บทที่ 3 การออกแบบทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลอง ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ (1) การศึกษาผลของค่าพลังงานในการฉายแสงต่อความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือภายหลังการล้างลายในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรเพื่อสร้างพื้นผิวแอร์แบริ่ง โดยการทดลองจะแบ่งออกเป็น การศึกษาผลจากการฉายแสงครั้งเดียว และผลจากการฉายแสงสองครั้ง แล้วจึงนำผลลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน (2) การศึกษาผลของพารามิเตอร์ในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรที่มีผลต่อความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง ที่ถูกฉายแสงหลายครั้ง (3) การทดลองเพื่อหาค่าคงที่ของแมคเพื่ออธิบายจลพลศาสตร์ของการล้างลาย สำหรับกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรที่มีการฉายแสงหลายครั้ง (4) การหาค่าคงที่ของดิลล์เพื่ออธิบายจลพลศาสตร์ของการฉายแสง สำหรับกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรที่มีการฉายแสงหลายครั้ง

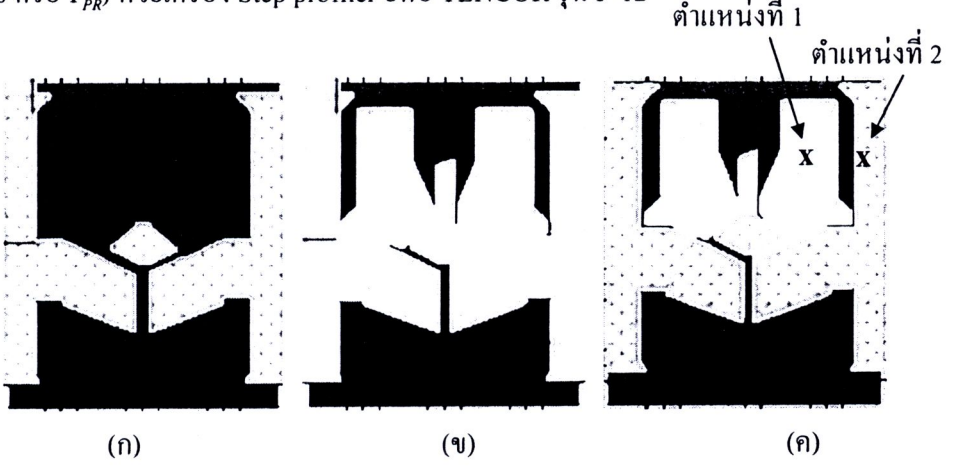
3.1 การศึกษาผลของค่าพลังงานในการฉายแสงต่อความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือภายหลังการล้างลาย

การทดลองนี้เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างพื้นผิวแอร์แบริ่ง ด้วยเทคนิคการฉายแสงหลายครั้ง และเปรียบเทียบความแตกต่างของผลจากการฉายแสงครั้งเดียวและจากการฉายแสงหลายครั้ง

3.1.1 การศึกษาผลจากการฉายแสงครั้งเดียว (Single exposure)

ในการทดลองนี้จะใช้ชิ้นงานที่เป็นแผ่นฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว ที่ทำจากวัสดุประเภทอลูมิเนียมไททาเนียมคาร์ไบด์ (Aluminium Titanium Carbide หรือ AlTiC) แล้วเคลือบชิ้นงานดังกล่าวด้วยฟิล์มน้ำยาไวแสงชนิดบวก (Positive photoresist หรือ + PR) ยี่ห้อ Clariantz เบอร์ AZ-P4620 โดยวิธีการหมุนเคลือบ (Spin coating method) ด้วยเครื่อง Rite-track HP0 spin coater ที่ความหนา 20 ไมโครเมตร และมีค่าความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์มเท่ากับ ± 3.0 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำชิ้นงานที่เคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงแล้ว ไปอบด้วยแผ่นอบ (Hot plate) ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที แล้วจึงไปฉายแสง (Exposure) ด้วยเครื่องถ่ายแบบลายวงจร ยี่ห้อ Ultratech stepper รุ่น Nanotech-190 ซึ่งมีแหล่งกำเนิดแสงชนิดไอปรอทความดันต่ำ (Mercury arc lamp) ที่ความยาวคลื่น (Wavelength หรือ λ) ในช่วง h-line หรือเท่ากับ 405 นาโนเมตร และมีกำลังแสง (Lamp power หรือ P) เท่ากับ 700 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (mW/cm^2) โดยทั่วไปเครื่องถ่ายย่อแบบลายวงจรจะมีชัตเตอร์ (Shutter) สำหรับเปิด-ปิด เพื่อควบคุมค่าความเข้มแสงที่จะตกกระทบลงบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง ซึ่งความเร็วในการเปิด/ปิดชัตเตอร์นั้น มีหน่วยเป็นมิลลิวินาที (millisecond) โดยการ

