



248060



**การประยุกต์ใช้โปรแกรมแบบจำลองของทางคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาผลของกรวดขอบของหลอด  
รอสัน สำหรับการผลิตรังสีแกมมาด้วยเครื่องบดกัมมันต์/เขียนสารกัมมันต์**

นางสาวสุภาวดี อธิษฐาน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรุณรัตน์ ตรีวิเศษ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรุณรัตน์ ตรีวิเศษ

ศาสตราจารย์ ดร. วรวิทย์ ตรีวิเศษ

ศาสตราจารย์ ดร. อรุณรัตน์ ตรีวิเศษ

**นางสาวสุภาวดี อธิษฐาน**

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรุณรัตน์ ตรีวิเศษ

นางสาวสุภาวดี อธิษฐาน

**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยของทางคณิตศาสตร์**

**ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า**

**คณะวิศวกรรมศาสตร์**

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี**

นางสาวสุภาวดี อธิษฐาน

พ.ศ. 2554

6002531A7

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



248060

การประยุกต์ใช้โปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาผลของการฉายแสงหลายระดับ  
สำหรับการสร้างพื้นผิวแอร์แบร์ริงบนหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์

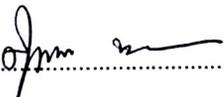
นางสาวปัทมา พลประสิทธิ์ วศ.บ. (วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม)

วิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พ.ศ. 2553



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....  
(ผศ.ดร. สุเนตร พรานนทส์ถิตย์)

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....  
(ผศ.ดร.ราชวดี ศิลพานิช)

กรรมการ และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

  
.....  
(ดร.กมล จิรเสรีอมรกุล)

กรรมการ

  
.....  
(ผศ.ดร.วันดี อ่อนเรียบร้อย)

กรรมการ

  
.....  
(ดร.อภิชัย ภัทรนันท์)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้โปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาผลของการฉายแสงหลายระดับ สำหรับการสร้างพื้นผิวแอร์เบริงบนหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นางสาวปัทมา พลประสิทธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ราชวดี ศิลาพันธ์
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2553

บทคัดย่อ

**248060**

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาผลของเทคนิคการฉายแสงหลายระดับที่มีต่อกระบวนการถ่ายแบบลายวงจร ทำการทดลองกับการสร้างพื้นผิวแอร์เบริง (Air Bearing Surface หรือ ABS) สำหรับหัวอ่าน/เขียน ฮาร์ดดิสก์ (Hard-disk read/write head) เนื่องจากพื้นผิวแอร์เบริงนั้นมีโครงสร้างจุลภาคสามมิติ คือมีความสูงของลวดลายต่างกันหลายระดับ กระบวนการสร้างพื้นผิวแอร์เบริง โดยวิธีเดิมนั้นจะเป็นการสิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่ายเป็นอย่างมาก เพราะเป็นการสร้างพื้นผิวแอร์เบริงทีละชั้นในกระบวนการถ่ายแบบ 1 ครั้ง แต่เมื่อนำเทคนิคการฉายแสงหลายระดับมาใช้ในการสร้างพื้นผิวแอร์เบริงนั้น สามารถสร้างพื้นผิวที่มีระดับต่างกันได้โดยฉายแสงซ้ำสองครั้งในหนึ่งกระบวนการถ่ายแบบ ซึ่งใช้แผ่นกระจกต้นแบบ (Photo mask) ที่ต่างกัน แล้วจึงค่อยนำไปผ่านการล้างลาย จากผลการทดลองสามารถหาความสัมพันธ์ของค่าความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือภายหลังการล้างลายจากการฉายแสงกับค่าพลังงานในการฉายแสงของบริเวณที่ถูกฉายแสงครั้งเดียว และบริเวณที่ถูกฉายแสงสองครั้ง ซึ่งเป็นกราฟที่ต่างกัน และสร้างถดถอย (Regression plot) ได้สองสมการ โดยมีประสิทธิภาพการทำนายเท่ากับ 95.8 เปอร์เซ็นต์ และ 91.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และยังพบว่าในเทคนิคการฉายแสงสองครั้งนั้น ค่าพลังงานการฉายแสงครั้งแรกส่งผลต่อค่าความหนาฟิล์มน้ำยาไวแสง ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเทคนิคการฉายแสงหลายระดับที่มีต่อกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรเบื้องต้นที่ใช้ระดับพลังงานสองระดับที่ต่างกัน โดยมีการนำโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้ เพื่อเปรียบเทียบผลกับการทดลองจริง โปรแกรมออปโทลิท (OPHTHOLITH) ถูกนำมาใช้เพื่อจำลองกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรในรูปแบบ 2 มิติ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ได้ลักษณะลวดลายที่ต้องการ ผลจากโปรแกรมพบว่าในบริเวณที่ถูกฉายแสงครั้งเดียวนั้นจะมีค่าความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือ

