวในแต่ละขั้นตอนการผลิต	151

### สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ฎ3	เวลารวมของกระบวนการผลิตขั้นตอนต่างๆ ในการสร้างลายวงจบบนแผ่น กระจกตันแบบชนิดความเข้มแสง ไปนารีที่มีลายวงจรหนึ่งชั้น ที่ลำดับชั้น ของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น	152
ฎ4	เวลารวมของกระบวนการผลิตขั้นตอนต่างๆ ในการสร้างลายวงจบบนแผ่น กระจกตันแบบชนิดความเข้มแสง ไปนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น ที่ลำดับชั้น ของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น	153
ฎ5	เวลารวมของกระบวนการผลิตขั้นตอนต่างๆ ในการสร้างลายวงจบบนแผ่น กระจกตันแบบชนิดเกรย์สเกล ที่ลำดับชั้นของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น	154
ฎ6	เวลารวมของกระบวนการผลิตขั้นตอนต่างๆ ในการสร้างลายวงจบบนแผ่น กระจกตันแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ ที่ลำดับชั้น ของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น	155
ฎ7	เวลารวมของกระบวนการผลิตขั้นตอนต่างๆ ในการสร้างลายวงจบบนแผ่น กระจกตันแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ ด้วยการปรับเปลี่ยนค่า พลังงานแสง ที่ลำดับชั้นของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น	156
ฎ8	เวลารวมของกระบวนการผลิตขั้นตอนต่างๆ ในการสร้างลายวงจบบนแผ่น ซิลิกอน ที่ลำดับชั้นของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น โดยเทคนิค การฉายแสงหนึ่งครั้ง เพื่อสร้างลายวงจรเพียงหนึ่งชั้นในการกัดลายวงจร เพียงครั้งเดียว	157
ฎ9	เวลารวมของกระบวนการผลิตขั้นตอนต่างๆ ในการสร้างลายวงจบบนแผ่น ซิลิกอน ที่ลำดับชั้นของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น โดยเทคนิค การฉายแสงหนึ่งครั้ง เพื่อสร้างลายวงจรหลายชั้นในการกัดลายวงจรเพียง ครั้งเดียว	158

### สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
<p>ฎ10      เวลารวมของกระบวนการผลิตชั้นตอมต่างๆ ในการสร้างลายวงจรถบนแผ่นซิลิกอน ที่ลำดับชั้นของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น โดยเทคนิคการฉายแสงหลายครั้งเพื่อสร้างลายวงจรถหลายชั้นในการกัดลายวงจรถเพียงครั้งเดียว</p>	159
<p>ฎ11      เวลารวมในการสร้างลายวงจรถบนแผ่นกระจกต้นแบบต่อแผ่นซิลิกอน 10,000 แผ่น สำหรับการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ที่มีจำนวนชั้นตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น</p>	160
<p>ฎ12      เวลารวมในการสร้างลายวงจรถบนแผ่นซิลิกอนสำหรับการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ที่มีจำนวนชั้นตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น</p>	161
<p>ฎ13      เวลารวมในการสร้างลายวงจรถบนแผ่นกระจกต้นแบบต่อแผ่นซิลิกอนหนึ่งแผ่น สำหรับการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ที่มีจำนวนชั้นตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น</p>	162
<p>ฎ14      เวลารวมในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ สำหรับเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรถประเภทต่างๆ</p>	163

## สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ภาคตัดขวางกระจกตันแบบ	7
2	ตำแหน่งของลายวงจรถับบรรจุลงบนกระจกตันแบบที่มีลายวงจรมีหนึ่งชั้น	7
3	ตำแหน่งของลายวงจรถับบรรจุลงบนกระจกตันแบบที่มีลายวงจรมีหลายชั้น	7
4	การสร้างโครงสร้างจุดภาค 3 มิติ ชั้นที่หนึ่งโดยใช้กระจกตันแบบชนิดความเข้มแสงไบนารี ด้วยการฉายแสงหลายครั้งในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรมีหนึ่งชั้นตอน	8
5	การสร้างโครงสร้างจุดภาค 3 มิติ ชั้นที่สองโดยใช้กระจกตันแบบชนิดความเข้มแสงไบนารี ด้วยการฉายแสงหลายครั้งในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรมีหนึ่งชั้นตอน	9
6	การสร้างโครงสร้างจุดภาค 3 มิติ โดยใช้กระจกตันแบบชนิดความเข้มแสงไบนารี ด้วยกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรมีหลายชั้นตอน	9
7	การสร้างโครงสร้างจุดภาค 3 มิติ โดยการถ่ายแบบลายวงจรมีด้วยกระจกตันแบบชนิดเกรย์สเกล	10
8	ช่องเปิดและระยะห่างระหว่างช่องเปิดบนแผ่นกระจกตันแบบ	12
9	การสร้างโครงสร้างจุดภาค 3 มิติ โดยกระจกตันแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ	13
10	กระบวนการถ่ายแบบลายวงจรมี	15
11	การสร้างพันธะเพื่อเพิ่มการยึดเกาะของน้ำยาไวแสงด้วยน้ำยาเฮกซะเมทิลไดไซลาเซน	16
12	ลายวงจรมีที่เกิดบนน้ำยาไวแสงชนิดบวกและชนิดลบ	17
13	การหยดน้ำยาไวแสงแบบสถิต	19
14	การหยดน้ำยาไวแสงแบบจลน์	19
15	การสร้างชั้นฟิล์มด้วยเทคนิคการหมุนเคลือบ ก.) การจุ่มน้ำยาไวแสง ข.) การหมุนที่ความเร็วรอบต่ำ ค.) การเร่งไปสู่ความเร็วรอบสูง ง.) การหมุนที่ความเร็วรอบสูง	20

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
16	หลักการเขียนลายวงจรแบบราสเตอร์สแกน	24
17	ส่วนประกอบทั่วไปของเครื่องสร้างต้นแบบลายวงจร	24
18	ส่วนประกอบทั่วไปของเครื่องคอนแทกมาสก์อะไลเนอร์	25
19	องค์ประกอบในการวัดความหนาชั้นฟิล์มด้วยเทคนิคอิลลิปโซมิเตอร์	28
20	แบบจำลองระบบการวัดความหนาชั้นฟิล์มด้วยเทคนิค AFM	29
21	แรงผลักดันทางอุตสาหกรรม 5 ประการ สำหรับการผลิตกระจกต้นแบบ	35
22	ตำแหน่งการวัดความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงบนแผ่นซิลิกอนขนาด 3 นิ้ว	39
23	ขั้นตอนการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการสร้างฟิล์ม น้ำยาไวแสงชนิด AZ-P4620	39
24	กระจกต้นแบบสำหรับทดสอบการส่องผ่านของแสง (ก) ตำแหน่งลาย ทดสอบ (ข) ชิ้นงานที่ 1 (ค) ชิ้นงานที่ 2 (ง) ชิ้นงานที่ 3	41
25	ภาคตัดขวางตำแหน่งและทิศทางการวัดความหนาชั้นฟิล์ม โครเมียม ด้วยเครื่องวัดแรงอะตอม	41
26	ขั้นตอนการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติของกระจกต้นแบบชนิด ความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ	43
27	ขั้นตอนการทดลองเพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ด้วยกระจกต้นแบบ ชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหนึ่งชั้นและที่มีลายวงจรหลายชั้น	45
28	ขั้นตอนการทดลองเพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ โดยการถ่ายแบบลาย วงจรด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสงด้วยกระจกต้นแบบชนิด ความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น	46
29	ขั้นตอนการทดลองเพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ด้วยการถ่ายแบบ ลายวงจรโดยอาศัยกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล	48
30	แผนภูมิผลกระทบหลักของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง	55

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
31	แผนภูมิผลกระทบหลักของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง	56
32	แผนภูมิผลกระทบหลักของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อความหนาและความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง	57
33	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการกัดชั้นฟิล์ม โครเมียมกับความหนาชั้นฟิล์ม โครเมียม	60
34	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นฟิล์ม โครเมียมต่อการส่องผ่านของแสง ที่ได้จากการทดลอง	61
35	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นฟิล์ม โครเมียมต่อการส่องผ่านของแสง ในรูปของลอการิทึม	63
36	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นฟิล์ม โครเมียมต่อการส่องผ่านของแสง ที่ได้จากค่าจากการทดลองและค่าจากกฎของกำลัง	63
37	ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานในการฉายแสงกับชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง ภายหลังการล้างลาย	64
38	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงกับความลึกของ ฟันผิวที่ถูกกัด	66
39	โครงสร้างสามมิติแบบขึ้นบันไดจากเทคนิคการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสง ด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสง ไบนารีที่มีลายวงจรมากมายขึ้น	67
40	ลายวงจรถูกออกแบบเพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ รูปร่างขึ้นบันได	67
41	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานแสงที่ผ่านแผ่นกระจกต้นแบบชนิดเกรย์ สเกลกับขนาดของช่องปิดที่ระยะห่างระหว่างช่องปิดเท่ากับ 3.0 ไมครอน	68
42	โครงสร้างสามมิติแบบขึ้นบันไดจากเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรถูกออกแบบด้วยกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล	69
43	โครงสร้างสามมิติแบบขึ้นบันไดจากเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรถูกออกแบบด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ	70

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$\mu\text{m}$	=	ไมโครเมตร
A°	=	องศา
ABC	=	การคำนวณต้นทุนตามกิจกรรม
AFM	=	เครื่องวัดแรงอะตอม
ANOVA	=	การวิเคราะห์ความแปรปรวน
AOD	=	อะคลูสโตออปติกดีเฟกเตอร์
AOM	=	อะคลูสโตออปติกมอดูเลเตอร์
BIM	=	กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารี
cm	=	เซนติเมตร
COG	=	กระจกเคลือบโครเมียม
CoO	=	ต้นทุนในส่วนของผู้ซื้อ
DI water	=	น้ำที่ปราศจากไอออน
DLC	=	ต้นทุนแรงงานทางตรง
DMC	=	ต้นทุนวัสดุทางตรง
DOE	=	การออกแบบการทดลอง
DWL	=	เครื่องฉายแสงเลเซอร์โดยตรง
FBC	=	การคำนวณต้นทุนตามหน้าที่การทำงาน
GSL-mask	=	กระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล
HEBS-glass	=	กระจกที่มีความว่องไวต่อแสงพลังงานสูง
HMDS	=	เฮกซะเมทิลไดซิลาเซน
HTE	=	การขยายตัวทางความร้อนสูง
IC	=	วงจรรวม
IP	=	ทรัพย์สินทางปัญญา
LTE	=	การขยายตัวทางความร้อนต่ำ
M	=	เมกะ
m	=	เมตร
ME	=	การฉายแสงหลายครั้ง
MEMS	=	เครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

MFT mask	=	กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ
MLM	=	กระจกต้นแบบที่มีลายวงจรหลายชั้น
mm	=	มิลลิเมตร
MOHC	=	ค่าโสหุ้ยในการผลิต
MP-mask	=	กระจกต้นแบบหลายผลิตภัณฑ์
NA	=	นิวเมอร์ริคอล แอปเพเจอร์
nm	=	นาโนเมตร
OPC	=	ออปติคอลพอกซิมิตีคออเรกชัน
PG	=	เครื่องสร้างลายวงจร
PR	=	น้ำยาไวแสง
PSM	=	กระจกต้นแบบชนิดเลื่อนเฟส
RIE	=	รีแอกทีพลาสมาไอออนเอชซี
Rs	=	ค่าความต้านทานเชิงแผ่น
S/N	=	สัญญาณต่อสิ่งรบกวน
SD	=	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
SEM	=	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
SLM	=	กระจกต้นแบบที่มีลายวงจรหนึ่งชั้น
SRAF	=	ซับริโซลูชันแอสซิสต์ไฟเจอร์
TEM	=	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน
UV	=	อัลตราไวโอเลต

การศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ด้วยกระบวนการถ่ายแบบ  
ลายวงจรชั้นตอนเดียว โดยใช้กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ

**A Feasibility Study of One-step Lithography for Fabrication of  
Three-dimensional Microstructures with Multi-Film Thickness Mask**

คำนำ

ถึงประดิษฐ์ประเภทเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค เช่น โครงสร้างอากาศยานศาสตร์จุลภาคและเลนส์ระดับจุลภาค จะมีโครงสร้างจุลภาคแบบ 3 มิติ ประกอบด้วยชั้นฟิล์มที่มีความหนาไม่เท่ากันในแต่ละพื้นที่ ซึ่งถ้าอาศัยกระบวนการสร้างลายวงจรทั่วไปที่ใช้กระจกต้นแบบลายวงจรชนิดไบนารีนั้น จะต้องผ่านการฉายแสงและกระบวนการกัดเป็นจำนวนหลายครั้ง ทำให้สิ้นเปลืองเวลาในการผลิต อีกทั้งยังไม่สามารถสร้างโครงสร้างที่มีผิวลาดเอียงได้ จึงได้มีการคิดค้นเทคนิคต่างๆ เช่น บัลคไมโครแมชชีนนิ่ง (Bulk Micromachining) มัลติมาสก์ โพรเซสซิง (Multimask processing) มัลติโดสอิเล็กตรอนบีม (Multidose electron beam) (Kalus *et al.*, 1998) หรือใช้กระจกที่มีความไวต่อแสงพลังงานสูง (High-energy beam sensitive glass, HEBS) (Kudryashov *et al.*, 2003) อย่างไรก็ตามเทคนิคเหล่านี้ก็ยังมีขั้นตอนการผลิตที่ซับซ้อนและมีต้นทุนสูง ดังนั้นจึงมีการคิดค้นกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล โดยเป็นกระจกต้นแบบที่ประกอบด้วยช่องปิด (Pixels) และระยะห่างระหว่างช่องปิด (Pitches) จำนวนมาก ทำหน้าที่กรองพลังงานและความเข้มของแสง ทำให้สามารถสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติและโครงสร้างที่มีผิวโค้งได้โดยกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรและกระบวนการกัดเพียงครั้งเดียว แต่ก็มีข้อจำกัด คือ ขนาดของช่องปิดและระยะห่างระหว่างช่องปิดจะต้องมีขนาดเล็กกว่าความละเอียดของเครื่องถ่ายแบบลายวงจรเท่านั้น ซึ่งทำให้กระจกต้นแบบชนิดนี้ยากต่อการผลิตและมีราคาสูงมากเช่นกัน ด้วยเหตุนี้จึงมีแนวคิดในการพัฒนากระจกต้นแบบชนิดใหม่ขึ้น คือ กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ โดยอาศัยการปรับเปลี่ยนความหนาของชั้นฟิล์ม โครเมียมบนแผ่นกระจกต้นแบบ เพื่อให้สามารถกรองพลังงานแสงได้เช่นเดียวกับกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล แต่ใช้หลักการออกแบบและผลิตเช่นเดียวกับกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารี งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพรวมถึงต้นทุนและเวลาในการผลิตโครงสร้างจุลภาคสามมิติที่มีผนังลายวงจรตั้งตรงตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น ด้วยเทคนิคตามชนิดของกระจกต้นแบบและการฉายแสงทั้ง 6 ชนิด คือ (1) การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหนึ่งชั้น (2) การถ่ายแบบลายวงจร

ด้วยกระจกตันแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรมัลติ (3) การถ่ายแบบลายวงจรมัลติด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสงด้วยกระจกตันแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรมัลติ (4) การถ่ายแบบลายวงจรมัลติด้วยกระจกตันแบบชนิดเกรย์สเกล (5) การถ่ายแบบลายวงจรมัลติด้วยกระจกตันแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ และ (6) การถ่ายแบบลายวงจรมัลติด้วยกระจกตันแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสง

## วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาค้นคว้าเทคนิคการถ่ายแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ อันเป็นเทคนิคใหม่ในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ที่มีผนังลายวงจรถัดตรง โดยการฉายแสงและการกัดลายวงจรถัดตรงเพียงครั้งเดียว ซึ่งอาศัยความแตกต่างของความหนาของชั้นฟิล์ม โครเมียมบนแผ่นกระจกตันแบบเพื่อเป็นตัวกรองพลังงานและความเข้มในการฉายแสง โดยสามารถใช้เครื่องจักรที่มีความละเอียดต่ำเพื่อสร้างต้นแบบลายวงจรถัดตรง ทำให้ประหยัดเวลาในกระบวนการผลิต อีกทั้งยังทราบต้นทุนและข้อเด่น-ข้อด้อยในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ลงบนแผ่นซิลิกอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว ของเทคนิคต่างๆ ทั้ง 6 เทคนิค คือ (1) การถ่ายแบบลายวงจรถัดตรงด้วยกระจกตันแบบชนิดความเข้มแสงไปนารีที่มีลายวงจรถัดตรง (2) การถ่ายแบบลายวงจรถัดตรงด้วยกระจกตันแบบชนิดความเข้มแสงไปนารีที่มีลายวงจรถัดตรง (3) การถ่ายแบบลายวงจรถัดตรงด้วยการปรับเปลี่ยค่าพลังงานแสงด้วยกระจกตันแบบชนิดความเข้มแสงไปนารีที่มีลายวงจรถัดตรง (4) การถ่ายแบบลายวงจรถัดตรงด้วยกระจกตันแบบชนิดเกรย์สเกล (5) การถ่ายแบบลายวงจรถัดตรงด้วยกระจกตันแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ และ (6) การถ่ายแบบลายวงจรถัดตรงด้วยกระจกตันแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยค่าพลังงานแสง โดยจะต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1. ศึกษาอัตราการกัดชั้นฟิล์มโครเมียมของน้ำยากัดลายโครเมียม
2. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการส่องผ่านของแสงต่อความหนาของชั้นฟิล์มโครเมียมที่เปลี่ยนแปลงไปบนแผ่นกระจกตันแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงชนิดบวกเบอร์ AZ-P4620 บนแผ่นซิลิกอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว
3. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแสงที่ส่องผ่านความหนาชั้นฟิล์มโครเมียมที่แตกต่างกันบนกระจกตันแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ ต่อความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงบนผิวแผ่นซิลิกอน
4. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงบนผิวแผ่นซิลิกอนที่เกิดจากการฉายแสงโดยใช้กระจกตันแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ ต่อความลึกของลายที่ถ่ายลงบนผิวแผ่นซิลิกอนโดยกระบวนการกัดแบบรีแอกทีฟไอออนเอชซี
5. เปรียบเทียบความสามารถในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ลงบนผิวแผ่นซิลิกอนด้วยเทคนิคการใช้กระจกตันแบบชนิดความเข้มแสงไปนารีและกระจกตันแบบชนิดเกรย์สเกล กับ

เทคนิคการปรับเปลี่ยนค่าความหนาของชั้นฟิล์ม โครเมียมบนแผ่นกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ

6. ศึกษาและเปรียบเทียบต้นทุนและเวลา รวมถึงข้อเด่น-ข้อด้อยในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารี กระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล และกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ

### ขอบเขตการวิจัย

การทดลองทำในห้องสะอาดระดับ 100 ซึ่งควบคุมอุณหภูมิที่ 23 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ที่ 45 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากขนาดของฝุ่นละอองและอุณหภูมิจะไม่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงของลายวงจรที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบอัตราการกัดชั้นฟิล์ม โครเมียมของน้ำยากัดลายโครเมียม
2. ทราบความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการส่องผ่านของแสงต่อความหนาของชั้นฟิล์ม โครเมียมบนแผ่นกระจกต้นแบบ
3. ทราบเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงชนิดบวกเบอร์ AZ-P4620 ลงบนแผ่นซิลิกอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว ด้วยเทคนิคการหมุนเคลือบ
4. ทราบความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแสงที่ส่องผ่านความหนาชั้นฟิล์ม โครเมียมที่แตกต่างกันต่อความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงบนผิวชิ้นงาน
5. ทราบต้นทุนและเวลาในการผลิตในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ บนแผ่นซิลิกอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว โดยใช้กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารี การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล และการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ เพื่อเป็นข้อมูลในการผลิตเชิงพาณิชย์
6. ทราบข้อดี-ข้อเสีย และข้อจำกัดในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ บนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงโดยใช้กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารี การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล และการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ

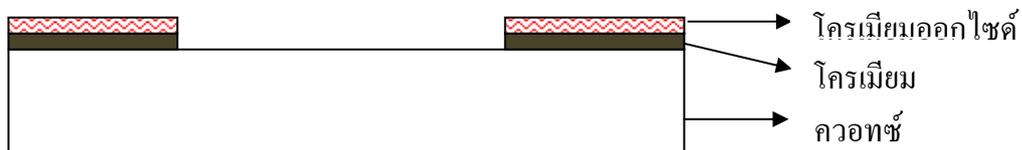
7. เป็นเทคนิคใหม่ในการสร้างต้นแบบลายวงจร สำหรับสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ด้วยการฉายแสงเพียงครั้งเดียว โดยใช้เครื่องจักรในการสร้างต้นแบบลายวงจรที่ไม่ต้องมีความละเอียดสูง

## การตรวจเอกสาร

### กระจกต้นแบบ

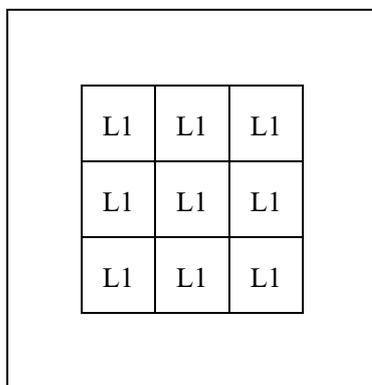
กระจกต้นแบบ (Photomask, Mask, Reticle) คือ แม่แบบในการสร้างลายวงจรสำหรับกระบวนการผลิตอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ในยุคแรกทำมาจากวัสดุประเภทโซดาไลม์ (Soda lime) ที่มีการขยายตัวทางความร้อนสูง (High Thermal Expansion, HTE) ซึ่งจะใช้งานกับเครื่องฉายแบบลายวงจรชนิดคอนแทกมาสก์โกะไลเนอร์ (Contact mask aligner, M/A) เพื่อสร้างลายวงจรที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน แต่ต่อมาได้มีการเปลี่ยนวัสดุเป็นแก้วควอทซ์ (Quartz glass) ที่มีการขยายตัวทางความร้อนต่ำ (Low Thermal Expansion, LTE) เพื่อใช้งานกับเครื่องฉายแบบลายวงจรชนิดโปรเจกชันอะไลเนอร์ (Projection aligner) ในการถ่ายแบบลายวงจรที่เล็กลงต่ำกว่า 1 ไมครอน โดยกระจกต้นแบบต้องมีสมบัติในการกำหนดพื้นที่ที่แสงผ่านได้และพื้นที่ที่แสงผ่านไม่ได้ จึงจำเป็นต้องเคลือบชั้นฟิล์มโครเมียมบนกระจก (Chromium on Glass, COG) เพื่อให้เป็นวัสดุที่ทำหน้าที่กั้นแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet, UV) ไม่ให้ผ่านทะลุกระจกต้นแบบ อีกทั้งยังทำให้กระจกต้นแบบมีความทนทานต่อสารเคมีและรอยขีดข่วน โดยทั่วไปชั้นฟิล์มโครเมียมที่อยู่ด้านบนผิวแก้วควอทซ์จะมีความหนา 100-130 นาโนเมตร (Kalk *et al.*, 1994) ซึ่งสามารถแบ่งเป็นชั้นฟิล์มโครเมียมหนาประมาณ 74 นาโนเมตร และเคลือบผิวด้านบนด้วยชั้นฟิล์มโครเมียมออกไซด์หนาประมาณ 26 นาโนเมตร (Al-Kuhaili and Durrani, 2007) ดังภาคตัดขวางของกระจกต้นแบบ (ภาพที่ 1) โดยชั้นฟิล์มโครเมียมออกไซด์ทำหน้าที่เป็นชั้นกั้นแสงสะท้อน (Antireflective layer) ไปยังผิวชิ้นงาน ทำให้มีค่าการสะท้อนของแสง (Reflectivity) ที่ความยาวคลื่นในช่วง 400 ถึง 800 นาโนเมตร ที่ 58 ถึง 68 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เหลือแสงที่สามารถส่องผ่านชั้นฟิล์มโครเมียมได้ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ (ชลิตา และคณะ, 2546) โดยทั่วไปกระจกต้นแบบสามารถแบ่งได้ 2 ชนิดตามการส่องผ่านของแสง คือ กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีและกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล โดยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีนั้น จะมีความเข้มแสงและพลังงานแสงที่ส่องผ่านกระจกต้นแบบเท่ากันทุกพื้นที่ แต่สำหรับกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกลนั้น จะมีความเข้มแสงและพลังงานแสงที่ส่องผ่านไม่เท่ากันในแต่ละพื้นที่ นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งชนิดของแผ่นกระจกต้นแบบออกได้อีก 2 ชนิด ตามพื้นที่ที่บรรจุลายวงจร คือ กระจกต้นแบบที่มีลายวงจรหนึ่งชั้น (Single Layer Reticle, SLR) ซึ่งในหนึ่งแผ่นกระจกต้นแบบจะบรรจุลายวงจรเพียงหนึ่งชั้นหรือ

หนึ่งลายเท่านั้น (ภาพที่ 2) และกระจกต้นแบบที่มีลายวงจรมากกว่าหนึ่งชั้น (Multi Layer Reticle, MLR) ซึ่งในหนึ่งแผ่นกระจกต้นแบบจะบรรจุลายวงจรมากกว่าหนึ่งชั้น (ภาพที่ 3)



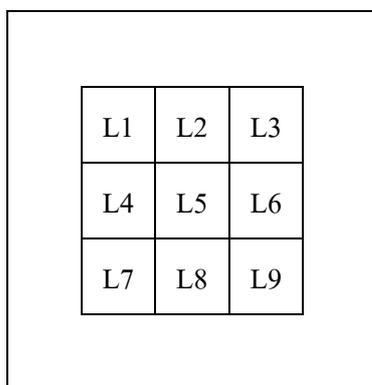
ภาพที่ 1 ภาคตัดขวางกระจกต้นแบบ

ที่มา: Benjamin (2005)



ภาพที่ 2 ตำแหน่งของลายวงจบบรรจุลงบนกระจกต้นแบบที่มีลายวงจรมีหนึ่งชั้น

ที่มา: Bulasinski (2006)

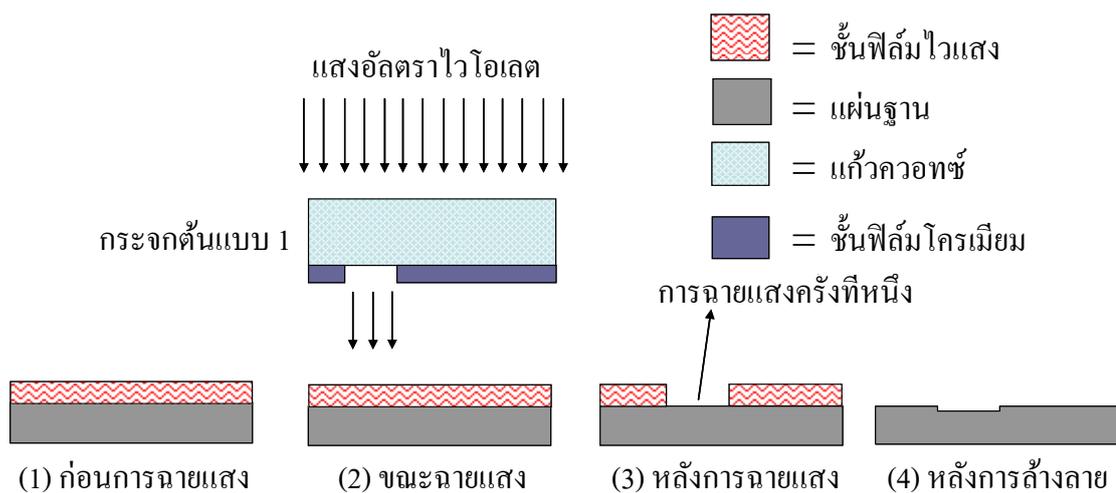


ภาพที่ 3 ตำแหน่งของลายวงจบบรรจุลงบนกระจกต้นแบบที่มีลายวงจรมีหลายชั้น

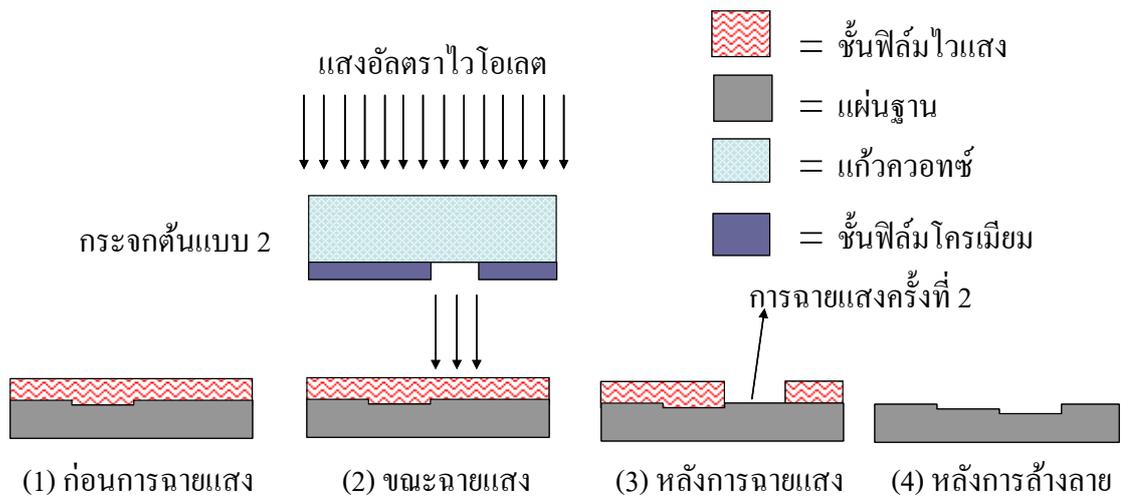
ที่มา: Bulasinski (2006)

### กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงโบนารี

กระจกต้นแบบลายวงจรถนิตความเข้มแสงโบนารี นิยมใช้เพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 2 มิติ บนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรถนิตเพื่อสร้างวงจรรวม (Integrated Circuit, IC) โดยลายวงจรถนิตแบบกระจกต้นแบบประกอบด้วยส่วนที่ไม่มีชั้นฟิล์มโครเมียมและส่วนที่มีชั้นฟิล์มโครเมียม เมื่อฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบชนิดนี้ แสงจะผ่านทะลุไปยังชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงด้านล่างได้เฉพาะในส่วนที่ไม่มีโครเมียมปกคลุม ในขณะที่ส่วนที่มีโครเมียมปกคลุมนั้นแสงไม่สามารถผ่านไป (Benjamin, 2005) ทำให้เมื่อผ่านการล้างลายวงจรถนิตฟิล์มน้ำยาไวแสงชนิดบวกส่วนที่ถูกฉายแสงจะอ่อนตัวและละลายไปกับน้ำยาล้างลาย ในขณะที่ยังชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงส่วนที่ไม่ถูกฉายแสงนั้นยังคงเหลืออยู่ และเมื่อผ่านการกัดลายวงจรถนิตที่มีน้ำยาไวแสงปกคลุมจะไม่ถูกกัดในขณะที่ส่วนที่ไม่มีชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงปกคลุมนั้น ชั้นฟิล์มด้านล่างจะถูกกัดทำให้สามารถถ่ายลายวงจรถนิตไปยังชิ้นงานได้ โดยกระจกต้นแบบชนิดนี้มีข้อดี คือ กระบวนการผลิตไม่มีความยุ่งยาก ราคาถูก แต่ก็มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติในการฉายแสงเพียงครั้งเดียวได้ แต่จะต้องผ่านกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรถนิตหลายๆครั้ง ซึ่งแต่ละครั้งจะต้องฉายแสงและกัดลายวงจรถนิต จากนั้นต้องนำชิ้นงานไปเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงใหม่และผ่านการฉายแสงและการกัดลายวงจรถนิตไปเรื่อยๆ ดังตัวอย่างการฉายแสงเพื่อสร้างลายวงจรถนิตชั้นที่หนึ่ง (ภาพที่ 4) และการนำชิ้นงานไปฉายแสงเพื่อสร้างลายวงจรถนิตชั้นที่สอง (ภาพที่ 5)

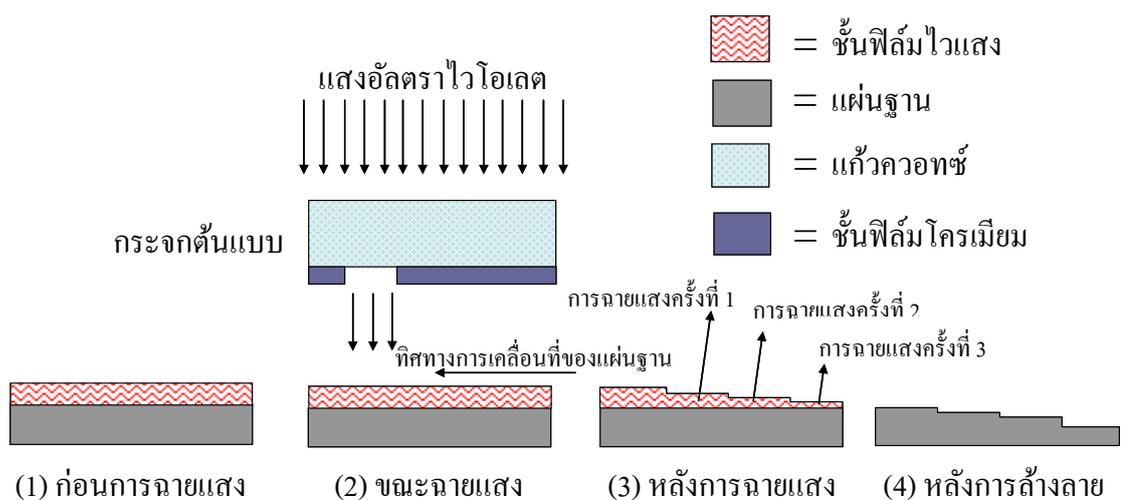


ภาพที่ 4 การสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ชั้นที่หนึ่งโดยใช้กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงโบนารี ด้วยการฉายแสงหลายครั้งในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรถนิตหนึ่งขั้นตอน



ภาพที่ 5 การสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ชั้นที่สองโดยใช้กระจกตันแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีด้วยการฉายแสงหลายครั้งในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรหนึ่งขั้นตอน

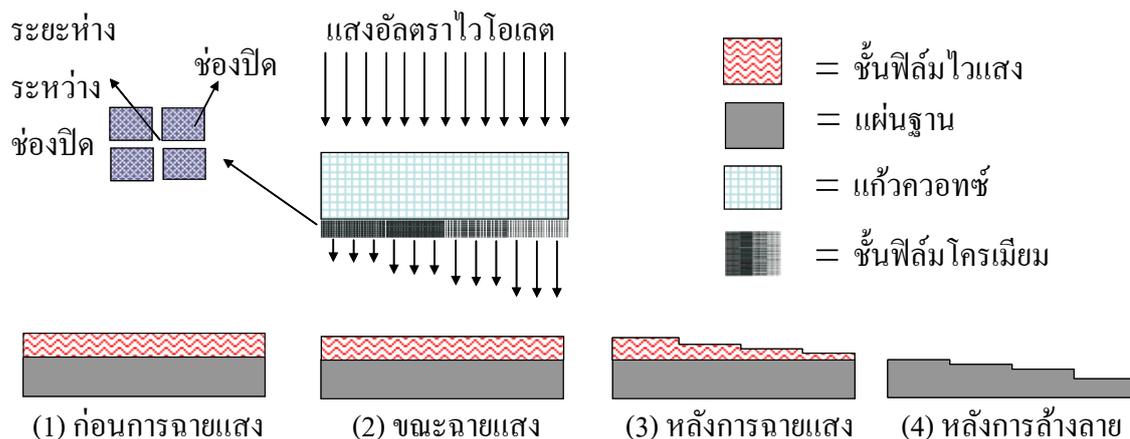
อีกเทคนิคหนึ่งคือการใช้กระบวนการถ่ายแบบลายวงจรเพียงครั้งเดียวผ่านกระจกตันแบบชนิดความเข้มแสงไบนารี แล้วปรับเปลี่ยนค่าพลังงานในการฉายพร้อมกับการเปลี่ยนตำแหน่งของชิ้นงานในขณะที่ทำการการฉายแสง จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการฉายแสงหลายๆครั้ง ไปกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียว (ภาพที่ 6) ทำให้ประหยัดเวลากว่าเทคนิคแรก อย่างไรก็ตามเทคนิคที่ใช้กระจกตันแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีนี้จะสามารถสร้าง โครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ที่มีผนังแบบตั้งตรง (Vertical sidewall slope profile) ได้เท่านั้น (Jantawong *et al.*, 2007)



ภาพที่ 6 การสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ โดยใช้กระจกตันแบบชนิดความเข้มแสงไบนารี ด้วยกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรหลายขั้นตอน

### กระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล

กระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล นิยมใช้เพื่อสร้าง โครงสร้างจุลภาค 3 มิติบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงเพื่อสร้างเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค เนื่องจากกระจกต้นแบบชนิดนี้มีคุณสมบัติในการกรองพลังงานและความเข้มของแสงเพื่อถ่ายแบบลายวงจรไปยังผิวชิ้นงาน (Brian, 2004; Kudryshov *et al.*, 2003) ทำให้เกิดเป็น โครงสร้างจุลภาค 3 มิติ บนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่มีคอนทราสต์ (Contrast) ต่ำ โดยการฉายแสงเพียงครั้งเดียว เช่น น้ำยาไวแสงเบอร์ Clariantz AZ-P4620 (Sure *et al.*, 2003) จากนั้นอาศัยกระบวนการกัดแบบรีแอคทีฟไอออนเอชซึ่ง (Reactive Ion Etching, RIE) เพื่อถ่ายโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ จากชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงไปยังชั้นฟิล์มด้านล่าง (Totsu *et al.*, 2006) ทำให้เกิดลายที่มีความลึกแตกต่างกัน (ภาพที่ 7)



ภาพที่ 7 การสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ โดยการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล

ลายวงจบบนกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล จะประกอบไปด้วยช่องปิดและระยะห่างระหว่างช่องปิด (ภาพที่ 8) โดยถ้ามีการปรับเปลี่ยนขนาดของช่องปิดและระยะห่างระหว่างช่องปิด จะทำให้แสงเกิดการแทรกสอดของแสงและเกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสง (Fuhua *et al.*, 2002) ทำให้มีพลังงานแสงเพียงบางส่วนที่สามารถส่องผ่านกระจกต้นแบบไปยังชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง ทำให้น้ำยาไวแสงในแต่ละตำแหน่งรับพลังงานแสงไม่เท่ากัน ความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงภายหลังการล้างลายวงจรจึงมีขนาดไม่เท่ากัน เกิดเป็นโครงสร้างจุลภาค 3 มิติได้ โดยช่องปิดและระยะห่างระหว่างช่องปิด จะต้องมีความเล็กกว่าความละเอียดของเครื่องถ่ายแบบลายวงจร (Wait *et al.*, 2003) ตามความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 1

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

เมื่อ  $W_{min}$  คือ ขนาดของช่องปิดที่เล็กที่สุด  
 $P$  คือ ระยะห่างระหว่างช่องปิด  
 $P_c$  คือ ความละเอียดของเครื่องถ่ายภาพลายวงจร

โดยความละเอียดของเครื่องถ่ายภาพลายวงจรจะมีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการฉายแสง ดังแสดงในสมการที่ 2

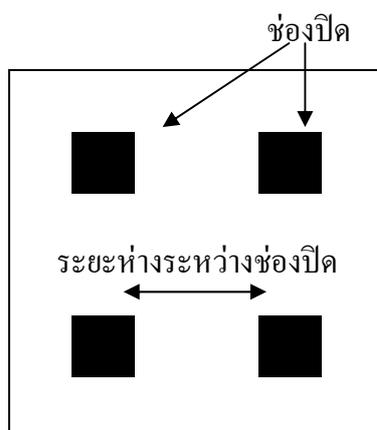
$$Pc = k \frac{\lambda}{NA} \quad (2)$$

เมื่อ  $Pc$  คือ ความละเอียดของระบบเลนส์ของเครื่องถ่ายภาพลายวงจร  
 $K$  คือ ค่าคงที่ของกระบวนการถ่ายภาพลายวงจร  
 $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นแสง  
 $NA$  (Numerical Aperture) คือ ความสว่างของระบบเลนส์

เมื่อออกแบบลายวงจร โดยกำหนดขอบเขตของช่องปิดและระยะห่างระหว่างช่องปิดให้เหมาะสมกับเครื่องถ่ายภาพลายวงจรที่มีอยู่ โดยใช้สมการที่ 1 และ 2 แล้ว จะสามารถคำนวณหาค่าการส่องผ่านของแสง (Light transmission) ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ช่องปิดและระยะห่างระหว่างช่องปิด (Brian, 2004) ดังแสดงในสมการที่ 3

$$\%T = \left(1 - \frac{A_{Pixel}}{A_{Pitch}}\right) \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ  $\%T$  คือ เปอร์เซนต์การส่องผ่านของแสง  
 $A_{pixel}$  คือ พื้นที่รวมของช่องปิด  
 $A_{pitch}$  คือ พื้นที่รวมของระยะห่างระหว่างช่องปิด



ภาพที่ 8 ช่องปิดและระยะห่างระหว่างช่องปิดบนแผ่นกระจกต้นแบบ

ที่มา: Brian (2004)

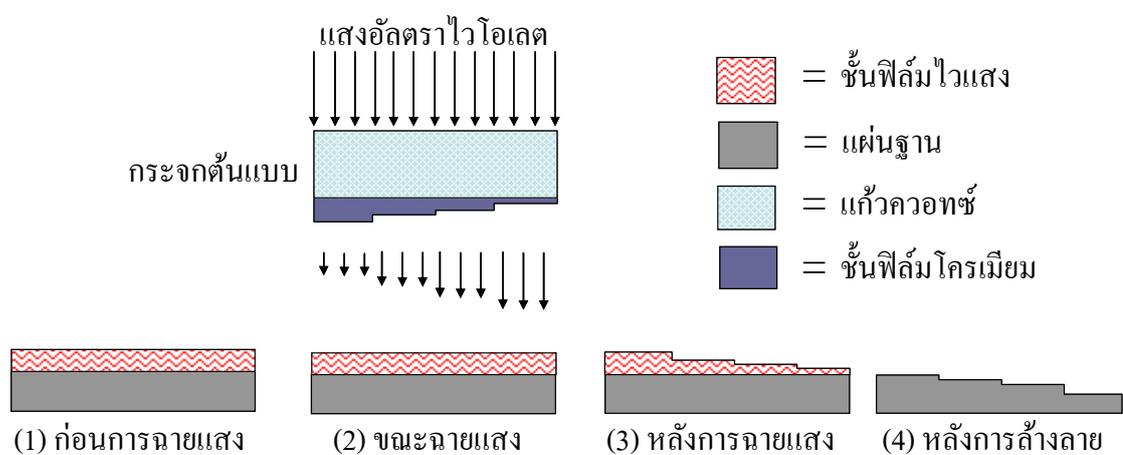
#### กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ

กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ เป็นกระจกต้นแบบที่คิดค้นเพื่อรวมข้อดีและข้อเสียข้อบกพร่องของกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงโบนารีและกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล กล่าวคือ กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงโบนารีนั้น มีวิธีการสร้างที่ไม่ซับซ้อนและไม่ต้องใช้เครื่องจักรที่มีความละเอียดสูง แต่ไม่สามารถใช้สร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติได้ด้วยการฉายแสงและการกัดเพียงครั้งเดียว ในขณะที่กระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกลสามารถสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติได้ แต่ต้องใช้เครื่องจักรที่มีความละเอียดสูงในการสร้างทำให้มีราคาแพงมาก (ตารางที่ 1) ด้วยเหตุนี้จึงมีการคิดค้นกระจกต้นแบบชนิดชั้นฟิล์มหลายความหนาเพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ด้วยการฉายแสงและการกัดเพียงครั้งเดียวได้เช่นกัน โดยอาศัยหลักการที่ว่า “เมื่อความหนาของวัสดุเปลี่ยนไป คุณสมบัติในการส่องผ่านของแสงก็จะเปลี่ยนไปตามความหนาของวัสดุนั้นด้วย” (Kalk *et al.*, 1994) ดังนั้นจึงสามารถสร้างกระจกต้นแบบชนิดนี้ได้ด้วยกระบวนการสร้างกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงโบนารี เพียงแต่ต้องกัดชั้นฟิล์มโครเมียมบนแผ่นกระจกต้นแบบหลายๆครั้ง เพื่อให้ได้ความหนาที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ ทำให้พลังงานของแสงที่ฉายลงไปบนชิ้นงานมีความแตกต่างกัน เกิดเป็นโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ โดยการฉายแสงและการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียวคล้ายการฉายแสงด้วยกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล แต่สามารถสร้างลายวงจรที่มีผนังแบบตั้งตรง (Vertical sidewall slope profile) เหมือนกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงโบนารีได้เท่านั้น โดยเมื่อนำกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับไปใช้ในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจร พบว่าแสงที่ส่องผ่านกระจกต้นแบบจะมีความเข้มและพลังงานแสงไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับความหนาชั้นฟิล์มโครเมียม ทำให้ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงด้านล่างรับพลังงานไม่