ทดลองนี้ จะใช้ลวดลายที่ใช้สร้างเป็นพื้นผิวแอร์แบริ่ง (Air Bearing Surface หรือ ABS) ในชั้นที่ 1 (First layer) ที่ปรากฏในรูปที่ 3.1 (ก) เพื่อศึกษาผลของค่าพลังงานในการฉายแสงเพียงครั้งเดียว (Single exposure dose หรือ E_1) ที่มีผลต่อความหนาที่เหลือของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงภายหลังการล้างลาย (Photoresist remaining thickness หรือ T_{PR}) โดยจะปรับเปลี่ยนค่าพลังงานในการฉายแสง ตั้งแต่ 100 มิลลิจูลต่อตารางเซนติเมตร (mJ/cm^2) ไปจนถึง 1,000 mJ/cm^2 ไปครั้งละ 100 mJ/cm^2 ทั้งนี้ค่าพลังงานในการฉายแสงช่วงดังกล่าว ถูกกำหนดโดยค่าพลังงานขีดเริ่ม (Dose-to-clear หรือ E_0) ที่ทำให้ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงในส่วนที่ถูกฉายแสง (Exposed region) นั้น ละลายไปกับน้ำยาล้างลาย (Developer) ทั้งหมด ซึ่งในกรณีของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง AZ-P4620 ที่มีความหนา 20 ไมโครเมตร นี้จะใช้ค่าพลังงาน E_0 เท่ากับ 800 mJ/cm^2 จึงกล่าวได้ว่าช่วงพลังงานในการฉายแสงที่ปรับเปลี่ยนดังกล่าว ครอบคลุมทั้งในส่วนของค่าพลังงานในการฉายแสงที่น้อยเกินไป (Under-exposure dose) และค่าพลังงานในการฉายแสงที่มากเกินไป (Over-exposure dose) ภายหลังการฉายแสง จะนำชิ้นงานไปล้างด้วยน้ำยาล้างลายชนิดโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide หรือ KOH) ด้วยเทคนิคการล้างลายแบบสเปรย์ (Spray develop) ที่การเคลื่อนที่ของหัวจ่ายน้ำยาล้างลายเท่ากับ 40 รอบ หรือเทียบเท่ากับเวลาในการล้างลายเท่ากับ 120 วินาที (1 รอบ ใช้เวลา 3 วินาที) และหยุดปฏิกิริยาเคมีของน้ำยาล้างลายด้วยน้ำปราศจากประจุ (Deionized water หรือ DIW) เป็นเวลา 3 นาที แล้วปั่นแห้ง (Spin dry) เป็นเวลา 90 วินาที โดยจะสร้างลวดลาย ABS ลงบนแผ่น AlTiC จำนวน 3 แผ่น และวัดค่าความหนาที่เหลือของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงภายหลังการล้างลาย (Photoresist remaining thickness หรือ T_{PR}) ด้วยเครื่อง Step profiler ยี่ห้อ TENCOR รุ่น P-12



รูปที่ 3.1 ลวดลายบนแผ่นกระจกต้นแบบสำหรับการสร้างพื้นผิวแอร์แบริ่งสามมิติ โดยบริเวณแถบสีจะเป็นส่วนที่แสงผ่านได้
(ก) ลายวงจรที่ใช้ในการฉายแสงครั้งแรก
(ข) ลายวงจรที่ใช้ในการฉายแสงครั้งที่สอง
(ค) ลายวงจรสุดท้ายของพื้นผิวแอร์แบริ่งที่ได้จากการฉายแสงทั้งสองครั้ง

3.1.2 การศึกษาผลจากการฉายแสงหลายครั้ง (Multi-exposure)