ภายหลังการล้างลายใกล้เคียงกับผลจากการทดลองเป็นอย่างมาก ซึ่งตรงกันข้ามกับบริเวณที่ถูกฉายแสงสองครั้งที่มีความแตกต่างเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากในโปรแกรมจำลองไม่มีการปรับเปลี่ยนค่าคุณสมบัติของฟิล์มสารไวแสงที่เปลี่ยนไปหลังจากการฉายแสงครั้งแรก เมื่อทำการฉายแสงครั้งที่สองซ้ำ ทำให้มีผลการทดลองที่คลาดเคลื่อนจากการทดลองจริง งานวิจัยนี้จึงคิดค้นวิธีปรับค่าคุณสมบัติของฟิล์มสารไวแสงที่ถูกฉายแสงไปแล้ว ซึ่งค่านั้นก็คือนำค่าดิลล์พารามิเตอร์ (Dill's parameters) โดยการทดลองพบว่าตัวแปรที่มีผลต่อความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือภายหลังการฉายแสงคือค่าดิลล์ซี (*Dill's C*) โดยจากการทดลองแบบสุ่มหาค่า *Dill's C* ที่ทำให้ได้ค่าความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือภายหลังการฉายแสงตรงกับค่าพลังงานการฉายแสงแรก และนำค่า *Dill's C* ใหม่ที่ได้พล็อตเทียบกับค่าความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือภายหลังการฉายแสง สามารถสร้างสมการถดถอยเพื่อค่า *Dill's C* ที่ถูกต้องให้กับโปรแกรมได้ จึงทำให้โปรแกรมมีความสามารถในการจำลองการถ่ายแบบลายวงจรที่ใช้เทคนิคการฉายแสงสองครั้ง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนจากโปรแกรมจำลองกับค่าจริงจากการทดลองเฉลี่ยเท่ากับ  $\pm 2.35$  เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ : พื้นผิวแอร์แบร์ริง / การฉายแสงหลายระดับ / ดิลล์พารามิเตอร์ / โปรแกรมจำลอง

Thesis Title	A Study on the Effects of Multi-Level Exposure Technique in the Photolithography Process by using a Simulation program
Thesis Credits	12
Candidate	Miss Patama Pholprasit
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Rardchawadee Silapunt
Program	Master of Engineering
Field of Study	Electrical Engineering
Department	Electronics and Telecommunication Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2553

#### Abstract

**248060**

This research paper presents a study on the effects of the multi-level exposure technique in the photolithography process by examination of the Air Bearing Surface (ABS) in a hard disk read/write head. Since there are different layers of levels in the ABS structure, using conventional techniques carries a high cost/time consumption. To reduce that cost/time consumption, the ABS can be fabricated by a technique called "multi-level exposure". This technique focuses on the exposure by changing the UV light intensity after moving the stage to a new position until all positions are completely exposed. The exposed wafer is then developed and etched in a single step to form the 3 levels of the ABS structure. The relation between the remaining photoresist (PR) film thickness and the single- and the double-exposure dose can be calculated by using the exponential equations with 95.8% and 91.5% correlation, respectively. Moreover, the first exposure dose clearly has an influence on the cumulative exposure dose in the double-exposure step. This research also studies the effect of the multi-level exposure technique in the photolithography process by using the OPTHOLITH simulation program to compare the result with the experiment. In the single-step exposure, the result from the program and the result from the experiment are very similar. On the other hand, in the double-step exposure, the result from the program and the result from the experiment are very different. It is found that the simulation program is not adaptive to a change in PR characteristics after the first exposure. So the method for adjusting the PR characteristics for the exposed PR is created. It is found that the remaining PR thickness is mainly altered by the *Dill's C* parameter. The adjustment of the *Dill's C* parameter associated with the double-exposure kinetics

is then performed using trial-and-error with the regression statistic. Adjusted *Dill's C* is used in the simulation to pattern a 3-step ABS structure. The result shows only  $\pm 2.35\%$  deviation of the remaining photoresist thickness from that of the experiment.