เท่ากัน ทำให้เมื่อผ่านการล้างลายวงจรและกระบวนการกัดแล้ว จะได้โครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ที่มีความลึกของพื้นผิวไม่เท่ากัน (ภาพที่ 9)

**ตารางที่ 1** การเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านต่างๆของกระจกตันแบบชนิดความเข้มแสงโบนารีและกระจกตันแบบชนิดเกรย์สเกล

คุณสมบัติด้านต่างๆ	กระจกตันแบบชนิดความเข้มแสงโบนารี	กระจกตันแบบชนิดเกรย์สเกล
1. ความละเอียดของลายวงจรบนแผ่นกระจกตันแบบ	ขนาดเท่ากับความละเอียดของเครื่องถ่ายแบบลายวงจร	ขนาดเล็กกว่าความละเอียดของเครื่องถ่ายแบบลายวงจร
2. ลักษณะของลวดลายบนแผ่นกระจกตันแบบ	เส้นและช่องเปิด	ช่องปิดและระยะห่างระหว่างช่องปิด
3. แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการเขียนลายวงจร	เลเซอร์	ลำอิเล็คตรอน
4. ต้นทุนในการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกตันแบบ	ต่ำ	สูง
5. ต้นทุนในการสร้างลายวงจรบนแผ่นซิลิกอน	สูง	ต่ำ

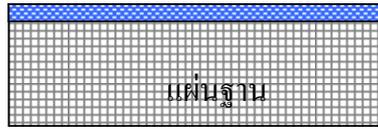


**ภาพที่ 9** การสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ โดยกระจกตันแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ

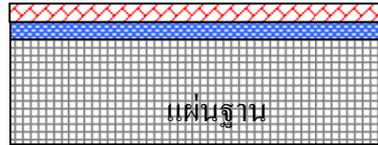
### กระบวนการถ่ายแบบลายวงจร

กระบวนการถ่ายแบบลายวงจร (Photolithography process) เป็นกระบวนการสร้างลายวงจรจากต้นแบบที่ได้ออกแบบไว้ลงบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เคลือบอยู่บนผิวชิ้นงาน โดยใช้แสงเป็นสื่อกลาง ซึ่งอาจเป็นการฉายแสงโดยตรงเพื่อสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบ หรือการฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบเพื่อสร้างลายวงจรลงบนแผ่นซิลิกอน โดยทั่วไปกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรมีขั้นตอนคือ การเตรียมชิ้นงาน การเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง การฉายแสง การล้างลายวงจร การกัดลายวงจร และการลอกชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงส่วนที่ไม่ต้องการออก โดยแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (ภาพที่ 10)

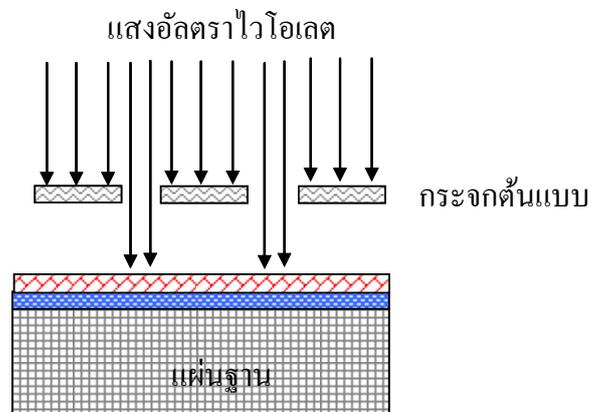
1. การเคลือบชั้นฟิล์ม  
ลงบนแผ่นฐาน



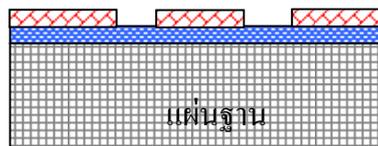
2. การเคลือบชั้นฟิล์ม  
น้ำยาไวแสง



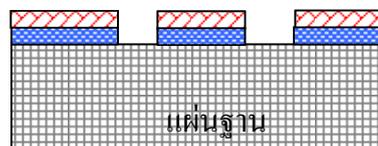
3. การฉายแสง



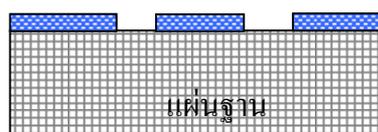
4. การล้างลายวงจร



5. การกัดลายวงจร



6. การลอกชั้นฟิล์ม  
น้ำยาไวแสง



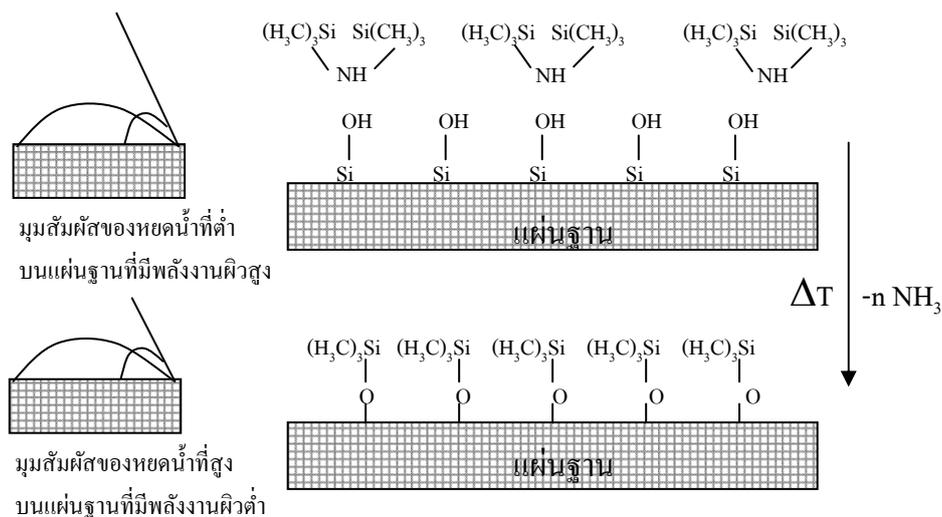
ภาพที่ 10 กระบวนการถ่ายแบบลายวงจร

ที่มา: Van Zant (2004)

## การเตรียมชิ้นงาน

การเตรียมชิ้นงานโดยทั่วไปจะล้างผิวหน้าซิลิกอนด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) ความเข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์ผสมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วน 4 ต่อ 1 (Van Zant, 2004) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน (Deionized water, DI water) ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 10 นาที เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน (รติพร และคณะ, 2007) จากนั้นอบไล่ความชื้นออกจากผิวหน้าชิ้นงานและเพิ่มการยึดเกาะระหว่างชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงกับผิวหน้าชิ้นงานด้วยน้ำยาเฮกซะเมทิลไดซิลลาเซน (Hexamethyldisilazane, HMDS) (Van Zant, 2004) โดยโมเลกุลของน้ำยาเฮกซะเมทิลไดซิลลาเซน จะเข้าไปแทนที่โมเลกุลของหมู่ไฮดรอกไซด์ (Hydroxide group, OH) ของน้ำที่อยู่บนผิวชิ้นงาน ทำให้เกิดก๊าซแอมโมเนีย ( $NH_3$ ) ก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) และสารประกอบเนื้อเยื่อของเฮกซะเมทิลไดซิลลาเซน จากนั้นเฮกซะเมทิลไดซิลลาเซน จะผสมกับก๊าซออกซิเจนเพื่อสร้าง ไตรเมทิลซิลิล (Trimethylsilyl) เพื่อแทนที่หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) และออกไซด์ (Oxide) และจะได้หมู่ไตรเมทิลซิลิลอามีน (Trimethylsilylamine) ที่ไม่เสถียรคอยยึดจับกับ โมเลกุลของน้ำยาไวแสง ทำให้ผิวหน้าชิ้นงานมีพลังงานที่ผิวต่ำ (Low surface energy) และมีมุมสัมผัสของหยดน้ำสูง (High contact angle) ผิวของชิ้นงานจึงกลายเป็นผิวน้ำไม่เกาะ (Hydrophobic surface) ทำให้ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงเกิดการยึดเกาะกับชิ้นงานดีขึ้น (Sheats and Smith, 1998; Wolf and Tauber, 2000)

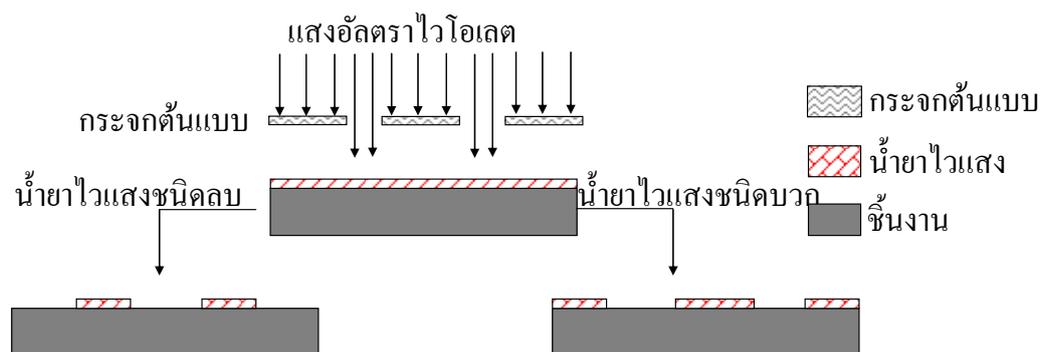
(ภาพที่ 11)



ภาพที่ 11 การสร้างพันธะเพื่อเพิ่มการยึดเกาะของน้ำยาไวแสงด้วยน้ำยาเฮกซะเมทิลไดซิลลาเซน  
ที่มา: Wolf and Tauber (2000)

## การเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง

น้ำยาไวแสง (Photoresist, PR) เป็นสารที่มีความไวต่อการทำปฏิกิริยากับแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet, UV) ที่ช่วงความยาวคลื่น 190 ถึง 442 นาโนเมตร มีองค์ประกอบหลักทางเคมี 4 ชนิด คือ (1) เรซิน (Resin) ทำหน้าที่กำหนดคุณสมบัติเชิงกลของน้ำยาไวแสง (2) ตัวทำละลาย (Solvent) ทำหน้าที่ละลายสารโพลีเมอร์ เพื่อให้น้ำยาไวแสงมีสถานะของเหลว เพื่อสะดวกต่อการเคลือบลงบนผิวชิ้นงาน นอกจากนี้ยังเป็นตัวกำหนดความหนืดของน้ำยาไวแสง (3) สารไวแสง (Sensitizers) ทำหน้าที่กำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยากับแสงที่ค่าความยาวคลื่นแสงที่ใช้ในการถ่ายแบบลายวงจรและ (4) สารเติมแต่ง (Additives) เป็นองค์ประกอบที่เพิ่มคุณสมบัติพิเศษต่างๆ เช่น เม็ดสี เป็นต้น น้ำยาไวแสงสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ตามสมบัติการละลายในตัวทำละลาย กล่าวคือ น้ำยาไวแสงชนิดบวก (Positive Photoresist) นั้น ส่วนที่ถูกฉายแสงจะละลายไปกับน้ำยาล้างลาย (Developer) ในขณะที่ส่วนที่ไม่ถูกฉายแสงจะไม่ละลายไปกับน้ำยาล้างลายและคงเหลือเป็นลายวงจรอยู่บนผิวชิ้นงาน โดยลายวงจรที่เกิดขึ้นจะเหมือนกับลายวงจรที่ได้ออกแบบไว้บนแผ่นกระจกต้นแบบ แต่สำหรับน้ำยาไวแสงชนิดลบ (Negative Photoresist) นั้น ส่วนที่ถูกฉายแสงจะแข็งตัวและไม่ละลายในน้ำยาล้างลาย ในขณะที่ส่วนที่ไม่ถูกฉายแสงจะอ่อนตัวและละลายออกไป ดังนั้นลายวงจรที่ปรากฏจะตรงข้ามกับลายวงจรที่ออกแบบไว้ (Quirk and Serda, 2001) (ภาพที่ 12)

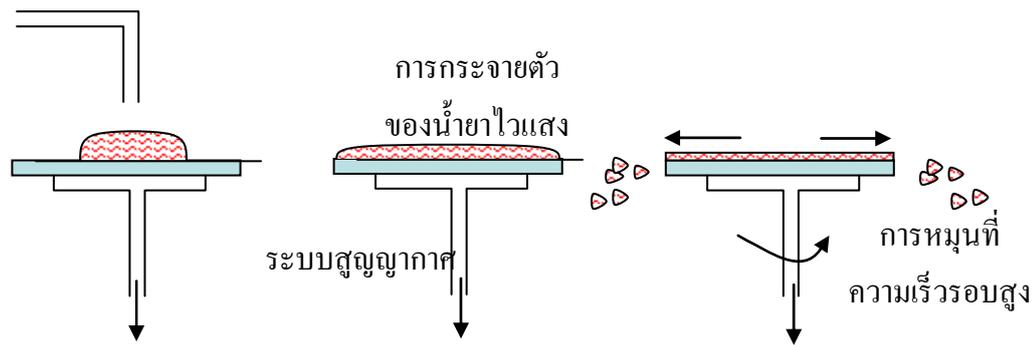


ภาพที่ 12 ลายวงจรที่เกิดขึ้นบนน้ำยาไวแสงชนิดบวกและชนิดลบ

ที่มา: Quirk and Serda (2001)

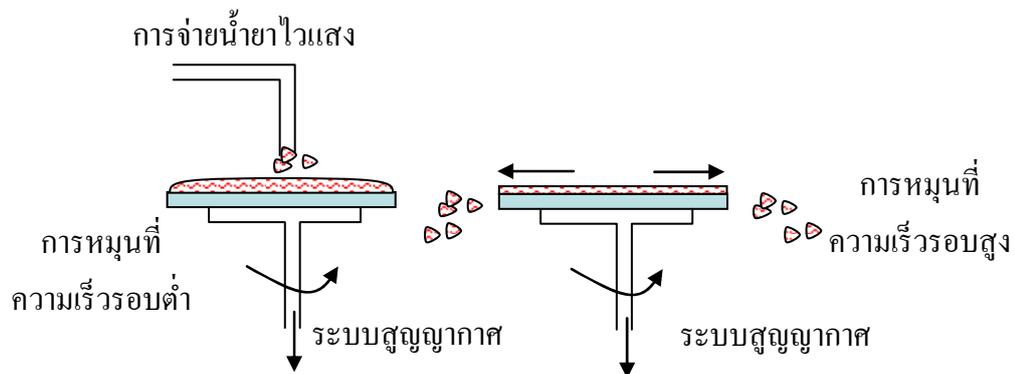
การเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงลงบนผิวชิ้นงานสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การพ่นเคลือบ (Spray Coating) ซึ่งจ่ายน้ำยาไวแสงผ่านหัวจ่ายอัลตราโซนิกเพื่อสร้างละอองของน้ำยาไวแสงให้มี

ขนาดเล็กระดับไมครอน ลงบนชิ้นงานที่หมุนด้วยความเร็วรอบ 30 ถึง 60 รอบต่อนาที โดยน้ำยา  
 ไวแสงที่ใช้จะต้องมีความหนืดน้อยกว่า 20 cSt. เพื่อให้สามารถพ่นได้ และต้องมีอัตราการ  
 ระเหยตัวของสารละลายที่เร็วเพื่อไม่ให้น้ำยาไวแสงไหลลงไปที่หลุมและทำให้ขอบด้านบนไม่  
 มีน้ำยาไวแสงปกคลุม ซึ่งเทคนิคการพ่นเคลือบมีข้อดี คือ ใช้ปริมาณน้ำยาไวแสงน้อยกว่าวิธีการ  
 หมุนเคลือบถึง 70 เปอร์เซ็นต์ และสามารถเคลือบชั้นฟิล์มๆ ลงไปในหลุมที่ลึกได้ นอกจากนี้ยังมี  
 เทคนิคการเคลือบแบบอิเล็กโทรด (Electrodeposition) ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีสมรรถภาพสูง ใช้ในการ  
 เคลือบน้ำยาไวแสงลงบนบนผิวโค้งและผิวขรุขระ โดยน้ำยาไวแสงที่ใช้จะต้องมีคุณสมบัติแบบ  
 แคทาโพรเรติก (Cataphoretic) และชิ้นงานต้องมีพื้นผิวที่นำไฟฟ้า ซึ่งจะได้ความหนาของชั้นฟิล์ม  
 ทั่วกันทุกพื้นผิว และไม่เกิดข้อบกพร่องชนิดตามด (Pinhole) บนชั้นฟิล์มๆ (Pham *et al.*, 2003)  
 แต่สำหรับชิ้นงานขนาดใหญ่จะนิยมใช้เทคนิคการรีดอัด (Extrusion Coating) (Bagan *et al.*, 1996)  
 โดยชิ้นงานจะวางบนแท่นสุญญากาศ และมีหัวรีดน้ำยาไวแสงอยู่เหนือพื้นผิวชิ้นงาน ปริมาณของ  
 น้ำยาไวแสงจะขึ้นอยู่กับขนาดของหัวรีดและความหนืด สำหรับความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์มๆ จะ  
 ขึ้นกับ ความสูงของหัวจ่าย (Head height) , ความหนืดของเหลว (Fluid viscosity) , ความแตกต่าง  
 ของความดันที่หัว (Differential head pressure) และอัตราส่วนของอัตราการปั๊ม (Pump rate) ต่อ  
 ความเร็วในการจ่าย (Transport speed) ซึ่งเทคนิคนี้จะประหยัดปริมาณน้ำยาไวแสงที่ใช้ได้ 95  
 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับวิธีการหมุนเคลือบ อีกเทคนิคหนึ่งที่กำลังได้รับการพัฒนาคือ เทคนิคของ  
 ชไนเดอร์-พิการ์ด (Schneider-Picard) ซึ่งสามารถสร้างชั้นฟิล์มที่มีความหนาในระดับไมโครและ  
 มีความเรียบอยู่ในระดับต่ำกว่า 1 นาโนเมตรได้ แต่วิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดถึงแม้จะสามารถ  
 ใช้น้ำยาไวแสงได้เพียงแค่ 2 เปอร์เซ็นต์ (Schneider *et al.*, 2006) คือ การหมุนเคลือบ ซึ่ง  
 ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน คือ การจ่ายน้ำยาไวแสง (Dispensing) สปินอัพ (Spin up) สปินออฟ (Spin  
 off) และการระเหย (Evaporation) โดยเริ่มจากการหยดน้ำยาไวแสงผ่านหัวจ่ายไปยังผิวชิ้นงาน  
 (Dispensing) ซึ่งอาจเป็นการหยดแบบสถิต (Static dispense) คือ หยดน้ำยาไวแสงลงไปใน  
 ผิวชิ้นงานที่หยุดนิ่ง (ภาพที่ 13) หรือการหยดแบบจลน์ (Dynamic dispense) คือ หยดน้ำยาไวแสง  
 ไปยังผิวชิ้นงานในขณะที่ชิ้นงานหมุนด้วยความเร็วรอบไม่เกิน 500 รอบต่อนาที โดยการหยดน้ำยา  
 ไวแสงแบบจลน์นี้จะช่วยให้น้ำยาไวแสงกระจายไปทั่วผิวชิ้นงานได้ดียิ่งขึ้น ทำให้ชั้นฟิล์มๆ มีความ  
 สม่ำเสมอมากขึ้นและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายน้อยกว่าการหยดแบบสถิต (ภาพที่ 14)



ภาพที่ 13 การหยดน้ำยาไวแสงแบบสถิต

ที่มา: Van Zant (2004)

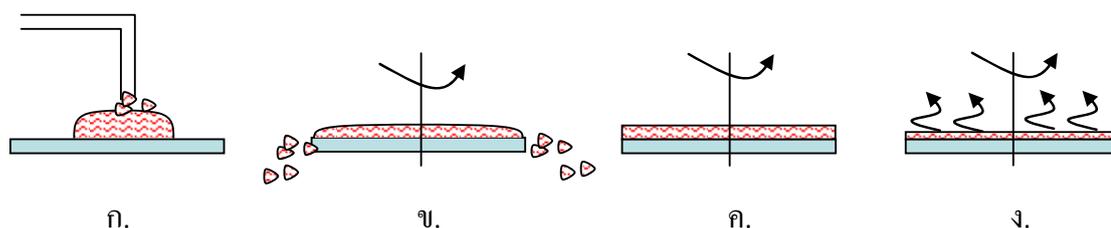


ภาพที่ 14 การหยดน้ำยาไวแสงแบบจลน์

ที่มา: Van Zant (2004)

ภายหลังการหยดน้ำยาไวแสงลงบนชิ้นงานแล้ว ชิ้นงานจะถูกเร่งด้วยความเร่งไปยังความเร็วแรก (First spin speed) ซึ่งเป็นความเร็วรอบต่ำ เพื่อให้น้ำยาไวแสงกระจายจากจุดกึ่งกลางไปยังขอบของชิ้นงานตามแรงหนีศูนย์กลาง โดยถ้าอัตราเร่งสูงจะทำให้ได้ชั้นฟิล์มที่มีความสม่ำเสมอมากกว่าอัตราเร่งต่ำ แต่ถ้าใช้เวลาในขั้นตอนสปินอphanเกินไป จะทำให้ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงมีความไม่สม่ำเสมอมากขึ้น จากนั้นชิ้นงานจะถูกเร่งจากความเร็วรอบต่ำไปยังความเร็วรอบสูง (Second spin speed) เป็นการเข้าสู่ขั้นตอนสปินออฟ เพื่อให้น้ำยาไวแสงส่วนเกินถูกขับออกจากผิวหน้าชิ้นงาน อีกทั้งยังเป็นขั้นตอนที่กำหนดความหนาของชั้นฟิล์ม โดยความเร็วรอบที่สูงขึ้นจะทำให้ได้ชั้นฟิล์มที่บางลง และชิ้นงานจะถูกหมุนที่ความเร็วรอบสูงอย่างต่อเนื่องตามเวลาที่กำหนด ซึ่งเป็นขั้นตอนการระเหยตัวทำละลายในน้ำยาไวแสงออกไปเพื่อให้ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง

แข็งตัว เพื่อกำหนดความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์มๆ (ภาพที่ 15) โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนาและความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์มๆ ในเทคนิคการหมุนเคลือบ 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) (Kuo and Chao, 2006; Levinson, 1999) หลังการเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงแล้ว ชั้นงานจะถูกอบ (Prebake) เพื่อให้ตัวทำละลายในน้ำยาไวแสงระเหยออกไป เพื่อให้ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงมีความแห้ง แข็งตัวและคงรูปอยู่ได้เมื่อผ่านกระบวนการฉายแสง อีกทั้งยังช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างผิวของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงกับผิวของชิ้นงาน นอกจากนี้ยังเป็นกระบวนการทางความร้อนเพื่อลดความเครียดที่เกิดขึ้นในชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง โดยปัจจัยที่ต้องควบคุมคือ อุณหภูมิและเวลาในการอบ ซึ่งโดยปกติจะใช้อุณหภูมิในการอบชั้นฟิล์มๆ ในช่วง 90 ถึง 130 องศาเซลเซียส (Mani, 1989 and Hayase, 1989)



**ภาพที่ 15** การสร้างชั้นฟิล์มๆด้วยเทคนิคการหมุนเคลือบ ก.) การจ่ายน้ำยาไวแสง ข.) การหมุนท ความเร็วรอบต่ำ ค.) การเร่งไปสู่ความเร็วรอบสูง ง.) การหมุนที่ความเร็วรอบสูง

**ที่มา:** Brian (2004)

การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงจะนิยมใช้การออกแบบการทดลอง (Design of an Experiments, DOE) ซึ่งอาจใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full factorial design) การทดลองแฟกทอเรียลบางส่วน (Fractional factorial design) และการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคทากูชิ (Taguchi DOE methods) (Levinson, 1999) แต่เนื่องจากการเคลือบชั้นฟิล์มๆ มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องหลายตัวแปร ซึ่งถ้าใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบหรือการทดลองแฟกทอเรียลบางส่วนแล้ว จะสิ้นเปลืองเวลาและเสียค่าใช้จ่ายมาก ดังนั้นจึงมีการนำการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคทากูชิมาประยุกต์ใช้ ดังตัวอย่างเช่น ศึกษาตัวแปรเพื่อที่จะสร้างชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง Shipley SJR5740 ให้มีความหนาที่สุด

และเกิดฟองอากาศน้อยที่สุด โดยมีปัจจัยทั้งหมด 11 ปัจจัย ปัจจัยละ 2 ระดับ ถ้าใช้การออกแบบการทดลองแบบการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูป นั้น จะต้องทำการทดลองถึง 2048 การทดลอง แต่ถ้าใช้วิธีการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคทากูชิจะเหลือการทดลองเพียง 12 การทดลอง (Hui *et al.*, 2007) โดยในการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคทากูชิ จำเป็นต้องกำหนดปัจจัย (Factor) และระดับของปัจจัย (Level) ให้อยู่ในรูปแบบของออโธโกนอลอาร์เรย์ (Orthogonal arrays) ทั้งนี้ เพื่อให้สามารถศึกษาผลของตัวแปรและความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อความหนา (Film thickness) และความสม่ำเสมอ (Film uniformity) ของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง ซึ่งโดยทั่วไป ต้องการพัฒนาชั้นฟิล์มฯ ให้มีความหนาน้อยที่สุดและมีความไม่สม่ำเสมอของชั้นฟิล์มฯน้อยที่สุด ทั้งนี้เพื่อไม่ให้ความขรุขระของชั้นฟิล์มฯ ส่งผลต่อขนาดของลายวงจร (Kim and Son, 2000) เมื่อทำการทดลองแล้ว ต้องเก็บข้อมูลของความหนาชั้นฟิล์มฯ จะทำการวัดที่ 25 หรือ 49 ตำแหน่งทั่วผิวชิ้นงาน และกำหนดให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, SD) เป็นค่าความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์มฯ จากนั้นต้องใช้ความรู้ทางด้านสถิติคือ การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) เพื่อทดสอบว่าตัวแปรใดส่งผลต่อชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงและหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการสร้างชั้นฟิล์มฯ ซึ่งนิยมทดสอบความแปรปรวนที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จากนั้นจะมีการทดสอบค่าความแปรปรวนของค่ากลางกำลังสอง (Mean square deviation) ด้วยค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal-noise ratio, S/N ratio) ซึ่งนิยมพิจารณาค่าใหญ่กว่าดีกว่า (Larger-the-better) และเล็กกว่าดีกว่า (Smaller-the-better) โดยสามารถคำนวณค่าดังกล่าวด้วยสมการที่ 4 และสมการที่ 5 ตามลำดับ ซึ่งถ้าต้องการชั้นฟิล์มฯที่มีความหนามากจะต้องใช้อัตราส่วนแบบใหญ่กว่าดีกว่า ในขณะที่ความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์มจะต้องใช้อัตราส่วนแบบเล็กกว่าดีกว่า ในการคำนวณ (Montgomery, 1997; Yang and Chang, 2006.)

ใหญ่กว่าดีกว่า

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i} \right) \quad (4)$$

เล็กกว่าดีกว่า

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (5)$$

เมื่อ  $\frac{S}{N}$  คือ อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน

$y_i$  คือ ค่าวัดของตัวแปร  $i$  ที่สนใจ เมื่อ  $i = 1, 2, \dots, n$

$n$  คือ จำนวนการทดลองของตัวแปร  $i$

แต่เนื่องจากการสร้างชั้นฟิล์มฯ จำเป็นต้องพิจารณาอัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของความหนาและความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์มฯ ไปพร้อมกัน โดยคำนวณได้จากการรวมกันของค่าความสูญเสียด้านคุณภาพโดยรวม (Total quality loss) ตามชนิดของค่าความผันแปรของค่ากลางกำลังสอง (Mean square deviation) คือ เล็กกว่าดีกว่าและใหญ่กว่าดีกว่า ดังแสดงในสมการที่ 6 และสมการ 7 และคำนวณค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนได้โดยสมการที่ 8

ใหญ่กว่าดีกว่า

$$Q_{a,total} = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{y_{1i}} \right)^2 \right] + \left[ \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left( \frac{1}{y_{2j}} \right)^2 \right] \quad (6)$$

เล็กกว่าดีกว่า

$$Q_{a,total} = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{1i})^2 \right] + \left[ \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (y_{2j})^2 \right] \quad (7)$$

$$\frac{S}{N} = -10 \text{Log}(Q_{a,total}) \quad (8)$$

เมื่อ  $\frac{S}{N}$  คือ อัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวน

$Q_{a,total}$  คือ ค่าความสูญเสียด้านคุณภาพโดยรวม

$y_{1i}$  คือ ค่าวัดที่  $i$  ของตัวแปรที่หนึ่ง เมื่อ  $i = 1, 2, \dots, n$

$y_{2j}$  คือ ค่าวัดที่  $j$  ของตัวแปรที่สอง เมื่อ  $j = 1, 2, \dots, m$

$n$  คือ จำนวนค่าวัดของตัวแปรที่  $i$

$m$  คือ จำนวนค่าวัดของตัวแปรที่  $j$

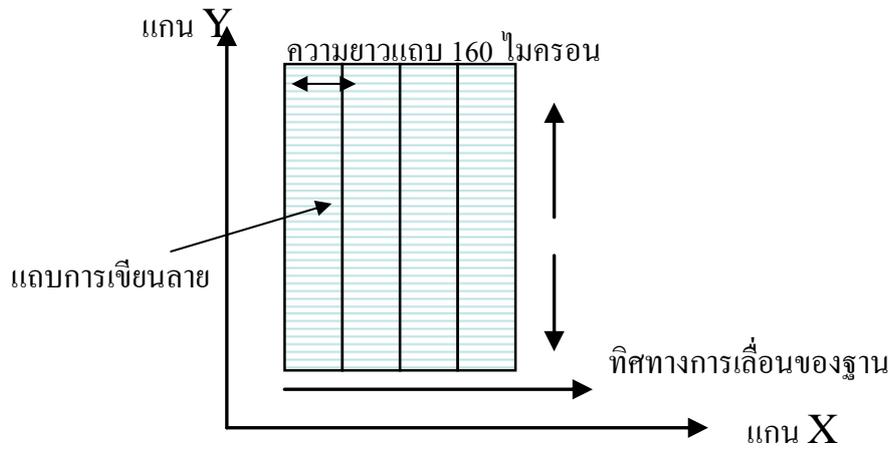
เมื่อได้เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการสร้างชั้นฟิล์มฯ แล้วจะสามารถพยากรณ์ค่าคาดคะเนของค่าตอบสนอง (Expected performance) ของความหนาและความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์มฯ ได้โดยใช้สมการที่ 9

$$Y_{opt} = T + \sum_i^k (x_i - T) \quad (9)$$

เมื่อ  $Y_{opt}$  คือ ค่าคาดคะเนของค่าตอบสนอง  
 $T$  คือ ค่าเฉลี่ยของค่าตอบสนองที่สนใจจากการทดลองทั้งหมด  
 $x_i$  คือ ค่าเฉลี่ยของค่าตอบสนองจากเงื่อนไขที่ดีที่สุดของตัวแปร  $i$   
 เมื่อ  $i = 1, 2, \dots, k$   
 $k$  คือ จำนวนตัวแปรที่สนใจ

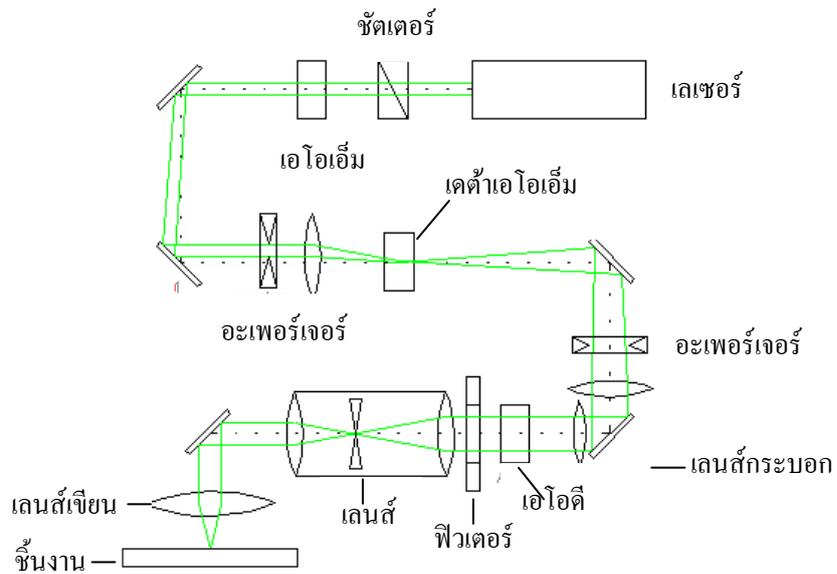
### การฉายแสง

เป็นขั้นตอนที่ใช้แสงเพื่อถ่ายแบบลายวงจรที่ได้ออกแบบไว้ลงบนชิ้นงาน ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นต่างๆ คือ 248 นาโนเมตร (Deep-UV, DUV), 365 นาโนเมตร (i-line), 405 นาโนเมตร (h-line) และ 436 นาโนเมตร (g-line) (Quirk and Serda, 2001) การฉายแสงสามารถแบ่งได้ 2 วิธี คือ การฉายแสงโดยตรง ซึ่งเป็นวิธีการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบ โดยใช้ข้อมูลของลายวงจรที่ทำการออกแบบไว้แปลงเป็นไฟล์ชุดคำสั่งในคอมพิวเตอร์ จากนั้นเครื่องสร้างลายวงจร (Pattern Generator, PG) จะเขียนลายวงจรตามที่ได้ออกแบบไว้ลงบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงโดยตรง ซึ่งการเขียนลายวงจรเริ่มจากการวางชิ้นงานบนฐาน (Stage) ในตำแหน่งอ้างอิง และปรับระยะโฟกัสของหัวเลเซอร์ จากนั้นกำหนดตำแหน่งบนชิ้นงานที่ต้องการเขียนลาย แล้วฉายแสงเลเซอร์ไปบนน้ำยาไวแสงโดยใช้หลักการแบบราสเตอร์สแกน (Raster scan) ซึ่งจะแบ่งลายวงจรออกเป็นแถบๆ และเขียนไปอย่างต่อเนื่องจนจบกระบวนการ (ภาพที่ 16) โดยมีระบบอะคูสติกออปติคโมดูเลเตอร์ (Acousto Optic Modulator, AOM) ทำหน้าที่ควบคุมความเข้มของแสงเลเซอร์ และระบบอะคูสติกออปติคดีเฟกเตอร์ (Acousto Optic Deflector, AOD) ทำหน้าที่ควบคุมการหักเหของแสง (ภาพที่ 17) จากนั้นเขียนลายวงจร การสร้างลายวงจรอีกเทคนิค คือ การฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ เป็นวิธีที่นิยมใช้มากในอุตสาหกรรมการผลิตวงจรรวม โดยทั่วไปจะฉายแสงด้วยเครื่องถ่ายแบบลายวงจรชนิดคอนแทกมาสก์อะไลเนอร์ (Contact mask aligner, M/A) ซึ่งหลักการในการสร้างลายวงจร คือ การวางชิ้นงานที่จะฉายแสงให้มีตำแหน่งตรงกับลายวงจรที่ต้องการบนกระจกต้นแบบ (Alignment) จากนั้นฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านแผ่นกระจกต้นแบบลงบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงบนชิ้นงานเพื่อถ่ายแบบลายวงจรที่ต้องการ โดยมีส่วนประกอบทั่วไปของเครื่องจักร (ภาพที่ 18)



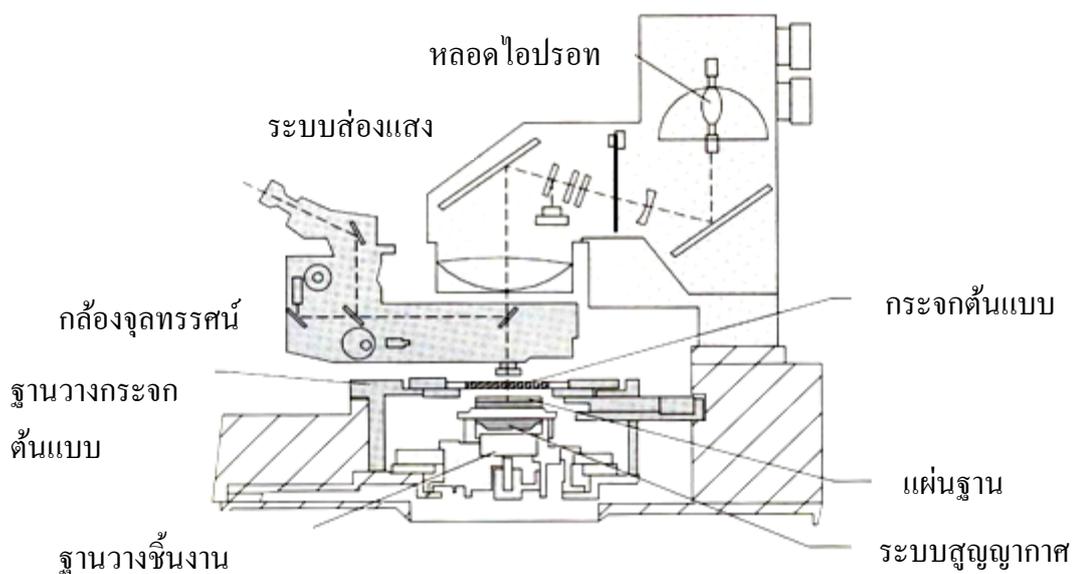
ภาพที่ 16 หลักการเขียนลายวงจรแบบราสเตอร์สแกน

ที่มา: Anonymous (n.d.)



ภาพที่ 17 ส่วนประกอบทั่วไปของเครื่องสร้างต้นแบบลายวงจร

ที่มา: Anonymous (n.d.)