ในการทดลองนี้จะศึกษาผลของค่าพลังงานในการฉายแสงรวม (Cumulative exposure dose หรือ E_c) อันเป็นผลรวมของค่าพลังงานในการฉายแสงครั้งที่ 1 (First exposure dose หรือ E_1) และ ค่าพลังงานในการฉายแสงครั้งที่ 2 (Second exposure dose หรือ E_2) ซึ่งจะใช้เงื่อนไขในกระบวนการผลิตเช่นเดียวกับเงื่อนไขในการทดลองหัวข้อ 3.1.2 แต่แตกต่างกันในส่วนของค่าพลังงานในการฉายแสง ซึ่งในการทดลองนี้จะฉายแสงทั้งหมด 2 ครั้ง (Double exposure) โดยสำหรับการฉายแสงครั้งที่ 1 จะใช้ลวดลาย ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ข) ที่การปรับเปลี่ยนค่าพลังงานในการฉายแสง E_2 ตั้งแต่ 50 mJ/cm^2 ถึง 650 mJ/cm^2 โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 50 mJ/cm^2 จึงทำให้ส่วนของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ถูกฉายแสง 2 ครั้ง นั้น จะได้รับค่าพลังงานรวม E_c ในช่วงตั้งแต่ 150 mJ/cm^2 ไปจนถึง 1,250 mJ/cm^2 ภายหลังจากการล้างลาย จะวัดค่าความหนาที่เหลือของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงภายหลังการล้างลาย (Photoresist remaining thickness หรือ T_{PR}) ในตำแหน่งที่ 1 (Pt_1) และตำแหน่งที่ 2 (Pt_2) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ค) โดยจะสร้างลวดลาย ABS ลงบนแผ่น AlTiC จำนวน 2 แผ่น

3.2 ศึกษาผลของพารามิเตอร์ในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรที่มีผลต่อความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง ที่ถูกฉายแสงหลายครั้ง

ในส่วนของการทดลองนี้ จะใช้เครื่องจักรและขั้นตอนการผลิตเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่ 3.1 แต่จะปรับเปลี่ยนเงื่อนไขในแต่ละขั้นตอนการผลิตให้มีค่าต่ำที่สุด และสูงที่สุด เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานที่ใช้ในกระบวนการผลิต เพื่อที่จะทราบว่าตัวแปรไหนที่ส่งผลกระทบต่อความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่ภายหลังการฉายแสง โดยจะเรียกเทคนิคการทดลองที่ปรับเปลี่ยนค่าต่ำสุด-สูงสุดนี้ว่า Extreme on-off experiment โดยยังคงใช้ชิ้นงาน AlTiC ที่เคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงหนา 20 ไมโครเมตร เป็นแผ่นฐาน จากนั้นปรับเปลี่ยนเงื่อนไขของตัวแปรจำนวน 5 ชนิด คือ (1) อุณหภูมิในการอบอ่อน (Prebake temperature) ที่ 90 และ 120 องศาเซลเซียส (2) เวลาในการอบอ่อน (Prebake time) ที่ 5 และ 10 นาที (3) ค่าพลังงานในการฉายแสงครั้งที่ 1 (E_1) และ (4) ค่าพลังงานในการฉายแสงครั้งที่ 2 (E_2) ที่ 50 mJ/cm^2 และ 1300 mJ/cm^2 และ (5) เวลาในการล้างลายที่ 45 และ 150วินาที ตามลำดับ ภายหลังจากการล้างลาย จะวัดค่าความหนาที่เหลือของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงภายหลังการล้างลาย (Photoresist remaining thickness หรือ T_{PR}) ในตำแหน่งที่ 1 (Pt_1) และตำแหน่งที่ 2 (Pt_2) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ค)

3.3 การทดลองเพื่อหาค่าคงที่ของแมคเพื่ออธิบายจลพลศาสตร์ของการล้างลายสำหรับกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรที่มีการฉายแสงหลายครั้ง