**Keywords:** Air Bearing Surface / Multi-level exposure / Dill's parameters / Lithography simulation

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลงได้ด้วยความรู้จากท่านอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ คือ ผศ.ดร.ราชวดี ศีลาพันธ์ ที่ได้สละเวลาให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางในการแก้ไขปัญหาอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการจัดทำวิทยานิพนธ์ และนายนิธิ อัครดี นักวิจัยจากศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาเป็นอย่างดีทั้งเรื่องแนวทางการทำวิจัยและแนวทางการใช้ชีวิต ตลอดจนทั้งอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้การประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ รวมถึง การให้คำปรึกษา ข้อชี้แนะในการทำงานวิจัยฉบับนี้ ตลอดจนการให้คำแนะนำและข้อคิดในการใช้ชีวิตในสังคม ในการทำงาน พร้อมทั้งยังให้ความรู้เป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.อภิชัย ภัทรนันท์ ดร.กมล จิรเสรีอมรกุล ผศ.ดร.วันดี อ่อนเรียบร้อย จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และ ผศ.ดร.สุเนตร พรานนท์สถิตย์ จาก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความรู้เป็นหนึ่งในการกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ทั้งนี้ยังรวมไปถึงคณาจารย์ในสาขา ภาควิชาอื่นๆ ที่ให้คำปรึกษาและชี้แนะต่อข้อสงสัยต่างๆ ของขอขอบคุณ นายธวัช ธรรมบุตร บริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด และศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) สังกัดศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ที่ให้โอกาส และเอื้อเฟื้อเครื่องมือและอุปกรณ์ที่จำเป็นในงานวิจัย ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ สมาชิกห้องปฏิบัติการสนามแม่เหล็กไฟฟ้าประยุกต์และเทคโนโลยีขนาดเล็ก (Small Scale Technology and Electromagnetic laboratory หรือ SSTEM) ที่ช่วยเป็นกำลังใจให้ในยามมีปัญหา และภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคมที่เอื้อเฟื้อสถานที่ให้เป็นอย่างดี และท้ายที่สุดผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาอันเป็นที่รัก สำหรับการเลี้ยงดูอบรมสั่งสอนและดูแลเอาใจใส่ผู้วิจัยเป็นอย่างดีตลอดมา

ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ย่อมเป็นผลมาจากความรู้ของคณะบุคคล ที่ได้กล่าวข้างต้น ข้าพเจ้า นางสาวปัทมา พลประสิทธิ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่งและขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	๗
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	๘
กิตติกรรมประกาศ	๑๑
สารบัญ	๑๒
รายการตาราง	๑๓
รายการรูปประกอบ	๑๔
รายการสัญลักษณ์	๑๕
ประมวลศัพท์และคำย่อ	๑๖
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ปัญหาและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 สถานที่และระยะเวลาทำการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 องค์ประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์	5
2.2 การสร้างพื้นผิวแอร์แบร์ริง	6
2.2.1 การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกตันแบบชนิดเกรย์สเกล	10
2.2.2 การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกตันแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ	12
2.2.3 กระบวนการถ่ายแบบลายวงจรเพียงครั้งเดียวผ่านกระจกตันแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีแล้วปรับเปลี่ยนค่าพลังงานในการฉายแสง	14
2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการถ่ายแบบลายวงจร	15
2.4 คุณภาพของลวดลายและการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจร	21
2.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพของลวดลายบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง	23

<b>3. การออกแบบทดลอง</b>	<b>26</b>
3.1 การศึกษาผลของค่าพลังงานในการฉายแสงต่อความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง ที่เหลือภายหลังการล้างลาย	26
3.1.1 การศึกษาผลจากการฉายแสงครั้งเดียว (Single exposure)	26
3.1.2 การศึกษาผลจากการฉายแสงหลายครั้ง (Multi-exposure)	28
3.2 ศึกษาผลของพารามิเตอร์ในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรที่มีผลต่อความหนา ของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง ที่ถูกฉายแสงหลายครั้ง	28
3.3 การทดลองเพื่อหาค่าคงที่ของแมคเพื่ออธิบายจลพลศาสตร์ของการล้างลาย สำหรับกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรที่มีการฉายแสงหลายครั้ง	29
3.4 การทดลองเพื่อหาค่าคงที่ของคิลล์เพื่ออธิบายจลพลศาสตร์ของการฉายแสง สำหรับกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรที่มีการฉายแสงหลายครั้ง	29
<b>4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์</b>	<b>32</b>
4.1 ผลของค่าพลังงาน ในการฉายแสงต่อความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือ หลังการล้างลาย	32
4.1.1 ความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือภายหลังการล้างลาย จากการฉายแสงครั้งเดียว	32
4.1.2 ความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือภายหลังการล้างลาย จากการฉายแสงหลายครั้ง	34
4.2 ปัจจัยในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรที่ส่งผลต่อความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง หลังการฉายแสงหลายครั้ง	39
4.3 การทดลองเพื่อหาค่าคงที่ของแมคเพื่ออธิบายจลพลศาสตร์ของการล้างลาย สำหรับกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรที่มีการฉายแสงหลายครั้ง	43
4.4 การหาค่าคงที่ของคิลล์เพื่ออธิบายจลพลศาสตร์ของการฉายแสง สำหรับกระบวนการ ถ่ายแบบลายวงจรที่มีการฉายแสงหลายครั้ง	48
<b>5. สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	<b>52</b>
5.1 สรุปผลงานวิจัย	52
5.2 ข้อเสนอแนะ	53
5.3 งานวิจัยที่ต้องดำเนินการต่อ	53
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>55</b>