ภาพที่ 18 ส่วนประกอบทั่วไปของเครื่องคอนแทกมาสก์อะไลเนอร์

ที่มา: Quirk and Serda (2001)

### การล้างลายวงจร

เมื่อชิ้นงานผ่านการฉายแสงแล้วจะต้องล้างลายวงจร (Develop) ด้วยน้ำยาล้างลาย (Developer) เพื่อให้ลายวงจรปรากฏขึ้น สำหรับ (1) น้ำยาไวแสงชนิดบวกนั้น ส่วนที่ถูกฉายแสงจะเกิดการทำลายพันธะของโพลีเมอร์ภายในเนื้อของน้ำยาไวแสงทำให้เกิดการอ่อนตัว ในขณะที่ส่วนที่ไม่ถูกฉายแสงนั้นพันธะของน้ำยาไวแสงจะคงแข็งแรงอยู่ เมื่อนำชิ้นงานไปแช่ในน้ำยาล้างลาย ส่วนของน้ำยาไวแสงที่ถูกฉายแสงจะหลุดลอกไปกับน้ำยาล้างลายในขณะที่ส่วนที่ไม่ถูกฉายแสงจะเหลืออยู่บนผิวชิ้นงานเกิดเป็นลายวงจรขึ้น สำหรับ (2) น้ำยาไวแสงชนิดลบนั้นจะได้ผลตรงข้ามกับน้ำยาไวแสงชนิดบวก โดยตัวแปรที่ต้องควบคุมในขั้นตอนการล้างลายวงจร คือ เวลาในการล้างลาย ซึ่งจะสัมพันธ์กับชนิดของน้ำยาไวแสงและชนิดของน้ำยาล้างลาย จากนั้นอบชิ้นงาน (Postbake) เพื่อไล่ความชื้นและก่อให้เกิดการเชื่อมพันธะกันระหว่างโมเลกุลของน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่บนชิ้นงาน ทำให้ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะทนต่อการกัดลายวงจรได้ โดยเงื่อนไขที่ต้องควบคุมในขั้นตอนการอบชิ้นงาน คือ อุณหภูมิและเวลาในการอบ (Quirk and Serda, 2001)

## การกัดลายวงจร

การกัดลายวงจรมีอยู่ 2 เทคนิค คือ การกัดแบบแห้ง (Dry anisotropic etching) ซึ่งเป็นการกัดที่อาศัยเคมีและแรงทางกล และการกัดแบบเปียก (Wet isotropic etching) ซึ่งเป็นการกัดทุกทิศทาง โดยสำหรับการกัดแบบเปียกมีตัวแปรที่ต้องควบคุมคือ เวลาที่ใช้ในการกัดลายวงจร ซึ่งโดยทั่วไปแล้วชั้นฟิล์มโครเมียมที่มีความหนา 120 นาโนเมตร จะใช้เวลาในการกัดประมาณ 65 ถึง 70 วินาที (Kalk *et al.*, 1994) โดยส่วนที่มีน้ำยาไวแสงปกคลุมจะปกป้องพื้นผิวด้านล่างไม่ให้ถูกกัด ในขณะที่ส่วนที่ไม่มีน้ำยาไวแสงปกคลุม ชั้นฟิล์มด้านล่างจะถูกกัดออก ซึ่งสำหรับกระจกต้นแบบนั้น เมื่อผ่านกระบวนการกัดลายวงจร โครเมียมด้านล่างส่วนที่ไม่มีน้ำยาไวแสงปกคลุมจะถูกกัดกลายเป็นช่องทะลุไปถึงกระจกด้านล่างเกิดเป็นส่วนโปร่งแสงขึ้น ในขณะที่ส่วนที่ไม่ถูกกัดจะเป็นส่วนทึบของโครเมียม ซึ่งเป็นส่วนที่กั้นไม่ให้แสงผ่าน จากนั้นต้องลอกชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่ออก (Photoresist stripping) เพื่อให้แผ่นกระจกต้นแบบมีความสะอาด พร้อมทั้งจะนำไปใช้ในกระบวนการต่อไปได้ ซึ่งภายหลังจากได้กระจกต้นแบบแล้ว จะต้องนำไปใช้ถ่ายแบบลายวงจรลงบนแผ่นซิลิกอน โดยการกัดพื้นผิวซิลิกอนในกระบวนการกัดแบบแห้งจะนิยมใช้เฮกซะฟลูออโรซัลเฟต ( $\text{SF}_6$ ) และออกตะฟลูออโรเตตระคาร์บอน ( $\text{C}_4\text{F}_8$ ) (Sure *et al.*, 2003) หรืออาจใช้คาร์บอนเตตระฟลูออไรด์ ( $\text{CF}_4$ ) ผสมกับก๊าซออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) (Wolf and Tauber, 2000) และและมีตัวแปรควบคุมคือ จำนวนแผ่นซิลิกอน อุณหภูมิแผ่นซิลิกอน อัตราการกัดและปริมาณก๊าซและกำลังของขั้วอิเล็กโทรด (Waits *et al.*, 2005)

## การตรวจสอบชิ้นงาน

### การวัดความหนาชั้นฟิล์ม

การสร้างกระจกต้นแบบชนิดชั้นฟิล์มหลายความหนาและโครงสร้างจุลภาค 3 มิตินั้น จำเป็นที่จะต้องวัดความหนาของของชั้นฟิล์มโครเมียมบนแผ่นกระจกต้นแบบและความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงบนแผ่นซิลิกอน ซึ่งเทคนิคที่ใช้ในการวัดความหนาชั้นฟิล์มสามารถแบ่งได้เป็น 3 เทคนิค คือ (1) การวัดแบบสัมผัสชิ้นงาน โดยการวัดทางไฟฟ้า (Electrical measurement) ซึ่งเหมาะสำหรับฟิล์มโลหะที่มีความหนาน้อยกว่า 100 นาโนเมตร โดยจะวัดค่าความต้านทานแผ่น (Sheet resistivity,  $R_s$ ) ของชั้นฟิล์ม (Wolf and Tauber, 2000) (2) การวัดแบบไม่สัมผัสชิ้นงานโดยการวัดด้วยแสง ซึ่งจะเป็นการวัดแบบไม่ทำลายผิวชิ้นงานนิยมใช้เทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรี

(Spectrophotometry) ซึ่งจะฉายแสงจากแหล่งกำเนิดแสงชนิดไฮโดรเจนหรือหลอดทังสเตนไปยังผิวชิ้นงาน จากนั้นใช้หลักการสะท้อนของแสงจากชั้นวัสดุที่แตกต่างกันทำให้ความยาวคลื่นของแสงสะท้อนมีแตกต่างกัน โดยจะต้องทราบดัชนีหักเหและมุมของรังสีตกกระทบแล้วใช้โมโนโครเมเตอร์ (Monochromator) เพื่อแยกลำแสงสะท้อนที่มีความยาวคลื่นต่อเนื่องออกเป็นความยาวคลื่นเดียว จากนั้นคำนวณหาค่าความหนาของชั้นฟิล์มโดยสมการที่ 10 (Anonymous, n.d.)

$$d = \frac{m}{2D_n \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \quad (10)$$

เมื่อ  $d$  คือ ความหนาฟิล์ม

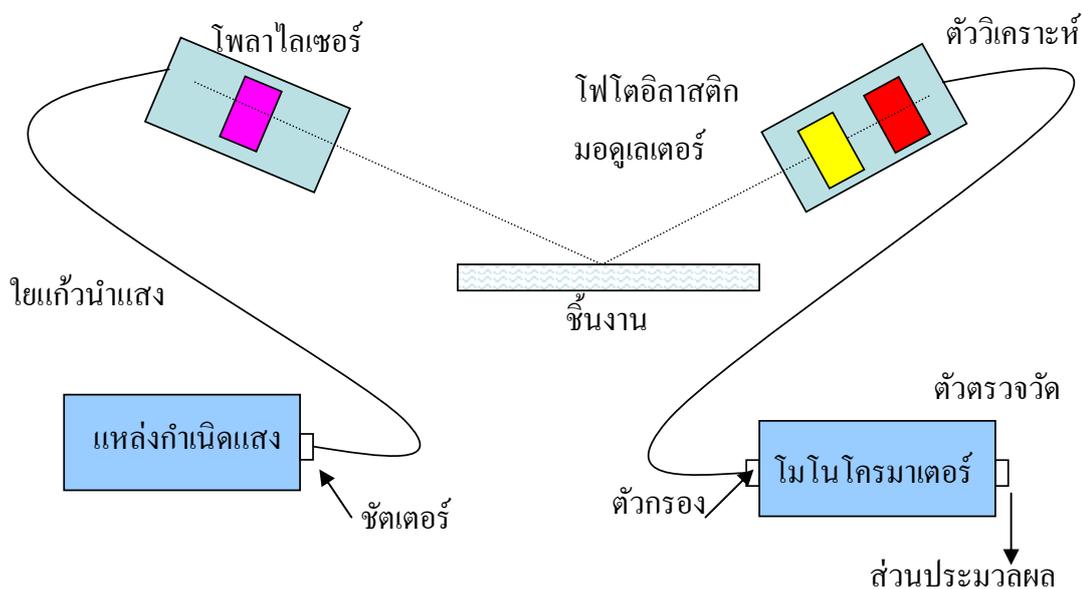
$m$  คือ จำนวนขอบของบริเวณเลขคลื่นที่ใช้

$n$  คือ ค่าดัชนีหักเห

$\theta$  คือ มุมของรังสีตกกระทบ

$D_n$  คือ บริเวณเลขคลื่น

การวัดแบบไม่สัมผัสชิ้นงานโดยใช้แสงที่นิยมอีกเทคนิคหนึ่งคือ เทคนิคอิลลิปโซเมทรี (Ellipsometry) มีหลักการคือ ฉายแสงจากแหล่งกำเนิดแสงผ่านโพลาไรซ์เซอร์ (Polarizer) ไปยังผิวชิ้นงาน แล้วตรวจสอบสัญญาณจากการเกิดโพลาไรซ์ของแสง (Polarized light) ที่สะท้อนมาจากผิวชิ้นงาน จากนั้นส่งผ่านข้อมูลไปยังตัวกรอง (Filters) และโมโนโครมาเตอร์ (Monochromator) เพื่อให้ได้ข้อมูลของความหนาและดัชนีการหักเหของแสงที่มีสัญญาณสูงๆ และเข้าสู่ตัวตรวจวัด (Detector) โดยจะนำข้อมูลไปคำนวณในคอมพิวเตอร์เพื่อหาค่าความหนาของชั้นฟิล์มต่อไป (ภาพที่ 19)

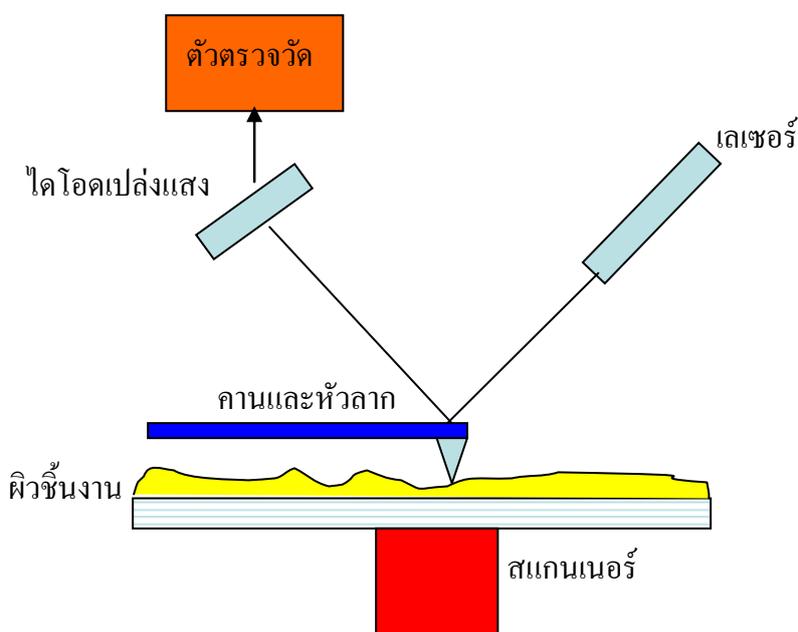


ภาพที่ 19 องค์ประกอบในการวัดความหนาชั้นฟิล์มด้วยเทคนิคออปติคัลโปรไฟโลมิเตอร์

ที่มา: Anonymous (n.d.)

การวัดความหนาแบบไม่สัมผัสชิ้นงานนั้น อาจถ่ายภาพตัดขวางของชิ้นงานโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ซึ่งเหมาะสำหรับชั้นฟิล์มที่มีความหนามากกว่า 100 นาโนเมตร (ชลิตา และคณะ, 2546) แต่สำหรับชั้นฟิล์มที่มีความหนาน้อยกว่านั้น จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีการเตรียมชิ้นงานที่ยากเนื่องจากชิ้นงานต้องมีความบางเพียงพอที่จะให้อิเล็กตรอนส่องทะลุผ่านได้ (Wolf and Tauber, 2000) และเนื่องจากการวัดความหนาด้วยเทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรีหรือเทคนิคออปติคัลโปรไฟโลมิทรินั้น มีข้อจำกัดคือ ต้องทราบค่าของตัวแปรต่างๆ ของวัสดุที่จะวัดความหนา อีกทั้งยังไม่สามารถวัดความหนาของชั้นฟิล์มที่มีความบางมากๆ ได้ จึงต้องใช้ (3) การวัดโดยสัมผัสกับชิ้นงานโดยตรงแบบลากหัวเข็ม (Stylus profilometry) โดยเทคนิคที่นิยมและมีความละเอียดสูงที่สุดในปัจจุบัน (Kalus *et al.*, 1998) คือ การวัดความหนาชั้นฟิล์มด้วยเทคนิคการวัดแรงอะตอม (Atomic Force Measurement, AFM) โดยมีความละเอียดอยู่ในระดับอังสตรอม ถูกค้นพบโดย Binnig, Quate และ Gerber ในปี 1986 ระบบการวัดประกอบด้วยคาน (Cantilever) ทำจากซิลิกอนหรือซิลิกอนไนไตรด์ขนาดเล็กระดับไมครอน ซึ่งที่ปลายจะมีหัวเข็ม (Tip) ที่มีรัศมีและความโค้งในระดับนาโนเมตรติดอยู่เพื่อทำหน้าที่ลากไปบนผิวชิ้นงาน (ภาพที่

20) โดยแรงที่เครื่องวัดแรงอะตอมสามารถวัดได้ จะเป็นการผสมระหว่างแรงชนิดต่างๆ เช่น แรงทางกล แรงแวนเดอร์วาลส์และแรงพันธะเคมี เป็นต้น โดยทั่วไปการวัดความหนาชั้นฟิล์ม โดยเทคนิควัดแรงอะตอมมีข้อดี คือ นอกจากความหนาแล้วยังสามารถนำข้อมูลมาสร้างเป็นภาพจำลอง 3 มิติ ของพื้นผิวได้ นอกจากนี้ชิ้นงานที่ทำการวัดด้วยวัดแรงอะตอม ไม่จำเป็นต้องเตรียมผิว โดยการเคลือบทองหรือคาร์บอนแบบเทคนิคการใช้อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและไม่ต้องทำการวัดในระบบสุญญากาศ ไม่ต้องมีแบบจำลองหรือสูตรการคำนวณทางคณิตศาสตร์สำหรับแต่ละวัสดุ เหมือนเทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรีหรือเทคนิคออลลิปโซมิทรี แต่ข้อจำกัดของเทคนิคการวัดแบบวัดแรงอะตอม คือ มีช่วงการวัดของความสูงชั้นฟิล์มสูงที่สุดอยู่ในระดับไมครอน และมีระยะการสแกนผิวชิ้นงานมากที่สุดคือ 150 ไมครอน นอกจากนี้คุณภาพของภาพที่ถ่ายจะขึ้นอยู่กับความโค้งของหัวเข็มและใช้เวลาในการสแกนผิวชิ้นงานมากกว่าเทคนิคการใช้อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Conroy and Armstrong, 2005) อย่างไรก็ตามเทคนิคการใช้หัวเข็มลากจะไม่สามารถวัดชั้นฟิล์มที่มีความหนาน้อยกว่า 100 นาโนเมตร ได้ เนื่องจากการสัมผัสที่อ่อนของหัวลาก (Wolf and Tauber, 2000)



ภาพที่ 20 แบบจำลองระบบการวัดความหนาชั้นฟิล์มด้วยเทคนิค AFM  
ที่มา: Anonymous (n.d.)

### การวัดค่าการส่องผ่านของแสง

กระบวนการถ่ายแบบลายวงจรนั้น จะฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะใช้ต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารี ซึ่งมีค่าการส่องผ่านของแสง (Light transmission) ช่วงความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร ในบริเวณที่ไม่มีโครเมียมปกคลุมเท่ากับ 6.5 เปอร์เซ็นต์ (Kalk *et al.*, 1994) แต่สำหรับกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกลและกระจกต้นแบบความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับนั้น จะมีการส่องผ่านของแสงที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่เพื่อให้เหมาะสมในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ โดยการฉายแสงและการกัดเพียงครั้งเดียว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องวัดค่าการส่องผ่านของแสงผ่านกระจกต้นแบบ ซึ่งคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างความเข้มแสงที่ความยาวคลื่นค่าหนึ่งส่องผ่านชิ้นงานต่อความเข้มแสงที่ทะลุผ่านออกจากผิวชิ้นงานได้ ซึ่งปกติจะทำการปรับเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นแสงที่ 400 ถึง 800 นาโนเมตร (ชลิตา และคณะ, 2546) ซึ่งค่าการส่องผ่านของแสงสามารถคำนวณได้โดยสมการที่ 11 (Al-Kuhaili and Durrani, 2007)

$$\%T = \left(\frac{I_x}{I_0}\right) \times 100\% \quad (11)$$

เมื่อ  $\%T$  คือ ค่าการส่องผ่านของแสง

$I_x$  คือ ค่าความเข้มของแสงที่ทะลุออกจากผิวชิ้นงาน

$I_0$  คือ ค่าความเข้มของแสงที่ส่องไปยังผิวชิ้นงาน

โดยค่าการส่องผ่านของแสงจะมีความสัมพันธ์กับค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ซึ่งสามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ 12 และค่าการส่องผ่านของแสงจะมีความสัมพันธ์กับความหนาของวัสดุชนิดต่างๆ ซึ่งสามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ 13 (Cullity, 1978)

$$A = -\log(\%T) = -\log\left(\frac{I_x}{I_0}\right) \quad (12)$$

$$I_x = I_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)x} \quad (13)$$

เมื่อ  $\%T$  คือ ค่าการส่องผ่านของแสง

$A$  คือ ค่าการดูดกลืนแสง

$I_x$  คือ ค่าความเข้มแสงเมื่อส่องผ่านวัตถุที่มีความหนา  $x$

$I_0$  คือ ค่าความเข้มแสงเริ่มต้นของแหล่งกำเนิดแสง

$\mu$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงเชิงเส้น

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของวัสดุ

$x$  คือ ความหนาของวัสดุ

### แบบจำลองในการคำนวณต้นทุน

ในกระบวนการสร้างลายวงจรนั้นจะมีตัวขับเคลื่อนของต้นทุน (Cost drivers) คือ (1) ต้นทุนกระจกต้นแบบ (Mask cost) (2) ต้นทุนการถ่ายแบบลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบ (3) ต้นทุนแผ่นซิลิกอน และ (4) ต้นทุนการสร้างลายวงจรบนแผ่นซิลิกอน โดยต้นทุนเครื่องจักรในกระบวนการผลิต (Tool cost) ต้นทุนการใช้งานกระจกต้นแบบ (Mask usage cost) และต้นทุนในการผลิต (Processing cost) ก็จะถูกนำมาคำนวณต้นทุนด้วย โดยสำหรับกระจกต้นแบบซึ่งจัดเป็นต้นทุนที่แพงที่สุดในกระบวนการผลิตนั้น จะต้องคำนึงถึงต้นทุนของกระจกต้นแบบ (Mask blank) การผลิตลายวงจร (Mask production) และปริมาณของลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบ (Data quantity) (EUVA, 2004) ซึ่งราคากระจกต้นแบบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง อันมีสาเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของต้นทุนของเครื่องจักร (Equipment cost) ค่าวัสดุและสารเคมี (Material cost) อัตราการผลิตที่ลดต่ำลง รวมไปถึงความซับซ้อนของลายวงจรที่เพิ่มขึ้น โดยพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนมากที่สุดคือ การเขียนลายวงจร (Write step), ค่าวัสดุดิบ (Materials) และค่าตรวจสอบชิ้นงาน (Inspection) ตามลำดับ โดยการเขียนลายวงจรเป็นต้นทุนถึง 50 เปอร์เซ็นต์ของกระจกต้นแบบ (Muzio, 2000) ดังนั้นการลดต้นทุนในการผลิตอาจทำได้โดย (1) การจัดการกับข้อมูล (Intellectual Property, IP) ซึ่งในอดีตนิยมสร้างลายวงจรหนึ่งชั้น (Layer, L) บนแผ่นกระจกต้นแบบหนึ่งแผ่น (Reticle plate, R) สำหรับแต่ละผลิตภัณฑ์ (Product, P) เรียกว่าเป็น 1R-1L-IP แต่ปัจจุบันมีการนำเอาลายวงจรหลายๆ ผลิตภัณฑ์มารวมกันในกระจกต้นแบบแผ่นเดียว (Multi-IP mask) ทั้งนี้เพื่อประหยัดต้นทุนของวัสดุดิบ โดยแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ กระจกต้นแบบหลายผลิตภัณฑ์ (Multiple product mask, MP-mask) หรืออาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ชัตเทิลมาสก์ (Shuttle mask) ซึ่งจะนำลายวงจรของผลิตภัณฑ์หลายชนิดมาสร้างบนกระจกต้นแบบแผ่นเดียว ในส่วนของกระจกต้นแบบหลายชั้นลายวงจร (Multiple layer mask, ML-mask) จะเขียนลายวงจรหลายชั้นของผลิตภัณฑ์เดียวกันลงไปบนกระจกต้นแบบแผ่นเดียว โดยการเลือกชั้นหรือผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมที่จะมาสร้างรวมกันบนกระจกต้นแบบแผ่นเดียวนั้นจะต้องคำนึงถึงขนาดลายวงจร ความหนาแน่น



ตารางเวลาสำหรับการผลิตและการเพิ่มขีดหุ่นในกระบวนการผลิต ซึ่งอาจทำให้ประสิทธิภาพในการผลิต (Performance efficiency) และเวลาในการผลิตของเครื่องจักรเพิ่มขึ้นอีก 40 เปอร์เซ็นต์ได้ (Steege, 1996) ทั้งนี้จะต้องเปรียบเทียบต้นทุนของเทคนิคต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาเพื่อหาวิธีในการลดต้นทุนที่ดีที่สุด แต่เนื่องจากกระบวนการผลิตอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำและกระบวนการสร้างกระจกต้นแบบมีความซับซ้อนและเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ทำให้การใช้เทคนิคการคำนวณต้นทุนตามกิจกรรม (Activity-based costing, ABC) ในการคิดต้นทุนนั้นทำได้ยาก ทำให้มีการนำเอาเทคนิคการคำนวณต้นทุนตามหน้าที่ (Function-based costing, FBC) มาใช้ในการคิดต้นทุน โดยแบ่งต้นทุนได้เป็น 3 ส่วน คือ ต้นทุนวัตถุดิบทางตรง (Direct material cost, DM), ต้นทุนแรงงานทางตรง (Direct labor cost, DLC) และค่าใช้จ่ายในการผลิต (Manufacturing overhead cost, MOHC) โดยจากงานวิจัยพบว่าค่าใช้จ่ายในการผลิตจะมีค่าสูงประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ของต้นทุนรวม ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรมีราคาสูงมาก (Gao *et al.*, 1999) ดังนั้นการเปรียบเทียบต้นทุนระหว่างกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไปนารี กระจกต้นแบบชนิดเกรย์ สเกลและกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ จะต้องตัดปัจจัยของเครื่องจักรที่ใช้ในการสร้างลายวงจรที่มีขนาดและความละเอียดไม่เท่ากัน ซึ่งทำได้โดยการใช้ข้อมูลต้นทุนในการสร้างกระจกต้นแบบที่ใช้กับการถ่ายแบบลายวงจรชนิดอัลตราไวโอเลตแบบสูงยิ่ง (Extreme Ultraviolet Lithography, EUVL) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ทันสมัยและมีราคาแพงที่สุดในปัจจุบัน โดยจะคิดต้นทุนในส่วนของแต่ละกระจกต้นแบบเริ่มต้น การเขียนลายวงจรด้วยลำอิเล็กตรอนและการซ่อมแซมจุดบกพร่อง (Hector, n.d.) ทั้งนี้จะไม่นำต้นทุนของระบบสนับสนุน, ค่าเสื่อมราคาของตัวอาคารสะอาดรวมไปถึงพื้นที่ในการวางเครื่องจักรมาพิจารณา เนื่องจากมีความแตกต่างกันในแต่ละเทคนิคอย่างมาก โดยต้นทุนรวมของกระบวนการสร้างต้นแบบลายวงจรสามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ 14 (Sreenivasan *et al.*, n.d.) ซึ่งจะเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตชิปต่อแผ่นซิลิกอนในเวลารวมที่เท่ากัน โดยใช้กระจกต้นแบบทั้ง 3 ชนิด

$$CoO = P_w + \frac{M_0}{M_L} + \frac{E_0 + (D)(E_M)}{(D)(T)(U)(365)(24)} \quad (14)$$

- เมื่อ  $CoO$  คือ ต้นทุนในส่วนของผู้ขาย  
 $P_w$  คือ ต้นทุนในการเคลื่อนย้ายไปแสงและการกัดต่อแผ่นซิลิกอน  
 $M_0$  คือ ต้นทุนของกระจกต้นแบบ  
 $M_L$  คือ จำนวนแผ่นซิลิกอนต่อกระจกต้นแบบ 1 แผ่น  
 $E_0$  คือ ต้นทุนของเครื่องจักรในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจร

$E_M$  คือ ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงรักษาเครื่องจักรรายปี

$D$  คือ ระยะเวลาเสื่อมสภาพของเครื่องจักร

$U$  คือ เปอร์เซนต์การใช้ประโยชน์ของเครื่องจักร

$T$  คือ อัตราการผลิตของแผ่นซีดีคอนต่อชั่วโมง

### การวิเคราะห์การตลาดด้วยเทคนิค SWOT และเทคนิคของพอร์ตเตอร์

ในการคิดค้นเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรแบบใหม่โดยใช้กระจกต้นแบบชนิด การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ จำเป็นต้องวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานจริงในอุตสาหกรรม รวมไปถึงการแข่งขันทางด้านตลาดกับกระจกต้นแบบชนิดอื่นๆที่ใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โดยเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ทางด้านตลาด คือ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SWOT เป็นเครื่องมือในการประเมินสถานการณ์ ซึ่งจะช่วยให้บริษัทสามารถวิเคราะห์ข้อดีและข้อเสียของผลิตภัณฑ์ใหม่ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำผลิตภัณฑ์เข้าสู่เชิงพาณิชย์ต่อไป โดย SWOT มาจากตัวย่อภาษาอังกฤษ 4 ตัว คือ (1) จุดแข็ง (Strengths) เป็นความแข็งแกร่ง ที่เกิดจากสภาพแวดล้อมภายในบริษัท เช่น จุดแข็งด้านส่วนประสม จุดแข็งด้านการเงิน จุดแข็งด้านการผลิต จุดแข็งด้านทรัพยากรบุคคล โดยบริษัทจะต้องใช้ประโยชน์จากจุดแข็งในการกำหนดกลยุทธ์การตลาดสำหรับผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ (2) จุดอ่อน (Weaknesses) เป็นปัญหาหรือข้อบกพร่องที่เกิดจากสภาพแวดล้อมภายในต่างๆ ของบริษัท ซึ่งจะต้องหาวิธีในการแก้ปัญหาเหล่านั้น เพื่อให้สามารถแข่งขันกับบริษัทหรือผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้ (3) โอกาส (Opportunities) เป็นผลจากการที่สภาพแวดล้อมภายนอกของบริษัทเอื้อประโยชน์หรือส่งเสริมการดำเนินงานขององค์กร โอกาสแตกต่างจากจุดแข็งตรงที่โอกาสนั้นเป็นผลมาจากสภาพแวดล้อมภายนอก แต่จุดแข็งนั้นเป็นผลมาจากสภาพแวดล้อมภายในหรืออาจเป็นจุดอ่อนของผลิตภัณฑ์อื่นๆที่มีในท้องตลาดอยู่แล้ว โดยนักการตลาดที่ดีจะต้องเสาะแสวงหาโอกาสอยู่เสมอ และใช้ประโยชน์จากโอกาสนั้น (4) อุปสรรค (Threats) เป็นข้อจำกัดที่เกิดจากสภาพแวดล้อมภายนอก โดยอาจเป็นจุดแข็งของผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นๆ ที่มีอยู่ในท้องตลาด ซึ่งธุรกิจจำเป็นต้องปรับกลยุทธ์การตลาดให้สอดคล้องและพยายามขจัดอุปสรรคต่างๆ ที่เกิดขึ้น (Anonymous, n.d.) นอกจากนี้ยังมีเทคนิคการวิเคราะห์การตลาดโดยใช้ปัจจัยทางการแข่งขัน 5 ประการของไมเคิล พอร์ตเตอร์ (Michael Porter) (ภาพที่ 21) เริ่มจากการสร้างกรอบป้องกันสำหรับบริษัทที่อยากเข้ามาเป็นคู่แข่ง (Entry) ซึ่งทำได้โดยการสร้างผลิตภัณฑ์ให้มีเอกลักษณ์ และสร้างความเชื่อใจของลูกค้าเพื่อให้เกิดความจงรักภักดี หรือการเป็นผู้ผลิตรายแรกในอุตสาหกรรมนั้นๆ เหล่านี้ทำให้คู่แข่งทางธุรกิจมีความยากลำบากใน

การเข้ามาแข่งขัน อย่างไรก็ตามก็ยังมีคู่แข่งที่มีสมรรถภาพใกล้เคียงกัน ทำให้การแข่งขันเป็นไปอย่างดุเดือด (Rivalry) โดยจะมีการใช้กลยุทธ์การแข่งขันด้านราคา การโฆษณาและการส่งเสริมการขายสินค้า การบริการลูกค้าและการประกันสินค้า โดยการแข่งขันนั้นมีสาเหตุมาจากผู้ผลิตได้รับแรงกดดันจากผู้ผลิตรายอื่นและความต้องการที่จะพัฒนาตำแหน่งทางการตลาดของตัวเอง ซึ่งการเคลื่อนไหวและการปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ของผู้ผลิตต้นแบบลายวงจรรายหนึ่ง จะส่งผลกระทบต่อผู้ผลิตรายอื่นด้วย ซึ่งสำหรับธุรกิจการสร้างต้นแบบลายวงจรที่ต้องใช้เครื่องจักรในการผลิตมีราคาสูงและใช้เวลานานในการคืนทุน จึงเหลือผู้ผลิตน้อยรายในปัจจุบัน โดยทั้งหมดอาศัยกลยุทธ์ทางเพดานราคาในการดึงดูดลูกค้า ทำให้ผู้ผลิตกระจุกต้นแบบถูกกดดันจากอำนาจต่อรองของผู้ผลิตอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Bargaining power of buyers) ซึ่งมีจำนวนมากกว่าผู้ผลิตกระจุกต้นแบบ และอาจถูกกดดันจากอำนาจต่อรองจากผู้ผลิตด้านเทคโนโลยีอันประกอบด้วย เครื่องจักรในกระบวนการผลิต, เครื่องจักรในการตรวจสอบ, เครื่องมือในการวิเคราะห์ และผู้ผลิตด้านวัสดุอันประกอบด้วย แผ่นกระจุกต้นแบบและน้ำยาไวแสง จึงมีความเป็นไปได้ที่จะถูกแทนที่ (Substitution) ด้วยเทคโนโลยีใหม่ๆ หรืออาจมีการรวมตัวกันของบริษัทต่างๆ เพื่อความอยู่รอด

#### การเข้า (Entry)

การผลิตในปริมาณมาก (Economics of scale)  
ความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ (Proprietary product)  
ลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ (Brand Identity)  
การเข้าถึงในการกระจายสินค้า (Access to Distribution)  
นโยบายของรัฐบาล (Government policies)  
ความคาดหว้งในการค้าปลีก (Expected retaliation)

ผู้ขาย  
(Supplier)

การเข้า  
(Entry)

คู่แข่ง  
(Rivals)

#### คู่แข่ง (Rivalry)

การเติบโตของอุตสาหกรรม (Industry growth)  
ความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ (Product differences)  
ลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ (Brand identity)  
กบอบป้องกัน (Exit barriers)  
ความแตกต่างของคู่แข่ง (Diverse of competitors)

ผู้ซื้อ  
(Buyers)

#### ผู้ขาย (Supplier)

การรวมกันของผู้ขาย (Supplier concentration)  
ปริมาณของผู้ขาย (Supplier volume)  
ลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ (Brand Identity)  
ผลกระทบต่อต้นทุน (Impact on cost)  
ผลกระทบต่อความแตกต่าง (Impact on differentiation)  
ข้อมูลจำเพาะของผู้ขาย (Supplier profile)

การแทนที่  
(Substitution)

#### ผู้ซื้อ (Buyers)

การรวมกันของผู้ซื้อ (Buyer concentration)  
ปริมาณของผู้ซื้อ (Buyer volume)  
ลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ (Brand identity)  
ผลกระทบต่อสมรรถนะ (Impact on performance)  
ข้อมูลจำเพาะของผู้ซื้อ (Buyer profile)

ภาพที่ 21 แรงผลักดันทางอุตสาหกรรม 5 ประการ สำหรับการผลิตกระจุกต้นแบบ

ที่มา: Weber and Berglund (2005)

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

1. กระจกตันแบบขนาด 3x3x0.06 นิ้ว (กว้างxยาวxหนา)
2. กระจกตันแบบขนาด 3x5x0.10 นิ้ว (กว้างxยาวxหนา)
3. แผ่นซิลิกอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว
4. เครื่องเคลือบฟิล์มน้ำยาไวแสง (Photoresist spinner)
5. แผ่นอบ (Hotplate)
6. อ่างสารเคมี (Chemical bath)
7. เครื่องคอนแทกมาสก์อะไลเนอร์ (Contact Mask Aligner)
8. เครื่องสร้างต้นแบบลายวงจร (Direct Write Laser)
9. เครื่องล้างลายวงจร (Developer)
10. เครื่องกัดลายวงจร (Etcher)
11. เครื่องวัดความหนาชั้นฟิล์มชนิดแรงอะตอม (Atomic Force Measurement, AFM)
12. เครื่องวัดความหนาชั้นฟิล์มชนิดอิลลิปโซมิเตอร์ (Ellipsometer)
13. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)
14. เครื่องวัดค่าการส่องผ่านของแสง (Light Transmission Spectrophotometer, LTS)
15. กรดซัลฟูริกเข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์ผสมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์

ที่อัตราส่วน 4 ต่อ 1

16. น้ำปราศจากไอออนความต้านทาน 18 MOhm
17. น้ำยาไวแสงชนิดบวกเบอร์ Shipley S1805
18. น้ำยาไวแสงชนิดบวกเบอร์ Clariantz AZ-P4620
19. น้ำยาล้างลายวงจรเบอร์ Shipley MF-26A
20. น้ำยากัดลายวงจร Microchrometechnology CEP-200

## วิธีการ

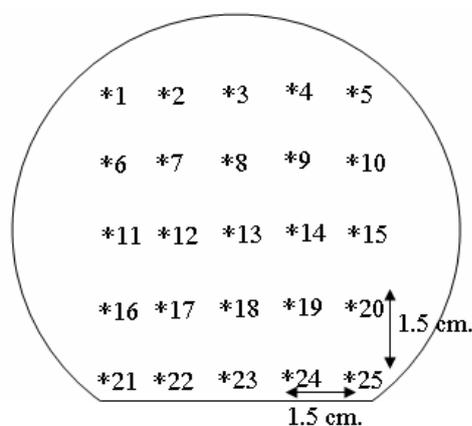
### การเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงชนิดบวกเบอร์ AZ-P4620 บนแผ่นซิลิกอนขนาด 3 นิ้ว

นำแผ่นซิลิกอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว ล้างทำความสะอาดด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์ผสมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วนปริมาตร 4 ต่อ 1 ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำ DI ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 10 นาที เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน แล้วนำไปแช่ในบรรยากาศของเฮกซะเมทิลไดซิลาเซนเป็นเวลา 15 นาที เพื่อไล่ความชื้นออกจากผิวชิ้นงาน จากนั้นเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงชนิดบวกเบอร์ AZ-P4620 ด้วยเครื่องหมุนเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง Polos MCD-100 และอบชั้นฟิล์มด้วยแผ่นอบ (Hotplate) รุ่น EMS-1000 โดยใช้เงื่อนไขจากการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคทางสถิติ เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงให้ได้ความหนาประมาณ 70,000 ถึง 75,000 อังสตรอม ที่ความสม่ำเสมอชั้นฟิล์ม  $\pm 2$  เปอร์เซ็นต์ โดยมีปัจจัยที่สนใจทั้งหมด 5 ปัจจัย แต่ละปัจจัยจะมีระดับของเงื่อนไข 2 ระดับ ได้แก่ (1) ความเร็วรอบต่ำในการหมุนเคลือบ (First spin speed) ที่ 200, 500, 750 และ 1000 รอบต่อนาที (2) อัตราเร่งในการหมุนเคลือบ (Acceleration) ที่ 200, 300, 400 และ 500 รอบต่อนาที<sup>2</sup> (3) ความเร็วรอบสูงในการหมุนเคลือบ (Second spin speed) ที่ 1500, 2000, 2500 และ 3000 รอบต่อนาที (4) เวลาในการหมุนเคลือบ (Second spin time) ที่ 45, 60, 75 และ 90 วินาที และ (5) อัตราการดูดไอเสีย (Exhaust force) ที่ 0, 100, 200 และ 300 ปาสคาล โดยในการออกแบบการทดลองจะแทนปัจจัยต่างๆด้วยสัญลักษณ์ A, B, C, D และ E ตามลำดับ (ตารางที่ 2) ทั้งนี้การกำหนดระดับของปัจจัยต่างๆ จะขึ้นอยู่กับความสามารถของเครื่องจักรเป็นหลัก โดยในการทดลองจะมีการควบคุมปัจจัยอื่นๆ คือ อัตราการจ่ายน้ำยาไวแสง (Dispensing Rate) ที่ 25 วินาที แรงลม 10 ปาสคาล และแรงดูด 10 inH<sub>2</sub>O ทั้งนี้เมื่อนำตัวแปรทั้งหมดไปออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคทางสถิติจะมีความสัมพันธ์กับแบบจำลองชนิด  $L_{16}(2^7)$  ซึ่งจะได้การทดลองทั้งหมด 16 การทดลอง (ตารางภาคผนวกที่ ก1) เมื่อสร้างชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงลงบนชิ้นงานตามเงื่อนไขที่กำหนดแล้ว จะวัดค่าความหนาชั้นฟิล์มด้วยเครื่องออลลิปโซมิเตอร์ยี่ห้อ Rudolph รุ่น FE-III โดยจะวัดทั้งหมด 25 ตำแหน่งต่อหนึ่งเงื่อนไขการทดลอง โดยมีตำแหน่งการวัดกระจายทั่วชิ้นงาน ห่างกันตำแหน่งละ 1.5 เซนติเมตร ทั้งในแนวแกน x และแนวแกน y (ภาพที่ 22) จากนั้นใช้สูตรคำนวณในสมการที่ 4 ถึงสมการที่ 8 คำนวณหาอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัยต่างๆ เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสม

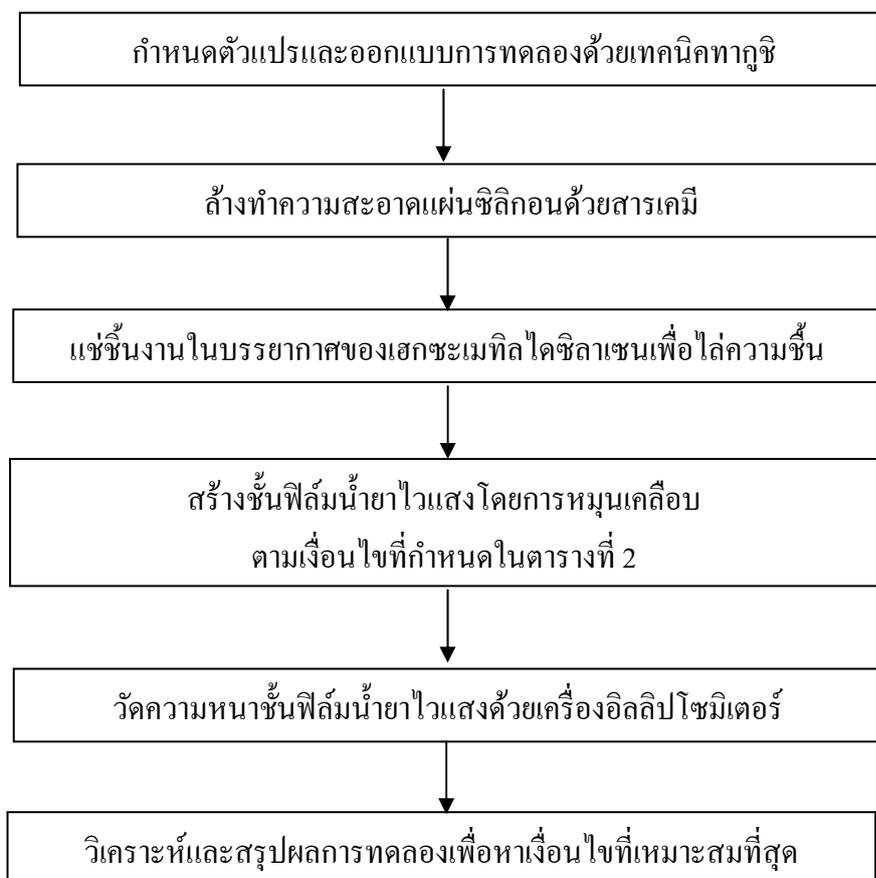
ที่สุดในการสร้างชั้นฟิล์มๆ และใช้สมการที่ 9 ในการพยากรณ์ค่าความหนาและความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์มๆ เมื่อใช้เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด โดยขั้นตอนการทดลองจะแสดงในภาพที่ 23

ตารางที่ 2 ปัจจัยและระดับในการเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงชนิดบวกเบอร์ AZ-P4620

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย			
	ระดับที่	ระดับที่	ระดับที่	ระดับที่
	1	2	3	4
A ความเร็วรอบต่ำในการหมุนเคลือบ (รอบต่อนาที)	250	500	750	1000
B อัตราแรงในการหมุนเคลือบ (รอบต่อนาที <sup>2</sup> )	200	300	400	500
C ความเร็วรอบสูงในการหมุนเคลือบ (รอบต่อนาที)	1500	2000	2500	3000
D เวลาในการหมุนเคลือบ (วินาที)	45	60	75	90
E อัตราการดูดไอเสีย (ปราศกาล)	0	100	200	300



ภาพที่ 22 ตำแหน่งการวัดความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงบนแผ่นซิลิกอนขนาด 3 นิ้ว

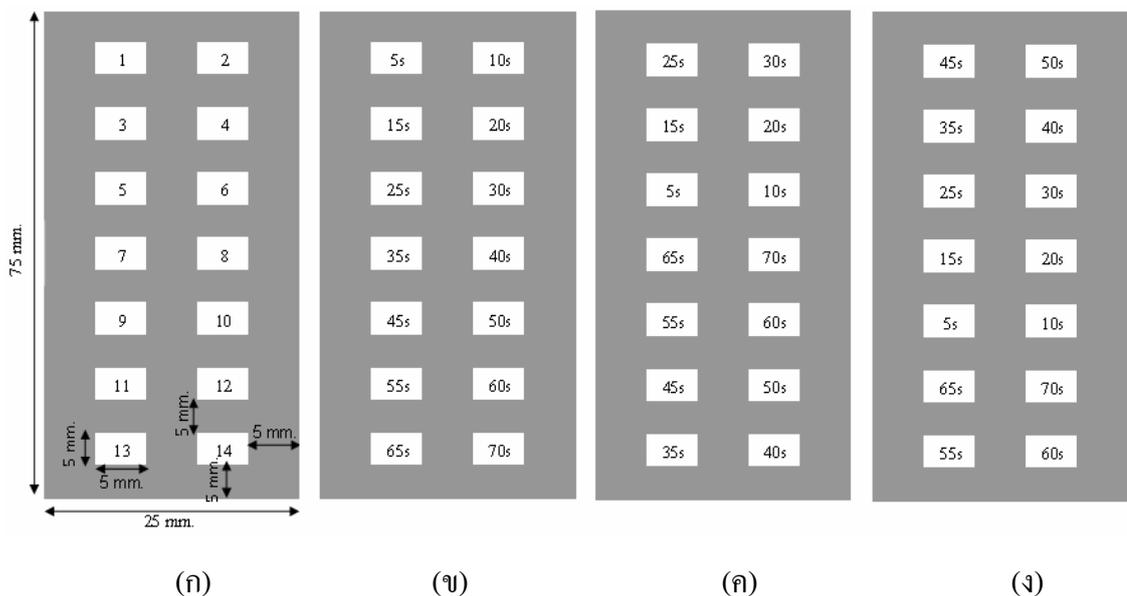


ภาพที่ 23 ขั้นตอนการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการสร้างฟิล์มน้ำยาไวแสงชนิด AZ-P4620

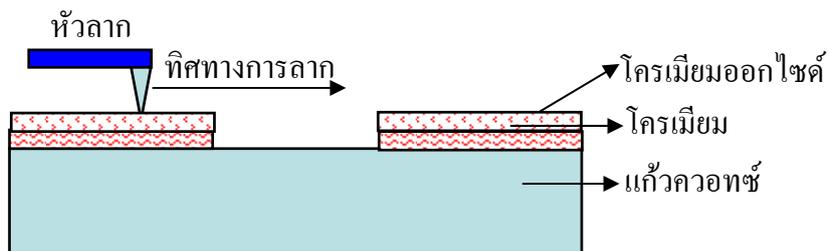
### การสร้างและศึกษาสมบัติของกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ

นำแผ่นกระจกต้นแบบชนิด 3006 ซึ่งมีขนาด 3x3 นิ้ว หนา 0.06 นิ้ว เคลือบด้วยชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงชนิดบวเบอร์ Shipley S1805 ด้วยเครื่องหมุนเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง Polos รุ่น MCD-200 ที่เงื่อนไขการจ่ายน้ำยาไวแสงเป็นเวลา 4.5 วินาที จากนั้นหมุนชิ้นงานที่ความเร็ว 800 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 วินาที แล้วใช้ความเร่ง 500 รอบต่อนาที<sup>2</sup> ไปที่ความเร็ว 2000 รอบต่อนาที หมุนต่อเนื่องเป็นเวลา 90 วินาที ที่อัตราการดูดไอเสีย 300 ปาสคาล แล้วอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 วินาที ได้ความหนาของชั้นฟิล์ม 5311 อังสตรอม (รติพร และคณะ, 2550) จากนั้นฉายลายทดสอบขนาด 0.5x0.5 มิลลิเมตร ลงบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงด้วยเครื่องสร้างต้นแบบลายวงจรร (Direct Write Laser, DWL) ยี่ห้อ Heidelberg Instruments รุ่น DWL200 ด้วยค่า

พลังงาน 120 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร แล้วล้างชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงด้วยน้ำยาล้างลายวงจร Shipley MF-26A เป็นเวลา 1 นาที อบชิ้นงานด้วยแผ่นอบ (Hotplate) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 วินาที จากนั้นกัดลายโครเมียมด้วยน้ำยากัดลายยี่ห้อ Microchrometechnology รุ่น CEP-200 โดยปรับเปลี่ยนเวลาในการกัดลายโครเมียมที่ 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65 และ 70 วินาที รวม 14 เงื่อนไข เมื่อกัดลายโครเมียมเสร็จแล้ว นำชิ้นงานไปลอกชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงออกด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับไฮดรอกเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วน 4 ต่อ 1 ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที แล้วล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำกระจกต้นแบบไปตัดออกเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นมีขนาดกว้าง 25 มิลลิเมตร ยาว 75 มิลลิเมตร (ภาพที่ 24) ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดของตัวจับชิ้นงานของเครื่องวัดการส่องผ่านของแสง จากนั้นนำชิ้นงานทั้งสามไปวัดค่าความหนาของชั้นฟิล์มโครเมียมด้วยเครื่องวัดแรงอะตอมที่เงื่อนไขการกัดลายโครเมียมละ 2 ตำแหน่ง คือ ด้านซ้ายและด้านขวา (ภาพที่ 25) และวัดความสามารถในการส่องผ่านของแสงด้วยเครื่องการวัดค่าการส่องผ่านของแสง โดยปรับเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นแสงตั้งแต่ 300 ถึง 700 นาโนเมตร แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างปัจจัยต่างๆ



ภาพที่ 24 กระจกต้นแบบสำหรับทดสอบการส่องผ่านของแสง (ก) ตำแหน่งลายทดสอบ (ข) ชิ้นงานที่ 1 (ค) ชิ้นงานที่ 2 (ง) ชิ้นงานที่ 3



ภาพที่ 25 ภาคตัดขวางตำแหน่งและทิศทางการวัดความหนาชั้นฟิล์มโครเมียมด้วยเครื่องวัดแรงอะตอม

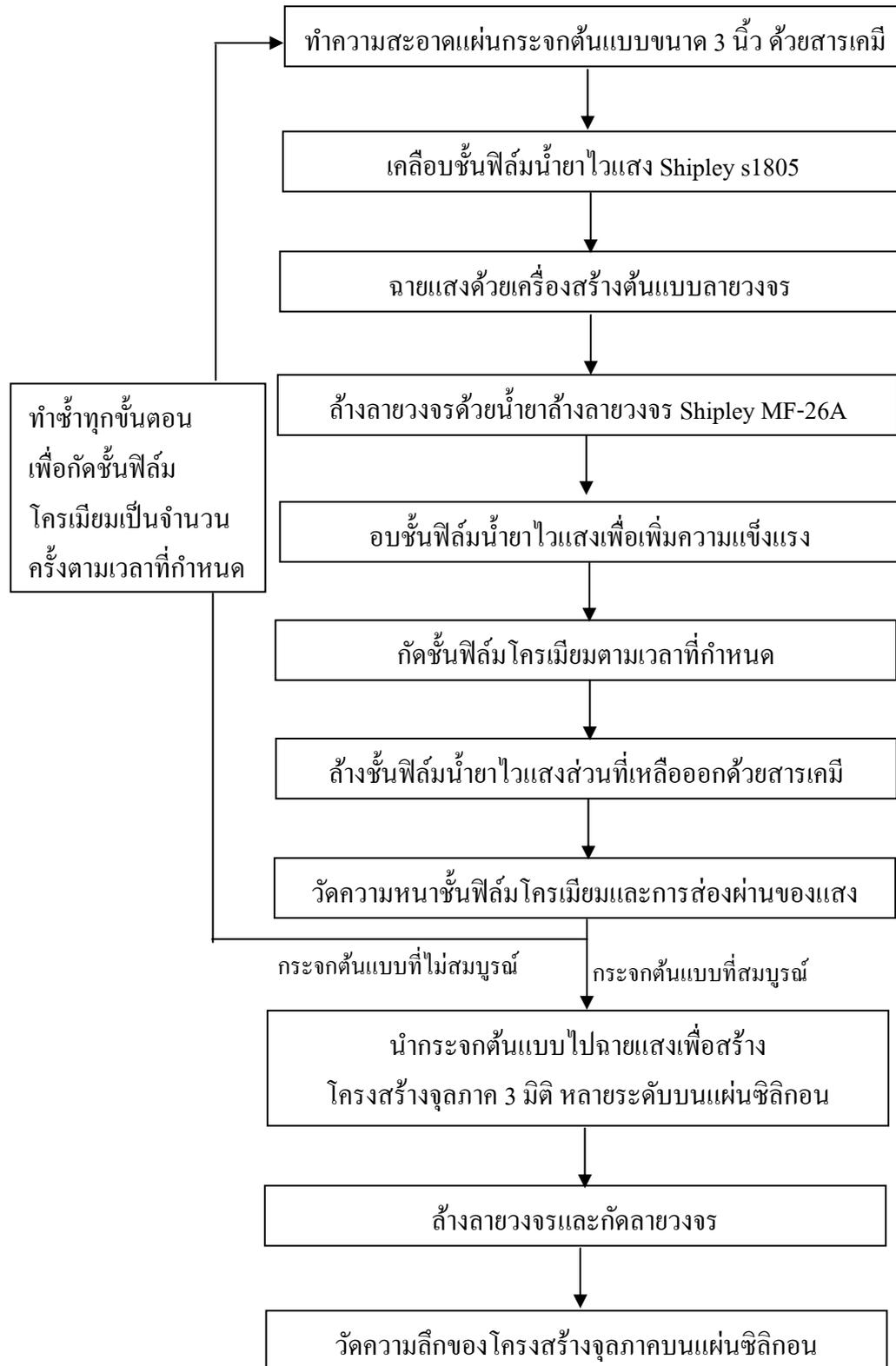
การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแสงที่ส่องผ่านความหนาชั้นฟิล์มโครเมียมที่แตกต่างกันบนกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ ต่อความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงบนผิวแผ่นซิลิกอน

นำกระจกต้นแบบที่ผ่านการกัดลายโครเมียมที่เวลาต่างๆ มาฉายแสงด้วยเครื่องถ่ายภาพลายวงจรชนิดคอนแทกมาสก์อะไลเนอร์ ยี่ห้อ Mikasa รุ่น MA-100 บนแผ่นซิลิกอนขนาด 3 นิ้ว ที่เคลือบด้วยน้ำยาไวแสงชนิดบวก Clariant AZ-P4620 ที่ความหนา 7.5 ไมครอน ด้วยเงื่อนไขที่ได้จากการทดลองการสร้างชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง โดยใช้ค่าพลังงานในการฉายแสงที่ 500 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 7 วินาที จากนั้นนำไปล้างลายด้วยน้ำยาล้างลาย Shipley MF-26A เป็นเวลา 2 นาที อบชิ้นงานด้วยแผ่นอบ (Hotplate) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 วินาที แล้วนำชิ้นงานไปวัดค่าความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงด้วยเครื่องวัดแรงอะตอม โดยวัดเงื่อนไขละ 2 ตำแหน่ง เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแสงที่ส่องผ่านความหนาชั้นฟิล์มโครเมียมที่แตกต่างกันต่อความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงบนแผ่นซิลิกอน

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงบนผิวแผ่นซิลิกอนต่อความลึกของลายที่ถ่ายลงบนผิวแผ่นซิลิกอนโดยกระบวนการกัดแบบรีแอกทีฟไอออนเอชซี

การศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกัดลายวงจรแบบแห้งนั้น ต้องหาความว่องไวในการกัด (Etch selectivity) ระหว่างน้ำยาไวแสงเบอร์ AZ-P4620 กับผิวซิลิกอน โดยการเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงชนิดบวกเบอร์ AZ-P4620 หนา 7.5 ไมครอน บนแผ่นซิลิกอนขนาด 3 นิ้ว สร้างช่องเปิดขนาดกว้าง 1 เซนติเมตร ยาว 1 เซนติเมตร กัดด้วยก๊าซคลอรีน ( $Cl_2$ ) ผสมกับก๊าซไฮโดรเจนโบรไมด์ (HBr) ด้วยเครื่องกัดลายวงจร ยี่ห้อ Applied Materials รุ่น RIE-P5000 แล้ววัด

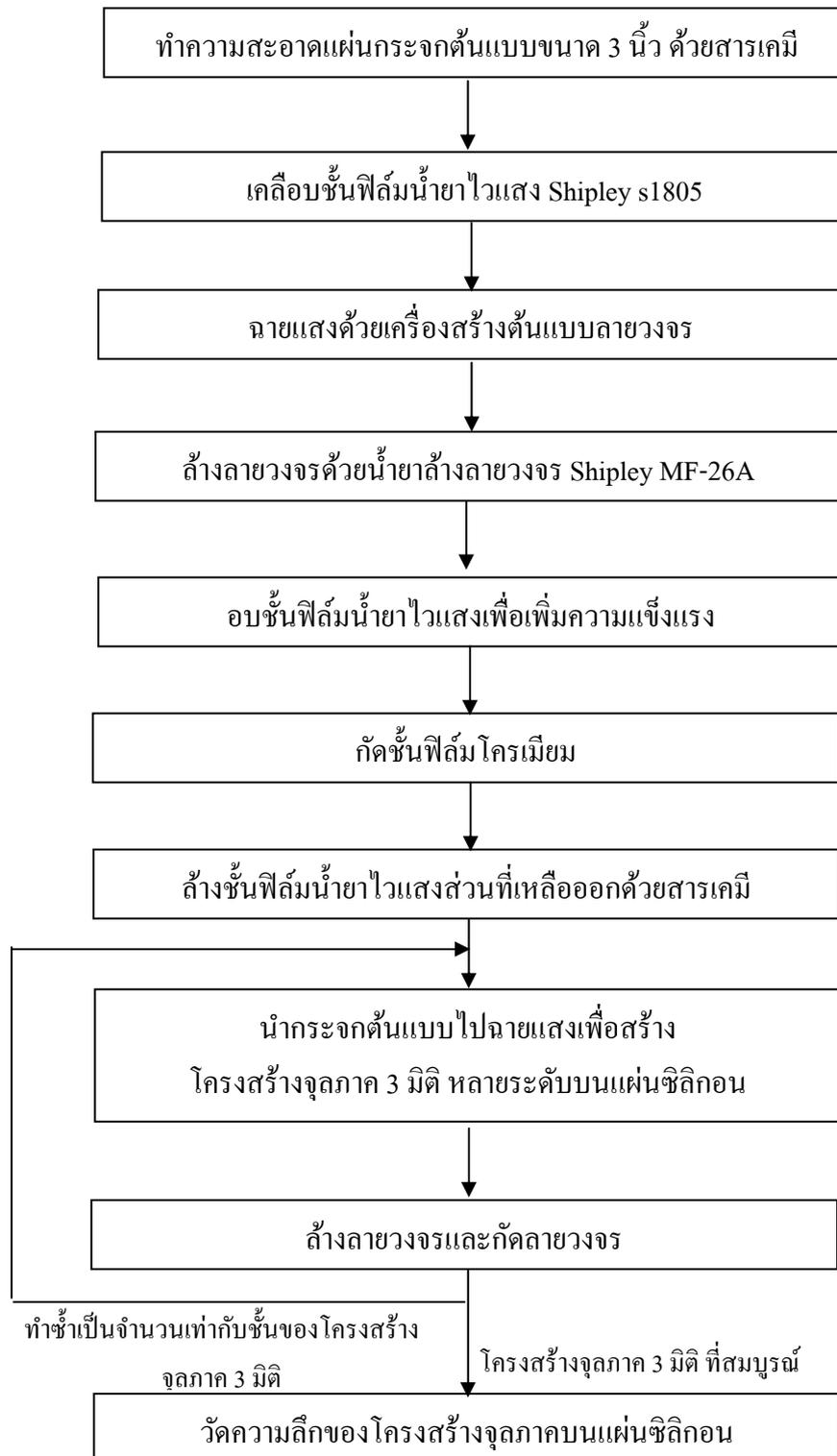
ค่าความลึกของพื้นผิวซีกก่อนที่ถูกกัดและความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่หายไปด้วย เครื่องอิลลิปโซมิเตอร์ ยี่ห้อ Rudolph รุ่น FE-III เพื่อคำนวณหาการเลือกกัดระหว่างน้ำยาไวแสงและผิวซีกก่อนได้ จากนั้นนำอัตราการกัดและการเลือกกัดมากำหนดเงื่อนไขสำหรับการกัดลายวงจรที่ผ่านการฉายแสงด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ ภายหลังการกัดลายวงจรชิ้นงานจะต้องนำไปจุ่มลงในสารละลายกรดกรดซัลฟูริกเข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์ผสมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วน 4 ต่อ 1 ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำ ปราศจากไอออน ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 10 นาที เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน แล้ววัดความลึกพร้อมสร้างภาพจำลอง 3 มิติ ของพื้นผิวซีกก่อนด้วยเครื่องวัดแรงอะตอม (ภาพที่ 26)



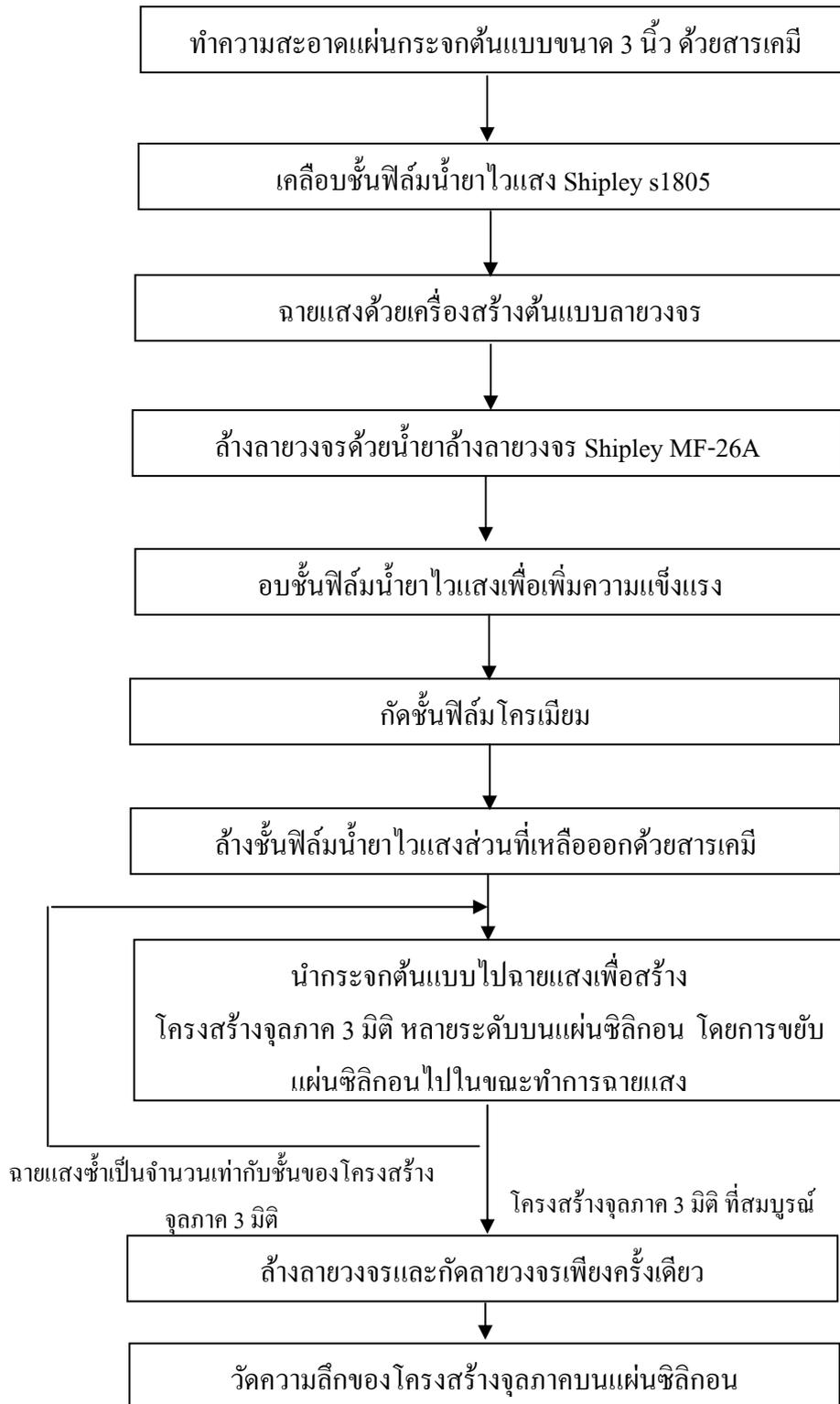
ภาพที่ 26 ขั้นตอนการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติของกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ

### การสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงใบนารี

ในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงใบนารีสำหรับงานวิจัยนี้ จะไม่สร้างชิ้นงานจากการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงใบนารีที่มีลายวงจรหนึ่งชั้นและการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงใบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น ทั้งนี้เนื่องจากเป็นกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรแบบปกติ (ภาพที่ 27) ซึ่งสามารถพิจารณาต้นทุนและข้อดีข้อเสียได้โดยไม่จำเป็นต้องมีชิ้นงาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จะสร้างชิ้นงานโดยการถ่ายแบบลายวงจรด้วยการปรับเปลี่ยค่าพลังงานแสงด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงใบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้นเท่านั้น โดยนำแผ่นซิลิกอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว ที่เคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงหนา 7.5 ไมครอน ด้วยเงื่อนไขที่ได้จากการทดลองการสร้างชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง มาฉายแสงด้วยเครื่องถ่ายแบบลายวงจร ยี่ห้อ Ultratech รุ่น Nanotech190 ที่มีความเที่ยงตรงของแท่นยึดชิ้นงาน (Stage accuracy) 70 นาโนเมตร และมีความละเอียดของระบบเลนส์ (Lens' resolution) ที่ 2 ไมครอน ปรับเปลี่ยค่าพลังงานในระหว่างการฉายแสงเริ่มตั้งแต่ 40 ถึง 800 mJ/cm<sup>2</sup> ไปครั้งละ 40 mJ/cm<sup>2</sup> และในแต่ละขั้นของการปรับเปลี่ยค่าพลังงาน จะเลื่อนแท่นยึดชิ้นงานไปครั้งละ 15 ไมครอน จากนั้นล้างลายวงจรด้วยน้ำยา Shipley MF-26A ที่เวลา 2 นาที และกัดลายไปในพื้นผิวซิลิกอนด้วยเครื่องกัดลายวงจร ยี่ห้อ Applied Materials รุ่น RIE-P5000 แล้ววัดค่าความลึกของพื้นผิวซิลิกอนที่ถูกกัดและความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่หายไปด้วยเครื่องอิลลิปโซมิเตอร์ยี่ห้อ Rudolph รุ่น FE-III โดยมีลำดับขั้นตอนการผลิตดังแสดงในภาพที่ 28



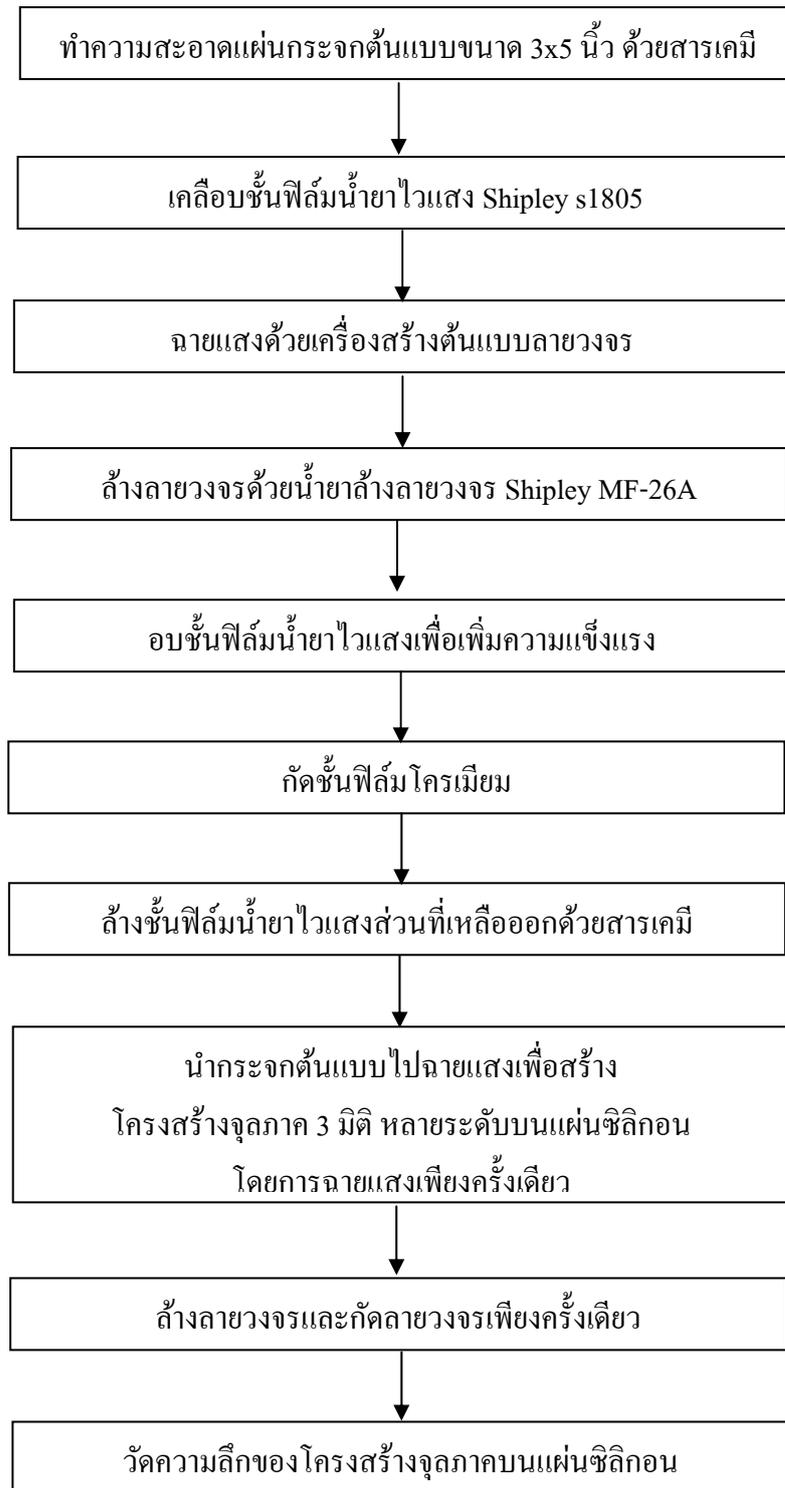
ภาพที่ 27 ขั้นตอนการทดลองเพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไปนารีที่มีลายวงจรหนึ่งชั้นและที่มีลายวงจรหลายชั้น



ภาพที่ 28 ขั้นตอนการทดลองเพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ โดยการถ่ายแบบลายวงจรด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสงด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสง โบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น

### การสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ด้วยกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบโครงสร้าง 3 มิติ รูปร่างแบบขั้นบันไดสำหรับกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกลโดยใช้โปรแกรมการออกแบบ Layout Editor (L-edit) version 8 โดยที่ขั้นบันไดแต่ละขั้นมีขนาดกว้าง 27 ไมครอน ยาว 250 ไมครอน แต่ละขั้นประกอบด้วยระยะห่างระหว่างช่องปิด (Pitches) คงที่คือ 3.0 ไมครอน และปรับเปลี่ยนขนาดของช่องปิด (Pixels) ตั้งแต่ 1.0, 1.2, 1.4, ..., 2.6 ไมครอน รวมทั้งหมด 9 เงื่อนไข จากนั้นนำขนาดของช่องปิดและระยะห่างระหว่างช่องปิดมาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ในการส่องผ่านของแสงด้วยค่าความเข้มแสงเท่ากับ  $700 \text{ mJ/cm}^2$  ตามสมการที่ 3 จะได้ความสัมพันธ์ของพลังงานแสงที่ส่องผ่านแผ่นกระจกต้นแบบและตกกระทบลงบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง โดยขนาดของช่องปิดและระยะห่างระหว่างช่องปิดนี้จะถูกนำมาสร้างบนแผ่นกระจกต้นแบบขนาด  $3 \times 5$  ตารางนิ้ว หนา 0.10 นิ้ว มาอบไล่ความชื้นด้วยเฮกซะเมทิล ไดซิลทาเซนเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก Shipley S1805 ให้ได้ความหนา 5000 อังสตรอม อบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงด้วยแผ่นอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นฉายแสงด้วยเครื่องสร้างต้นแบบลายวงจรถงบริษัท Heidelberg Instrument รุ่น DWL 200 โดยใช้แสงเลเซอร์ฮีเลียม-แคดเมียม (He-Cd laser) ที่ความยาวคลื่น 442 นาโนเมตร เพื่อสร้างลายวงจรถง และล้างลายวงจรถงด้วยน้ำยาล้างลาย Shipley MF-26A เป็นเวลา 3 นาที อบด้วยแผ่นอบอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นกัดลายโลหะโครเมียม ด้วยน้ำยา Microchrometechnology CEP-200 แล้วลอกชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงในสารละลายกรดกรดซัลฟูริกเข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์ผสมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วน 4 ต่อ 1 ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน เป็นเวลา 5 นาที แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน จากนั้นจะถ่ายลายวงจรถงโดยนำแผ่นซิลิกอนขนาด 3 นิ้ว มาเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวกเบอร์ Clariantz AZ-P4620 ด้วยเงื่อนไขที่ได้จากการออกแบบการทดลอง เพื่อให้ได้ความหนาชั้นฟิล์ม 7.5 ไมครอน ฉายแสงเพื่อสร้างลวดลายด้วยเครื่องถ่ายภาพลายวงจรถง Ultratech Stepper รุ่น Nanotech-190 ที่ความยาวคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ต 390-420 นาโนเมตร โดยใช้ค่าพลังงานในการฉายแสงที่  $700 \text{ mJ/cm}^2$  จากนั้นล้างลายวงจรถงด้วยน้ำยา Shipley MF-26A ที่เวลา 2 นาที และทำการกัดลายไปในพื้นผิวซิลิกอนด้วยเครื่องกัดลายวงจรถง ยี่ห้อ Applied Materials รุ่น RIE-P5000 แล้ววัดค่าความลึกของพื้นผิวซิลิกอนที่ถูกกัดและความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่หายไปด้วยเครื่องอิลลิปโซมิเตอร์ ยี่ห้อ Rudolph รุ่น FE-III (ภาพที่ 29)



ภาพที่ 29 ขั้นตอนการทดลองเพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ด้วยการถ่ายภาพแบบลายวงจรโดยอาศัยกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล

### การศึกษาต้นทุนและเวลาในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ด้วยวิธีต่างๆ

ในการคำนวณต้นทุนและเวลาของกระบวนการสร้างโครงสร้างจุลภาคสามมิตินี้ จะพิจารณาการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ชั้น (1L) ไปจนถึง 5 ชั้น (5L) ด้วยเทคนิคทั้ง 6 ชนิด คือ (1) การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงใบนารีที่มีลายวงจรหนึ่งชั้น (2) การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงใบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น (3) การถ่ายแบบลายวงจรด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสงด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงใบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น (4) การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล (5) การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ และ (6) การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสง โดยใช้ราคาเครื่องจักรสำหรับเทคนิคการถ่ายแบบด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตแบบสูงยิ่ง (Extreme Ultraviolet lithography process, EUVL) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ทันสมัยที่สุดในปัจจุบัน (Device sub working group, 2004) ทั้งนี้เพื่อให้การคิดต้นทุนครอบคลุมทุกการใช้งานในอุตสาหกรรม โดยอาศัยแนวคิดจากสมการที่ 14 เพื่อความเป็นสากลในการนำไปใช้งาน โดยจะคำนวณต้นทุนในหน่วยสกุลเงินดอลลาร์สหรัฐอเมริกา ซึ่งต้นทุนในส่วนของเจ้าของ (Cost of Ownership,  $CoO$ ) นั้น จะมีตัวขับเคลื่อนของต้นทุนคือ (1) ต้นทุนแผ่นกระจกต้นแบบ (Mask blank cost,  $C_1$ ) ซึ่งจะมีราคาเท่ากับ \$7,700 ต่อแผ่นกระจกต้นแบบ (Device sub working group, 2004) (2) ต้นทุนของการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบ (Mask patterning cost,  $C_2$ ) และ (3) ต้นทุนแผ่นซิลิกอน (Bare wafer cost,  $C_3$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ \$300 ต่อแผ่นซิลิกอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 นิ้ว และ (4) ต้นทุนในการถ่ายแบบลายวงจรลงบนแผ่นซิลิกอน (Wafer patterning cost,  $C_4$ ) ทั้งนี้ได้ตั้งสมมติฐานว่ากระจกต้นแบบหนึ่งแผ่นจะสามารถใช้เป็นต้นแบบเพื่อถ่ายลายวงจรบนแผ่นซิลิกอนได้ 10,000 แผ่น (EUVA, 2006) ดังแสดงในสมการที่ 15

ในส่วนของต้นทุนที่  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  และ  $C_4$  นั้น จะคำนวณได้จากผลรวมของต้นทุนวัตถุดิบทางตรง (Direct Materials Cost,  $Dm_{ik}$ ) ต้นทุนแรงงานทางตรง (Direct Labor Cost,  $DL_{ik}$ ) และต้นทุนในกระบวนการผลิต (Overhead Cost,  $OH_{ik}$ ) ดังแสดงในสมการที่ 16 โดยในส่วนของต้นทุนวัตถุดิบทางตรงซึ่งประกอบไปด้วยค่าสารเคมี ค่าแก๊สและค่าน้ำนั้น เนื่องจากไม่สามารถหาต้นทุนวัตถุดิบในทุกขั้นตอนการผลิตได้ จึงกำหนดให้ต้นทุนวัตถุดิบทางตรงมีค่าเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ของต้นทุนในกระบวนการผลิตทั้งหมด (Anonymous, n.d.) ดังแสดงในสมการที่ 17 สำหรับต้นทุนแรงงานนั้น จะใช้ค่าเฉลี่ยของอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำของประเทศญี่ปุ่นและ

สหรัฐอเมริกา ซึ่งเท่ากับ \$15.81 ต่อชั่วโมง มาเป็นค่าแรงมาตรฐาน ( $L$ ) (Hardford *et al.*, 1997) และคำนวณต้นทุนแรงงานได้โดยนำเอาค่าแรงมาตรฐานไปคูณกับผลรวมของจำนวนเครื่องจักร ( $N_j$ ) คูณกับเวลาในการผลิตชิ้นงานของแต่ละเครื่องจักร ( $Pt_j$ ) ในทุกขั้นตอนการผลิตที่  $j$  ดังแสดงในสมการที่ 18 ทั้งนี้จะตั้งสมมติฐานว่าพนักงานหนึ่งคนจะมีหน้าที่ควบคุมเครื่องจักร 1 เครื่อง โดยหลังจากใส่ชิ้นงานเข้าเครื่องจักรแล้วจะต้องดูแลเครื่องจักรตลอดเวลา

ในส่วน of ต้นทุนในกระบวนการผลิต ( $OH_j$ ) จะคำนวณโดยผลรวมของต้นทุนเครื่องจักรแต่ละชนิดในทุกขั้นตอนการผลิตที่  $j$  โดยต้นทุนเครื่องจักรแต่ละชนิดในแต่ละขั้นตอนจะคำนวณโดยนำเอาจำนวนเครื่องจักร ( $N_j$ ) ของแต่ละขั้นตอนการผลิตที่  $j$  คูณกับต้นทุนของเครื่องจักรแต่ละตัวในกระบวนการผลิต (Machine cost,  $Eo_j$ ) บวกด้วยค่าบำรุงรักษาเครื่องจักรแต่ละตัวรายปี (Maintenance cost,  $Em_j$ ) ซึ่งค่าบำรุงรักษาเครื่องจักรแต่ละตัวรายปี จะคิดเป็น 5 เปอร์เซ็นต์ของต้นทุนของเครื่องจักร คูณกับระยะเวลาการเสื่อมราคาเครื่องจักร (Depreciation time,  $D$ ) ซึ่งมีระยะเวลาเท่ากับ 5 ปี เมื่อได้ผลรวมของต้นทุนเครื่องจักรทุกชนิดในทุกขั้นตอนการผลิตที่  $j$  แล้ว จะต้องนำผลรวมนั้นมาหารด้วยจำนวนชิ้นงานที่ได้จากเครื่องจักรที่สามารถผลิตชิ้นงานได้น้อยที่สุด ทั้งนี้เพื่อกำจัดคอขวดของกระบวนการผลิต ดังแสดงในสมการที่ 19 โดยในการหาจำนวนชิ้นงานที่ได้จากเครื่องจักรที่สามารถผลิตชิ้นงานได้น้อยที่สุดนั้น จะใช้โปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซลโซลเวอร์ (Microsoft Excel's Solver) ซึ่งจะคำนวณได้โดยกำหนดให้จำนวนชิ้นงานที่ได้จากเครื่องจักรที่สามารถผลิตชิ้นงานได้น้อยที่สุดเป็นเซลล์เป้าหมาย (Target cell) และมีเซลล์ที่เปลี่ยนค่าได้ (Changing cell) คือ จำนวนเครื่องจักร ( $N_j$ ) ของแต่ละขั้นตอนการผลิตที่  $j$  โดยมีค่ากำหนด (Constraint) คือ จำนวนชิ้นงานที่ได้จากเครื่องจักรที่สามารถผลิตชิ้นงานได้น้อยที่สุดต้องมีค่าอย่างน้อย 20,000 ชิ้น โดยจำนวนชิ้นงานที่ได้จากเครื่องจักรแต่ละตัว จะคำนวณได้ด้วยผลคูณของจำนวนเครื่องจักรของแต่ละขั้นตอนการผลิตที่  $j$  ( $N_j$ ) อัตราการผลิตของเครื่องจักรแต่ละตัวในขั้นตอนการผลิตที่  $j$  (Production throughput,  $T_j$ ) เปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ของเครื่องจักรแต่ละตัวในขั้นตอนการผลิตที่  $j$  (Machine utilization,  $U_j$ ) จะกำหนดให้เท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์ ทุกเครื่องจักรในกระบวนการผลิต ค่าผลิตผลของเครื่องจักรแต่ละตัวในขั้นตอนการผลิตที่  $j$  (Machine yield,  $Y_j$ ) ระยะเวลาการเสื่อมของเครื่องจักร ( $D$ ) โดยกำหนดมีเวลาการผลิตเท่ากับ 331 วันต่อปี ทั้งนี้ได้หักวันหยุดราชการและการปิดซ่อมบำรุงประจำปี และในหนึ่งวันกำหนดให้มีการผลิต 21 ชั่วโมง โดยตัดเวลาในส่วนของพักกลางวันและช่วงการเปลี่ยนกะของพนักงานออกไป อีกทั้งยังต้องหักเวลาในการนำชิ้นงานเข้า-ออก เครื่องจักร (Loading time) โดยในส่วนของ การฉายแสงเพื่อสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบนั้น จะมี 2 วิธี คือ การเขียนด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron

beam writing, E-beam writing) ซึ่งเหมาะสำหรับลายวงจรที่มีขนาดเล็กกว่า 0.5 ไมครอน ใช้สำหรับเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล และการเขียนด้วยแสงเลเซอร์ (Laser writing) ซึ่งเหมาะสำหรับลายวงจรที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.5 ไมครอน สำหรับเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหนึ่งชั้น เทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น เทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสงด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น เทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ และเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสง ซึ่งโดยปกติราคาของเครื่องสร้างลายวงจรที่ใช้ลำอิเล็กตรอนจะมีราคาสูงกว่าเครื่องจักรที่ใช้ลำแสงเลเซอร์ถึง 10 เท่า และมีอัตราการผลิตที่ต่ำกว่าเครื่องจักรชนิดเลเซอร์ถึง 5 เท่า (Bengamin, 2005)

$$CoO = \left(\frac{C_1 + C_2}{10000}\right) + C_3 + C_4 \quad (15)$$

$$C_i = \sum_{k=1}^5 (Dm_{ik} + Dl_{ik} + OH_{ik}) \quad (16)$$

$$Dm_{ik} = 0.2 * OH_{ik} \quad (17)$$

$$Dl_{ik} = L * \left(\sum_{j=1}^n N_j * Pt_j\right) \quad (18)$$

$$OH_{ik} = \left[ \frac{\sum_j^n [N_j * (Eo_j + (D * Em_j))]}{(\min_j (N_j * T_j * U_j * Y_j * D * 330 * 21))} \right]_{ik} \quad (19)$$

เมื่อ  $CoO$  คือ ต้นทุนรวมในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ต่อหนึ่งแผ่นซิลิกอน (\$/แผ่นซิลิกอน)

$C_1$  คือ ต้นทุนของแผ่นกระจกต้นแบบเปล่าหนึ่งแผ่น (\$/แผ่นกระจกต้นแบบ)

- $C_2$  คือ ต้นทุนการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบ  
(\$/แผ่นกระจกต้นแบบ)
- $C_3$  คือ ต้นทุนแผ่นซิลิกอนเปล่า (\$/แผ่นซิลิกอน)
- $C_4$  คือ ต้นทุนการสร้างลายวงจรบนแผ่นซิลิกอน (\$/แผ่นซิลิกอน)
- $C_i$  คือ ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิตชนิดที่  $i$  เมื่อ  $i = 1, 2, 3, 4$  (\$/แผ่น)
- $Dm_{ik}$  คือ ต้นทุนวัตถุดิบทางตรงของกระบวนการผลิตที่  $i$  ในการสร้าง  
โครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ชั้นที่  $k$  เมื่อ  $i = 1, 2, 3, 4$  และ  $k = 1, 2, 3, 4, 5$  (\$/แผ่น)
- $DI_{ik}$  คือ ต้นทุนแรงงานทางตรงของกระบวนการผลิตที่  $i$  ในการสร้าง  
โครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ชั้นที่  $k$  เมื่อ  $i = 1, 2, 3, 4$  และ  $k = 1, 2, 3, 4, 5$  (\$/แผ่น)
- $OH_{ik}$  คือ ต้นทุนกระบวนการของกระบวนการผลิตที่  $i$  ในการสร้าง  
โครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ชั้นที่  $k$  เมื่อ  $i = 1, 2, 3, 4$  และ  $k = 1, 2, 3, 4, 5$  (\$/แผ่น)
- $i$  คือ ชนิดของกระบวนการผลิต เมื่อ  $i = 1, 2, 3, 4$
- $j$  คือ ขั้นตอนการผลิต เมื่อ  $j = 1, 2, \dots, n$
- $k$  คือ จำนวนชั้นของโครงสร้างจุลภาคสามมิติ เมื่อ  $k = 1, 2, 3, 4, 5$  (ชั้น)
- $L$  ค่าแรงงานมาตรฐาน (\$/ชั่วโมง)
- $N_j$  คือ จำนวนเครื่องจักรในขั้นตอนการผลิตที่  $j$  เมื่อ  $j = 1, 2, \dots, n$  (เครื่องจักร)
- $Pt_j$  คือ เวลาในการผลิตชิ้นงานของแต่ละเครื่องจักรในขั้นตอนการผลิตที่  $j$  เมื่อ  
 $j = 1, 2, \dots, n$  (ชั่วโมง/แผ่น/เครื่องจักร)
- $Eo_j$  คือ ต้นทุนของเครื่องจักรแต่ละตัวในขั้นตอนการผลิตที่  $j$  เมื่อ  
 $j = 1, 2, \dots, n$  (\$/เครื่องจักร)
- $Em_j$  คือ ค่าบำรุงรักษาเครื่องจักรแต่ละตัวรายปีในขั้นตอนการผลิตที่  $j$  เมื่อ  
 $j = 1, 2, \dots, n$  (\$/ปี/เครื่องจักร)
- $T_j$  คือ อัตราการผลิตของเครื่องจักรแต่ละตัวในขั้นตอนการผลิตที่  $j$  เมื่อ  
 $j = 1, 2, \dots, n$  (แผ่น/ชั่วโมง/เครื่องจักร)
- $U_j$  คือ เปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ของเครื่องจักรแต่ละตัวในขั้นตอนการผลิตที่  
 $j$  เมื่อ  $j = 1, 2, \dots, n$  (เปอร์เซ็นต์)
- $Y_j$  คือ ค่าผลิตผลของเครื่องจักรแต่ละตัวในขั้นตอนการผลิตที่  $j$  เมื่อ  
 $j = 1, 2, \dots, n$  (เปอร์เซ็นต์)
- $D$  คือ ระยะเวลาการใช้งานของเครื่องจักร (ปี)

ในส่วนของการคำนวณเวลาในการผลิตนั้น เนื่องจากงานวิจัยนี้กำหนดให้ซื้อแผ่นกระจกต้นแบบเปล่าและแผ่นซิลิกอนเปล่า จึงไม่ต้องคำนวณเวลาในการผลิตใน 2 ชนิด กระบวนการผลิตนี้ ดังนั้นการคำนวณเวลาในการผลิตจึงประกอบด้วยกระบวนการผลิต 2 ชนิด คือ (1) เวลาในการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบ ( $t_1$ ) และ (2) เวลาในการสร้างลายวงจรบนแผ่นซิลิกอน ( $t_2$ ) ดังแสดงในสมการที่ 20 ซึ่งการคำนวณเวลาในการผลิตจะเป็นผลรวมทั้งหมดของเวลาในการผลิตชิ้นงานของเครื่องจักรทุกตัวในขั้นตอนการผลิตที่  $j$  ของแต่ละจำนวนชั้นของโครงสร้างจุลภาคสามมิติที่  $k$  บนกระบวนการผลิตชนิดที่  $i$  ดังแสดงในสมการที่ 21 โดยเวลาในการผลิตชิ้นงานของเครื่องจักรทุกตัวในขั้นตอนการผลิตที่  $j$  จะคำนวณได้จากผลรวมของผลคูณของจำนวนเครื่องจักรในขั้นตอนการผลิตที่  $j$  กับเวลาการผลิตของเครื่องจักรแต่ละตัว ( $t_j$ ) ในขั้นตอนการผลิตที่  $j$  ดังแสดงในสมการที่ 22 โดยเวลาการผลิตของเครื่องจักรแต่ละตัว ( $t_j$ ) จะเป็นส่วนกลับของอัตราการผลิตของเครื่องจักรแต่ละตัว ( $T_j$ ) ดังแสดงในสมการที่ 23

$$Tt = \frac{t_1}{10000} + t_2 \quad (20)$$

$$t_i = \sum_{k=1}^5 (Pt)_{ik} \quad (21)$$

$$Pt = \sum_j^n (t_j) \quad (22)$$

$$t_j = \frac{1}{T_j * N_j} \quad (23)$$

เมื่อ  $Tt$  คือ เวลารวมในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ (ชั่วโมง/แผ่นซิลิกอน)  
 $t_1$  คือ เวลาในการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบ  
 (ชั่วโมง/แผ่นกระจกต้นแบบ)  
 $t_2$  คือ เวลาในการสร้างลายวงจรบนแผ่นซิลิกอน (ชั่วโมง/แผ่นซิลิกอน)  
 $t_i$  คือ เวลาในการสร้างลายวงจรบนกระบวนการผลิตชนิดที่  $i$  เมื่อ  $i = 1, 2$   
 $Pt$  คือ เวลารวมในการผลิตชิ้นงานสำหรับเครื่องจักรทุกตัวในทุกขั้นตอนการผลิต  
 (ชั่วโมง/แผ่น)  
 $N_j$  คือ จำนวนเครื่องจักรในขั้นตอนการผลิตที่  $j$  เมื่อ  $j = 1, 2, \dots, n$  (เครื่องจักร)

$t_j$  คือ เวลาการผลิตแผ่นชิ้นงานสำหรับเครื่องจักรทุกตัวในขั้นตอนการผลิตที่  $j$  เมื่อ  $j = 1, 2, \dots, n$  (ชั่วโมง/แผ่น)

$T_j$  คือ อัตราการผลิตของเครื่องจักรแต่ละตัวในขั้นตอนการผลิตที่  $j$  เมื่อ  $j = 1, 2, \dots, n$  (แผ่น/ชั่วโมง/เครื่องจักร)

$i$  คือ ชนิดของกระบวนการผลิต เมื่อ  $i = 1, 2$

$j$  คือ ขั้นตอนการผลิต เมื่อ  $j = 1, 2, \dots, n$

$k$  คือ จำนวนชั้นของโครงสร้างจุลภาคสามมิติ เมื่อ  $k = 1, 2, 3, 4, 5$  (ชั้น)

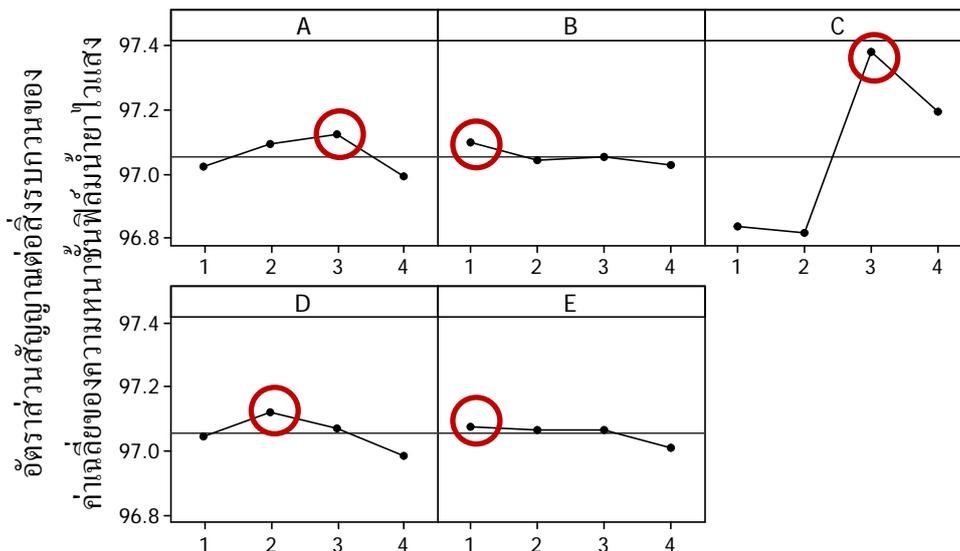
### การวิเคราะห์การตลาดด้วยเทคนิค SWOT

ในการวิเคราะห์ข้อดีข้อเสียของเทคนิคต่างๆในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ จะอาศัยข้อมูลทางด้านเทคนิคในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ชั้น (1L) ไปจนถึง 5 ชั้น (5L) ด้วยเทคนิคทั้ง 6 ชนิด คือ (1) การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหนึ่งชั้น (2) การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น (3) การถ่ายแบบลายวงจรด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสงด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น (4) การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล (5) การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ และ (6) การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสง โดยพิจารณาข้อมูลทางด้านฟิสิกส์ซึ่งสะท้อนถึงความยากง่ายและความเป็นไปได้ในการผลิตเพื่อใช้งานจริง นอกจากนี้จะอาศัยข้อมูลทางด้านต้นทุนและเวลาในการผลิตลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบและแผ่นซิลิกอนว่าเทคนิคไหนมีความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์มากที่สุด ทั้งนี้ต้องใช้เทคนิค SWOT เป็นเครื่องมือในการพิจารณา