ภาคผนวก	59
ก. ค่าความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือหลังการล้างลาย ที่เงื่อนไขที่แตกต่างกัน	59
ข. รหัสของโปรแกรมแบบจำลอง ที่ใช้ในการทดลอง	100
ประวัติผู้วิจัย	107

## รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของกระจกตันแบบชนิด BIM ชนิด GSL และชนิด MFT	14
2.2 หลักการคำนวณและการสร้างภาพเสมือนบนชั้นฟิล์มๆ ในโปรแกรมแบบจำลอง	20
ก.1 ความหนาของชั้นฟิล์มๆ ที่หายไป เมื่อเปลี่ยนค่า $E$ สำหรับเทคนิคการฉายแสงครั้งเดียว	60
ก.2 ความหนาของชั้นฟิล์มๆ ที่หายไป ที่ค่า $E$ , เท่ากับ $100 \text{ mJ/cm}^2$ และปรับเปลี่ยนค่า $E_2$	61
ก.3 ความหนาของชั้นฟิล์มๆ ที่หายไป ที่ค่า $E$ , เท่ากับ $200 \text{ mJ/cm}^2$ และปรับเปลี่ยนค่า $E_2$	62
ก.4 ความหนาของชั้นฟิล์มๆ ที่หายไป ที่ค่า $E$ , เท่ากับ $300 \text{ mJ/cm}^2$ และปรับเปลี่ยนค่า $E_2$	63
ก.5 ความหนาของชั้นฟิล์มๆ ที่หายไป ที่ค่า $E$ , เท่ากับ $400 \text{ mJ/cm}^2$ และปรับเปลี่ยนค่า $E_2$	64
ก.6 ความหนาของชั้นฟิล์มๆ ที่หายไป ที่ค่า $E$ , เท่ากับ $500 \text{ mJ/cm}^2$ และปรับเปลี่ยนค่า $E_2$	65
ก.7 ความหนาของชั้นฟิล์มๆ ที่หายไป ที่ค่า $E$ , เท่ากับ $600 \text{ mJ/cm}^2$ และปรับเปลี่ยนค่า $E_2$	66
ก.8 ความหนาของชั้นฟิล์มๆ ที่เหลือหลังการล้างลาย 45 วินาที ที่ค่า $E$ , $50 \text{ mJ/cm}^2$ ปรับเปลี่ยนค่า $E_2$ ที่อุณหภูมิในการอบ $90^\circ \text{ C}$ เป็นเวลา 5 นาที	67
ก. 9 ความหนาของชั้นฟิล์มๆ ที่เหลือหลังการล้างลาย 45 วินาที ที่ค่า $E$ , $100 \text{ mJ/cm}^2$ ปรับเปลี่ยนค่า $E_2$ ที่อุณหภูมิในการอบ $90^\circ \text{ C}$ เป็นเวลา 5 นาที	68
ก.10 ความหนาของชั้นฟิล์มๆ ที่เหลือหลังการล้างลาย 45 วินาที ที่ค่า $E$ , $1300 \text{ mJ/cm}^2$ ปรับเปลี่ยนค่า $E_2$ ที่อุณหภูมิในการอบ $90^\circ \text{ C}$ เป็นเวลา 5 นาที	69
ก.11 ความหนาของชั้นฟิล์มๆ ที่เหลือหลังการล้างลาย 150 วินาที ที่ค่า $E$ , $50 \text{ mJ/cm}^2$ ปรับเปลี่ยนค่า $E_2$ ที่อุณหภูมิในการอบ $90^\circ \text{ C}$ เป็นเวลา 5 นาที	70
ก.12 ความหนาของชั้นฟิล์มๆ ที่เหลือหลังการล้างลาย 150 วินาที ที่ค่า $E$ , $100 \text{ mJ/cm}^2$ ปรับเปลี่ยนค่า $E_2$ ที่อุณหภูมิในการอบ $90^\circ \text{ C}$ เป็นเวลา 5 นาที	71
ก.13 ความหนาของชั้นฟิล์มๆ ที่เหลือหลังการล้างลาย 150 วินาที ที่ค่า $E$ , $1300 \text{ mJ/cm}^2$ ปรับเปลี่ยนค่า $E_2$ ที่อุณหภูมิในการอบ $90^\circ \text{ C}$ เป็นเวลา 5 นาที	72
ก. 14 ความหนาของชั้นฟิล์มๆ ที่เหลือหลังการล้างลาย 150 วินาที ที่ค่า $E$ , $50 \text{ mJ/cm}^2$ ปรับเปลี่ยนค่า $E_2$ ที่อุณหภูมิในการอบ $90^\circ \text{ C}$ เป็นเวลา 10 นาที	73
ก.15 ความหนาของชั้นฟิล์มๆ ที่เหลือหลังการล้างลาย 150 วินาที ที่ค่า $E$ , $100 \text{ mJ/cm}^2$ ปรับเปลี่ยนค่า $E_2$ ที่อุณหภูมิในการอบ $90^\circ \text{ C}$ เป็นเวลา 10 นาที	74
ก. 16 ความหนาของชั้นฟิล์มๆ ที่เหลือหลังการล้างลาย 150 วินาที ที่ค่า $E$ , $1300 \text{ mJ/cm}^2$ ปรับเปลี่ยนค่า $E_2$ ที่อุณหภูมิในการอบ $90^\circ \text{ C}$ เป็นเวลา 10 นาที	75