## ผลและวิจารณ์

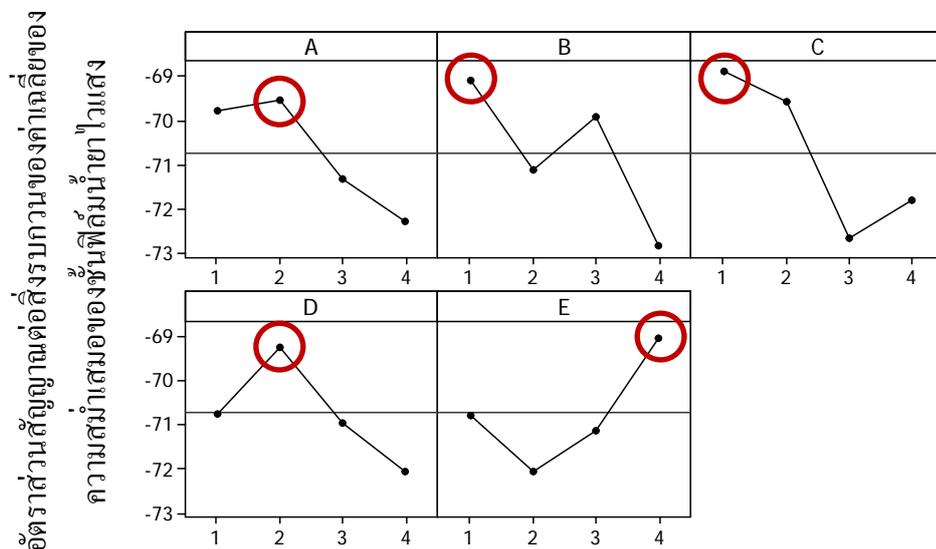
### คุณภาพของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงชนิดบวกเบอร์ AZ-P4620 บนแผ่นซิลิกอนขนาด 3 นิ้ว

จากข้อมูลความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่วัดได้ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ ก2 และ ตารางภาคผนวกที่ ก3 เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนแบบใหญ่กว่าดีกว่า สำหรับค่าความหนาของชั้นฟิล์ม และอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนแบบเล็กกว่าดีกว่าเพื่อวิเคราะห์ความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง โดยพิจารณาระดับที่เหมาะสมของแต่ละตัวแปร เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงจากระดับของตัวแปรที่ให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนสูงที่สุด ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ ก4 พบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงให้ได้ความหนาที่ต้องการคือ เงื่อนไข A3 B1 C3 D2 E1 กล่าวคือ จุ่มน้ำยาไวแสงเป็นเวลา 25 วินาที ที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที จากนั้นหมุนชิ้นงานที่ความเร็ว 750 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 วินาที แล้วใช้ความเร่ง 200 รอบต่อนาที<sup>2</sup> ไปที่ความเร็ว 2500 รอบต่อนาที หมุนต่อเนื่องเป็นเวลา 60 วินาที ที่อัตราการดูดไอเสีย 0 ปาสคาล แล้วอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 วินาที (ภาพที่ 30)



ภาพที่ 30 แผนภูมิผลกระทบหลักของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง

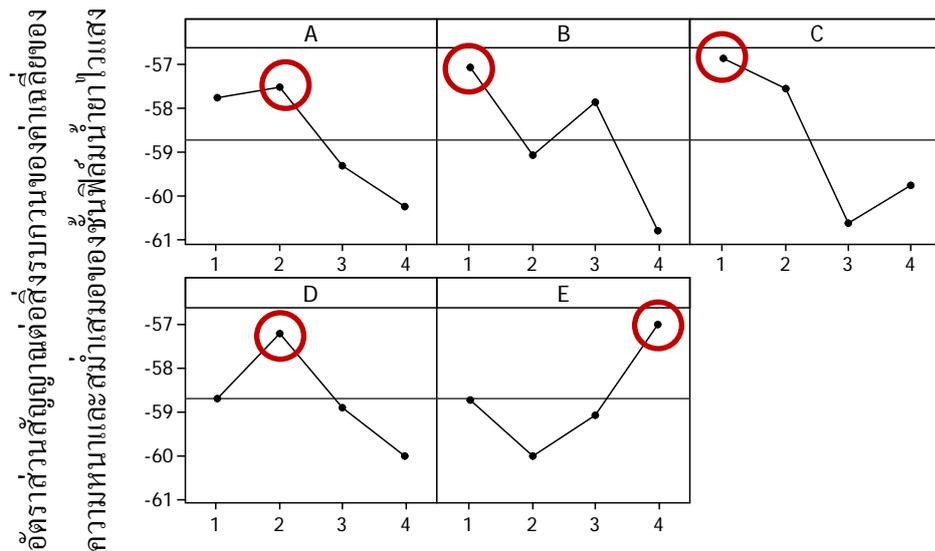
สำหรับการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงจากระดับของตัวแปรที่ให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนสูงสุด ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ ก5 คือ เงื่อนไข A2 B1 C1 D2 E4 กล่าวคือ จ่ายน้ำยาไวแสงเป็นเวลา 25 วินาที ที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที จากนั้นหมุนชิ้นงานที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 วินาที แล้วใช้ความเร่ง 200 รอบต่อนาที<sup>2</sup> ไปที่ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที หมุนต่อเนื่องเป็นเวลา 60 วินาที ที่อัตราการดูดไอเสีย 300 ปาสคาล แล้วอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 วินาที (ภาพที่ 31)



ภาพที่ 31 แผนภูมิผลกระทบหลักของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง

อย่างไรก็ตาม เงื่อนไขที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนสำหรับความหนาและความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์มนั้นไม่ได้เป็นเงื่อนไขเดียวกัน จึงจะนำไปผลิตจริงไม่ได้ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนสำหรับทั้งสองปัจจัยพร้อมกัน โดยจากการคำนวณด้วยสมการที่ 6 สมการที่ 7 และสมการที่ 8 จะได้ผลรวมของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของความหนาและความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์ม (ตารางภาคผนวกที่ ก6) ซึ่งเมื่อเลือกอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนที่สูงที่สุดของแต่ละปัจจัย จะได้เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง คือ A2 B1 C1 D2 E4 คือ จ่ายน้ำยาไวแสงเป็นเวลา 25 วินาที ที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที จากนั้นหมุนชิ้นงานที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 วินาที แล้วใช้

ความเร่ง 200 รอบต่อนาที ไปที่ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที หมุนต่อเนื่องเป็นเวลา 60 วินาที ที่ อัตราการดูดไอเสีย 300 ปาสคาล แล้วอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 วินาที (ภาพที่ 32)



ภาพที่ 32 แผนภูมิผลกระทบหลักของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อ ความหนาและความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง

เมื่อได้เงื่อนไขที่เหมาะสมแล้ว จะต้องพยากรณ์ค่าความหนาและความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์มที่ดีที่สุดได้โดยแทนค่าต่างๆ ลงไปในสมการที่ 9 ซึ่งจะสามารถคำนวณค่าคาดคะเนของความหนาและความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง ที่ได้จากเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดจากการวิเคราะห์ผลรวมของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน ได้ด้วยสมการที่ 21 และสมการที่ 22 ตามลำดับ

$$T_{opt} = \bar{x} + (\overline{x_{A2}} - \bar{x}) + (\overline{x_{B1}} - \bar{x}) + (\overline{x_{C1}} - \bar{x}) + (\overline{x_{D2}} - \bar{x}) + (\overline{x_{E4}} - \bar{x}) \quad (21)$$

$$U_{opt} = \sigma + (\overline{s_{A2}} - \sigma) + (\overline{s_{B1}} - \sigma) + (\overline{s_{C1}} - \sigma) + (\overline{s_{D2}} - \sigma) + (\overline{s_{E4}} - \sigma) \quad (22)$$

เมื่อ  $T_{opt}$  คือ ค่าคาดคะเนของความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง  
 $\bar{x}$  คือ ค่าเฉลี่ยของค่าเฉลี่ยความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงทั้ง 16 การทดลอง

$\overline{x_{A2}}$  คือ ค่าเฉลี่ยของความหนาชั้นฟิล์มๆ จากเงื่อนไขระดับที่ 2 ของปัจจัย A

$\overline{x_{B1}}$  คือ ค่าเฉลี่ยของความหนาชั้นฟิล์มๆ จากเงื่อนไขระดับที่ 1 ของปัจจัย B

$\overline{x_{C1}}$  คือ ค่าเฉลี่ยของความหนาชั้นฟิล์มๆ จากเงื่อนไขระดับที่ 1 ของปัจจัย C

$\overline{x_{D2}}$  คือ ค่าเฉลี่ยของความหนาชั้นฟิล์มๆ จากเงื่อนไขระดับที่ 2 ของปัจจัย D

$\overline{x_{E4}}$  คือ ค่าเฉลี่ยของความหนาชั้นฟิล์มๆ จากเงื่อนไขระดับที่ 4 ของปัจจัย E

$U_{opt}$  คือ ค่าคาดคะเนของความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง

$\sigma$  คือ ค่าเฉลี่ยของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงทั้ง

#### 16 ชุดการทดลอง

$\overline{s_{A2}}$  คือ ค่าเฉลี่ยของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนาชั้นฟิล์มๆ จากเงื่อนไขระดับที่ 2 ของปัจจัย A

$\overline{s_{B1}}$  คือ ค่าเฉลี่ยของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนาชั้นฟิล์มๆ จากเงื่อนไขระดับที่ 1 ของปัจจัย B

$\overline{s_{C1}}$  คือ ค่าเฉลี่ยของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนาชั้นฟิล์มๆ จากเงื่อนไขระดับที่ 1 ของปัจจัย C

$\overline{s_{D2}}$  คือ ค่าเฉลี่ยของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนาชั้นฟิล์มๆ จากเงื่อนไขระดับที่ 2 ของปัจจัย D

$\overline{s_{E4}}$  คือ ค่าเฉลี่ยของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนาชั้นฟิล์มๆ จากเงื่อนไขระดับที่ 4 ของปัจจัย E

โดยในที่นี้จะขอยกตัวอย่างการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงจากเงื่อนไขระดับที่ 2 ของปัจจัย A ( $\overline{x_{A2}}$ ) และค่าเฉลี่ยของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของชั้นฟิล์มๆ จากเงื่อนไขระดับที่ 2 ของปัจจัย A ( $\overline{s_{A2}}$ ) กล่าวคือ สำหรับ  $\overline{x_{A2}}$  นั้น จะเป็นค่าเฉลี่ยของความหนาจากการทดลองที่ปัจจัย A นั้น มีระดับที่ 2 คือ การทดลองที่ 5, 6, 7 และ 8 ซึ่งจะมีค่าความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงของแต่ละการทดลองเท่ากับ 69,675, 69,618, 72,737 และ 74,805 อังสตรอม ตามลำดับ โดยจะหาค่า  $\overline{x_{A2}}$  ได้เท่ากับ 71596.25 อังสตรอม ในส่วนของ  $\overline{s_{A2}}$  นั้น จะเป็นค่าเฉลี่ยของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลองที่ปัจจัย A นั้น มีระดับที่ 2 คือ การทดลองที่ 5, 6, 7 และ 8 เช่นเดียวกัน ซึ่งจะมีค่าความส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงของแต่ละการทดลองเท่ากับ 1,825.81, 3,082.36, 3,577.90 และ 4,021.73 อังสตรอม ตามลำดับ โดยจะหาค่า  $\overline{s_{A2}}$  ได้เท่ากับ 3,126.95 อังสตรอม ซึ่งเมื่อใช้ขั้นตอนการคำนวณดังกล่าวในการหาค่า  $\overline{x_{B1}}, \overline{x_{C1}}, \overline{x_{D2}}, \overline{x_{E4}}, \overline{s_{B1}}, \overline{s_{C1}}, \overline{s_{D2}}$  และ  $\overline{s_{E4}}$  ซึ่งจะสามารถคำนวณค่าได้ค่าความหนาและ

ความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์มฯ สำหรับเงื่อนไขที่เหมาะสมในการหมุนเคลือบ คือ  $70274 \pm 908.233$  อังสตรอม ซึ่งเป็นความหนาของชั้นฟิล์มที่อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ในกระบวนการผลิตคือ  $\pm 2$  เปอร์เซ็นต์ จากความหนาที่กำหนดไว้ ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ 67 จึงกล่าวได้ว่าการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคทางทฤษฎีสามารถศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงได้ ซึ่งช่วยประหยัดทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลองได้

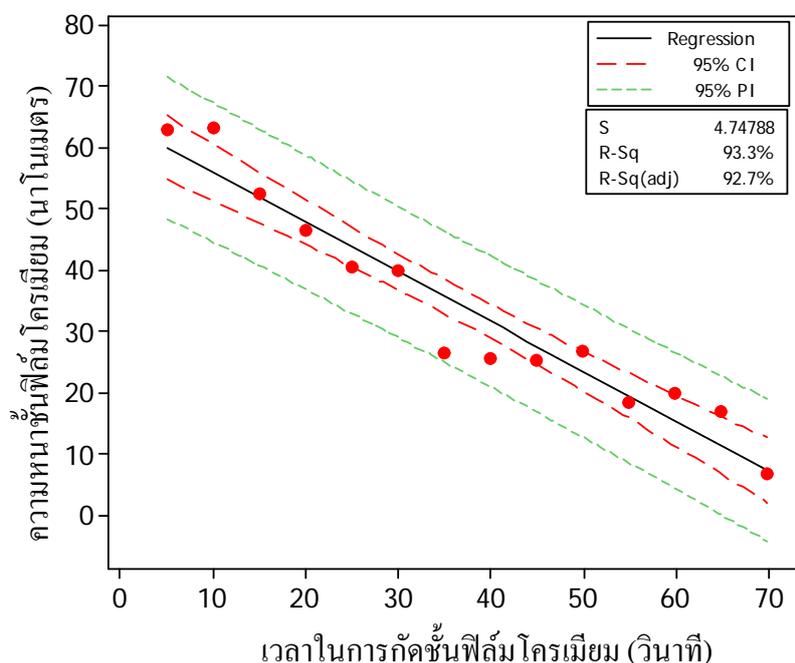
### อัตราการกัดชั้นฟิล์มโครเมียมของน้ำยาคัดลายโครเมียม

จากการวัดค่าความหนาของชั้นฟิล์มโครเมียมด้วยเครื่องวัดแรงอะตอม ที่เงื่อนไขการกัดลายโครเมียมละ 2 ตำแหน่ง คือ ด้านซ้ายและด้านขวา (ภาพที่ 25) ได้ผลของความลึกจากผิวหน้าชิ้นงานไปยังความหนาของชั้นฟิล์มโครเมียมที่เหลืออยู่ หรือเป็นความหนาของชั้นฟิล์มโครเมียมที่ถูกกัดออกไปของชิ้นงานแผ่นที่ 1, 2 และ 3 ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ ข1 ตารางภาคผนวกที่ ข2 และตารางภาคผนวกที่ ข3 ตามลำดับ จากนั้นนำความหนาเฉลี่ยของชั้นฟิล์มโครเมียมที่เหลืออยู่ของชิ้นงานทั้งสามกับเวลาในการกัดมาคำนวณหาสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (ภาพที่ 33) ซึ่งพบว่าเมื่อเวลาในการกัดเพิ่มมากขึ้น ชั้นฟิล์มโครเมียมจะมีความหนาลดน้อยลง ดังแสดงในสมการที่ 28 และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้ว (Adjusted R<sup>2</sup>) พบว่าสมการที่ 28 ที่คำนวณมาได้ จะสามารถอธิบายความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ถึง 93.2 เปอร์เซ็นต์

$$x = 64 - 0.8105t \quad (28)$$

เมื่อ  $x$  คือ ความหนาของชั้นฟิล์มโครเมียม (นาโนเมตร)

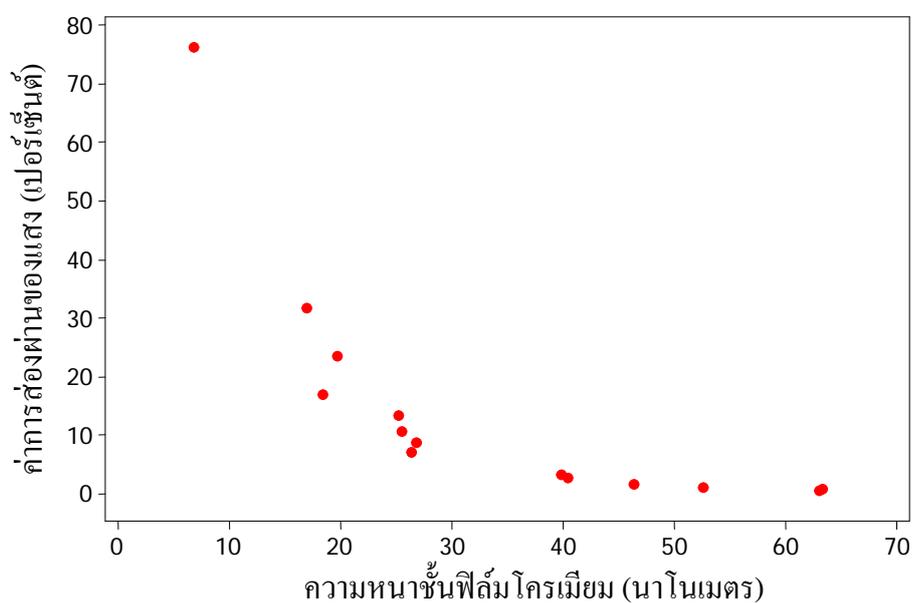
$t$  คือ เวลาในการกัดชั้นฟิล์มโครเมียม (วินาที)



ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการกักชั้นฟิล์มโครเมียมกับความหนาชั้นฟิล์มโครเมียม

#### ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการส่องผ่านของแสงต่อความหนาของชั้นฟิล์มโครเมียม

จากข้อมูลที่ได้จากการวัดการส่องผ่านของแสงผ่านชั้นฟิล์มโครเมียมที่ความหนาต่างๆด้วยเครื่อง LTS ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ ข4 เมื่อวาดกราฟจากข้อมูลดังกล่าว พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการส่องผ่านของแสงกับความหนาชั้นฟิล์มโครเมียมไม่เป็นเส้นตรง กล่าวคือ เมื่อชั้นฟิล์มโครเมียมมีความหนามากกว่า 40 นาโนเมตร แสงจะส่องผ่านได้น้อยลงและมีค่าเกือบคงที่แม้ว่าชั้นฟิล์มจะมีความหนาเปลี่ยนแปลงไปก็ตาม แต่เมื่อความหนาของชั้นฟิล์มมีค่าน้อยกว่า 40 นาโนเมตร แสงจะผ่านชั้นฟิล์มได้ดีและแปรผันไปตามความหนาชั้นฟิล์มโครเมียม นอกจากนี้ความสามารถในการส่องผ่านของแสงจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความหนาของชั้นฟิล์มอยู่ในช่วง 0 ถึง 30 นาโนเมตร โดยมีความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 29 จึงกล่าวได้ว่าการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับนั้น สามารถควบคุมการส่องผ่านของแสงไปยังชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงด้านล่างได้เช่นเดียวกับกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล (ภาพที่ 34)



**ภาพที่ 34** ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นฟิล์มโครเมียมต่อการส่องผ่านของแสงที่ได้จากการทดลอง

อย่างไรก็ตามการนำสมการที่ 29 ซึ่งเป็นสมการเอ็กซ์โปเนนเชียลไปใช้นั้นไม่มีความสะดวก จึงต้องปรับเปลี่ยนรูปแบบของสมการให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ด้วยการใส่ลอการิทึมใส่เข้าไปในข้อมูลดิบของความหนาชั้นฟิล์มและความสามารถในการส่องผ่านของแสง ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ ข5 จากนั้นวาดกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงในรูปของลอการิทึมระหว่างการส่องผ่านของแสงต่อความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง พบว่าเมื่อลอการิทึมของความหนาของชั้นฟิล์มโครเมียมเพิ่มขึ้น ลอการิทึมการส่องผ่านของแสงจะลดลง (ภาพที่ 35) และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้ว (Adjusted  $R^2$ ) ในสมการที่ 29 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ถึง 92.7 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องเปลี่ยนสมการที่ 29 ให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงด้วยรูปแบบความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 30 ซึ่งเมื่อใส่ค่าลอการิทึมฐานสิบเข้าไปทั้งสองข้างของสมการที่ 30 จะได้สมการในรูปลอการิทึมดังแสดงในสมการที่ 31 และเมื่อเปรียบเทียบตัวแปรต่างๆในสมการที่ 29 กับตัวแปรในสมการที่ 31 พบว่าตัวแปร  $m$  และ  $n$  ในสมการที่ 31 จะเท่ากับ  $10^{4.478}$  และ  $-2.561$  ตามลำดับ และเมื่อแทนค่า  $m$  และ  $n$  ที่คำนวณมาได้เข้าไปในสมการที่ 30 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการส่องผ่านของแสงกับความหนาของชั้นฟิล์มดังแสดงในสมการที่ 32 และเมื่อนำค่าความหนาของชั้นฟิล์มในสมการที่ 28 มาแทนค่าลงในสมการที่ 32 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการส่องผ่านของแสงกับเวลา

ในการกักชั้นฟิล์มโครเมียม ดังแสดงในสมการที่ 33 ซึ่งเป็นสมการที่คำนวณได้จากกฎของกำลัง (Power law) จากนั้นทำการปรับเปลี่ยนค่าเวลาในการกักชั้นฟิล์มโครเมียมแล้วแทนค่าลงไป ในสมการที่ 32 เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงตามสมการกฎกำลัง ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ ข6 จะได้ความสัมพันธ์ของความหนาชั้นฟิล์มโครเมียมกับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยกฎของกำลัง (ภาพที่ 36)

$$\log(\%T) = 4.478 - 2.561\log(x) \quad (29)$$

$$\%T = mx^n \quad (30)$$

$$\log(\%T) = n \log x + \log m \quad (31)$$

$$\%T = 10^{4.478} x^{-2.561} \quad (32)$$

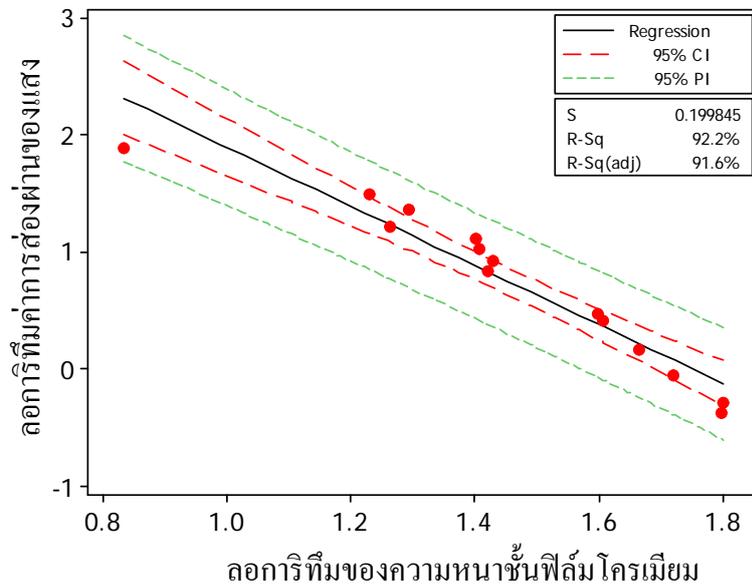
$$\%T = 10^{4.478} (64 - 0.8105t)^{-2.561} \quad (33)$$

เมื่อ  $\%T$  คือ ความสามารถในการส่องผ่านของแสง (เปอร์เซ็นต์)

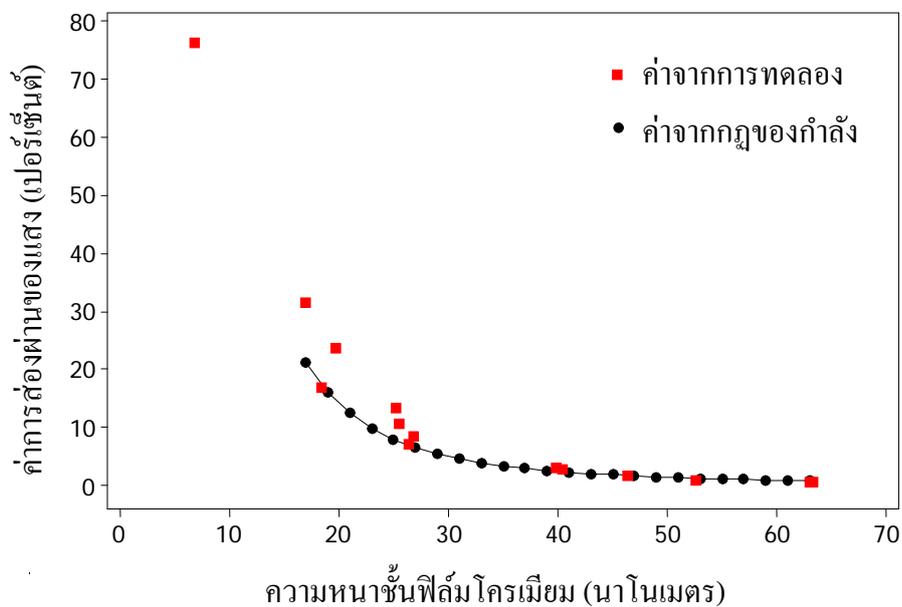
$x$  คือ ความหนาของชั้นฟิล์มโครเมียม (นาโนเมตร)

$t$  คือ เวลาในการกักชั้นฟิล์มโครเมียม (วินาที)

$n$  และ  $m$  คือ ค่าคงที่



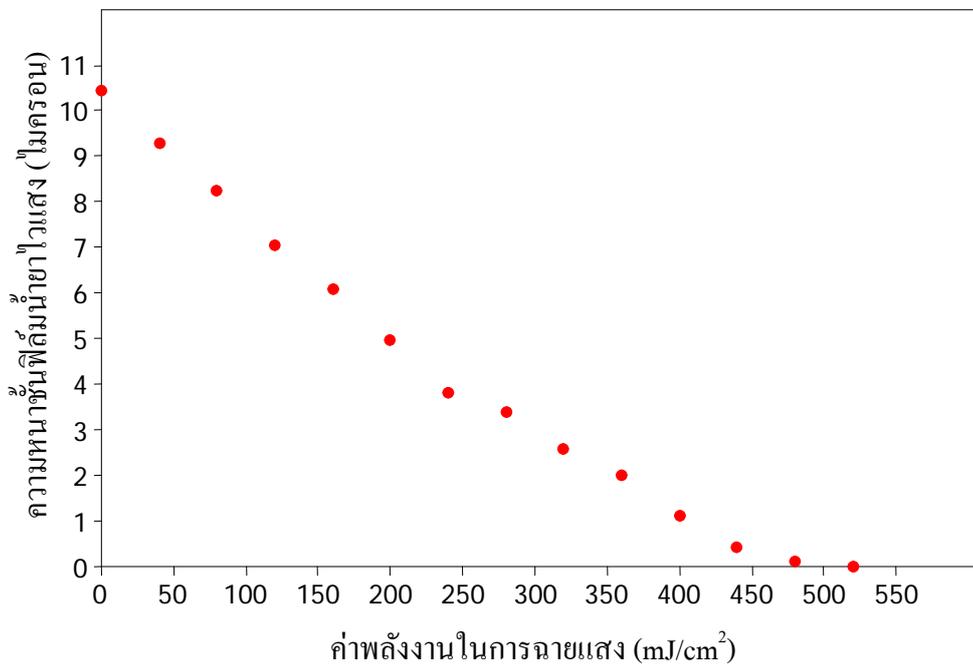
ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นฟิล์มโครเมียมต่อการส่องผ่านของแสงในรูปของลอกิริทึม



ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นฟิล์มโครเมียมต่อการส่องผ่านของแสงที่ได้จากค่าจากการทดลองและค่าจากกฎของกำลัง

**ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงบนผิวแผ่นซิลิกอนต่อความลึกของ  
ลายที่ถ่ายลงบนผิวแผ่นซิลิกอนโดยกระบวนการกัดแบบแห้ง**

นำแผ่นซิลิกอนขนาด 3 นิ้ว ที่เคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงหนา 7.5 ไมครอน มาฉายแสงด้วยค่าพลังงานตั้งแต่ 40 ถึง 800  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  โดยปรับเปลี่ยนค่าพลังงานไปครั้งละ 40  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  จากนั้นล้างลายวงจรด้วยน้ำยาโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่เวลา 80 วินาที และกัดลายไปในพื้นผิวซิลิกอนด้วยเครื่องกัดลายวงจร ไอซีพีมัลติเพล็กซ์ (ICP Multiplex) ที่ความดัน 4 มิลลิทอร์ อัตราการไหลของก๊าซเตตระฟลูออโรคาร์บอน ( $\text{CF}_4$ ) ที่ 20 sccm โดยมีค่าพลังงานที่คอยล์ 500 วัตต์ และที่แผ่นเพลตเท่ากับ 550 วัตต์ เป็นเวลา 60 นาที จากการนำข้อมูลในตารางภาคผนวกที่ ข7 พบว่าชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงในส่วนที่ถูกฉายแสงด้วยพลังงานที่มากจะละลายไปกับน้ำยาล้างลายได้มาก (ภาพที่ 37) และที่ค่าพลังงานในการฉายแสงที่ 520  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  นั้น ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงจะถูกฉายแสงและละลายไปกับน้ำยาล้างลายจนหมด



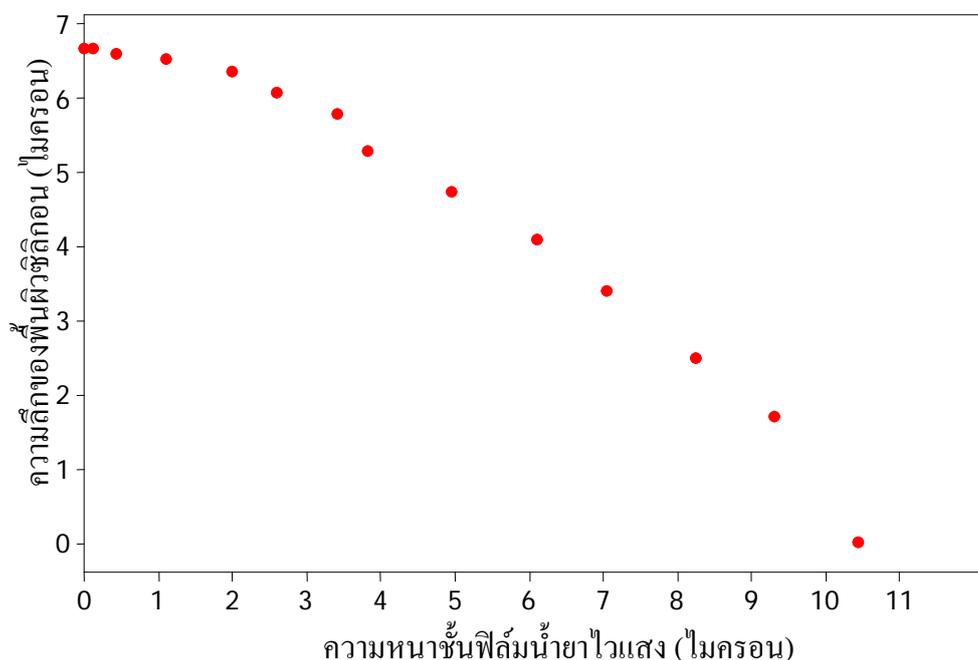
**ภาพที่ 37** ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานในการฉายแสงกับชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงภายหลังการล้างลาย

จากข้อมูลในตารางภาคผนวกที่ ข7 พบว่าส่วนของพื้นที่ที่มีชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงเหลือมาก จะปกป้องให้พื้นผิวซิลิกอนที่อยู่ด้านล่างถูกกัดไปน้อย ในขณะที่ส่วนของพื้นที่ที่มีชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงเหลือน้อย จะปกป้องให้พื้นผิวซิลิกอนที่อยู่ด้านล่างถูกกัดไปมาก (ภาพที่ 38) นอกจากนี้ที่พื้นที่ที่ถูกฉายแสงด้วยค่าพลังงานในการฉายแสงที่  $520 \text{ mJ/cm}^2$  หรือพื้นที่ที่ไม่มีชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงปกคลุมนั้น พื้นผิวซิลิกอนนั้นถูกกัดไปเท่ากับ 6.67 ไมครอน ด้วยเวลา 60 นาที แสดงว่าอัตราการกัดพื้นผิวซิลิกอน (Etch rate) ที่ได้จากการคำนวณโดยอาศัยสมการที่ 34 จะมีค่าเท่ากับ 0.11 ไมครอนต่อนาที และหลังจากกระบวนการกัดพบว่า บริเวณที่ไม่ถูกฉายแสงนั้น ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงจะมีความหนาเหลือเพียง 0.5 ไมครอน แสดงว่าชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงถูกกัดหายไปเท่ากับ 7.0 ไมครอน ในเวลา 60 นาที ในขณะที่พื้นผิวซิลิกอนส่วนที่ไม่มีชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงปกคลุมนั้น จะถูกกัดลึกลงไป 6.67 ไมครอน ในเวลา 60 นาที จึงสามารถใช้สูตรในสมการที่ 35 คำนวณหาความว่องไวในการกัดระหว่างชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงกับพื้นผิวซิลิกอนได้เท่ากับ 1.049 แสดงว่าชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงถูกกัดเร็วกว่าพื้นผิวซิลิกอนเท่ากับ 1.049 เท่า

$$Etch_{rate} = \frac{\Delta T}{t} \quad (34)$$

$$S_R = \frac{E_f}{E_r} \quad (35)$$

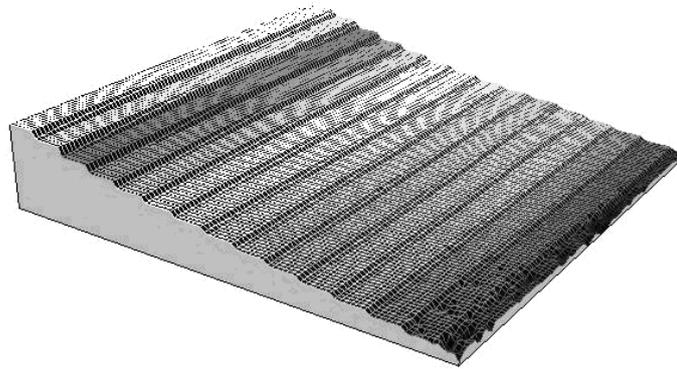
- เมื่อ  $Etch_{rate}$  คือ อัตราการกัด (ไมครอนต่อนาที)  
 $\Delta T$  คือ ความหนาชั้นฟิล์มที่เปลี่ยนไปหลังการกัด (ไมครอน)  
 $t$  คือ เวลาในการกัด (นาที)  
 $S_R$  คือ ความว่องไวในการกัด  
 $E_f$  คือ อัตราการกัดบนพื้นผิวซิลิกอน (ไมครอนต่อนาที)  
 $E_r$  คือ อัตราการกัดบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง (ไมครอนต่อนาที)



ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงกับความลึกของพื้นผิวที่ถูกกัด

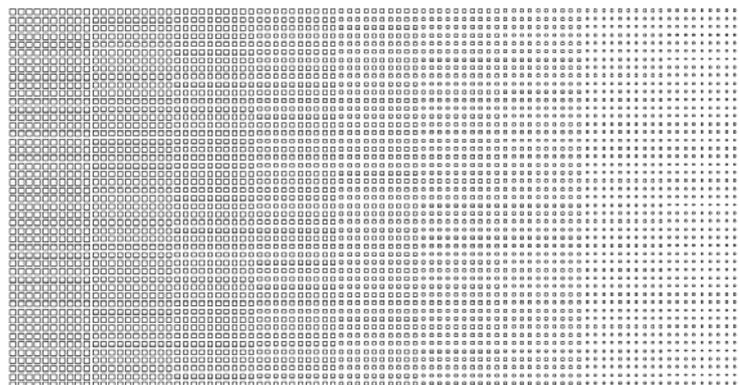
การเปรียบเทียบความสามารถในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ลงบนผิวแผ่นซิลิกอนด้วยเทคนิคต่างๆ

การสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีนั้น จะทดสอบเฉพาะการใช้เทคนิคการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสงด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้นเท่านั้น เนื่องจากเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหนึ่งชั้น และเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้นนั้น เป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลายอยู่แล้ว โดยจากเทคนิคการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสงด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้นจะได้โครงสร้างขั้นบันได (ภาพที่ 39)

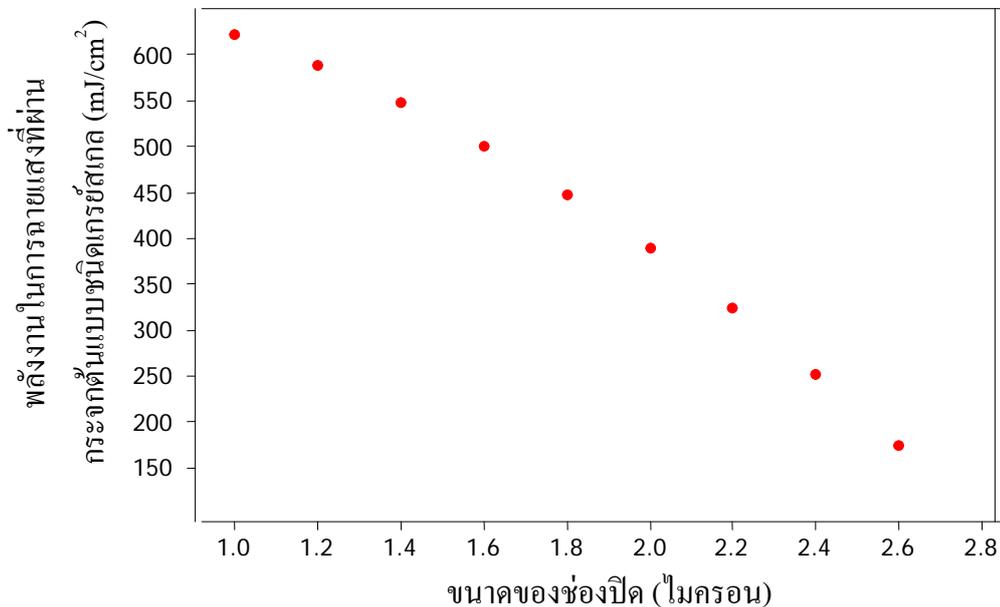


ภาพที่ 39 โครงสร้างสามมิติแบบชั้นบันไดจากเทคนิคการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสงด้วยกระจก  
 พื้นแบบชนิดความเข้มแสงไปนารีที่มีลายวงจรถ่ายหลายชั้น

สำหรับการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ด้วยกระจกพื้นแบบชนิดเกรย์สเกลนั้น เมื่อกำหนดระยะห่างระหว่างช่องปิดให้เป็นค่าคงที่ คือ 3.0 ไมครอน และปรับเปลี่ยนขนาดของช่องปิดตั้งแต่ 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.4 และ 2.6 ไมครอน รวมทั้งหมด 9 เงื่อนไข แล้วทำการวาดลายวงจรถ่ายด้วยโปรแกรมการออกแบบ จะได้ลวดลายที่มองเป็นภาพเกรย์สเกลที่ไล่ความเข้มของสีจากมากไปน้อยตามขนาดของช่องปิด (ภาพที่ 40) และเมื่อนำขนาดของช่องปิดและระยะห่างระหว่างช่องปิดมาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ในการส่องผ่านของแสง โดยกำหนดให้ความเข้มแสงเริ่มต้นที่ส่องจากแหล่งกำเนิดมีค่าเท่ากับ  $700 \text{ mJ/cm}^2$  ด้วยสมการที่ 3 เมื่อนำค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงและพลังงานในการฉายแสงเมื่อฉายแสงผ่านกระจกพื้นแบบชนิดเกรย์สเกลในตารางภาคผนวกที่ ค1 จะได้ความสัมพันธ์ของพลังงานแสงที่ส่องผ่านแผ่นกระจกพื้นแบบและตกกระทบบลงบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง (ภาพที่ 41)



ภาพที่ 40 ลายวงจรถ่ายที่ออกแบบเพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ รูปร่างชั้นบันได

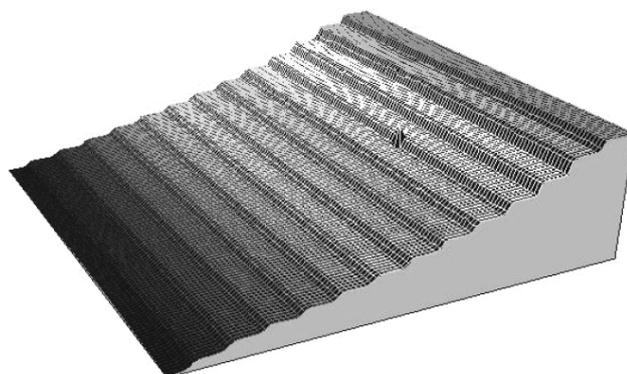


**ภาพที่ 41** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานแสงที่ผ่านแผ่นกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกลกับขนาดของช่องเปิดที่ระยะห่างระหว่างช่องเปิดเท่ากับ 3.0 ไมครอน

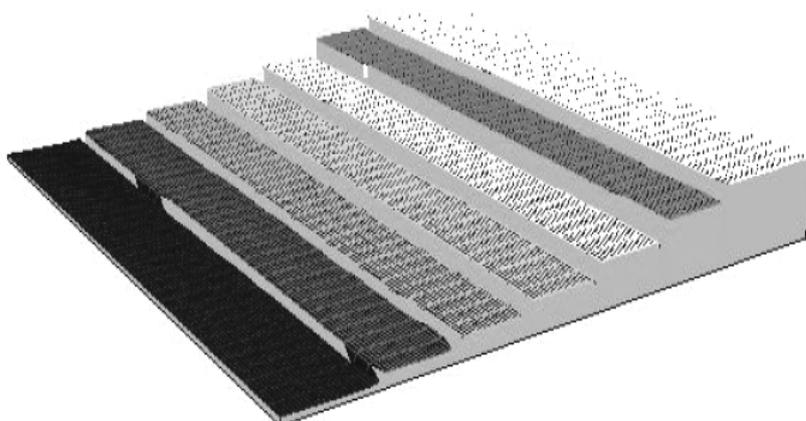
จากนั้นสร้างลวดลายที่ได้ ออกแบบไว้บนแผ่นกระจกต้นแบบขนาด 3 x 5 ตารางนิ้ว หนา 0.10 นิ้ว มาอบไล่ความชื้นด้วยน้ำยาเฮกซะเมทิลไดซิลลาเซน จากนั้นเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก Shipley S1805 ให้ได้ความหนา 5000 อังสตรอม อบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที แล้วฉายแสงด้วยเครื่องสร้างต้นแบบลายวงจรของบริษัท Heidelberg Instrument รุ่น DWL 200 โดยใช้แสงเลเซอร์ฮีเลียม-แคดเมียม ที่ความยาวคลื่น 442 นาโนเมตร เพื่อสร้างลายวงจร และล้างลายวงจรด้วยน้ำยาล้างลาย Shipley MF-26A เป็นเวลา 3 นาที อบด้วยแผ่นอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นกัดลายโลหะโครเมียมด้วยน้ำยา Microchrome CEP-200 แล้วลอกชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงในสารละลายกรดครดซัลฟูริกเข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์ผสมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วน 4 ต่อ 1 ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน เป็นเวลา 5 นาที แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน จากนั้นนำกระจกต้นแบบไปถ่ายแบบลายวงจรลงบนแผ่นซิลิคอนขนาด 3 นิ้ว ที่เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวกเบอร์ Clariantz AZ-P4620 ด้วยเครื่องถ่ายแบบลายวงจร Ultratech Stepper รุ่น Nanotech-190 ที่ความยาวคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ต 390-420 นาโนเมตร โดยใช้ค่าพลังงานในการฉายแสงที่ 700 mJ/cm<sup>2</sup> จากนั้นล้างลายวงจรด้วยน้ำยาโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยเครื่องล้าง

ลดลายแบบสเปรย์ เป็นเวลา 80 วินาที ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนเป็นเวลา 30 วินาที และปั่นแห้งเป็นเวลา 30 วินาที แล้ววัดความหนาและถ่ายรูป 3 มิติ ของชิ้นงานด้วยเครื่อง โคฮีเรนซ์ คอริเรชั่น อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ รุ่น Taly surf CCI 3000A

ผลการทดลองพบว่าจากข้อจำกัดของเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการสร้างต้นแบบลายวงจบบนกระจกต้นแบบ ทำให้สามารถสร้างช่องปิดที่มีขนาดตั้งแต่ 1.4 ไมครอน ขึ้นไป โดยช่องปิดขนาดเล็กกว่า 1.4 ไมครอน จะมีลดลายบางส่วนที่หลุดหายไป เนื่องจากลดลายเหล่านั้นมีขนาดใกล้เคียงกับความละเอียดของเครื่องสร้างต้นแบบลายวงจร และเมื่อนำแผ่นกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล ไปสร้างลดลายบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงนั้น พบว่าจะได้โครงสร้าง 3 มิติ รูปร่างชั้นบันไดที่มีความต่างของระดับความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง นอกจากนี้เมื่อขนาดของช่องปิดเพิ่มขึ้น ความขรุขระของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และลายของช่องปิดจะชัดเจนบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงเหมือนลายบนแผ่นกระจกต้นแบบเมื่อขนาดของช่องปิดใหญ่กว่า 2.2 ไมครอน ทั้งนี้เนื่องจากขนาดของช่องปิดมากกว่าความละเอียดของเครื่องถ่ายภาพแบบลายวงจร โดยความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ต่างกันของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ รูปร่างชั้นบันได แสดงด้วยภาพจำลอง 3 มิติ ที่วัดด้วยเครื่อง โคฮีเรนซ์ คอริเรชั่น อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ (ภาพที่ 42) ในส่วนของการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ด้วยเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับลงบนแผ่นซิลิกอน จะได้โครงสร้างแบบชั้นบันไดเช่นเดียวกับเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสงด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น และการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล ดังแสดงด้วยภาพจำลอง 3 มิติ (ภาพที่ 43)



ภาพที่ 42 โครงสร้างสามมิติแบบชั้นบันไดจากเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล



**ภาพที่ 43** โครงสร้างสามมิติแบบขั้นบันไดจากเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบ ชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ

#### การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตโครงสร้างจุลภาค 3 มิติด้วยเทคนิคต่างๆ

จากสูตรการคำนวณต้นทุนซึ่งประกอบไปด้วย (1) ต้นทุนของแผ่นกระจกต้นแบบเปล่า (2) ต้นทุนของการสร้างลายวงจรถบนแผ่นกระจกต้นแบบ (3) ต้นทุนของแผ่นซิลิกอนเปล่า และ (4) ต้นทุนของการสร้างลายวงจรถบนแผ่นซิลิกอน ซึ่งในส่วนของ (1) และ (3) นั้น จะเป็นค่าคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ \$7,700 ต่อแผ่นกระจกต้นแบบ และ \$300 ต่อแผ่นซิลิกอน ตามลำดับ ทำให้การคำนวณเพื่อหาต้นทุนการผลิตนั้น จะพิจารณาในส่วนของ (2) กับ (4) เพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ชั้น (1L) ถึง 5 ชั้น (5L) เท่านั้น ทั้งนี้จะสามารถจำแนกชนิดของการสร้างลายวงจรถบนแผ่นกระจกต้นแบบสำหรับเทคนิคการถ่ายแบบทั้ง 6 ชนิด ได้เป็น 5 ประเภท คือ (1) กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงโบนารีที่มีลายวงจรหนึ่งชั้น (2) กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงโบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น (3) กระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล (4) กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ และ (5) กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสง และสามารถจำแนกชนิดของการสร้างลายวงจรถบนแผ่นซิลิกอนสำหรับเทคนิคการถ่ายแบบทั้ง 6 ชนิด ได้เป็น 3 ประเภท คือ (1) การฉายแสงหนึ่งครั้งเพื่อสร้างลายวงจรเพียงหนึ่งชั้นในการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียว (2) การฉายแสงเพียงหนึ่งครั้งเพื่อสร้างลายวงจรหลายชั้นในการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียวและ (3) การฉายแสงหลายครั้งเพื่อสร้างลายวงจรหลายชั้นในการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียว โดยในการคำนวณต้นทุนสำหรับการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ สำหรับเทคนิคการถ่ายแบบทั้ง 6 ชนิด นั้น จะใช้ประเภทของการสร้างลายวงจรถบนแผ่นกระจกต้นแบบและบนแผ่นซิลิกอน ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ 1 และตารางภาคผนวกที่ 2 ตามลำดับ ทั้งนี้จะต้องคำนวณ

ต้นทุนในแต่ละขั้นตอนการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบและบนแผ่นซิลิกอนก่อน จึงจะนำไปเป็นข้อมูลสำหรับการคำนวณต้นทุนในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ด้วยเทคนิคต่างๆ ได้ ดังนั้นจึงขอยกตัวอย่างวิธีการคำนวณต้นทุนของสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ สำหรับเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงใบนารีที่มีลายวงจรหนึ่งชั้นเท่านั้น

โดยต้นทุนของการสร้างลายวงจรลงบนแผ่นกระจกต้นแบบนั้น จะมีจำนวนขั้นตอนการผลิตทั้งสิ้น 22 ขั้นตอน ตามลำดับ คือ (1) การเตรียมข้อมูลการสร้างลายวงจรด้วยเว็คเตอร์ (2) การเตรียมข้อมูลการสร้างลายวงจรด้วยโปรแกรม (3) การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล (4) การเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง (5) การเขียนลายวงจรด้วยลำอิเล็กตรอน (6) การเขียนลายวงจรด้วยลำแสงเลเซอร์ (7) การล้างลายวงจร (8) การอบชิ้นงาน (9) การกัดลายวงจร (10) การลอกชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง (11) การวัดขนาดของลายวงจร (12) การวัดตำแหน่งของลายวงจร (13) การทำความสะอาดชิ้นงาน (14) การตรวจสอบจุดบกพร่องบนชิ้นงาน (15) การซ่อมแซมจุดบกพร่องบนชิ้นงาน (16) การตรวจสอบชิ้นงานหลังการซ่อมแซม (17) การลอกชั้นบัพเฟออร์ออกจากผิวหน้า (18) การทำความสะอาดชิ้นงาน (19) การตรวจสอบจุดบกพร่องหลังการทำความสะอาดชิ้นงาน (20) การซ่อมแซมจุดบกพร่องขั้นสุดท้าย (21) การตรวจสอบชิ้นงานขั้นสุดท้าย และ (22) การติดเพลตลิเคล โดยในขั้นตอนการฉายแสงนั้น จะต้องใช้ลำอิเล็กตรอนในขั้นตอนที่ (5) สำหรับการเขียนลายวงจรสำหรับกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล แต่สำหรับกระจกต้นแบบชนิดอื่นๆจะใช้ลำแสงเลเซอร์ในขั้นตอนที่ (6) สำหรับการคำนวณต้นทุนในการผลิตนั้น จะอ้างอิงสูตรคำนวณดังแสดงในสมการที่ 19 โดยจะได้ต้นทุนรวมของเครื่องจักรในแต่ละขั้นตอนการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบ ซึ่งเป็นพจน์เศษในสมการที่ 19 ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ จ1 และการคำนวณผลผลิตรวมของเครื่องจักรในแต่ละขั้นตอนการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบนั้น จะเป็นพจน์ส่วนในสมการที่ 19 โดยในการคำนวณนั้นจะต้องแก้ปัญหาคอขวดของกระบวนการผลิต โดยต้องเลือกค่าผลผลิตที่ต่ำที่สุดที่เกิดจากเครื่องจักรในกระบวนการผลิต มาเป็นค่าผลผลิตในกระบวนการผลิต ซึ่งจากไมโครซอฟท์เอ็กเซลโซฟแวร์ นั้น กำหนดให้จำนวนชิ้นงานที่ได้จากเครื่องจักรที่สามารถผลิตชิ้นงานได้น้อยที่สุดเป็นเซลล์เป้าหมาย (Target cell) และมีเซลล์ที่เปลี่ยนค่าได้ (Changing cell) คือ จำนวนเครื่องจักร ( $N_j$ ) ของแต่ละขั้นตอนการผลิตที่  $j$  โดยมีค่ากำหนด (Constraint) คือ จำนวนชิ้นงานที่ได้จากเครื่องจักรที่สามารถผลิตชิ้นงานได้น้อยที่สุดต้องมีค่าอย่างน้อย 20,000 ชิ้น ซึ่งจะได้จำนวนเครื่องจักรและผลผลิตในแต่ละขั้นตอนการผลิต ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ จ2 ทั้งนี้เครื่องจักรในขั้นตอนการผลิตที่ (14) คือ เครื่องตรวจสอบคุณภาพลายวงจรมีค่าผลผลิตต่ำ

ที่สุดคือ 25,988 ชิ้น ในการผลิตเป็นระยะเวลา 5 ปี จากนั้นคำนวณหาต้นทุนกระบวนการผลิตของขั้นตอนการผลิตต่างๆ ได้โดยเอาต้นทุนรวมของเครื่องจักรในแต่ละขั้นตอนการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบหารด้วยค่าผลผลิตที่ต่ำที่สุดในกระบวนการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบ นอกจากนี้ยังใช้ต้นทุนกระบวนการผลิต มาคำนวณหาต้นทุนวัตถุดิบได้ โดยใช้สมการที่ 17 ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ จ3 ในส่วนของต้นทุนแรงงานในแต่ละขั้นตอนนั้น จะคำนวณโดยใช้ผลคูณของจำนวนเครื่องจักรในแต่ละขั้นตอนการผลิตกับเวลาในการผลิตชิ้นงานของแต่ละเครื่องจักร คูณด้วยค่าแรงงานมาตรฐาน ซึ่งมีค่าเท่ากับ \$15.81 ต่อชั่วโมง โดยต้นทุนแรงงานในแต่ละขั้นตอนของการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบ จะแสดงในตารางภาคผนวกที่ จ4 จากนั้นนำต้นทุนวัตถุดิบ ต้นทุนแรงงานและต้นทุนกระบวนการผลิต มาหาผลรวมด้วยสูตรคำนวณในสมการที่ 16 เพื่อหาต้นทุนรวมในแต่ละขั้นตอนการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบ ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ จ5

ในส่วนของต้นทุนของการสร้างลายวงจรลงบนแผ่นซิลิกอนนั้น จะมีจำนวนขั้นตอนการผลิตทั้งสิ้น 10 ขั้นตอน ตามลำดับ คือ (1) การเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง (2) การฉายแสงเพื่อสร้างลายวงจร (3) การล้างลายวงจร (4) การอบชิ้นงาน (5) การกัดลายวงจร (6) การลอกชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง (7) การวัดขนาดของลายวงจร (8) การวัดตำแหน่งของลายวงจร (9) การตรวจสอบจุดบกพร่องบนชิ้นงาน และ (10) การทำความสะอาดชิ้นงาน สำหรับการคำนวณต้นทุนในการผลิตนั้น จะอ้างอิงสูตรคำนวณดังแสดงในสมการที่ 19 โดยจะได้ต้นทุนรวมของเครื่องจักรในแต่ละขั้นตอนการสร้างลายวงจรบนแผ่นซิลิกอน ซึ่งเป็นพจน์เศษในสมการที่ 19 ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ ฉ1 และการคำนวณผลผลิตรวมของเครื่องจักรในแต่ละขั้นตอนการสร้างลายวงจรบนแผ่นซิลิกอนนั้น จะเป็นพจน์ส่วนในสมการที่ 19 โดยในการคำนวณนั้นจะต้องแก้ปัญหาคอขวดของกระบวนการผลิต โดยต้องเลือกค่าผลผลิตที่ต่ำที่สุดที่เกิดจากเครื่องจักรในกระบวนการผลิต มาเป็นค่าผลผลิตในกระบวนการผลิต ซึ่งจากไมโครซอฟท์เอ็กเซลโซฟแวร์ นั้น กำหนดให้จำนวนชิ้นงานที่ได้จากเครื่องจักรที่สามารถผลิตชิ้นงานได้น้อยที่สุดเป็นเซลล์เป้าหมาย (Target cell) และมีเซลล์ที่เปลี่ยนค่าได้ (Changing cell) คือ จำนวนเครื่องจักร ( $N_j$ ) ของแต่ละขั้นตอนการผลิตที่  $j$  ซึ่งจะได้จำนวนเครื่องจักรและผลผลิตในแต่ละขั้นตอนการผลิต ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ ฉ2 ทั้งนี้เครื่องจักรในขั้นตอนการผลิตที่(1) คือ เครื่องเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงนั้น มีค่าผลผลิตต่ำที่สุดคือ 2,899,072 แผ่น ในการผลิตเป็นระยะเวลา 5 ปี จากนั้นคำนวณหาต้นทุนกระบวนการผลิตของขั้นตอนการผลิตต่างๆ ได้โดยเอาต้นทุนรวมของเครื่องจักรในแต่ละขั้นตอนการสร้างลายวงจรบนแผ่นซิลิกอนหารด้วยค่าผลผลิตที่ต่ำที่สุดในกระบวนการสร้างลายวงจรบนแผ่นซิลิกอน นอกจากนี้ยังใช้ต้นทุน

กระบวนการผลิต มาคำนวณหาต้นทุนวัตถุดิบได้ โดยใช้สมการที่ 17 ดังแสดงในตาราง ภาคผนวกที่ ฉ3 ในส่วนของต้นทุนแรงงานในแต่ละขั้นตอนนี้ จะคำนวณโดยใช้ผลคูณของ จำนวนเครื่องจักรในแต่ละขั้นตอนการผลิตกับเวลาในการผลิตชิ้นงานของแต่ละเครื่องจักร คูณด้วย ค่าแรงงานมาตรฐาน ซึ่งมีค่าเท่ากับ \$15.81 ต่อชั่วโมง โดยต้นทุนแรงงาน ในแต่ละขั้นตอนของการ สร้างลายวงจรบนแผ่นซิลิกอนจะแสดงในตารางภาคผนวกที่ ฉ4 จากนั้นนำต้นทุนวัตถุดิบ ต้นทุน แรงงานและต้นทุนกระบวนการผลิต มาหาผลรวมด้วยสูตรคำนวณในสมการที่ 16 เพื่อหาต้นทุน รวมในแต่ละขั้นตอนการสร้างลายวงจรบนแผ่นซิลิกอน ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ ฉ5

เมื่อได้ต้นทุนรวมในแต่ละขั้นตอนของการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบและ ต้นทุนรวมในแต่ละขั้นตอนการสร้างลายวงจรบนแผ่นซิลิกอนแล้ว จะต้องนำมาหาต้นทุนรวม สำหรับการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ รูปร่างขั้นบันได ที่มีลำดับชั้นตั้งแต่ 1 ชั้น จนถึง 5 ชั้น โดย ในที่นี้จะขอยกตัวอย่างการคำนวณสำหรับการสร้างลายวงจรบนกระจกต้นแบบชนิดความเข้ม แสงไบนารีที่มีลายวงจรหนึ่งชั้นเท่านั้น โดยมีข้อกำหนดรหัสสำหรับโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ด้วย ตัวเลข 1, 2, 3, 4 และ 5 เพื่อใช้เป็นตัวคูณกับต้นทุนรวมในแต่ละขั้นตอน ซึ่งถ้าขั้นตอนการผลิตใด ไม่ได้ถูกนำมาใช้ในการคำนวณ ก็จะแทนด้วยรหัสเลข 0 โดยรหัสของกระบวนการสร้างลายวงจร บนแผ่นกระจกต้นแบบทั้ง 5 ประเภท คือ (1) กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจร หนึ่งชั้น (2) กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น (3) กระจกต้นแบบชนิด เกรย์สเกล (4) กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ และ (5) กระจกต้นแบบชนิดความ หนาชั้นฟิล์มหลายระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสง จะแสดงในตารางภาคผนวกที่ ข1, ข2, ข3, ข4 และ ข5 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำค่าต้นทุนรวมของการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจก ต้นแบบดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ ฉ5 มาคูณกับจำนวนชั้นของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ต่างๆ ดัง แสดงในตารางภาคผนวกที่ ข1, ข2, ข3, ข4 และ ข5 โดยใช้สูตรการคำนวณดังแสดงในสมการที่ 16 แล้ว ก็จะสามารรถคำนวณต้นทุนรวมของการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบสำหรับ โครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ของกระจกต้นแบบทั้ง 5 ประเภท คือ (1) กระจกต้นแบบชนิดความเข้ม แสงไบนารีที่มีลายวงจรหนึ่งชั้น (2) กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น (3) กระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล (4) กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ และ (5) กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสง ใน ตารางภาคผนวกที่ ข1, ข2, ข3, ข4 และ ข5 ตามลำดับ

ในส่วนของการคำนวณสำหรับการสร้างลายวงจบบนแผ่นซิลิกอน เพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ จะกำหนดรหัสสำหรับโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ด้วยตัวเลข 1, 2, 3, 4 และ 5 เพื่อใช้เป็นตัวคูณกับต้นทุนรวมในแต่ละขั้นตอน ซึ่งถ้าขั้นตอนการผลิตใด ไม่ได้ถูกนำมาใช้ในการคำนวณ ก็จะแทนด้วยรหัสเลข 0 โดยรหัสของกระบวนการสร้างลายวงจบบนแผ่นซิลิกอนทั้ง 3 ประเภท คือ (1) การฉายแสงหนึ่งครั้งเพื่อสร้างลายวงจรถ่ายเพียงหนึ่งชั้นในการกัดลายวงจรถ่ายเพียงครั้งเดียว (2) การฉายแสงเพียงหนึ่งครั้งเพื่อสร้างลายวงจรถ่ายหลายชั้นในการกัดลายวงจรถ่ายเพียงครั้งเดียว และ (3) การฉายแสงหลายครั้งเพื่อสร้างลายวงจรถ่ายหลายชั้นในการกัดลายวงจรถ่ายเพียงครั้งเดียว จะแสดงในตารางภาคผนวกที่ ฉู1, ฉู2 และ ฉู3 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำค่าต้นทุนรวมของการสร้างลายวงจบบนแผ่นซิลิกอน ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ ฉู5 มาคูณกับจำนวนชั้นของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ต่างๆ ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ ฉู1, ฉู2 และ ฉู3 โดยใช้สูตรการคำนวณดังแสดงในสมการที่ 16 แล้ว ก็จะสามารคำนวณต้นทุนรวมของการสร้างลายวงจบบนแผ่นกระจกต้นแบบสำหรับโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ของแผ่นซิลิกอนทั้ง 3 ประเภท คือ (1) การฉายแสงหนึ่งครั้งเพื่อสร้างลายวงจรถ่ายเพียงหนึ่งชั้นในการกัดลายวงจรถ่ายเพียงครั้งเดียว (2) การฉายแสงเพียงหนึ่งครั้งเพื่อสร้างลายวงจรถ่ายหลายชั้นในการกัดลายวงจรถ่ายเพียงครั้งเดียว และ (3) การฉายแสงหลายครั้งเพื่อสร้างลายวงจรถ่ายหลายชั้นในการกัดลายวงจรถ่ายเพียงครั้งเดียว ในตารางภาคผนวกที่ ฉู1, ฉู2 และ ฉู3 ตามลำดับ

เมื่อได้ต้นทุนการผลิตของแต่ละขั้นตอนสำหรับการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ชั้น ถึง 5 ชั้น แล้ว จะต้องนำต้นทุนนั้น มาใช้เพื่อคำนวณหาต้นทุนรวมในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ต่อหนึ่งแผ่นซิลิกอน โดยจากสูตรในสมการที่ 15 นั้น ผลรวมของต้นทุนของแผ่นกระจกต้นแบบเปล่า 1 แผ่น กับต้นทุนของการสร้างลายวงจบบนแผ่นกระจกต้นแบบนี้ จะเป็นผลบวกของต้นทุนกระบวนการผลิตของทุกขั้นตอนการผลิตที่  $j$  ของตารางภาคผนวกที่ ซ1, ซ2, ซ3, ซ4 และ ซ5 สำหรับเทคนิคที่ใช้กระจกต้นแบบทั้ง 5 ประเภท คือ (1) กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงโบนารีที่มีลายวงจรถ่ายหนึ่งชั้น (2) กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงโบนารีที่มีลายวงจรถ่ายหลายชั้น (3) กระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล (4) กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ และ (5) กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสงตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อทำการหาผลรวมของต้นทุนแล้ว จะต้องหารด้วยจำนวนแผ่นซิลิกอนที่สามารถใช้ในการถ่ายแบบลายวงจรถ่ายได้ต่อหนึ่งแผ่นกระจกต้นแบบคือ จำนวน 10,000 แผ่น ดังพจน์ที่หนึ่งที่แสดงในสมการที่ 15 ซึ่งผลของต้นทุนรวมของกระจกต้นแบบประเภทต่างๆ ต่อแผ่นซิลิกอนสำหรับการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ที่ลำดับชั้นต่างๆนั้น แสดงในตารางภาคผนวกที่ ฉู4 โดย

สำหรับสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติเพียงชั้นเดียวนั้น กระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกลจะมีต้นทุนสูงที่สุดคือ \$2.98 ต่อแผ่นซิลิกอน ในขณะที่กระจกต้นแบบชนิดอื่นมีต้นทุนอยู่ที่ \$2.31 ต่อแผ่นซิลิกอน แต่เมื่อจำนวนชั้นลายวงจรเพิ่มมากขึ้น กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหนึ่งชั้น และกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ จะมีต้นทุนเพิ่มแปรผันตามจำนวนชั้น ซึ่งที่ชั้นที่ห้า จะมีต้นทุนอยู่ที่ \$11.57 และ \$2.43 ในขณะที่กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น กระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล และกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสง จะมีต้นทุนคงที่ไม่แปรผันตามจำนวนชั้นคือ \$2.31, \$2.98 และ \$2.31 ต่อแผ่นซิลิกอน ตามลำดับ ดังนั้นถ้าพิจารณาที่การสร้างลายวงจร 5 ชั้น กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหนึ่งชั้น จะมีต้นทุนกระจกต้นแบบสูงที่สุด คือ \$11.57 ต่อแผ่นซิลิกอน รองลงมาคือ กระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล และกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ คือ \$2.98 และ \$2.43 ต่อแผ่นซิลิกอน ตามลำดับ ในขณะที่กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น และกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสง จะมีต้นทุนเท่ากันและต่ำที่สุดคือ \$2.31 ต่อแผ่นซิลิกอน อย่างไรก็ตามแนวโน้มต้นทุนของกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับและกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสง จะสูงกว่ากระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล เมื่อมีการสร้างลายวงจรมากกว่า 5 ชั้น

ในส่วนของผลรวมของต้นทุนของแผ่นซิลิกอนเปล่า 1 แผ่น กับต้นทุนของการสร้างลายวงจรบนแผ่นซิลิกอนนั้น จะคำนวณได้จากผลบวกของต้นทุนกระบวนการผลิตของทุกขั้นตอนการผลิตที่  $j$  ของตารางภาคผนวกที่ ฎ1, ฎ2 และ ฎ3 สำหรับเทคนิคที่ใช้กระจกต้นแบบทั้ง 3 ประเภท คือ (1) การฉายแสงหนึ่งครั้งเพื่อสร้างลายวงจรเพียงหนึ่งชั้นในการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียว (2) การฉายแสงเพียงหนึ่งครั้งเพื่อสร้างลายวงจรหลายชั้นในการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียว และ (3) การฉายแสงหลายครั้งเพื่อสร้างลายวงจรหลายชั้นในการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียว ตามลำดับ โดยต้นทุนรวมของกระบวนการผลิตลายวงจรบนแผ่นซิลิกอนหนึ่งแผ่นเพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ที่ลำดับชั้นที่ 1 ถึง ชั้นที่ 5 สำหรับเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรประเภทต่างๆ จะแสดงในตารางภาคผนวกที่ ฎ5 โดยพบว่าที่ลายวงจรชั้นที่หนึ่ง ทุกเทคนิคจะมีต้นทุนการผลิตเท่ากันคือ \$379.07 ต่อแผ่นซิลิกอน แต่เมื่อจำนวนชั้นเพิ่มมากขึ้น เทคนิคการฉายแสงหนึ่งครั้งเพื่อสร้างลายวงจรเพียงหนึ่งชั้นในการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียว และการฉายแสงหลายครั้งเพื่อสร้างลายวงจรหลายชั้นในการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียวจะมีต้นทุนแปรผันตามจำนวนชั้น ในขณะที่การฉายแสงเพียงหนึ่งครั้งเพื่อสร้างลายวงจรหลายชั้นในการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียวนั้น จะมีต้นทุนที่คงที่ไม่แปรผัน

ไปตามจำนวนชั้น ทั้งนี้เมื่อพิจารณาต้นทุนการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ที่ชั้นที่ 5 พบว่าการฉายแสงหนึ่งครั้งเพื่อสร้างลายวงจรเพียงหนึ่งชั้นในการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียวจะมีต้นทุนสูงที่สุดคือ \$695.37 ต่อแผ่นซิลิกอน รองลงมาคือ การฉายแสงหลายครั้งเพื่อสร้างลายวงจรหลายชั้นในการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียว ซึ่งต้นทุนมีค่าเท่ากับ \$455.78 ต่อแผ่นซิลิกอน ในขณะที่การฉายแสงเพียงหนึ่งครั้งเพื่อสร้างลายวงจรหลายชั้นในการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียวนั้น มีต้นทุนต่ำที่สุดคือ \$379.07 ต่อแผ่นซิลิกอน

เมื่อได้ต้นทุนรวมของการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ บนแผ่นกระจกต้นแบบและบนแผ่นซิลิกอน ที่ลำดับชั้นที่ 1 ถึง ชั้นที่ 5 สำหรับเทคนิคต่างๆ ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ 6 และ 7 ตามลำดับแล้ว จะต้องนำต้นทุนรวมเหล่านี้ ไปหาต้นทุนรวมในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ต่อแผ่นซิลิกอนสำหรับเทคนิคการถ่ายแบบต่างๆ ตามตารางภาคผนวกที่ 1 และ 2 โดยใช้สูตรการคำนวณในสมการที่ 15 ซึ่งจะได้ต้นทุนรวมดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ 6 กล่าวคือ มีเพียงเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล และการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสงเท่านั้นที่มีต้นทุนการผลิตค่าคงที่ไม่แปรผันไปตามจำนวนชั้น เนื่องจากใช้เทคนิคการฉายแสงเพียงหนึ่งครั้งเพื่อสร้างลายวงจรหลายชั้นในการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียว ในขณะที่เทคนิคอื่นนั้น จะมีต้นทุนแปรผันตามจำนวนชั้น ทั้งนี้เมื่อพิจารณาต้นทุนรวมในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ที่หนึ่งชั้น พบว่าเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกลนั้นมีต้นทุนสูงที่สุดคือ \$382.05 ต่อแผ่นซิลิกอน ในขณะที่เทคนิคอื่นนั้นจะมีต้นทุนการผลิตอยู่ที่ \$381.39 ต่อแผ่นซิลิกอน แต่เมื่อพิจารณาที่การสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ที่ชั้นที่ห้า พบว่าเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหนึ่งชั้นนั้น มีต้นทุนสูงที่สุดคือ \$706.94 รองลงมาคือ การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น การถ่ายแบบลายวงจรด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสงด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล และการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ ซึ่งมีต้นทุนการผลิตเท่ากับ \$697.68, \$458.10, \$382.01 และ \$381.51 ต่อแผ่นซิลิกอน ตามลำดับ ในขณะที่เทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสงนั้น จะเป็นเทคนิคที่มีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดคือ \$381.39 ต่อแผ่นซิลิกอน

### การเปรียบเทียบเวลาในการผลิตโครงสร้างจุลภาค 3 มิติด้วยเทคนิคต่างๆ

เวลาในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ นั้น จะประกอบด้วย (1) เวลาในการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบ และ (2) เวลาในการสร้างลายวงจรบนแผ่นซิลิกอน โดยในการคำนวณจะเริ่มจากการหาเวลาการผลิตต่อแผ่นชิ้นงานสำหรับเครื่องจักรทุกตัวในแต่ละขั้นตอนการผลิต ซึ่งเป็นส่วนกลับของผลคูณของอัตราการผลิตของเครื่องจักรแต่ละตัวในแต่ละขั้นตอนการผลิต กับจำนวนเครื่องจักรในแต่ละขั้นตอนการผลิต ดังสมการในสมการที่ 23 โดยสำหรับเวลาการสร้างลายวงจรต่อแผ่นกระจกต้นแบบสำหรับเครื่องจักรทุกตัวในแต่ละขั้นตอนการผลิตนั้น จะแสดงในตารางภาคผนวกที่ ฎ1 และเวลาการสร้างลายวงจรต่อแผ่นซิลิกอนสำหรับเครื่องจักรทุกตัวในแต่ละขั้นตอนการผลิต จะแสดงในตารางภาคผนวกที่ ฎ2 จากนั้นเมื่อได้เวลาการสร้างลายวงจรบนกระจกต้นแบบสำหรับเครื่องจักรทุกตัว และเวลาการสร้างลายวงจรแผ่นซิลิกอนสำหรับเครื่องจักรทุกตัวแล้ว นำเอาเวลาการสร้างลายวงจรต่อชิ้นงานนี้ไปคำนวณหาเวลารวมในการผลิตชิ้นงานสำหรับเครื่องจักรทุกตัวในทุกขั้นตอนการผลิตด้วยสมการที่ 22 แล้วจึงนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาเวลาการผลิตรวมสำหรับการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ รูปร่างชั้นบันได ที่มีลำดับชั้นตั้งแต่ 1 ชั้น จนถึง 5 ชั้น โดยจะมีการกำหนดรหัสสำหรับโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ด้วยตัวเลข 1, 2, 3, 4 และ 5 เพื่อใช้เป็นตัวคูณกับต้นทุนรวมในแต่ละขั้นตอน เช่นเดียวกับการคำนวณต้นทุนการผลิต กล่าวคือ ถ้าขั้นตอนการผลิตใด ไม่ได้ถูกนำมาใช้ในการคำนวณ ก็จะแทนด้วยรหัสเลข 0 โดยรหัสของกระบวนการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบทั้ง 5 ประเภท คือ (1) กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงโบนารีที่มีลายวงจรหนึ่งชั้น (2) กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงโบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น (3) กระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล (4) กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ และ (5) กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสง จะแสดงในตารางภาคผนวกที่ ซ1, ซ2, ซ3, ซ4 และ ซ5 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำเวลาในการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบในขั้นตอนการผลิตต่างๆ ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ ฎ1 มาคูณกับจำนวนชั้นของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ต่างๆ ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ ซ1, ซ2, ซ3, ซ4 และ ซ5 โดยใช้สูตรการคำนวณดังแสดงในสมการที่ 21 แล้ว ก็จะสามารถคำนวณเวลารวมของการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบสำหรับโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ของกระจกต้นแบบทั้ง 5 ประเภท คือ (1) กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงโบนารีที่มีลายวงจรหนึ่งชั้น (2) กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงโบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น (3) กระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล (4) กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ และ (5) กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสง ในตารางภาคผนวกที่ ฎ3, ฎ4, ฎ5, ฎ6 และ ฎ7 ตามลำดับ

ในส่วนของการคำนวณเวลาการผลิตสำหรับการสร้างลายวงจบบนแผ่นซิลิกอน เพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ จะกำหนดรหัสสำหรับโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ด้วยตัวเลข 1, 2, 3, 4 และ 5 เพื่อใช้เป็นตัวคูณกับต้นทุนรวมในแต่ละขั้นตอน ซึ่งถ้าขั้นตอนการผลิตใด ไม่ได้ถูกนำมาใช้ในการคำนวณ ก็จะแทนด้วยรหัสเลข 0 โดยรหัสของกระบวนการสร้างลายวงจบบนแผ่นซิลิกอนทั้ง 3 ประเภท คือ (1) การฉายแสงหนึ่งครั้งเพื่อสร้างลายวงจรถ่ายเพียงหนึ่งชั้นในการกัดลายวงจรถ่ายเพียงครั้งเดียว (2) การฉายแสงเพียงหนึ่งครั้งเพื่อสร้างลายวงจรถ่ายหลายชั้นในการกัดลายวงจรถ่ายเพียงครั้งเดียว และ (3) การฉายแสงหลายครั้งเพื่อสร้างลายวงจรถ่ายหลายชั้นในการกัดลายวงจรถ่ายเพียงครั้งเดียว จะแสดงในตารางภาคผนวกที่ ญ1, ญ2 และ ญ3 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำเวลาการผลิตลายวงจบบนแผ่นซิลิกอนสำหรับเครื่องจักรทุกตัวในแต่ละขั้นตอนการผลิต ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ ญ2 มาคูณกับจำนวนชั้นของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ต่างๆ ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ ญ1, ญ2 และ ญ3 โดยใช้สูตรการคำนวณดังแสดงในสมการที่ 21 แล้ว ก็จะสามารถคำนวณเวลาการผลิตรวมของการสร้างลายวงจรถ่ายสำหรับโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ของแผ่นซิลิกอนทั้ง 3 ประเภท คือ (1) การฉายแสงหนึ่งครั้งเพื่อสร้างลายวงจรถ่ายเพียงหนึ่งชั้นในการกัดลายวงจรถ่ายเพียงครั้งเดียว (2) การฉายแสงเพียงหนึ่งครั้งเพื่อสร้างลายวงจรถ่ายหลายชั้นในการกัดลายวงจรถ่ายเพียงครั้งเดียว และ (3) การฉายแสงหลายครั้งเพื่อสร้างลายวงจรถ่ายหลายชั้นในการกัดลายวงจรถ่ายเพียงครั้งเดียว ในตารางภาคผนวกที่ ญ8, ญ9 และ ญ10 ตามลำดับ

จากตารางภาคผนวกที่ ญ11 พบว่าเมื่อพิจารณาเวลาในการสร้างแผ่นกระจกต้นแบบด้วยเทคนิคต่างๆ สำหรับการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ชั้น ถึง 5 ชั้น พบว่ากระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกลจะใช้เวลาในการสร้างน้อยที่สุดคือ 11.86 ชั่วโมงต่อแผ่นกระจกต้นแบบ ในขณะที่เทคนิคอื่นๆ จะใช้เวลาในการสร้างลายวงจรถ่ายที่ 12.96 ชั่วโมงต่อแผ่นกระจกต้นแบบ แต่ถ้าพิจารณาที่การสร้างลายวงจรถ่าย 5 ชั้น นอกจากนี้ยังพบว่าเวลาในการผลิตลายวงจบบนแผ่นกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกลนั้น ไม่แปรผันตามจำนวนชั้นของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ซึ่งแตกต่างกับเทคนิคอื่นๆ ที่เวลาในการผลิตแปรผันตามจำนวนชั้นของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาเวลาในการสร้างลายวงจรถ่ายสำหรับโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ที่จำนวน 5 ชั้น พบว่ากระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรถ่ายหนึ่งชั้น และกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรถ่ายหลายชั้น จะใช้เวลามากที่สุดคือ 64.78 ชั่วโมงต่อแผ่นกระจกต้นแบบ รองลงมาคือ กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ คือ 21.52 ชั่วโมงต่อแผ่นกระจกต้นแบบ และกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ ที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสง คือ 12.96 ชั่วโมงต่อแผ่น

กระจกต้นแบบ ในขณะที่กระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล จะใช้เวลาน้อยที่สุดคือ 11.86 ชั่วโมง ต่อแผ่นกระจกต้นแบบ

เมื่อพิจารณาเวลาในการสร้างลายวงจบบนแผ่นซิลิกอน ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ ฎ12 พบว่าการสร้างลายวงจรเพียงชั้นเดียวนั้น ทุกเทคนิคจะใช้เวลาเท่ากันคือ 0.114 ชั่วโมงต่อแผ่นซิลิกอน โดยการฉายแสงหลายครั้งเพื่อสร้างลายวงจรหลายชั้นในการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียวนั้น จะมีความการผลิตเป็นค่าคงที่ ไม่แปรผันตามจำนวนชั้นของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ในขณะที่เทคนิคอื่นๆจะใช้เวลาในการผลิตแปรผันกับจำนวนชั้นของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ แต่ถ้าพิจารณาที่การสร้างลายวงจร 5 ชั้น พบว่า การฉายแสงหนึ่งครั้งเพื่อสร้างลายวงจรเพียงหนึ่งชั้นในการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียวนั้น จะใช้เวลาในการสร้างลายวงจรมากที่สุด คือ 0.572 ชั่วโมงต่อแผ่นซิลิกอน ในขณะที่เทคนิคการฉายแสงเพียงหนึ่งครั้งเพื่อสร้างลายวงจรหลายชั้นในการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียว และเทคนิคการฉายแสงหลายครั้งเพื่อสร้างลายวงจรหลายชั้นในการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียวนั้น จะใช้เวลาในการผลิตน้อยกว่าคือ 0.148 และ 0.114 ชั่วโมงต่อแผ่นซิลิกอนตามลำดับ

เมื่อได้เวลาในการสร้างลายวงจบบนแผ่นกระจกต้นแบบและแผ่นซิลิกอน เพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ แล้ว จะต้องนำเวลาในการสร้างลายวงจบบนแผ่นกระจกต้นแบบดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ ฎ11 มาหารด้วยจำนวนแผ่นซิลิกอนที่สามารถผลิตได้ต่อหนึ่งแผ่นกระจกต้นแบบ ซึ่งงานวิจัยนี้กำหนดให้เท่ากับ 10,000 แผ่น โดยเวลาการผลิตลายวงจบบนแผ่นกระจกต้นแบบ ต่อแผ่นซิลิกอน ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ ฎ13 จากนั้นนำเวลาที่คำนวณได้ ไปรวมกับเวลาในการสร้างลายวงจบบนแผ่นซิลิกอน ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ ฎ12 โดยใช้สูตรคำนวณในสมการที่ 20 ทั้งนี้ประเภทของการสร้างลายวงจบบนแผ่นกระจกต้นแบบและบนแผ่นซิลิกอนนั้น ต้องสอดคล้องกับเทคนิคในการถ่ายแบบเพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติต่างๆ ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ ง1 และตารางภาคผนวกที่ ง2 ตามลำดับ ซึ่งจะทำได้จะทำให้สามารถคำนวณเวลาการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ทั้งหมด ต่อแผ่นซิลิกอน สำหรับเทคนิคการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ต่างๆ ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ ฎ14 ซึ่งพบว่าในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ที่หนึ่งชั้นนั้น การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสง จะใช้เวลาการผลิตรวมน้อยที่สุดคือ 0.114 ชั่วโมงต่อแผ่นซิลิกอน ในขณะที่เทคนิคอื่นๆ นั้นใช้เวลาในการผลิตเท่ากันคือ 0.116 ชั่วโมงต่อแผ่นซิลิกอน โดยเวลาการผลิตสำหรับเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล เทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ และเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสงนั้น จะเป็นค่าคงที่และไม่แปร

ผันไปตามจำนวนชั้นของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ในขณะที่เทคนิคอื่นๆ จะมีเวลาในการผลิตแปรผันกับจำนวนชั้นของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาเวลาในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ที่ 5 ชั้น พบว่าเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงใบนารีที่มีลายวงจรหนึ่งชั้น และเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงใบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้นนั้น จะใช้เวลาในการผลิตมากที่สุด เมื่อเทียบกับเทคนิคอื่นๆ คือ 0.578 ชั่วโมงต่อแผ่นซิลิกอน ในขณะที่เทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสงด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงใบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น เทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล เทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ และเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสง จะมีเวลาในการผลิตรวมเท่ากับ 0.149, 0.116, 0.116 และ 0.114 ชั่วโมงต่อแผ่นซิลิกอน ตามลำดับ จึงกล่าวได้ว่าเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสง ใช้เวลาในการผลิตน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่นๆ

จากการคำนวณต้นทุนและเวลาในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ด้วยเทคนิคต่างๆ พบว่าการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสงนั้น จะมีต้นทุนและเวลาในการผลิตต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่นๆ คือ ต้นทุน \$381.39 ต่อแผ่นซิลิกอน ที่เวลาการผลิต 0.114 ชั่วโมงต่อแผ่นซิลิกอน

#### การเปรียบเทียบข้อเด่น-ข้อด้อยของการผลิตโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ด้วยเทคนิคต่างๆ

##### จุดแข็งที่เกิดจากปัจจัยภายใน (Strengths)

จากสมบัติทางฟิสิกส์และการคำนวณเวลาการผลิตและต้นทุนการผลิตที่ผ่านมา จำเป็นต้องเปรียบเทียบข้อเด่นและข้อด้อยของเทคนิคต่างๆ เพื่อคูแวนโน้มและความเป็นไปได้ในการนำไปผลิตโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ อย่างมีประสิทธิภาพต่อไปในอนาคต โดยจากเทคนิค SWOT ซึ่งจะพิจารณาทั้งจุดแข็งที่เกิดจากปัจจัยภายใน จุดอ่อนที่เกิดจากปัจจัยภายใน โอกาสที่เกิดจากปัจจัยภายนอก และอุปสรรคที่เกิดจากปัจจัยภายนอกนั้น พบว่าเทคนิคการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ โดยเทคนิค การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับนั้น สามารถเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่นๆ ได้ดังนี้

1. กระบวนการผลิตกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับนั้นสอดคล้องกับเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงใบนารี ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำและไม่ต้องลงทุนซื้อเครื่องจักรที่มีความเที่ยงตรงสูงซึ่งมีราคาแพงมาก
2. กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ สามารถรองรับงานแสงเพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ด้วยการฉายแสงเพียงครั้งเดียวได้เช่นเดียวกับการใช้กระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล ซึ่งมีความซับซ้อนในการสร้างและมีราคาแพงมาก
3. เวลาในการสร้างกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับนั้นน้อยกว่าการสร้างกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงใบนารีชนิดหนึ่งชั้นและหลายชั้น เมื่อเทียบกับการนำไปใช้สร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ที่มีจำนวนลำดับชั้นเท่ากัน
4. เวลาในการผลิตโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ลงบนแผ่นซิลิกอนด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับนั้น ใช้เวลาทั้งที่และ ไม่แปรผันตามจำนวนลำดับชั้นของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ เช่นเดียวกับการถ่ายแบบลายวงจรมด้วยกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล
5. ต้นทุนในการสร้างกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับนั้นต่ำกว่าการสร้างกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงใบนารีที่มีลายวงจรมหนึ่งชั้นและกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล และมีต้นทุนเท่ากับกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงใบนารีที่มีลายวงจรมหลายชั้น
6. ต้นทุนในการถ่ายแบบลายวงจรมลงบนแผ่นซิลิกอนเพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ นั้นต่ำกว่าการสร้างลายวงจรมที่ต้องใช้กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงใบนารีทุกเทคนิค และมีต้นทุนเท่ากับการสร้างลายวงจรมด้วยกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล ซึ่งต้นทุนนี้จะไม่แปรผันตามลำดับชั้นของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ
7. ต้นทุนรวมในการสร้างกระจกต้นแบบและการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ลงบนแผ่นซิลิกอนสำหรับเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรมด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสงนั้น น้อยกว่าการสร้างด้วยกระจกต้นแบบชนิดอื่นๆ เมื่อเทียบกับการสร้างโครงสร้างที่มีลำดับชั้นไม่เกิน 5 ชั้น

#### จุดอ่อนที่เกิดจากปัจจัยภายใน (Weakness)

1. กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ สามารถสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ที่มีผนังลายวงจรมตั้งตรงได้เท่านั้น ไม่สามารถสร้างโครงสร้างที่มีผนังลายวงจรมโค้งได้ เช่นเดียวกับการถ่ายแบบลายวงจรมด้วยกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล

2. การควบคุมความหนาชั้นฟิล์มโลหะโครเมียมในกระบวนการกัดให้เป็นไปตามที่ ต้องการนั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องจากชั้นฟิล์มโครเมียมเริ่มต้นนั้นมีความบางในระดับอังstrom และต้องใช้เพียงกระบวนการกัดแบบแห้ง (Dry etching) เท่านั้น ไม่สามารถใช้กระบวนการกัดเคมี แบบเปียก (Wet chemical etching) ได้

3. เวลาในการสร้างกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับนั้นมากกว่าเวลาใน การสร้างกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล เมื่อเทียบกับการนำไปใช้สร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ที่มี จำนวนลำดับชั้นเท่ากัน

4. ต้นทุนของเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์ม หลายระดับนั้น มีแนวโน้มสูงกว่าการใช้กระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล เมื่อมีการสร้างโครงสร้าง จุลภาค 3 มิติ มากกว่า 5 ชั้น