- ก.17 ความหนาของชั้นฟิล์มๆที่เหลือหลังการล้างลาย 45 วินาที ที่ค่า  $E_1$  50 mJ/cm<sup>2</sup> 76  
ปรับเปลี่ยนค่า  $E_2$  ที่อุณหภูมิในการอบ 90° C เป็นเวลา 10 นาที
- ก.18 ความหนาของชั้นฟิล์มๆที่เหลือหลังการล้างลาย 45 วินาที ที่ค่า  $E_1$  100 mJ/cm<sup>2</sup> 77  
ปรับเปลี่ยนค่า  $E_2$  ที่อุณหภูมิในการอบ 90° C เป็นเวลา 10 นาที
- ก.19 ความหนาของชั้นฟิล์มๆที่เหลือหลังการล้างลายเป็นเวลา 45 วินาที ที่ค่า  $E_1$  1300 mJ/cm<sup>2</sup> 78  
ปรับเปลี่ยนค่า  $E_2$  ที่อุณหภูมิในการอบ 90° C เป็นเวลา 10 นาที
- ก.20 ความหนาของชั้นฟิล์มๆที่เหลือหลังการล้างลาย 150 วินาที ที่ค่า  $E_1$  50 mJ/cm<sup>2</sup> 79  
ปรับเปลี่ยนค่า  $E_2$  ที่อุณหภูมิในการอบ 120° C เป็นเวลา 5 นาที
- ก.21 ความหนาของชั้นฟิล์มๆที่เหลือหลังการล้างลาย 150 วินาที ที่ค่า  $E_1$  100 mJ/cm<sup>2</sup> 80  
ปรับเปลี่ยนค่า  $E_2$  ที่อุณหภูมิในการอบ 120° C เป็นเวลา 5 นาที
- ก.22 ความหนาของชั้นฟิล์มๆที่เหลือหลังการล้างลาย 150 วินาที ที่ค่า  $E_1$  1300 mJ/cm<sup>2</sup> 81  
ปรับเปลี่ยนค่า  $E_2$  ที่อุณหภูมิในการอบ 120° C เป็นเวลา 5 นาที
- ก.23 ความหนาของชั้นฟิล์มๆที่หายไปหลังการล้างลาย 45 วินาที ที่ค่า  $E_1$  50 mJ/cm<sup>2</sup> 82  
ปรับเปลี่ยนค่า  $E_2$  ที่อุณหภูมิในการอบ 120° C เป็นเวลา 5 นาที
- ก.24 ความหนาของชั้นฟิล์มๆที่หายไปหลังการล้างลาย 45 วินาที ที่ค่า  $E_1$  100 mJ/cm<sup>2</sup> 83  
ปรับเปลี่ยนค่า  $E_2$  ที่อุณหภูมิในการอบ 120° C เป็นเวลา 5 นาที
- ก.25 ความหนาของชั้นฟิล์มๆที่หายไปหลังการล้างลาย 45 วินาที ที่ค่า  $E_1$  1300 mJ/cm<sup>2</sup> 84  
ปรับเปลี่ยนค่า  $E_2$  ที่อุณหภูมิในการอบ 120° C เป็นเวลา 5 นาที
- ก.26 ความหนาของชั้นฟิล์มๆที่หายไปหลังการล้างลาย 150 วินาที ที่ค่า  $E_1$  50 mJ/cm<sup>2</sup> 85  
ปรับเปลี่ยนค่า  $E_2$  ที่อุณหภูมิในการอบ 120° C เป็นเวลา 10 นาที
- ก.27 ความหนาของชั้นฟิล์มๆที่หายไปหลังการล้างลาย 150 วินาที ที่ค่า  $E_1$  100 mJ/cm<sup>2</sup> 86  
ปรับเปลี่ยนค่า  $E_2$  ที่อุณหภูมิในการอบ 120° C เป็นเวลา 10 นาที
- ก.28 ความหนาของชั้นฟิล์มๆที่หายไปหลังการล้างลาย 150 วินาที ที่ค่า  $E_1$  1300 mJ/cm<sup>2</sup> 87  
ปรับเปลี่ยนค่า  $E_2$  ที่อุณหภูมิในการอบ 120° C เป็นเวลา 10 นาที
- ก.29 สรุปค่าความหนาของชั้นฟิล์มๆที่เหลือหลังการล้างลาย ณ ตำแหน่งที่ 1 ( $T1_{PR}$ ) 88  
ตำแหน่งที่ 2 ( $T2_{PR}$ ) และค่ามุมผนังลายวงจร ( $\theta_s$ ) ที่ทดลองได้ในแต่ละเงื่อนไข
- ก.30 ความหนาของชั้นฟิล์มๆที่เหลือหลังการล้างลายที่เวลาแตกต่างกันสำหรับเทคนิค 89  
การฉายแสงครั้งเดียว
- ก.31 ความหนาของชั้นฟิล์มๆที่เหลือหลังการล้างลาย 45 วินาที เทคนิคการฉายแสงสองครั้ง 90
- ก.32 ความหนาของชั้นฟิล์มๆที่เหลือหลังการล้างลาย 60 วินาที เทคนิคการฉายแสงสองครั้ง 91
- ก.33 ความหนาของชั้นฟิล์มๆที่เหลือหลังการล้างลาย 90 วินาที เทคนิคการฉายแสงสองครั้ง 92
- ก.34 ความหนาของชั้นฟิล์มๆที่เหลือหลังการล้างลาย 120 วินาที เทคนิคการฉายแสงสองครั้ง 93