#### โอกาสที่เกิดจากปัจจัยภายนอก (Opportunity)

1. กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ เป็นเทคโนโลยีชนิดใหม่ที่ใช้ในการ สร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ที่มีผนังลายวงจرتั้งตรง ซึ่งอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำที่ต้องการสร้าง โครงสร้างจุลภาคเพื่อควบคุมอากาศพลศาสตร์ เช่น ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ นั้น สามารถนำไปใช้ใน กระบวนการผลิตได้ ทำให้ลดเวลาและต้นทุนในการผลิต อีกทั้งยังไม่ต้องซื้อเครื่องจักรใหม่ ซึ่งจะ ทำให้สูญเสียทรัพยากรต่าง ๆ น้อยลง

2. เครื่องมือในการสร้างกระจกต้นแบบในบริษัทผลิตกระจกต้นแบบในโลกปัจจุบันนั้น ส่วนใหญ่ใช้สำหรับสร้างกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารี ซึ่งมีลักษณะกระบวนการผลิต เหมือนกับกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ ทำให้ง่ายต่อการพัฒนาและปรับปรุง กระบวนการผลิตเพื่อให้สอดคล้องกับกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ

3. ราคาของกระจกต้นแบบในปัจจุบันมีแนวโน้มสูงมากขึ้น ทำให้เทคนิคของกระจก ต้นแบบ การถ่ายแบบลายวงจรรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ หรือการถ่าย แบบลายวงจรรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่า พลังงานแสงนั้น จะกลายเป็นทางเลือกใหม่ต่อไปในอนาคต

### อุปสรรคที่เกิดจากปัจจัยภายนอก (Threats)

1. เทคโนโลยีในการถ่ายแบบลายวงจรเพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ แบบตั้งตรงนั้น นิยมใช้กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงโบนารี เนื่องจากง่ายต่อการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขในกระบวนการผลิต เทคโนโลยีในการถ่ายแบบลายวงจรเพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ แบบตั้งตรงนั้น นิยมใช้กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงโบนารี เนื่องจากง่ายต่อการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขในกระบวนการผลิต
2. บริษัทผู้ผลิตกระจกต้นแบบอาจสูญเสียรายได้จากการขายกระจกต้นแบบในปริมาณมาก ในกรณีที่เปลี่ยนมาผลิตกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับในอนาคต จึงเป็นการยากที่จะโน้มน้าวให้บริษัทเหล่านั้นผลิตกระจกต้นแบบชนิดนี้
3. แนวโน้มของจำนวนชั้นสำหรับโครงสร้างจุลภาค 3 มิตินั้น จะเพิ่มขึ้น ทำให้ถ้าใช้กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ นั้น จะมีต้นทุนการผลิตสูงกว่ากระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล
4. โครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างที่มีผิวโค้ง ทำให้เทคนิคการใช้กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับนั้น ไม่เหมาะสม

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

1. เมื่อเวลาในการกัด ( $t$ ) เพิ่มมากขึ้น ชั้นฟิล์มโครเมียมจะมีความหนา ( $x$ ) ลดน้อยลง และมีสมการถดถอยเชิงเส้นเพื่อทำนายเวลาในการกัดต่อความหนาของชั้นฟิล์มโครเมียมที่เปลี่ยนไปคือ  $x = 64 - 0.8105t$  โดยมีความถูกต้องในการอธิบายความสัมพันธ์เท่ากับ 93.8 เปอร์เซ็นต์

2. ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการส่องผ่านของแสงกับความหนาชั้นฟิล์มโครเมียมเป็นสมการเอ็กซ์โปเนนเชียล กล่าวคือ เมื่อชั้นฟิล์มโครเมียมมีความหนามากกว่า 40 นาโนเมตร แสงจะส่องผ่านได้น้อยลงและมีค่าเกือบคงที่แม้ว่าชั้นฟิล์มจะมีความหนาเปลี่ยนแปลงไปก็ตาม แต่เมื่อความหนาของชั้นฟิล์มมีค่าน้อยกว่า 40 นาโนเมตร แสงจะผ่านชั้นฟิล์มได้ดีและแปรผันไปตามความหนาชั้นฟิล์มๆ ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนรูปสมการให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงระหว่างความสามารถในการส่องผ่านของแสง ( $\%T$ ) กับเวลาในการกัดโครเมียม ( $t$ ) คือ  $\%T = 10^{4.478} (64 - 0.8105t)^{-2.561}$

3. เงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงชนิด AZ-P4620 ลงบนแผ่นซิลิกอนขนาด 3 นิ้ว คือ ฉายน้ำยาไวแสงเป็นเวลา 25 วินาที ที่แรงดัน 2.5 psi ที่ความเร็วในการหมุน 100 รอบต่อนาที จากนั้นหมุนชิ้นงานที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 วินาที แล้วใช้ความเร็ว 200 รอบต่อนาที<sup>2</sup> ไปที่ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที หมุนต่อเนื่องเป็นเวลา 60 วินาที ที่แรงดูดไอเสีย 300 ปาสคาล แล้วอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 วินาที ได้ชั้นฟิล์มๆ ที่มี ความหนา  $70274 \pm 908.233$  อังสตรอม

4. เมื่อความหนาชั้นฟิล์มโครเมียมน้อยนั้น พลังงานแสงจะส่องผ่านมายังชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เคลือบบนชิ้นงานได้มาก แต่เมื่อความหนาชั้นฟิล์มโครเมียมมาก พลังงานแสงจะส่องผ่านมายังชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงน้อย ทั้งนี้ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงในส่วนที่ถูกฉายแสงด้วยพลังงานที่มากจะละลายไปกับน้ำยาล้างลายได้มาก โดยที่ค่าพลังงานในการฉายแสงที่  $520 \text{ mJ/cm}^2$  นั้น ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงส่วนที่ถูกฉายแสงจะละลายไปกับน้ำยาล้างลายจนหมด โดยมีความว่องไวในการกัดระหว่างชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงกับพื้นผิวซิลิกอนเท่ากับ 0.66

5. การสร้างกระจกตันแบบชนิด การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกตันแบบชนิดเกรย์สเกล นั้น สามารถสร้างช่องปิดที่มีขนาดตั้งแต่ 1.4 ไมครอน ขึ้นไป โดยลายวงจรขนาดเล็กกว่า 1.4 ไมครอน จะมีผลลดตายบางส่วนที่หลุดหายไป เนื่องจากลดตายเหล่านั้นมีขนาดใกล้เคียงกับความละเอียดของเครื่องสร้างต้นแบบลายวงจร นอกจากนี้เมื่อขนาดของช่องปิดเพิ่มขึ้น ความขรุขระของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้น และการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ด้วยเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกตันแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ ลงบนแผ่นซิลิกอน จะได้โครงสร้างแบบขั้นบันไดเช่นเดียวกับเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกตันแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น และการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกตันแบบชนิดเกรย์สเกล

6. การสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ด้วยเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกตันแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสง นั้น จะมีต้นทุนและเวลาในการผลิตที่ต่ำที่สุด และเทคนิคที่ใช้กระจกตันแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีนั้น ไม่เหมาะสมที่จะใช้สร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ เนื่องจากมีต้นทุนที่สูง อีกทั้งยังพบว่าเทคนิค การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกตันแบบชนิดเกรย์สเกล นั้น ไม่เหมาะสมกับการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ เพียงระดับเดียว เนื่องจากมีต้นทุนของแผ่นกระจกตันแบบที่สูงมากเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่น

7. การสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ด้วยเทคนิค การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกตันแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับนั้น มีความได้เปรียบในด้านของราคาและเวลาในการผลิตที่ต่ำเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่น กล่าวคือ ต้นทุน \$381.39 ต่อแผ่นซิลิกอน ที่เวลาการผลิต 0.114 ชั่วโมงต่อแผ่นซิลิกอน แต่ข้อจำกัดของเทคนิคนี้คือ ความยุ่งยากในการควบคุมคุณภาพในการผลิต โดยเฉพาะความหนาของชั้นฟิล์มโครเมียม และสามารถสร้างได้เพียงโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ที่มีผนังลายวงจรตั้งตรงเท่านั้น นอกจากนี้ยังมีความยากในการเจาะตลาดผู้ผลิต ซึ่งนิยมใช้กระจกตันแบบชนิดความเข้มแสงไบนารี และการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกตันแบบชนิดเกรย์สเกล จึงทำให้การใช้กระจกตันแบบชนิด การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกตันแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับในเชิงพาณิชย์นั้น ยังเป็นไปได้ยากในอนาคตอันใกล้ ถึงแม้จะเป็นเทคนิคที่มีข้อได้เปรียบมากกว่าเทคนิคอื่นก็ตาม

### ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นซิลิกอนด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลองนั้น ควรทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 1 ครั้ง ทั้งนี้เพื่อที่จะได้พิจารณาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหนาและความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวน หรือสามารถหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์มต่อปัจจัยต่างๆด้วยการใช้เทคนิคสมการถดถอยเชิงเส้น อันจะเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับการออกแบบการทดลองครั้งต่อไป
2. ในการกัดชั้นฟิล์มโครเมียมให้มีความหนาแตกต่างกันสำหรับกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับนั้น ควรใช้การกัดแบบแห้งเคมีมากกว่าการกัดแบบเปียก ทั้งนี้เนื่องจากการกัดแบบแห้งนั้น สามารถควบคุมความหนาและความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์มโครเมียม อีกทั้งรูปร่างและผิวผนังของลายวงจร ได้ดีกว่าการกัดแบบเปียก
3. ควรประยุกต์ใช้กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับในการผลิต โครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ที่ใช้งานจริงในอุปกรณ์เครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค และวัดค่าทางไฟฟ้าเมื่ออุปกรณ์นั้นทำงาน ทั้งนี้เพื่อพิจารณาว่าโครงสร้างที่สร้างด้วยกระจกต้นแบบชนิดต่าง ๆ นั้น สามารถทำให้อุปกรณ์ทำงานได้เช่นเดียวกัน

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ชลิดา คุณหาเรื่อง, เสกสรรค์ ชิมากุล, วีระ เฟื่องจันทร์, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ สมเกียรติ ศุภเดช.

2546. กระบวนการสร้างโฟโตมาส์สำหรับวงจรรวมซิลิคอนขนาด 5 ไมครอน, น. 1365-1370. ใน การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26.

รติพร มั่นพรหม, นิธิ อັติ, พิระพงษ์ ตริยเจริญ, วุฒินันท์ เจียมศักดิ์ศิริ, ชาญเดช หูอนันต์ และ

อัมพร โพธิ์ไย. 2550. สภาวะที่เหมาะสมในการหมุนเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงบนกระจกตันแบบขนาด 6x6 นิ้ว โดยเทคนิคการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ, น. 973-976.

ใน การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30

Al-Kuhaili, M.F. and S.M.A. Durrani. Optical properties of Chromium oxide thin films deposited by electron-beam evaporation. **Optical Materials** 29: 709-713.

Anonymous. n.d. **Atomic Force Measurement**. Available Source:

[http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic\\_force\\_microscope](http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_force_microscope), January 20, 2007.

\_\_\_\_\_. n.d. **Ellipsometer**. Available Source:

<http://www.jobinyvon.com/usadivisions/TFilms/dataellip.htm>, April 25, 2007.

\_\_\_\_\_. n.d. **Heidelberg Instrument DWL 200 and Maskwrite 800. user guide part 1**.

Available Source: [www.himt.de](http://www.himt.de), November 20, 2006.

\_\_\_\_\_. n.d. **Spectrophotometer**. Available Source:

<http://en.wikipedia.org/wiki/Spectrophotometry>, January 10, 2007.

\_\_\_\_\_. n.d. **SWOT analysis**. Available Source: [http://en.wikipedia.org/wiki/SWOT\\_analysis](http://en.wikipedia.org/wiki/SWOT_analysis), January 5, 2007.

Anonymous. n.d. **The Billion-Dollar Mask set. Is it Inevitable?**

Available Source: [www.xinitiative.org/img/rygler-204.pdf](http://www.xinitiative.org/img/rygler-204.pdf), November 18, 2006.

Bagan, S., G. Gibson, C. Newquist and H. Sago. 1996. Next generation coating technologies for low- cost electronics manufacturing. **Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)**: 468-475.

Benjamin, G.E. 2005. **Photomask Fabrication Technology**. McGraw-Hill Co. Inc., New York.

Bonn, J, S. Sisler and P. Tivnan. 2001. Balancing mask and lithography costs. **Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)**: 25-27.

Brian, C.M. 2004. **Development of a Deep Silicon Phase Fresnel Lens Using Grayscale Lithography and Deep Reactive Ion Etching**. M.S. thesis thesis, University of Maryland.

Bulasinski, A. 2006. Multilayer and Multiproduct masks: Cost Reduction Methodology. **Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)** (19): 121-129.

Conroy, M. and J. Armstrong. 2005. A comparison of surface metrology techniques. **Journal of Physics** (13): 458-465.

Cullity, B.D. 1978. **Elements of X-ray diffraction**. 2<sup>nd</sup> ed. Addison-Wesley Publ. Co. Inc, California.

EUVA, Device sub working group. 2004. **The estimation of Cost of Ownership of EUV exposure system, and other NGL technologies**. Available Source: [www.euva.or.jp/images/technical\\_info/pdf/EUVACoO\\_d.pdf](http://www.euva.or.jp/images/technical_info/pdf/EUVACoO_d.pdf), November 5, 2006.

- Fuhua, G., J. Yao, Y. Zeng, S. Xie and Y. Guo. 2002. One-step lithography for fabrication of multifunction diffractive structures with grey-tone mask. **Microelectronics engineering** (61-61): 165-171.
- Gao, R.S., A. Chen, P. Lin and Shih. 1999. Function-based cost modeling for wafer manufacturing and its application to strategic management. **Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)** : 31-34.
- Hardford, N. 1997. **Cost Effective IC Manufacturing 1998-1999**. Intregated Circuit Engineer Corporation (ICEC). Available Source: <http://smithsonianchips.si.edu/ice/cd/CEICM/SECTION2.pdf>, May 25, 2007.
- Hayase, S. 1989. Recent progress of resist and resist process in Japan. **Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)** (5): 22-26.
- Hector, S.D. n.d. **Modeling the cost of EUVL masks**. Motorola DigitalDNA Laboratories, Austin, Texas 78721. Available Source: <http://www.sematech.org/public/resources/coo/index.htm>, December 18, 2006.
- Hui, A., J.O. Blosiu and D.V. Wiberg. n.d. **Taguchi Method Applied in Optimization of Shipley SJR5740 Positive Resist Deposition**. Available Source: <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/19044/1/98-0228.pdf>, January 1, 2007.
- Jantawong, J, N. Atthi, S. Niamcharoen, K. Siangjaew, W. Jeamsaksiri and A. Poyai. 2007. 3D- microstructure fabrication by using energy dose variation lithography technique. pp. 32. **In The International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology 2007 (ICEAST2007)**.

- Kalk, F.D.,R.French, H.U.Alpay and G.Hughes. 1994. Attenuated phase-shifting photomasks fabricated from Cr-based embedded shifter blanks. *In SPIE proceeding Photomask Japan*.
- Kalus, M, M. Frey, L-M Buckmann, K. Reimer and B. Wagner. 1998. Free 3D Shaping with Grey-Tone Lithography and Multidose E-beam Writing. **Microelectronics Engineering** (41-42): 461-464.
- Kim, J.Y and D.S. Son. 2000. Prediction of resist non-uniformity caused by underlying pattern density and topology. **Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)**: 98-99.
- Kudryashov, V, X.C. Yuan, W.C. Cheong and Radhakrushnan. 2003. Grey scale structures formation in SU-8 with e-beam and UV. **Microelectronics Engineering** (67-68): 306-311.
- Kuo, Y. K. and C. G. Chao. 2006. Control ability of spin coating planarization of resist film and optimal control of developers. **Microelectronics Journal** (37): 759-764.
- Levinson, H.J. 1999. **Lithography Process Control, Tutorial texts in Optical Engineering**, Vol.TT28, 66-79.
- Mani, B. 1989. Effect of heat and moisture on thick positive photoresist. **Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)** : 310-313.
- Montgomery, D.C. 1997. **Design and analysis of experiments**. 4<sup>th</sup> ed. John wiley & Sons, Inc., Canada.
- Muzio, E. 2000. **Optical Lithography Cost of Ownership (CoO), Final report for LITG501. International SEMATECH. 16.**

- Pham, P. and E. Boellaard. 2004. Photoresist coating methods for the integration of Novel 3-D RF microstructures. **Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)** (13): 491-499.
- Quirk, M., J. Serda. 2001. **Semiconductor Manufacturing Technology**. Prentice hall, New Jersey.
- Schneider, J. G. Picard, M. F. Seye, and M. H. Pérez. n.d.. **A Novel Method for the Deposition of Ultra-Uniform Resist film for Mask Making**. Available Source: [www.nanometrix.com/pdf/Nanometrix\\_Deposition\\_of\\_Ultra\\_Uniform\\_Resist\\_Film\\_for\\_Mask\\_Making.pdf](http://www.nanometrix.com/pdf/Nanometrix_Deposition_of_Ultra_Uniform_Resist_Film_for_Mask_Making.pdf), December 13, 2006.
- Sheat, J.R and B.W. Smith. 1998. **Microlithography science and technology**. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Sreenivasan, S.V., C.G. Willson, N.E. Schumaker and D.J.Resnick. n.d. Cost of Ownership analysis for Patterning Using Step and Flash Imprint Lithography. **The international society for optical engineering (Proceedings of SPIE)** (4688):
- Steege, P. 1996. Overall Equipment Effectiveness in resist process equipment. **Institute of Electrical and Electronics Engineer (IEEE)**: 76-79.
- Sure, A, T. Dillon, J. Murakowski, C. Lin, D. Pustai and D.W. Prather. 2003. Fabrication and Characterization of three-dimensional silicon tapers. **Optical society of America**
- Totsu, K, K. Fujishiro, S. Tanaka and M. Esashi. 2006. Fabrication of three-dimensional microstructure using maskless Gray-scale lithography. **Applied Physical (sensor and actuator)** (130-131): 387-392.

- Van Zant, P. 2004. **Microchip Fabrication: a practical guide to semiconductor processing**. 4<sup>th</sup> ed. McGraw-Hill Inc, New York.
- Waits, C.M, B. Morgan, M. Kastantin and R. Ghodssi. 2005. Microfabrication of 3D silicon MEMS structures using gray-scale lithography and deep reactive ion etching. **Applied physical (sensor and actuator)** (119): 245-253.
- \_\_\_\_\_. Modafe and R. Ghodssi. 2003. Investigation of gray-scale technology for large area 3D silicon MEMS structures. **Journal of Micromechanics and Microengineer** (13): 170-177.
- Weber, C.M and C. N. Berglund. 2005. A strategic assessment of the photomask manufacturing industry. **Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)**: 18-34.
- Wolf, S. and R.N. Tauber. 2000. **Silicon processing for VLSI era: Process technology, Vol.1**. 2<sup>nd</sup> ed. Lattice Press, California.
- Yang, Y.K and T.C. Chang. 2006. Experimental analysis and optimization of a photo resist coating process for photolithography in wafer fabrication. **Microelectronics Journal** (37): 746-751.

ภาคผนวก

### ภาคผนวก ก

ข้อมูลและการวิเคราะห์ผลสำหรับความหนาและความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง

ตารางผนวกที่ ก1 เงื่อนไขในการเคลื่อนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงชนิดบวกเบอร์ AZ-P4620 จาก  
การออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคทฤษฎีแบบ  $L_{16} (2^7)$

การทดลองที่	ความเร็วรอบต่ำ (รอบต่อนาที)	อัตราเร่ง (รอบต่อนาที <sup>2</sup> )	ความเร็วรอบ สูง (รอบต่อนาที)	เวลาในการ หมุน เคลื่อน (วินาที)	อัตราคูณ ไอเสีย (ปาสกาล)
1	200	200	1500	45	0
2	200	300	2000	60	100
3	200	400	2500	75	200
4	200	500	3000	90	300
5	500	200	2000	75	300
6	500	300	1500	90	200
7	500	400	3000	45	100
8	500	500	2500	60	0
9	750	200	2500	90	100
10	750	300	3000	75	0
11	750	400	1500	60	300
12	750	500	2000	45	200
13	1000	200	3000	60	200
14	1000	300	2500	45	300
15	1000	400	2000	90	0
16	1000	500	1500	75	100

ตารางผนวกที่ ก2 ความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงของชุดการทดลองที่ 1 ถึง 8

ตำแหน่ง การวัด	ความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงในหน่วยอังสตรอมในแต่ละการทดลอง							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	71238	72823	74868	65728	68707	68918	75122	75609
2	71569	70104	70773	76520	67794	74945	72068	71468
3	71619	71231	73064	73818	70822	69006	71486	80203
4	67919	71304	70712	69349	68413	71652	80210	73173
5	68142	70804	70980	71260	66997	70331	73780	68495
6	67956	71283	79640	79426	67939	66449	74355	73152
7	68652	71242	70747	71474	68605	69027	80672	71075
8	68915	70802	73718	70718	70857	68759	71269	73723
9	68929	66089	80167	73040	68895	66576	68638	70769
10	68179	70766	73064	69027	70773	71233	74495	80146
11	77070	76899	71254	77096	71585	71249	71271	70949
12	71220	68858	70735	68651	68617	70803	71261	71255
13	68450	72495	68745	72457	68603	65925	67883	74464
14	67950	73073	77681	70775	70830	68339	71476	80107
15	68155	68333	71243	68706	68016	70776	71253	75619
16	68517	68335	71473	65535	70061	68325	76771	80991
17	68589	65594	79349	69431	71541	65979	68567	80167
18	70888	66630	79271	67762	68598	59144	70823	73717
19	71581	66690	77064	68589	73425	70983	70747	80171
20	68025	66009	75353	71079	72330	68895	71249	70772
21	67984	66031	68677	73762	73162	71169	71263	76646
22	68902	67942	71492	76654	66995	73200	73938	73131
23	68939	68578	80546	74382	68620	66551	80226	68719
24	71212	67946	71461	67614	68930	69396	70975	75427
25	68942	68891	74445	59880	70755	71574	68616	80182

ตารางผนวกที่ ก3 ความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงของชุดการทดลองที่ 9 ถึง 16

ตำแหน่ง การวัด	ความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงในหน่วยอังสตรอมในแต่ละการทดลอง							
	9	10	11	12	13	14	15	16
1	76652	70792	70873	59795	74263	74384	68229	72750
2	74253	76800	71588	61531	77795	67853	72975	72420
3	79704	79153	71260	70979	70776	76962	68866	72966
4	70959	77117	73537	73119	75099	72231	70878	62102
5	73053	77420	72753	59229	71497	59801	70840	67716
6	66914	67764	71241	73038	75698	76638	68339	73138
7	79538	67880	66285	66293	72752	72652	68894	72957
8	68723	76790	68330	73051	69394	77305	68332	66676
9	59889	76582	71569	73119	73723	77306	59254	68433
10	81074	65566	68335	70881	72257	79295	59878	66093
11	77275	76752	71034	73055	75378	72220	68933	62105
12	68801	73739	70976	68624	68896	68323	66299	72422
13	77080	71473	68514	66090	73423	68617	68335	79621
14	72827	74260	68572	68008	75684	67746	66076	62131
15	73708	67850	71231	72424	78264	74464	68336	59876
16	79606	74921	72819	73090	72932	67982	73035	62161
17	76744	74383	71268	70861	66637	73189	70824	72956
18	77305	67713	68763	67963	67058	70976	75489	73111
19	77307	70778	68701	73080	75725	74322	68848	62163
20	68661	74374	71247	73103	67146	76976	68888	68975
21	79656	79546	68155	70956	72977	70741	63783	70857
22	70824	65566	67935	68891	72284	73008	63073	66213
23	80120	74322	68936	73144	70066	74374	71269	72958
24	71469	67915	68329	72449	72232	77071	67273	72351
25	77301	79428	71542	66692	78756	76951	71715	70185

**ตารางผนวกที่ ก4** อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงเมื่อพิจารณาด้วยแบบจำลองชนิดใหญ่กว่าดีกว่า

ระดับ	A	B	C	D	E
1	97.02	97.10	96.83	97.05	97.08
2	97.09	97.04	96.81	97.12	97.07
3	97.12	97.05	97.38	97.07	97.07
4	96.99	97.03	97.19	96.98	97.01
เคลด้า	0.13	0.07	0.57	0.14	0.07
ลำดับ	3	4	1	2	5

**ตารางผนวกที่ ก5** อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงเมื่อพิจารณาด้วยแบบจำลองชนิดเล็กกว่าดีกว่า

ระดับ	A	B	C	D	E
1	-69.80	-69.10	-68.89	-70.73	-70.77
2	-69.54	-71.12	-69.57	-69.23	-72.03
3	-71.33	-69.90	-72.68	-70.94	-71.12
4	-72.28	-72.83	-71.81	-72.05	-69.03
เคลด้า	2.73	3.72	3.78	2.83	3.01
ลำดับ	5	2	1	4	3

ตารางผนวกที่ ก6 ผลรวมของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของความหนาและความ  
สม่ำเสมอของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง

การทดลอง	ความสูญเสียทางคุณภาพ ของความหนา ของชั้นฟิล์มฯ (Q1)	ความสูญเสียทาง คุณภาพ ของความสม่ำเสมอ ของชั้นฟิล์มฯ (Q2)	ผลรวมของ ความสูญเสีย ทางคุณภาพ (Q1)+(Q2)	ผลรวมของ อัตราส่วนสัญญาณ ต่อสิ่งรบกวน S/N(1)+S/N(2)
1	1.29088E-11	269542.68	269542.68	-54.31
2	1.29207E-11	473254.56	473254.56	-56.75
3	1.14564E-11	880092.59	880092.59	-59.45
4	1.24302E-11	1127732.49	1127732.49	-60.52
5	1.28744E-11	208348.88	208348.88	-53.19
6	1.30638E-11	593808.95	593808.95	-57.74
7	1.18132E-11	800085.53	800085.53	-59.03
8	1.11691E-11	1010894.51	1010894.51	-60.05
9	1.12977E-11	1663951.65	1663951.65	-62.21
10	1.16786E-11	1254248.80	1254248.80	-60.98
11	1.26999E-11	218310.88	218310.88	-53.39
12	1.29099E-11	1145295.93	1145295.93	-60.59
13	1.17837E-11	715648.32	715648.32	-58.55
14	1.1775E-11	1213357.33	1213357.33	-60.84
15	1.33799E-11	906427.76	906427.76	-59.57
16	1.3153E-11	1577165.50	1577165.50	-61.98

ตารางผนวกที่ ก7 ค่าเฉลี่ยของความหนาและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนาชั้นฟิล์ม  
น้ำยาไวแสงที่ระดับการทดลองของปัจจัยต่างๆ

ระดับปัจจัย	ค่าเฉลี่ยของความหนาชั้นฟิล์มฯ ของระดับต่างๆของแต่ละปัจจัย (อังสตรอม)	ค่าเฉลี่ยของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของความหนาชั้นฟิล์มฯของระดับ ต่างๆของแต่ละปัจจัย (อังสตรอม)
A1	70975.50	3207.19
A2	71596.25	3126.95
A3	71816.00	3947.30
A4	70740.50	4155.40
B1	71615.75	3111.53
B2	71182.00	3679.98
B3	71274.00	3251.91
B4	71056.50	4393.42
C1	69458.75	3012.86
C2	69287.50	3166.64
C3	73974.75	4335.03
C4	72407.25	3922.32
D1	71188.25	3585.36
D2	71833.75	3006.57
D3	71406.00	3770.37
D4	70700.25	4074.55
E1	71472.00	3596.61
E2	71399.50	4128.21
E3	71359.00	3624.87
E4	70897.75	3087.16

## ภาคผนวก ข

ข้อมูลและการวิเคราะห์ผลสำหรับความหนาของชั้นฟิล์ม โครเมียมต่อคุณสมบัติด้านต่างๆ

**ตารางผนวกที่ ข1** ความหนาชั้นฟิล์มโครเมียมที่ถูกกัดออกไปจากการวัดด้วยเครื่องวัดแรง  
อะตอมของชิ้นงานแผ่นที่ 1

เวลาในการกัด (วินาที)	ชั้นฟิล์มโครเมียมที่ถูก กัดเมื่อวัดจากผิว ด้านซ้ายของชิ้นงาน (นาโนเมตร)	ชั้นฟิล์มโครเมียมที่ถูก กัดเมื่อวัดจากผิว ด้านขวาของชิ้นงาน (นาโนเมตร)	ความหนาเฉลี่ยของชั้น ฟิล์มโครเมียมที่เหลืออยู่ หลังการกัด (นาโนเมตร)
5	35.935	35.855	35.895
10	38.448	84.442	61.445
15	48.171	50.608	49.390
20	52.448	51.215	51.832
25	60.504	65.331	62.918
30	62.707	61.330	62.019
35	77.141	75.082	76.112
40	78.782	73.221	76.002
45	80.236	75.749	77.993
50	66.545	70.532	68.539
55	84.188	85.375	84.782
60	87.596	84.932	86.264
65	80.251	83.575	81.913
70	96.624	94.490	95.557

**ตารางผนวกที่ ข2** ความหนาชั้นฟิล์มโครเมียมที่ถูกกัดออกไปจากการวัดด้วยเครื่องวัดแรง  
อะตอมของชิ้นงานแผ่นที่ 2

เวลาในการกัด (วินาที)	ชั้นฟิล์มโครเมียมที่ถูก กัดเมื่อวัดจากผิว ด้านซ้ายของชิ้นงาน (นาโนเมตร)	ชั้นฟิล์มโครเมียมที่ถูก กัดเมื่อวัดจากผิว ด้านขวาของชิ้นงาน (นาโนเมตร)	ความหนาเฉลี่ยของชั้น ฟิล์มโครเมียมที่เหลืออยู่ หลังการกัด (นาโนเมตร)
5	38.012	35.403	36.708
10	39.683	35.724	37.704
15	46.758	53.227	49.993
20	56.392	59.070	57.731
25	58.896	59.183	59.040
30	59.152	61.916	60.534
35	73.468	71.836	72.652
40	71.922	69.105	70.514
45	70.824	72.430	71.627
50	74.172	75.901	75.037
55	80.457	74.341	77.399
60	74.115	71.299	72.707
65	91.556	86.986	89.271
70	85.748	89.367	87.558

**ตารางผนวกที่ ข3** ความหนาชั้นฟิล์มโครเมียมที่ถูกกัดออกไปจากการวัดด้วยเครื่องวัดแรง  
อะตอมของชิ้นงานแผ่นที่ 3

เวลาในการกัด (วินาที)	ชั้นฟิล์มโครเมียมที่ถูก กัดเมื่อวัดจากผิว ด้านซ้ายของชิ้นงาน (นาโนเมตร)	ชั้นฟิล์มโครเมียมที่ถูก กัดเมื่อวัดจากผิว ด้านขวาของชิ้นงาน (นาโนเมตร)	ความหนาเฉลี่ยของชั้น ฟิล์มโครเมียมที่เหลืออยู่ หลังการกัด (นาโนเมตร)
5	39.866	37.164	38.515
10	35.740	35.673	35.707
15	43.000	42.943	42.972
20	52.662	49.673	51.168
25	57.495	55.803	56.649
30	55.293	60.518	57.906
35	71.871	72.441	72.156
40	70.459	83.477	76.968
45	74.767	74.751	74.759
50	79.326	72.387	75.857
55	83.925	81.458	82.692
60	79.960	83.619	81.790
65	78.121	77.548	77.835
70	95.394	97.436	96.415

ตารางผนวกที่ ข4 เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงต่อความหนาของชั้นฟิล์มโครเมียมที่เวลา  
ต่างๆในการกัดชั้นฟิล์ม

เวลาในการกัดชั้นฟิล์ม (วินาที)	ความหนาชั้นฟิล์มโครเมียม (นาโนเมตร)	การส่องผ่านของแสง (เปอร์เซ็นต์)
5	62.961	0.432
10	63.382	0.526
15	52.550	0.882
20	46.420	1.491
25	40.460	2.584
30	39.850	3.034
35	26.360	7.027
40	25.510	10.653
45	25.210	13.228
50	26.860	8.512
55	18.380	16.798
60	19.750	23.494
65	16.990	31.568
70	6.820	76.423

ตารางผนวกที่ ข5 ลอการิทึมฐานสิบของความหนาชั้นฟิล์มโครเมียมและการส่องผ่านของแสง

เวลาในการกักชั้นฟิล์ม (วินาที)	ลอการิทึมฐานสิบของ	
	ความหนาชั้น ฟิล์มโครเมียม	ลอการิทึมฐานสิบของ การส่องผ่าน ของแสง
5	-0.365	1.799
10	-0.279	1.802
15	-0.055	1.721
20	0.173	1.667
25	0.412	1.607
30	0.482	1.600
35	0.847	1.421
40	1.027	1.407
45	1.121	1.402
50	0.930	1.429
55	1.225	1.264
60	1.371	1.296
65	1.499	1.230
70	1.883	0.834

**ตารางผนวกที่ ข6** ค่าการส่องผ่านของแสงที่ได้จากการคำนวณตามกฎของกำลังต่อความหนา  
ของชั้นฟิล์ม โครเมียม

ความหนาชั้นฟิล์มโครเมียม (นาโนเมตร)	ค่าการส่องผ่านของแสง ตามกฎของกำลัง (เปอร์เซ็นต์)
63	0.741
61	0.805
59	0.877
57	0.958
55	1.049
53	1.154
51	1.273
49	1.411
47	1.569
45	1.754
43	1.971
41	2.227
39	2.531
37	2.896
35	3.339
33	3.882
31	4.556
29	5.405
27	6.490
25	7.905
23	9.786
21	12.354
19	15.963
17	21.224

**ตารางผนวกที่ ๗** ความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงและความลึกของพื้นผิวซิลิกอนที่ถูกกัด  
หลังจากการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานในการฉายแสง

ค่าพลังงานในการฉายแสง (mJ/cm <sup>2</sup> )	ความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง (ไมครอน)	ความลึกของผิวซิลิกอนที่ถูกกัด (ไมครอน)
0	10.43	0.00
40	9.30	1.70
80	8.25	2.50
120	7.05	3.39
160	6.10	4.09
200	4.96	4.75
240	3.82	5.28
280	3.41	5.79
320	2.60	6.09
360	2.00	6.36
400	1.10	6.54
440	0.44	6.61
480	0.12	6.68
520	0.00	6.67

**ภาคผนวก ค**

ค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงและพลังงานในการฉายแสง  
ผ่านกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล

**ตารางผนวกที่ ค1** ค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงและพลังงานในการฉายแสงเมื่อฉายแสงผ่านกระจกตันแบบชนิดเกรย์สเกล

ขนาดของช่องเปิด (ไมครอน)	ระยะห่างระหว่างช่องเปิด (ไมครอน)	พื้นที่ของช่องเปิด (ตารางไมครอน)	พื้นที่ของช่องระหว่างช่องเปิด (ตารางไมครอน)	ค่าการส่องผ่านของแสง (เปอร์เซ็นต์)	พลังงานในการฉายแสง ( $\text{mJ}/\text{cm}^2$ )
1.0	3.0	1.0	9.0	88.89	622.22
1.2	3.0	1.4	9.0	84.00	588.00
1.4	3.0	2.0	9.0	78.22	547.56
1.6	3.0	2.6	9.0	71.56	500.89
1.8	3.0	3.2	9.0	64.00	448.00
2.0	3.0	4.0	9.0	55.56	388.89
2.2	3.0	4.8	9.0	46.22	323.56
2.4	3.0	5.8	9.0	36.00	252.00
2.6	3.0	6.8	9.0	24.89	174.22

### ภาคผนวก ง

ประเภทของการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบและบนแผ่นซิลิกอน

ตารางผนวกที่ 1 ประเภทของการสร้างลายวงจบบนแผ่นกระจกต้นแบบสำหรับเทคนิคต่างๆ  
ในการถ่ายแบบเพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ

เทคนิคการถ่ายแบบลายวงจร เพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ	ประเภทของการสร้างลายวงจบบนแผ่นกระจกต้นแบบ
การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหนึ่งชั้น	กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหนึ่งชั้น
การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น	กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น
การถ่ายแบบลายวงจรด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสงด้วยกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น	กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น
การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล	กระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล
การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ	กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ
การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสง	กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสง

ตารางผนวกที่ 2 ประเภทของการสร้างลายวงจรถนบนแผ่นซิลิกอนสำหรับเทคนิคต่างๆในการ  
ถ่ายแบบเพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ

เทคนิคการถ่ายแบบลายวงจร เพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ	ประเภทของการสร้างลายวงจรถนบนแผ่นซิลิกอน
การถ่ายแบบลายวงจรด้วย กระจกตันแบบชนิดความเข้มแสงไบนารี ที่มีลายวงจรหนึ่งชั้น	การฉายแสงหนึ่งครั้ง เพื่อสร้างลายวงจรเพียงหนึ่งชั้น ในการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียว
การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกตันแบบ ชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น	การฉายแสงหนึ่งครั้ง เพื่อสร้างลายวงจรเพียงหนึ่งชั้น ในการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียว
การถ่ายแบบลายวงจรด้วยการปรับเปลี่ยน ค่าพลังงานแสงด้วยกระจกตันแบบชนิด ความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น	การฉายแสงหลายครั้ง เพื่อสร้างลายวงจรหลายชั้น ในการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียว
การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกตันแบบ ชนิดเกรย์สเกล	การฉายแสงเพียงหนึ่งครั้ง เพื่อสร้างลายวงจรหลายชั้น ในการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียว
การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกตันแบบ ชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ	การฉายแสงเพียงหนึ่งครั้ง เพื่อสร้างลายวงจรหลายชั้น ในการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียว
การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกตันแบบ ชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ ที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสง	การฉายแสงเพียงหนึ่งครั้ง เพื่อสร้างลายวงจรหลายชั้น ในการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียว

**ภาคผนวก จ**

ข้อมูลต้นทุนในแต่ละขั้นตอนสำหรับกระบวนการสร้างแผ่นกระจกต้นแบบชนิดต่างๆ

ตารางผนวกที่ ๑1 การคำนวณต้นทุนรวมของเครื่องจักรในแต่ละขั้นตอนการสร้างลายวงจรบน  
แผ่นกระจกต้นแบบ

ขั้นตอน การผลิต	ต้นทุนของ เครื่องจักร	ระยะเวลา การเสื่อม ของ เครื่องจักร	ค่าบำรุงรักษา เครื่องจักรใน เวลา 5 ปี	จำนวนของ เครื่องจักร	ต้นทุนรวมของเครื่องจักร
$j$	$Eo_j$ \$/เครื่องจักร	$D$ ปี	$D * Em_j$ \$/เครื่องจักร	$N_j$ เครื่องจักร	$N_j * (Eo_j + D * Em_j)$ \$
1	50,000	5	12,500	9	562,500
2	100,000	5	25,000	2	250,000
3	110,000	5	27,500	6	825,000
4	290,000	5	72,500	1	362,500
5	22,000,000	5	5,500,000	5	137,500,000
6	2,200,000	5	550,000	1	2,750,000
7	290,000	5	72,500	1	362,500
8	290,000	5	72,500	1	362,500
9	700,000	5	175,000	1	875,000
10	800,000	5	200,000	1	1,000,000
11	1,600,000	5	400,000	1	2,000,000
12	1,800,000	5	450,000	1	2,250,000
13	600,000	5	150,000	1	750,000
14	15,600,000	5	3,900,000	5	97,500,000
15	5,000,000	5	1,250,000	2	12,500,000
16	15,600,000	5	3,900,000	1	19,500,000
17	600,000	5	150,000	1	750,000
18	600,000	5	150,000	1	750,000
19	15,600,000	5	3,900,000	5	97,500,000
20	5,000,000	5	1,250,000	1	6,250,000
21	15,600,000	5	3,900,000	1	19,500,000
22	25,000	5	6,250	1	31,250

ตารางผนวกที่ จ2 การคำนวณผลผลิตรวมของเครื่องจักรในแต่ละขั้นตอนการสร้างลายวงจร  
บนแผ่นกระจกต้นแบบ

ขั้นตอนการผลิต $j$	จำนวนของ เครื่องจักร	อัตราการผลิต	การใช้ ประโยชน์	ค่า ผลิตผล	ผลผลิตรวมของแต่ละ ขั้นตอนการผลิต ในระยะเวลา 5 ปี
	$N_j$	$T_j$	$U_j$	$Y_j$	$N_j * T_j * U_j * Y_j$ $* 5 * 331 * 21$
	เครื่องจักร	แผ่น/ชั่วโมง/เครื่องจักร	เปอร์เซ็นต์	เปอร์เซ็นต์	แผ่น
1	9	0.11	90%	99%	30,873
2	2	0.50	90%	100%	31,185
3	6	0.14	90%	100%	26,730
4	1	5.88	90%	100%	183,441
5	5	0.18	90%	100%	28,350
6	1	0.91	90%	100%	28,350
7	1	5.88	90%	100%	183,441
8	1	10.00	90%	100%	311,850
9	1	2.00	90%	100%	62,370
10	1	10.00	90%	100%	311,850
11	1	2.00	90%	90%	56,133
12	1	2.00	90%	93%	58,004
13	1	2.00	90%	100%	62,370
14	5	0.17	90%	100%	25,988
15	2	0.50	90%	93%	29,002
16	1	1.00	90%	100%	31,185
17	1	4.00	90%	100%	124,740
18	1	2.00	90%	100%	62,370
19	5	0.17	90%	100%	25,988
20	1	2.00	90%	96%	59,875
21	1	4.00	90%	100%	124,740
22	1	4.00	90%	100%	124,740

ตารางผนวกที่ จ3 การคำนวณต้นทุนกระบวนการและต้นทุนวัตถุดิบของเครื่องจักรในแต่ละ  
ขั้นตอนการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกตัน

ขั้นตอน การผลิต	ต้นทุนรวมของเครื่องจักร	ผลผลิตรวมของแต่ละ ระดับขั้นตอนการผลิต ในระยะเวลา 5 ปี	ต้นทุน กระบวนการ ผลิต	ต้นทุน วัตถุดิบ
$j$	$N_j * (E0_j + D * Em_j)$	$N_j * T_j * U_j * Y_j$ $* 5 * 331 * 21$	$OH_j$	$DL_j$
	\$	แผ่น	\$ต่อแผ่น	\$ต่อแผ่น
1	562,500	25,988	21.65	4.33
2	250,000	25,988	9.62	1.92
3	825,000	25,988	31.75	6.35
4	362,500	25,988	13.95	2.79
5	137,500,000	25,988	5,291.01	1,058.20
6	2,750,000	25,988	105.82	21.16
7	362,500	25,988	13.95	2.79
8	362,500	25,988	13.95	2.79
9	875,000	25,988	33.67	6.73
10	1,000,000	25,988	38.48	7.70
11	2,000,000	25,988	76.96	15.39
12	2,250,000	25,988	86.58	17.32
13	750,000	25,988	28.86	5.77
14	97,500,000	25,988	3,751.80	750.36
15	12,500,000	25,988	481.00	96.20
16	19,500,000	25,988	750.36	150.07
17	750,000	25,988	28.86	5.77
18	750,000	25,988	28.86	5.77
19	97,500,000	25,988	3,751.80	750.36
20	6,250,000	25,988	240.50	48.10
21	19,500,000	25,988	750.36	150.07
22	31,250	25,988	1.20	0.24

ตารางผนวกที่ จ4 การคำนวณต้นทุนแรงงานในแต่ละขั้นตอนการสร้างลายวงจบบนแผ่น  
กระจกต้นแบบ

ขั้นตอน การผลิต	จำนวนของ เครื่องจักร	เวลาในการผลิต	ต้นทุนแรงงาน
		ชิ้นงานของ เครื่องจักร	
$j$	$N_j$	$Pt_j$	$N_j * Pt_j * 15.81$
	เครื่องจักร	ชั่วโมง/แผ่น/เครื่องจักร	\$ต่อแผ่น
1	9	9.00	1280.61
2	2	2.00	63.24
3	6	7.00	664.02
4	1	0.17	2.69
5	5	5.50	434.78
6	1	1.10	17.39
7	1	0.17	2.69
8	1	0.10	1.58
9	1	0.50	7.91
10	1	0.10	1.58
11	1	0.50	7.91
12	1	0.50	7.91
13	1	0.50	7.91
14	5	6.00	474.30
15	2	2.00	63.24
16	1	1.00	15.81
17	1	0.25	3.95
18	1	0.50	7.91
19	5	6.00	474.30
20	1	0.50	7.91
21	1	0.25	3.95
22	1	0.25	3.95

ตารางผนวกที่ จ5 ต้นทุนรวมในแต่ละขั้นตอนการสร้างलयวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบ

ขั้นตอนการผลิต $j$	ต้นทุน	ต้นทุนแรงงาน	ต้นทุน	ต้นทุนรวมของสร้างलय
	วัตถุดิบ		กระบวนการ	วงจร
	$Dl_j$	$Dm_j$	ผลิต	บนแผ่นกระจกต้นแบบ
	\$ต่อแผ่น	\$ต่อแผ่น	\$ต่อแผ่น	\$ต่อแผ่น
1	4.33	1280.61	21.65	1306.58
2	1.92	63.24	9.62	74.78
3	6.35	664.02	31.75	702.12
4	2.79	2.69	13.95	19.43
5	1,058.20	434.78	5,291.01	6783.98
6	21.16	17.39	105.82	144.38
7	2.79	2.69	13.95	19.43
8	2.79	1.58	13.95	18.32
9	6.73	7.91	33.67	48.31
10	7.70	1.58	38.48	47.76
11	15.39	7.91	76.96	100.26
12	17.32	7.91	86.58	111.80
13	5.77	7.91	28.86	42.54
14	750.36	474.30	3,751.80	4976.46
15	96.20	63.24	481.00	640.44
16	150.07	15.81	750.36	916.24
17	5.77	3.95	28.86	38.58
18	5.77	7.91	28.86	42.54
19	750.36	474.30	3,751.80	4976.46
20	48.10	7.91	240.50	296.51
21	150.07	3.95	750.36	904.39
22	0.24	3.95	1.20	5.40

### ภาคผนวก จ

ข้อมูลต้นทุนสำหรับกระบวนการสร้างลายวงจรในแต่ละขั้นตอนบนแผ่นซิลิกอนเทคนิคต่างๆ

ตารางผนวกที่ ๑1 การคำนวณต้นทุนรวมของเครื่องจักรในแต่ละขั้นตอนการสร้างลายวงจรบนแผ่นซิลิกอน

ขั้นตอนการผลิต	ต้นทุนของเครื่องจักร	ระยะเวลาของการเสื่อมของเครื่องจักร	ค่าบำรุงรักษาเครื่องจักรในเวลา 5 ปี	จำนวนของเครื่องจักร	ต้นทุนรวมของเครื่องจักร
$j$	$E0_j$ \$/ต่อเครื่องจักร	$D$ ปี	$D * Em_j$ \$/เครื่องจักร	$N_j$ เครื่องจักร	$N_j * (E0_j + D * Em_j)$ \$
1	290,000	5	72,500	2	720,524
2	15,000,000	5	3,750,000	2	44,516,504
3	290,000	5	72,500	4	1,337,110
4	290,000	5	72,500	2	720,524
5	1,400,000	5	350,000	4	7,022,859
6	800,000	5	200,000	2	1,965,940
7	1,600,000	5	400,000	4	7,863,762
8	1,800,000	5	450,000	4	8,827,573
9	15,600,000	5	3,900,000	4	73,936,864
10	600,000	5	150,000	2	1,480,841

ตารางผนวกที่ ๓2 การคำนวณผลผลิตรวมของเครื่องจักรในแต่ละขั้นตอนการสร้างลายวงจร  
บนแผ่นซิลิกอน

ขั้นตอนการผลิต $j$	จำนวนของ เครื่องจักร	อัตราการผลิต	การใช้ ประโยชน์	ค่า ผลิตผล	ผลผลิตรวมของแต่ละ ขั้นตอนการผลิตใน ระยะเวลา 5 ปี
	$N_j$	$T_j$	$U_j$	$Y_j$	$N_j * T_j * U_j * Y_j$ $* 5 * 331 * 21$
	เครื่องจักร	แผ่น/ชั่วโมง/เครื่องจักร	เปอร์เซ็นต์	เปอร์เซ็นต์	แผ่น
1	2	37	90%	100%	2,899,072
2	2	50	90%	62%	2,901,336
3	4	37	90%	98%	5,272,343
4	2	37	90%	100%	2,899,072
5	4	20	90%	93%	2,942,426
6	2	50	90%	93%	3,603,628
7	4	20	90%	100%	3,099,895
8	4	20	90%	95%	2,938,523
9	4	20	90%	100%	2,989,324
10	2	50	90%	100%	3,891,651

ตารางผนวกที่ ๓3 การคำนวณต้นทุนกระบวนการและต้นทุนวัตถุดิบของเครื่องจักรในแต่ละ  
ขั้นตอนการสร้างลายวงจบบนแผ่นซิลิกอน

ขั้นตอนการผลิต	ต้นทุนรวมของเครื่องจักร	ผลผลิตรวมของแต่ละขั้นตอนการผลิต ในระยะเวลา 5 ปี	ต้นทุนกระบวนการผลิต	ต้นทุนวัตถุดิบ
$j$	$N_j * (EO_j + D * Em_j)$	$N_j * T_j * U_j * Y_j$ $* 5 * 331 * 21$	$OH_j$	$DI_j$
	฿	แผ่น	฿ต่อแผ่น	฿ต่อแผ่น
1	720,524	2,899,072	0.25	0.05
2	44,516,504	2,901,336	15.36	3.07
3	1,337,110	5,272,343	0.46	0.09
4	720,524	2,899,072	0.25	0.05
5	7,022,859	2,942,426	2.42	0.48
6	1,965,940	3,603,628	0.68	0.14
7	7,863,762	3,099,895	2.71	0.54
8	8,827,573	2,938,523	3.04	0.61
9	73,936,864	2,989,324	25.50	5.10
10	1,480,841	3,891,651	0.51	0.10

ตารางผนวกที่ ๓4 การคำนวณต้นทุนแรงงานในแต่ละขั้นตอนการสร้างลายวงจรบนแผ่นซิลิกอน

ขั้นตอนการผลิต	จำนวนของเครื่องจักร	เวลาในการผลิตชิ้นงานของเครื่องจักร	ต้นทุนแรงงาน
$j$	$N_j$	$Pt_j$	$N_j * Pt_j * 15.81$
	เครื่องจักร	ชั่วโมง/แผ่น/เครื่องจักร	฿ต่อแผ่น
1	2	0.027	0.85
2	2	0.020	0.75
3	4	0.027	1.58
4	2	0.027	0.85
5	4	0.050	3.17
6	2	0.020	0.62
7	4	0.050	3.11
8	4	0.050	3.10
9	4	0.050	3.00
10	2	0.020	0.62

ตารางผนวกที่ ๓5 ต้นทุนรวมในแต่ละขั้นตอนการสร้างลายวงจรบนแผ่นซิลิกอน

ขั้นตอนการผลิต $j$	ต้นทุน วัตถุดิบ	ต้นทุนแรงงาน	ต้นทุน กระบวนการ ผลิต	ต้นทุนรวมของสร้างลาย วงจร บนแผ่นซิลิกอน
	$Dl_j$	$Dm_j$	$OH_j$	$C_4$
	\$ต่อแผ่น	\$ต่อแผ่น	\$ต่อแผ่น	\$ต่อแผ่น
1	0.05	0.85	0.25	1.15
2	3.07	0.75	15.36	19.18
3	0.09	1.58	0.46	2.13
4	0.05	0.85	0.25	1.15
5	0.48	3.17	2.42	6.08
6	0.14	0.62	0.68	1.44
7	0.54	3.11	2.71	6.36
8	0.61	3.10	3.04	6.76
9	5.10	3.00	25.50	33.60
10	0.10	0.62	0.51	1.24

**ภาคผนวก ข**

รหัสของขั้นตอนการผลิตแผ่นกระจกต้นแบบลำดับชั้นต่างๆสำหรับการสร้าง  
โครงสร้างจุดภาค 3 มิติ

ตารางผนวกที่ ข1 รหัสของขั้นตอนการผลิตในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ลำดับชั้นต่างๆ  
ในกระบวนการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสง  
ไบนารีที่มีลายวงจรหนึ่งชั้น

ขั้นตอนการผลิต $j$	จำนวนชั้นของ โครงสร้างจุลภาค 3 มิติ				
	$k$				
	1 ชั้น	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	5 ชั้น
1	1	2	3	4	5
2	1	2	3	4	5
3	1	2	3	4	5
4	1	2	3	4	5
5	1	2	3	4	5
6	0	0	0	0	0
7	1	2	3	4	5
8	1	2	3	4	5
9	1	2	3	4	5
10	1	2	3	4	5
11	1	2	3	4	5
12	1	2	3	4	5
13	1	2	3	4	5
14	1	2	3	4	5
15	1	2	3	4	5
16	1	2	3	4	5
17	1	2	3	4	5
18	1	2	3	4	5
19	1	2	3	4	5
20	1	2	3	4	5
21	1	2	3	4	5
22	1	2	3	4	5

ตารางผนวกที่ ข2 รหัสของขั้นตอนการผลิตในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ลำดับชั้นต่างๆ  
 ในกระบวนการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสง  
 โบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น

ขั้นตอนการผลิต $j$	จำนวนชั้นของ โครงสร้างจุลภาค 3 มิติ				
	$k$				
	1 ชั้น	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	5 ชั้น
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1
6	0	0	0	0	0
7	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1
13	1	1	1	1	1
14	1	1	1	1	1
15	1	1	1	1	1
16	1	1	1	1	1
17	1	1	1	1	1
18	1	1	1	1	1
19	1	1	1	1	1
20	1	1	1	1	1
21	1	1	1	1	1
22	1	1	1	1	1

ตารางผนวกที่ ข3 รหัสของขั้นตอนการผลิตในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ลำดับชั้นต่างๆ  
ในกระบวนการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล

ขั้นตอนการผลิต $j$	จำนวนชั้นของ โครงสร้างจุลภาค 3 มิติ				
	$k$				
	1 ชั้น	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	5 ชั้น
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1
7	0	0	0	0	0
8	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1
13	1	1	1	1	1
14	1	1	1	1	1
15	1	1	1	1	1
16	1	1	1	1	1
17	1	1	1	1	1
18	1	1	1	1	1
19	1	1	1	1	1
20	1	1	1	1	1
21	1	1	1	1	1
22	1	1	1	1	1

ตารางผนวกที่ ๒4 รหัสของขั้นตอนการผลิตในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ลำดับชั้นต่างๆ  
ในกระบวนการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้น  
ฟิล์มหลายระดับ

ขั้นตอนการผลิต $j$	จำนวนชั้นของ โครงสร้างจุลภาค 3 มิติ				
	$k$				
	1 ชั้น	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	5 ชั้น
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1
5	1	2	3	4	5
6	0	0	0	0	0
7	1	2	3	4	5
8	1	2	3	4	5
9	1	2	3	4	5
10	1	2	3	4	5
11	1	2	3	4	5
12	1	1	1	1	1
13	1	1	1	1	1
14	1	1	1	1	1
15	1	1	1	1	1
16	1	1	1	1	1
17	1	1	1	1	1
18	1	1	1	1	1
19	1	1	1	1	1
20	1	1	1	1	1
21	1	1	1	1	1
22	1	1	1	1	1

ตารางผนวกที่ ๗5 รหัสของขั้นตอนการผลิตในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ลำดับชั้นต่างๆ  
 ในกระบวนการสร้างลายวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้น  
 ฟิล์มหลายระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสง

ขั้นตอนการผลิต $j$	จำนวนชั้นของ โครงสร้างจุลภาค 3 มิติ				
	$k$				
	1 ชั้น	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	5 ชั้น
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1
6	0	0	0	0	0
7	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1
13	1	1	1	1	1
14	1	1	1	1	1
15	1	1	1	1	1
16	1	1	1	1	1
17	1	1	1	1	1
18	1	1	1	1	1
19	1	1	1	1	1
20	1	1	1	1	1
21	1	1	1	1	1
22	1	1	1	1	1

**ภาคผนวก ข**

ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิตขั้นตอนนี้ในการสร้างลายวงจบบนแผ่นกระจกต้นแบบ  
ประเภทต่างๆ

**ตารางผนวกที่ ข1** ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิตขั้นตอนต่างๆ ในการสร้างลายวงจรมบน  
แผ่นกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไปนารีที่มีลายวงจรมหนึ่งชั้น ที่ลำดับ  
ชั้นของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น

ขั้นตอนการผลิต $j$	ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิต				
	$C_i$ (\$/แผ่น)				
	1 ชั้น	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	5 ชั้น
แผ่นกระจกต้นแบบเปล่า	7,700.00	15,400.00	23,100.00	30,800.00	38,500.00
1	1,306.58	2,613.17	3,919.75	5,226.34	6,532.92
2	74.78	149.57	224.35	299.14	373.92
3	702.12	1,404.23	2,106.35	2,808.46	3,510.58
4	19.43	38.85	58.28	77.71	97.13
5	-	-	-	-	-
6	144.38	288.75	433.13	577.50	721.88
7	19.43	38.85	58.28	77.71	97.13
8	18.32	36.64	54.96	73.28	91.60
9	48.31	96.62	144.93	193.24	241.55
10	47.76	95.51	143.27	191.03	238.79
11	100.26	200.51	300.77	401.03	501.29
12	111.80	223.60	335.40	447.20	559.01
13	42.54	85.07	127.61	170.15	212.69
14	4,976.46	9,952.93	14,929.39	19,905.86	24,882.32
15	640.44	1,280.88	1,921.32	2,561.76	3,202.20
16	916.24	1,832.49	2,748.73	3,664.97	4,581.21
17	38.58	77.17	115.75	154.34	192.92
18	42.54	85.07	127.61	170.15	212.69
19	4,976.46	9,952.93	14,929.39	19,905.86	24,882.32
20	296.51	593.01	889.52	1,186.02	1,482.53
21	904.39	1,808.77	2,713.16	3,617.54	4,521.93
22	5.40	10.79	16.19	21.58	26.98

ตารางผนวกที่ ข2 ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิตขั้นตอนต่างๆ ในการสร้างลายวงจรมบน  
แผ่นกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงโบนารีที่มีลายวงจรมหลายชั้น ที่ลำดับ  
ขั้นของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ขั้น

ขั้นตอนการผลิต $j$	ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิต				
	$C_i$ (\$/แผ่น)				
	1 ขั้น	2 ขั้น	3 ขั้น	4 ขั้น	5 ขั้น
แผ่นกระจกต้นแบบเปล่า	7,700.00	15,400.00	23,100.00	30,800.00	38,500.00
1	1,306.58	2,613.17	3,919.75	5,226.34	6,532.92
2	74.78	149.57	224.35	299.14	373.92
3	702.12	1,404.23	2,106.35	2,808.46	3,510.58
4	19.43	38.85	58.28	77.71	97.13
5	-	-	-	-	-
6	144.38	288.75	433.13	577.50	721.88
7	19.43	38.85	58.28	77.71	97.13
8	18.32	36.64	54.96	73.28	91.60
9	48.31	96.62	144.93	193.24	241.55
10	47.76	95.51	143.27	191.03	238.79
11	100.26	200.51	300.77	401.03	501.29
12	111.80	223.60	335.40	447.20	559.01
13	42.54	85.07	127.61	170.15	212.69
14	4,976.46	9,952.93	14,929.39	19,905.86	24,882.32
15	640.44	1,280.88	1,921.32	2,561.76	3,202.20
16	916.24	1,832.49	2,748.73	3,664.97	4,581.21
17	38.58	77.17	115.75	154.34	192.92
18	42.54	85.07	127.61	170.15	212.69
19	4,976.46	9,952.93	14,929.39	19,905.86	24,882.32
20	296.51	593.01	889.52	1,186.02	1,482.53
21	904.39	1,808.77	2,713.16	3,617.54	4,521.93
22	5.40	10.79	16.19	21.58	26.98

ตารางผนวกที่ ข3 ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิตขั้นตอนต่างๆ ในการสร้างลายวงจรบน  
แผ่น กระจกคั่นแบบชนิดเกรย์สเกล ที่ลำดับชั้นของ โครงสร้างจุลภาค 3 มิติ  
ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น

ขั้นตอนการผลิต $j$	ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิต				
	$C_i$ (\$/แผ่น)				
	1 ชั้น	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	5 ชั้น
แผ่นกระจกคั่นแบบเปล่า	7,700.00	7,700.00	7,700.00	7,700.00	7,700.00
1	1,306.58	1,306.58	1,306.58	1,306.58	1,306.58
2	74.78	74.78	74.78	74.78	74.78
3	702.12	702.12	702.12	702.12	702.12
4	19.43	19.43	19.43	19.43	19.43
5	6,783.98	6,783.98	6,783.98	6,783.98	6,783.98
6	-	-	-	-	-
7	19.43	19.43	19.43	19.43	19.43
8	18.32	18.32	18.32	18.32	18.32
9	48.31	48.31	48.31	48.31	48.31
10	47.76	47.76	47.76	47.76	47.76
11	100.26	100.26	100.26	100.26	100.26
12	111.80	111.80	111.80	111.80	111.80
13	42.54	42.54	42.54	42.54	42.54
14	4,976.46	4,976.46	4,976.46	4,976.46	4,976.46
15	640.44	640.44	640.44	640.44	640.44
16	916.24	916.24	916.24	916.24	916.24
17	38.58	38.58	38.58	38.58	38.58
18	42.54	42.54	42.54	42.54	42.54
19	4,976.46	4,976.46	4,976.46	4,976.46	4,976.46
20	296.51	296.51	296.51	296.51	296.51
21	904.39	904.39	904.39	904.39	904.39
22	5.40	5.40	5.40	5.40	5.40

**ตารางผนวกที่ ข4** ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิตขั้นตอนต่างๆ ในการสร้างลายวงจรบน  
แผ่นกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ ที่ลำดับชั้นของ  
โครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น

ขั้นตอนการผลิต $j$	ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิต				
	$C_i$ (\$/แผ่น)				
	1 ชั้น	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	5 ชั้น
แผ่นกระจกต้นแบบเปล่า	7,700.00	7,700.00	7,700.00	7,700.00	7,700.00
1	1,306.58	1,306.58	1,306.58	1,306.58	1,306.58
2	74.78	74.78	74.78	74.78	74.78
3	702.12	702.12	702.12	702.12	702.12
4	19.43	38.85	58.28	77.71	97.13
5	-	-	-	-	-
6	144.38	288.75	433.13	577.50	721.88
7	19.43	38.85	58.28	77.71	97.13
8	18.32	36.64	54.96	73.28	91.60
9	48.31	96.62	144.93	193.24	241.55
10	47.76	95.51	143.27	191.03	238.79
11	100.26	100.26	100.26	100.26	100.26
12	111.80	111.80	111.80	111.80	111.80
13	42.54	42.54	42.54	42.54	42.54
14	4,976.46	4,976.46	4,976.46	4,976.46	4,976.46
15	640.44	640.44	640.44	640.44	640.44
16	916.24	916.24	916.24	916.24	916.24
17	38.58	38.58	38.58	38.58	38.58
18	42.54	42.54	42.54	42.54	42.54
19	4,976.46	4,976.46	4,976.46	4,976.46	4,976.46
20	296.51	296.51	296.51	296.51	296.51
21	904.39	904.39	904.39	904.39	904.39
22	5.40	5.40	5.40	5.40	5.40

ตารางผนวกที่ ข5 ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิตขั้นตอนต่างๆ ในการสร้างลายวงจรบนแผ่น กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับที่สร้างด้วยการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสง ที่ลำดับขั้นของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น

ขั้นตอนการผลิต $j$	ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิต				
	$C_i$ (\$/แผ่น)				
	1 ชั้น	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	5 ชั้น
แผ่นกระจกต้นแบบเปล่า	7,700.00	7,700.00	7,700.00	7,700.00	7,700.00
1	1,306.58	1,306.58	1,306.58	1,306.58	1,306.58
2	74.78	74.78	74.78	74.78	74.78
3	702.12	702.12	702.12	702.12	702.12
4	19.43	19.43	19.43	19.43	19.43
5	6,783.98	6,783.98	6,783.98	6,783.98	6,783.98
6	-	-	-	-	-
7	19.43	19.43	19.43	19.43	19.43
8	18.32	18.32	18.32	18.32	18.32
9	48.31	48.31	48.31	48.31	48.31
10	47.76	47.76	47.76	47.76	47.76
11	100.26	100.26	100.26	100.26	100.26
12	111.80	111.80	111.80	111.80	111.80
13	42.54	42.54	42.54	42.54	42.54
14	4,976.46	4,976.46	4,976.46	4,976.46	4,976.46
15	640.44	640.44	640.44	640.44	640.44
16	916.24	916.24	916.24	916.24	916.24
17	38.58	38.58	38.58	38.58	38.58
18	42.54	42.54	42.54	42.54	42.54
19	4,976.46	4,976.46	4,976.46	4,976.46	4,976.46
20	296.51	296.51	296.51	296.51	296.51
21	904.39	904.39	904.39	904.39	904.39
22	5.40	5.40	5.40	5.40	5.40

**ภาคผนวก ญ**

รหัสของขั้นตอนการผลิตสร้างโครงสร้างจุดภาค 3 มิติ ลงบนแผ่นซิลิกอน

ตารางผนวกที่ ๑1 รหัสของขั้นตอนการผลิตในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ลำดับชั้น  
ต่างๆ ในกระบวนการสร้างลายวงจรบนแผ่นซิลิกอน ด้วยเทคนิคการฉาย  
แสงหนึ่งครั้งเพื่อสร้างลายวงจรเพียงหนึ่งชั้นในการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียว

ขั้นตอนการผลิต $j$	จำนวนชั้นของ โครงสร้างจุลภาค 3 มิติ				
	$k$				
	1 ชั้น	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	5 ชั้น
1	1	2	3	4	5
2	1	2	3	4	5
3	1	2	3	4	5
4	1	2	3	4	5
5	1	2	3	4	5
6	1	2	3	4	5
7	1	2	3	4	5
8	1	2	3	4	5
9	1	2	3	4	5
10	1	2	3	4	5

ตารางผนวกที่ ๒ รหัสของขั้นตอนการผลิตในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ลำดับชั้น  
 ต่างๆ ในกระบวนการสร้างลายวงจรบนแผ่นซิลิกอน ด้วยเทคนิคการฉาย  
 แสงเพียงหนึ่งครั้งเพื่อสร้างลายวงจรหลายชั้นในการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียว

ขั้นตอนการผลิต $j$	จำนวนชั้นของ โครงสร้างจุลภาค 3 มิติ				
	$k$				
	1 ชั้น	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	5 ชั้น
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1

ตารางผนวกที่ ๓ รหัสของขั้นตอนการผลิตในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ลำดับชั้น  
 ต่างๆ ในกระบวนการสร้างลายวงจรบนแผ่นซิลิกอน ด้วยเทคนิคการฉาย  
 แสงหลายครั้งเพื่อสร้างลายวงจรหลายชั้นในการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียว

ขั้นตอนการผลิต $j$	จำนวนชั้นของ โครงสร้างจุลภาค 3 มิติ				
	$k$				
	1 ชั้น	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	5 ชั้น
1	1	1	1	1	1
2	1	2	3	4	5
3	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1

### ภาคผนวก ก

ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิตขั้นตอนต่างๆในการสร้างलयวงจรบนแผ่นกระจกต้นแบบและบน  
แผ่นซิลิกอนเพื่อสร้าง โครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น

**ตารางผนวกที่ ๑** ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิตขั้นตอนต่างๆ ในการสร้างลายวงจบบนแผ่นซิลิกอนเพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น โดยเทคนิคการฉายแสงหนึ่งครั้งเพื่อสร้างลายวงจรเพียงหนึ่งชั้นในการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียว

ขั้นตอนการผลิต $j$	ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิต				
	$C_i$ (\$/แผ่น)				
	1 ชั้น	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	5 ชั้น
แผ่นซิลิกอนเปล่า	300	300	300	300	300
1	1.15	2.30	3.44	4.59	5.74
2	19.18	38.35	57.53	76.71	95.89
3	2.13	4.26	6.39	8.52	10.65
4	1.15	2.30	3.44	4.59	5.74
5	6.08	12.16	18.24	24.32	30.40
6	1.44	2.87	4.31	5.74	7.18
7	6.36	12.73	19.09	25.45	31.82
8	6.76	13.51	20.27	27.02	33.78
9	33.60	67.20	100.80	134.41	168.01
10	1.24	2.47	3.71	4.95	6.19

ตารางผนวกที่ ๒ ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิตขั้นตอนต่างๆ ในการสร้างลายวงจรบนแผ่นซิลิกอนเพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น โดยเทคนิคการฉายแสงเพียงหนึ่งครั้งเพื่อสร้างลายวงจรหลายชั้นในการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียว

ขั้นตอนการผลิต $j$	ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิต				
	$C_i$ (\$/แผ่น)				
	1 ชั้น	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	5 ชั้น
แผ่นซิลิกอนเปล่า	300	300	300	300	300
1	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
2	19.18	19.18	19.18	19.18	19.18
3	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13
4	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
5	6.08	6.08	6.08	6.08	6.08
6	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44
7	6.36	6.36	6.36	6.36	6.36
8	6.76	6.76	6.76	6.76	6.76
9	33.60	33.60	33.60	33.60	33.60
10	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24

ตารางผนวกที่ ๓ ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิตชั้นตอนต่างๆ ในการสร้างลายวงจรรบนแผ่นซิลิกอนเพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น โดยเทคนิคการฉายแสงหลายครั้งเพื่อสร้างลายวงจรมากมายชั้นในการกัดลายวงจรรเพียงครั้งเดียว

ขั้นตอนการผลิต $j$	ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิต				
	$C_i$ (\$/แผ่น)				
	1 ชั้น	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	5 ชั้น
แผ่นซิลิกอนเปล่า	300	300	300	300	300
1	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
2	19.18	38.35	57.53	76.71	95.89
3	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13
4	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
5	6.08	6.08	6.08	6.08	6.08
6	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44
7	6.36	6.36	6.36	6.36	6.36
8	6.76	6.76	6.76	6.76	6.76
9	33.60	33.60	33.60	33.60	33.60
10	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24

ตารางผนวกที่ ๓๔ ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิตแผ่นกระจกต้นแบบหนึ่งแผ่นเพื่อสร้าง  
โครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ที่ลำดับชั้นที่ 1 ถึง ชั้นที่ 5 สำหรับกระจกต้นแบบ  
ประเภทต่างๆ

ประเภทของกระจกต้นแบบ	ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิตแผ่นกระจก ต้นแบบ				
	$(C_1 + C_2)/10000$ (\$/แผ่นซิลิกอน)				
	1 ชั้น	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	5 ชั้น
1. กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงโบนารีที่มีลายวงจรหนึ่งชั้น	2.31	4.63	6.94	9.25	11.57
2. กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงโบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31
3. กระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล	2.98	2.98	2.98	2.98	2.98
4. กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ	2.31	2.34	2.37	2.40	2.43
5. กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสง	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31

ตารางผนวกที่ ๕ ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิตลายวงจบบนแผ่นซิลิกอนหนึ่งแผ่นเพื่อ  
สร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ที่ลำดับชั้นที่ 1 ถึง ชั้นที่ 5 สำหรับเทคนิคการ  
ถ่ายแบบลายวงจประเภทต่างๆ

ประเภทของเทคนิค การถ่ายแบบลายวงจร	ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิตโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ บนแผ่นซิลิกอน				
	$C_3 + C_4$ (\$/แผ่นซิลิกอน)				
	1 ชั้น	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	5 ชั้น
1. การฉายแสงหนึ่งครั้งเพื่อสร้างลาย วงจรเพียงหนึ่งชั้นในการกัดลายวงจร เพียงครั้งเดียว	379.07	458.15	537.22	616.30	695.37
2. การฉายแสงเพียงหนึ่งครั้งเพื่อสร้าง ลายวงจรหลายชั้นในการกัดลายวงจร เพียงครั้งเดียว	379.07	379.07	379.07	379.07	379.07
3. การฉายแสงหลายครั้งเพื่อสร้างลาย วงจรหลายชั้นในการกัดลายวงจรเพียง ครั้งเดียว	379.07	398.25	417.43	436.61	455.78

ตารางผนวกที่ ๖ ต้นทุนรวมในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ต่อแผ่นซิลิกอนสำหรับ  
เทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรประเภทต่างๆ

ประเภทของเทคนิคการถ่ายแบบลายวงจร	ต้นทุนรวมของกระบวนการผลิตโครงสร้าง จุลภาค 3 มิติ ต่อแผ่นซิลิกอน				
	((C <sub>1</sub> + C <sub>2</sub> )/10000) + (C <sub>3</sub> + C <sub>4</sub> ) (\$/แผ่นซิลิกอน)				
	1 ชั้น	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	5 ชั้น
1. การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจก ต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลาย วงจรหนึ่งชั้น	381.39	462.77	544.16	625.55	706.94
2. การถ่ายแบบลายวงจรด้วย กระจกต้นแบบชนิด ความเข้มแสงไบนารีที่มีลายวงจรหลายชั้น	381.39	460.46	539.54	618.61	697.68
3. การถ่ายแบบลายวงจรด้วยการ ปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสงด้วยกระจก ต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลาย วงจรหลายชั้น	381.39	400.56	419.74	438.92	458.10
4. การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจก ต้นแบบชนิดเกรย์สเกล	382.05	382.05	382.05	382.05	382.05
5. การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจก ต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลาย ระดับ	381.39	381.42	381.45	381.48	381.51
6. การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจก ต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลาย ระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่า พลังงานแสง	381.39	381.39	381.39	381.39	381.39

### ภาคผนวก ก

การคำนวณเวลาในกระบวนการผลิตขั้นตอนต่างๆ ในการสร้างลายวงจบบนแผ่นกระจกต้นแบบ  
และบนแผ่นซิลิกอน เพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น

ตารางผนวกที่ ๑1 เวลาการสร้างลายวงจรลงบนแผ่นกระจกต้นแบบสำหรับเครื่องจักรทุกตัวใน  
แต่ละขั้นตอนการผลิต

ขั้นตอน การผลิต	อัตราการผลิตของ เครื่องจักรแต่ละตัว	จำนวน เครื่องจักร	เวลาการสร้างลายวงจรบนกระจก ต้นแบบสำหรับเครื่องจักรทุกตัว
$j$	$T_j$ แผ่นต่อชั่วโมงต่อ เครื่องจักร	$N_j$ เครื่องจักร	$t_j = 1/(T_j * N_j)$ ชั่วโมงต่อแผ่น
1	0.1	9	1.00
2	0.5	2	1.00
3	0.1	6	1.17
4	5.9	1	0.17
5	0.2	5	1.10
6	0.9	1	1.10
7	5.9	1	0.17
8	10.0	1	0.10
9	2.0	1	0.50
10	10.0	1	0.10
11	2.0	1	0.50
12	2.0	1	0.50
13	2.0	1	0.50
14	0.2	5	1.20
15	0.5	2	1.00
16	1.0	1	1.00
17	4.0	1	0.25
18	2.0	1	0.50
19	0.2	5	1.20
20	2.0	1	0.50
21	4.0	1	0.25
22	4.0	1	0.25

ตารางผนวกที่ ๒ เวลาการสร้างลายวงจรบนแผ่นซิลิกอนสำหรับเครื่องจักรทุกตัวในแต่ละ  
ขั้นตอนการผลิต

ขั้นตอน การผลิต	อัตราการผลิตของ เครื่องจักรแต่ละตัว	จำนวน เครื่องจักร	เวลาการสร้างลายวงจรบนแผ่น ซิลิกอนสำหรับเครื่องจักรทุกตัว
$j$	$T_j$ แผ่นต่อชั่วโมงต่อ เครื่องจักร	$N_j$ เครื่องจักร	$t_j = 1/(T_j * N_j)$ ชั่วโมงต่อแผ่น
1	37	2	0.014
2	50	2	0.008
3	37	4	0.007
4	37	2	0.014
5	20	4	0.012
6	50	2	0.010
7	20	4	0.013
8	20	4	0.013
9	20	4	0.013
10	50	2	0.010

ตารางผนวกที่ ๓ เวลารวมของกระบวนการผลิตขั้นตอนต่างๆ ในการสร้างลายวงจบบนแผ่น  
 กระจกตันแบบชนิดความเข้มแสงไปนารีที่มีลายวงจรถนึ่งชั้น ที่ลำดับชั้น  
 ของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น

ขั้นตอนการผลิต $j$	เวลารวมของกระบวนการผลิต				
	(ชั่วโมงต่อแผ่นกระจกตันแบบ)				
	1 ชั้น	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	5 ชั้น
แผ่นกระจกตันแบบเปล่า	-	-	-	-	-
1	-	-	-	-	-
2	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
3	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
4	1.17	2.33	3.50	4.67	5.83
5	0.17	0.34	0.51	0.68	0.85
6	-	-	-	-	-
7	1.10	2.20	3.30	4.40	5.50
8	0.17	0.34	0.51	0.68	0.85
9	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
10	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
11	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
12	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
13	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
14	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
15	1.20	2.40	3.60	4.80	6.00
16	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
17	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
18	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25
19	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
20	1.20	2.40	3.60	4.80	6.00
21	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
22	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25

ตารางผนวกที่ ๓4 เวลารวมของกระบวนการผลิตขั้นตอนต่างๆ ในการสร้างลายวงจบบนแผ่น  
 กระจกตันแบบชนิดความเข้มแสงไปนารีที่มีลายวงจรมากมายชั้น ที่ลำดับชั้น  
 ของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น

ขั้นตอนการผลิต $j$	เวลารวมของกระบวนการผลิต				
	(ชั่วโมงต่อแผ่นกระจกตันแบบ)				
	1 ชั้น	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	5 ชั้น
แผ่นกระจกตันแบบเปล่า	-	-	-	-	-
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
4	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
5	-	-	-	-	-
6	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
7	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
8	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
9	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
11	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
12	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
13	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
14	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
15	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
16	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
17	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
18	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
19	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
20	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
21	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
22	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25

ตารางผนวกที่ ๕ เวลารวมของกระบวนการผลิตชั้นตอนต่างๆ ในการสร้างลายวงจบบนแผ่น  
 กระจกตันแบบชนิดเกรย์สเกล ที่ลำดับชั้นของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่  
 1 ถึง 5 ชั้น

ขั้นตอนการผลิต $j$	เวลารวมของกระบวนการผลิต				
	(ชั่วโมงต่อแผ่นกระจกตันแบบ)				
	1 ชั้น	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	5 ชั้น
แผ่นกระจกตันแบบเปล่า	-	-	-	-	-
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
4	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
5	-	-	-	-	-
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
8	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
9	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
11	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
12	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
13	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
14	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
15	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
16	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
17	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
18	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
19	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
20	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
21	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
22	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25

ตารางผนวกที่ ๖ เวลารวมของกระบวนการผลิตขั้นตอนต่างๆ ในการสร้างลายวงจรบนแผ่น  
กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ ที่ลำดับชั้นของ  
โครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น

ขั้นตอนการผลิต $j$	เวลารวมของกระบวนการผลิต				
	(ชั่วโมงต่อแผ่นกระจกต้นแบบ)				
	1 ชั้น	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	5 ชั้น
แผ่นกระจกต้นแบบเปล่า	-	-	-	-	-
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
4	0.17	0.34	0.51	0.68	0.85
5	-	-	-	-	-
6	1.10	2.20	3.30	4.40	5.50
7	0.17	0.34	0.51	0.68	0.85
8	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
9	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
10	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
11	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
12	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
13	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
14	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
15	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
16	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
17	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
18	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
19	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
20	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
21	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
22	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25

ตารางผนวกที่ ๗7 เวลารวมของกระบวนการผลิตขั้นตอนต่างๆ ในการสร้างลายวงจบบนแผ่น  
 กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ ด้วยการปรับเปลี่ยนค่า  
 พลังงานแสง ที่ลำดับชั้นของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น

ขั้นตอนการผลิต $j$	เวลารวมของกระบวนการผลิต (ชั่วโมงต่อแผ่นกระจกต้นแบบ)				
	1 ชั้น	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	5 ชั้น
	แผ่นกระจกต้นแบบเปล่า	-	-	-	-
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
4	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
5	-	-	-	-	-
6	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
7	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
8	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
9	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
11	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
12	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
13	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
14	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
15	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
16	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
17	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
18	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
19	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
20	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
21	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
22	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25

**ตารางผนวกที่ ๘** เวลารวมของกระบวนการผลิตชั้นตอนต่างๆ ในการสร้างลายวงจบบนแผ่นซิลิกอน ที่ลำดับชั้นของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น โดยเทคนิคการฉายแสงหนึ่งครั้ง เพื่อสร้างลายวงจรถือเพียงหนึ่งชั้นในการกัดลายวงจรถือเพียงครั้งเดียว

ขั้นตอนการผลิต $j$	เวลารวมของกระบวนการผลิต				
	(ชั่วโมงต่อแผ่นซิลิกอน)				
	1 ชั้น	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	5 ชั้น
แผ่นซิลิกอนเปล่า	-	-	-	-	-
1	0.014	0.027	0.041	0.054	0.068
2	0.008	0.017	0.025	0.034	0.042
3	0.007	0.015	0.022	0.029	0.037
4	0.014	0.027	0.041	0.054	0.068
5	0.012	0.025	0.037	0.050	0.062
6	0.010	0.020	0.031	0.041	0.051
7	0.013	0.025	0.038	0.051	0.064
8	0.013	0.025	0.038	0.051	0.064
9	0.013	0.026	0.040	0.053	0.066
10	0.010	0.020	0.030	0.041	0.051

**ตารางผนวกที่ 9** เวลารวมของกระบวนการผลิตชั้นตอนต่างๆ ในการสร้างลายวงจรบนแผ่นซิลิกอน ที่ลำดับชั้นของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น โดยเทคนิคการฉายแสงหนึ่งครั้ง เพื่อสร้างลายวงจรหลายชั้นในการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียว

ชั้นตอนการผลิต $j$	เวลารวมของกระบวนการผลิต (ชั่วโมงต่อแผ่นซิลิกอน)				
	1 ชั้น	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	5 ชั้น
	แผ่นซิลิกอนเปล่า	-	-	-	-
1	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014
2	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
3	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
4	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014
5	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
6	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
7	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013
8	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013
9	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013
10	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010

**ตารางผนวกที่ 10** เวลารวมของกระบวนการผลิตขั้นตอนต่างๆ ในการสร้างลายวงจรบนแผ่นซิลิกอน ที่ลำดับชั้นของโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น โดยเทคนิคการฉายแสงหลายครั้งเพื่อสร้างลายวงจรหลายชั้นในการกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียว

ขั้นตอนการผลิต $j$	เวลารวมของกระบวนการผลิต				
	(ชั่วโมงต่อแผ่นซิลิกอน)				
	1 ชั้น	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	5 ชั้น
แผ่นซิลิกอนเปล่า	-	-	-	-	-
1	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014
2	0.008	0.017	0.025	0.034	0.042
3	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
4	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014
5	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
6	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
7	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013
8	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013
9	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013
10	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010

**ตารางผนวกที่ ๑๑** เวลารวมในการสร้างลายวงจรลงบนแผ่นกระจกตันแบบต่อแผ่นซีลิกอน  
10,000 แผ่น สำหรับการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ที่มีจำนวนชั้น  
ตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น

	$t_1$ (ชั่วโมงต่อแผ่นกระจกตันแบบ)				
	1 ชั้น	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	5 ชั้น
1. กระจกตันแบบชนิดความเข้มแสงไป นารีที่มีลายวงจรหนึ่งชั้น	12.96	25.91	38.87	51.83	64.78
2. กระจกตันแบบชนิดความเข้มแสงไป นารีที่มีลายวงจรหลายชั้น	12.96	25.91	38.87	51.83	64.78
3. กระจกตันแบบชนิดเกรย์สเกล	11.86	11.86	11.86	11.86	11.86
4. กระจกตันแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์ม หลายระดับ	12.96	15.10	17.24	19.38	21.52
5. กระจกตันแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์ม หลายระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่า พลังงานแสง	12.96	12.96	12.96	12.96	12.96

ตารางผนวกที่ ๑๒ เวลารวมในการสร้างลายวงจรลงบนแผ่นซิลิกอนสำหรับการสร้าง  
โครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ที่มีจำนวนชั้นตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น

ประเภทของเทคนิค การถ่ายแบบลายวงจร	เวลารวมในการสร้างลายวงจรบนแผ่นซิลิกอน				
	$t_2$ (ชั่วโมงต่อแผ่นซิลิกอน)				
	1 ชั้น	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	5 ชั้น
1. การฉายแสงหนึ่งครั้งเพื่อสร้างลาย วงจรเพียงหนึ่งชั้นในการกัดลายวงจร เพียงครั้งเดียว	0.114	0.229	0.343	0.457	0.572
2. การฉายแสงเพียงหนึ่งครั้งเพื่อสร้าง ลายวงจรหลายชั้นในการกัดลายวงจร เพียงครั้งเดียว	0.114	0.123	0.131	0.140	0.148
3. การฉายแสงหลายครั้งเพื่อสร้างลาย วงจรหลายชั้นในการกัดลายวงจรเพียง ครั้งเดียว	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114

**ตารางผนวกที่ ๑๓** เวลารวมในการสร้างลายวงจรลงบนแผ่นกระจกตันแบบต่อแผ่นซิลิกอน  
หนึ่งแผ่น สำหรับการสร้าง โครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ที่มีจำนวนชั้นตั้งแต่ 1  
ถึง 5 ชั้น

ประเภทของกระจกตันแบบ	เวลารวมในการสร้างลายวงจร บนแผ่นกระจกตันแบบ				
	$t_1 / 10000$ (ชั่วโมงต่อแผ่นซิลิกอน)				
	1 ชั้น	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	5 ชั้น
1. กระจกตันแบบชนิดความเข้มแสงไป นารีที่มีลายวงจรหนึ่งชั้น	0.0013	0.0026	0.0039	0.0052	0.0065
2. กระจกตันแบบชนิดความเข้มแสงไป นารีที่มีลายวงจรหลายชั้น	0.0013	0.0026	0.0039	0.0052	0.0065
3. กระจกตันแบบชนิดเกรย์สเกล	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012
4. กระจกตันแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์ม หลายระดับ	0.0013	0.0015	0.0017	0.0019	0.0022
5. กระจกตันแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์ม หลายระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่า พลังงานแสง	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013

ตารางผนวกที่ ๑๔ เวลารวมในการสร้างโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ สำหรับเทคนิคการถ่ายภาพ  
ลายวงจรประเภทต่างๆ

ประเภทของเทคนิคการถ่ายภาพลายวงจร	เวลารวมของกระบวนการผลิตโครงสร้าง จุลภาค 3 มิติ ต่อแผ่นซิลิกอน				
	$(t_1 / 10000) + t_2$ (ชั่วโมง/แผ่นซิลิกอน)				
	1 ชั้น	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น	5 ชั้น
1. การถ่ายภาพลายวงจรด้วยกระจก ต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลาย วงจรหนึ่งชั้น	0.116	0.231	0.347	0.463	0.578
2. การถ่ายภาพลายวงจรด้วย กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารี ที่มีลายวงจรหลายชั้น	0.116	0.231	0.347	0.463	0.578
3. การถ่ายภาพลายวงจรด้วยการ ปรับเปลี่ยนค่าพลังงานแสงด้วยกระจก ต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีที่มีลาย วงจรหลายชั้น	0.116	0.124	0.132	0.141	0.149
4. การถ่ายภาพลายวงจรด้วยกระจก ต้นแบบชนิดเกรย์สเกล	0.116	0.116	0.116	0.116	0.116
5. การถ่ายภาพลายวงจรด้วยกระจก ต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลาย ระดับ	0.116	0.116	0.116	0.116	0.116
6. การถ่ายภาพลายวงจรด้วยกระจก ต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลาย ระดับที่สร้างด้วยการปรับเปลี่ยนค่า พลังงานแสง	0.114	0.114	0.114	0.114	0.114

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายนิธิ อັติ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 28 กันยายน 2525
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วัสดุ) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2546)
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	ผู้ช่วยนักวิจัย
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	1. นิสิตสหกิจศึกษาดีเด่นรุ่นที่ 1 ของ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปี (พ.ศ. 2546) 2. รางวัล Industrials outstanding project award จาก บริษัท Delta Electronics (Thailand) Co.Ltd. ในหัวข้อ “Study of optimization conditions to print layout by using Contact mask aligner and Direct Write Laser” (พ.ศ. 2546) 3. รางวัล Best Presentator award ในงานประชุมวิชาการ ระดับนานาชาติ Data Storage Technology Conference 2008, DST-CON 2008 (พ.ศ. 2551)
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-