- ก.35 ความหนาของชั้นฟิล์มๆที่เหลือหลังการล้างลาย 135 วินาที เทคนิคการฉายแสงสองครั้ง 94
- ก.36 การเปรียบเทียบความหนาชั้นฟิล์มๆที่เหลือภายหลังการฉายแสงจากการทดลองจริง และจากโปรแกรมจำลอง สำหรับเทคนิคการฉายแสงครั้งเดียว 95
- ก.37 การเปรียบเทียบความหนาชั้นฟิล์มๆที่เหลือภายหลังการล้างลายจากการทดลองจริง และจากโปรแกรมจำลอง สำหรับเทคนิคการฉายแสงสองครั้ง 96
- ก. 38 ความหนาของชั้นฟิล์มๆภายหลังการล้างลาย จากโปรแกรมจำลอง เมื่อมีการปรับเปลี่ยน ค่าคงที่ของดิลล์ สำหรับการฉายแสงสองครั้ง 97
- ก. 39 การเปรียบเทียบความหนาชั้นฟิล์มๆที่เหลือหลังการล้างลาย จากการทดลองจริง และจาก โปรแกรมจำลอง โดยปรับเปลี่ยนค่า *Dill's C* สำหรับเทคนิคการฉายแสงสองครั้ง 98
- ก. 40 ความหนาของชั้นฟิล์มๆที่เหลือหลังการล้างลายบนชิ้นงานจริง เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่า พลังงานในการฉายแสงทั้งสองครั้ง 99
- ก. 41 ค่าคงที่ *Dill's C* ที่ปรับเปลี่ยนแล้ว ที่ทำให้ความหนาชั้นฟิล์มๆที่เหลือหลังการล้างลาย จากโปรแกรมแบบจำลองมีค่าตรงกับค่าวัดจากการทดลองจริง 99

## รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
2.1 ส่วนประกอบทั่วไปของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์	5
2.2 การสร้างสไลเดอร์	6
2.3 โครงสร้างจุลภาคสามมิติของABS	7
2.4 กระบวนการถ่ายแบบลายวงจร	8
2.5 การสร้างโครงสร้างจุลภาคสามมิติ ชั้นที่หนึ่งโดยใช้กระจกต้นแบบชนิด BIM	9
2.6 การสร้างโครงสร้างจุลภาคสามมิติ ชั้นที่สองโดยใช้กระจกต้นแบบชนิด BIM	9
2.7 การสร้างโครงสร้างจุลภาคสามมิติ โดยการถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบ GSL	10
2.8 ช่องปิดและระยะห่างระหว่างช่องปิดบนแผ่นกระจกต้นแบบ	11
2.9 การสร้างโครงสร้างจุลภาคสามมิติ โดยกระจกต้นแบบชนิด MFT	13
2.10 การสร้างโครงสร้างจุลภาคสามมิติ โดยใช้กระจกต้นแบบชนิด BIM ด้วยกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรหลายขั้นตอน	15
2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการส่งผ่านของแสงและค่าพลังงานในการฉายแสง	17
2.12 ความลึกของระยะโฟกัสในระบบเลนส์	18
2.13 ขั้นตอนการสร้างลายวงจร โดยใช้โปรแกรม	21
2.14 คุณภาพของลายวงจรบนชั้นฟิล์มฯ ภายหลังจากล้างลาย	21
2.15 ตัวอย่างการพล็อตกราฟความสัมพันธ์แบบบอสซุง (Bossung plot)	22
2.16 ตัวอย่างการพล็อตกราฟแบบพื้นที่ (Contour plot)	23
2.17 ส่วนประกอบเบื้องต้นของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	24
2.18 หลักการทำงานของเครื่อง Step profiler	25
3.1 ลวดลายบนแผ่นกระจกต้นแบบสำหรับการสร้าง ABS สามมิติ	27
4.1 ภาพถ่ายของ ABS ที่ผ่านการฉายแสงเพียงครั้งเดียว ที่พลังงานที่แตกต่างกัน	33
4.2 กราฟความหนาชั้นฟิล์มฯ ที่เลือกกับค่าพลังงานการฉายแสงครั้งเดียว	34
4.3 ภาพถ่ายด้านบนของ ABS ที่ผ่านการฉายแสงสองครั้งที่ค่าพลังงานฉายแสงต่างกัน	36
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฟิล์มฯ ที่เหลือในบริเวณที่ถูกฉายแสงเพียงครั้งเดียว และบริเวณที่ถูกฉายแสงสองครั้ง	37
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นฟิล์มฯ ที่เหลือภายหลังจากล้างลาย สำหรับการฉายแสงเพียงครั้งเดียวและการฉายแสงสองครั้ง	37

- 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาชั้นฟิล์มฯที่เหลือภายหลังการฉายแสงกับ  
ค่าพลังงานรวมในการฉายแสง ของตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 2 38
- 4.7 ภาพถ่ายของ ABS ที่สร้างด้วยเทคนิคการฉายแสงสองครั้ง 39
- 4.8 กราฟความสัมพันธ์ร่วมระหว่างปัจจัยในกระบวนการ 40
- 4.9 กราฟความสัมพันธ์ร่วมระหว่างปัจจัยในกระบวนการ 41
- 4.10 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เมื่อปรับเปลี่ยนเงื่อนไขใน  
กระบวนการถ่ายแบบลายวงจร 42
- 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วในการล้างลายกับค่าพลังงานในการฉายแสง  
เพียงครั้งเดียว และค่าพลังงานในการฉายแสงสองครั้ง 43
- 4.12 กราฟความหนาของชั้นฟิล์มฯที่เหลือภายหลังการล้างลายสัมพันธ์กับลอการิทึมของค่า  
พลังงานในการฉายแสงเพียงครั้งเดียว เมื่อปรับเปลี่ยนเวลาในการล้างลาย 44
- 4.13 กราฟความหนาของชั้นฟิล์มฯที่เหลือภายหลังการล้างลายสัมพันธ์กับลอการิทึมของค่า  
พลังงานในการฉายแสงรวม เมื่อปรับเปลี่ยนเวลาในการล้างลาย 45
- 4.14 กราฟเปรียบเทียบความหนาชั้นฟิล์มฯที่เหลือภายหลังการล้างลายที่ได้จากโปรแกรม  
และการทดลองจริง สำหรับการฉายแสงเพียงครั้งเดียว 46
- 4.15 กราฟเปรียบเทียบความหนาชั้นฟิล์มฯที่เหลือภายหลังการล้างลายที่ได้จากโปรแกรม  
และการทดลองจริง สำหรับการฉายแสงสองครั้ง 46
- 4.16 ผลของค่าดีลล์พารามิเตอร์ต่อความหนาของชั้นฟิล์มฯ ภายหลังการฉายแสงสองครั้ง 47
- 4.17 การเปรียบเทียบค่าความหนาของชั้นฟิล์มฯที่เหลือภายหลังการฉายแสงสองครั้ง  
ที่ได้จากโปรแกรมโดยใช้ค่า  $Dill's C$  ที่ได้ชดเชยแล้วกับผลการทดลองจริง 48
- 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $Dill's C_{adj}$  กับค่า  $E_1$  และค่า  $E_2$  49
- 4.19 ภาพความหนาของชั้นฟิล์มฯที่เหลืออยู่ภายหลังการล้างลายจากโปรแกรม  
โดยใช้ค่าดีลล์ซีที่ได้ชดเชยแล้ว สำหรับการฉายแสงสองครั้ง 51
- 4.20 ภาพถ่ายโครงสร้าง ABS ที่สร้างโดยการฉายแสงหลายครั้ง 51

### รายการสัญลักษณ์

$A_{pitch}$	=	พื้นที่รวมของระยะห่างระหว่างช่องปิด ( $\mu\text{m}^2$ )
$A_{pixel}$	=	พื้นที่รวมของช่องปิด ( $\mu\text{m}^2$ )
$\alpha$	=	สัมประสิทธิ์การดูดซับแสง (Absorption coefficient)
Dill's A	=	ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับแสงของน้ำยาไวแสงก่อนการถูกฉายแสง
Dill's B	=	ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับแสงของน้ำยาไวแสงหลังการถูกฉายแสง
Dill's C	=	ค่าคงที่ของอัตราการฉายแสงมาตรฐาน (Standard exposure rate constant)
E	=	ค่าพลังงานในการฉายแสง (Exposure dose) ( $\text{mJ}/\text{cm}^2$ )
F	=	ระยะโฟกัสที่ใช้ในการฉายแสง ( $\mu\text{m}$ )
K	=	ค่าคงที่ของกระบวนการถ่ายแบบลายวงจร
$\lambda$	=	ค่าความยาวคลื่นแสง (nm)
M	=	สารไวแสง (Photoactive compound หรือ PAC)
$M_0$	=	ค่าความเข้มข้นของสารไวแสงที่ไม่ถูกฉายแสง (Unexposed)
$M_{th}$	=	ค่าเกณฑ์ความเข้มข้นของตัวยับยั้งปฏิกิริยา (Threshold inhibitor concentration)
n	=	ค่าการเลือกทำละลาย (Dissolution selectivity parameter)
P	=	ระยะห่างระหว่างช่องปิด ( $\mu\text{m}$ )
$P_c$	=	ความละเอียดของเครื่องถ่ายแบบลายวงจร
R	=	เรซิน (Resin)
$R_{max}$	=	อัตราการละลายของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงส่วนที่ถูกฉายแสง (Dissolution rate of fully exposed PR) ( $\mu\text{m}/\text{second}$ )
$R_{min}$	=	อัตราการละลายของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงส่วนที่ไม่ถูกฉายแสง (Dissolution rate of unexposed PR) ( $\mu\text{m}/\text{second}$ )
S	=	ตัวทำละลาย (Solvent)
$\theta_s$	=	ค่ามุมผนังลายวงจร (Sidewall profile)
$T(0)$	=	อัตราการส่งผ่านของแสงเมื่อน้ำยาไวแสงยังไม่ถูกฉายแสง
$T(\infty)$	=	อัตราการส่งผ่านของแสงเมื่อน้ำยาไวแสงได้รับแสงเต็มที่แล้ว
$T_{12}$	=	อัตราการส่งผ่านของแสงเมื่ออยู่ในสภาวะบรรยากาศปกติ
$T_{PR}$	=	ค่าความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง ( $\mu\text{m}$ )
%T	=	เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านของแสง
$W_{min}$	=	ขนาดของช่องปิดที่เล็กที่สุด ( $\mu\text{m}$ )

## ประมวลศัพท์และคำย่อ

3-D	=	3 Dimensional
ABS	=	Air Bearing Surface
AlTiC	=	Aluminum Titanium Carbide
CD	=	Critical dimension
GSL	=	Gray-scale lithography
HDD	=	Hard-disk drive
IBM	=	International Business Machines coporation
ICs	=	Integrated circuits
ME-MLM	=	Multi-exposure with multi-layer mask
MFT	=	Multi-Film thickness
NA	=	Numerical Aperture
NILS	=	Normalized image log-slope
PAC	=	Photoactive compound
PROLITH	=	Positive Resist Optical LITHography model
RPM	=	Round per minutes
SEM	=	Scanning electron microscope
SE-MLM	=	Single-exposure with multi-layer mask
UV	=	Ultraviolet