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าคงที่ในสมการคณิตศาสตร์ของแมค (Mack's model) ซึ่งเป็นโมเดลที่อธิบายจลพลศาสตร์ของการล้างลาย (development kinetics) ซึ่งจะประกอบด้วย (1) อัตราการละลายของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงในส่วนที่ไม่ถูกฉายแสงในน้ำยาล้างลาย ซึ่งถือเป็นอัตราการละลายที่ต่ำที่สุด (Minimum dissolution rate หรือ R_{min}) (2) อัตราการละลายของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงในส่วนที่ถูกฉายแสงที่ค่าพลังงานตั้งแต่ E_0 ในน้ำยาล้างลาย ซึ่งถือเป็นอัตราการละลายที่สูงที่สุด (Maximum dissolution rate หรือ R_{max}) (3) ค่าความสามารถในการเลือกทำละลาย (Dissolution selectivity หรือ n) และ (4) ค่าเกณฑ์ความเข้มข้นของตัวยับยั้งปฏิกิริยา (Threshold inhibitor concentration หรือ M_{th}) ทั้งนี้ค่าคงที่ของปัจจัยดังกล่าวทั้ง 4 ชนิด จะเป็นค่าเฉพาะสำหรับกระบวนการฉายแสงเพียงครั้งเดียว และสำหรับกระบวนการฉายแสงสองครั้ง โดยขึ้นอยู่กับค่าพลังงานในการฉายแสง โดยสำหรับการฉายแสงเพียงครั้งเดียวนั้น จะปรับเปลี่ยนค่าพลังงาน E_1 ตั้งแต่ 100 mJ/cm^2 ไปจนถึง 800 mJ/cm^2 โดยปรับเปลี่ยนครั้งละ 100 mJ/cm^2 และในส่วนของการฉายแสง 2 ครั้ง นั้น จะปรับเปลี่ยนค่าพลังงาน E_1 สำหรับการฉายแสงครั้งแรกเท่ากับ 50 100 150 200 250 300 400 500 และ 600 mJ/cm^2 และปรับเปลี่ยนค่าพลังงาน E_2 สำหรับการฉายแสงครั้งที่ 2 เท่ากับ 50 100 200 300 400 500 และ 600 mJ/cm^2 จากนั้นนำชิ้นงานที่มีเงื่อนไขแตกต่างกันไปทำการล้างลาย โดยมีการปรับเปลี่ยนเวลาในการล้างลายตั้งแต่ 0 30 45 60 90 และ 120 วินาที จากนั้นนำค่าต่างๆไปคำนวณและสร้างความสัมพันธ์ในรูปแบบกราฟระหว่างอัตราการล้างลาย (Development rate) กับค่าพลังงานในการฉายแสง (Exposure dose) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือภายหลังการล้างลายกับค่าพลังงานในการฉายแสง

3.4 การทดลองเพื่อหาค่าคงที่ของดิลล์เพื่ออธิบายจลพลศาสตร์ของการฉายแสงสำหรับกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรที่มีการฉายแสงหลายครั้ง

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าคงที่ในสมการคณิตศาสตร์ของดิลล์ (Dill's model) ซึ่งเป็นโมเดลที่อธิบายจลพลศาสตร์ของการฉายแสง (Exposure kinetics) ซึ่งประกอบด้วย (1) ค่าดิลล์เอ (*Dill's A*) ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับของแสงในส่วนของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ไม่ถูกฉายแสง (Bleachable absorption coefficients of unexposed photoresist) และ (2) ค่าดิลล์บี (*Dill's B*) ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับของแสงในส่วนของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ถูกฉายแสงด้วยค่าพลังงาน E_0 (Non-bleachable absorption coefficients of unexposed photoresist) และ (3) ค่าดิลล์ซี (*Dill's C*) ซึ่งเป็นค่าคงที่มาตรฐานของอัตราการฉายแสง (Standard exposure rate constant) โดยทั่วไปค่าดิลล์เอ (*Dill's A*) และดิลล์บี (*Dill's B*) จะได้จากการทดลองวัดค่าการส่องผ่านของแสง (Light transmission)

ผ่านชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง และค่าดิลล์ซี จะได้จากการคำนวณ ทั้งนี้ด้วยข้อจำกัดของเครื่องมือที่ใช้วัดค่าการส่องผ่านของแสงของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ที่ไม่ได้ติดตั้งอยู่ในห้องสะอาด (Clean room) และไม่ได้ติดตั้งอยู่ในบริเวณที่มีบรรยากาศของแสงสีเหลือง (Yellow room) ทำให้ไม่สามารถนำชิ้นงานที่ผ่านการฉายแสงแล้ว ไปวัดค่าดิลล์เอ และดิลล์บี ได้อย่างถูกต้อง ทั้งนี้เนื่องจากชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงบนชิ้นงานจะถูกความชื้นในบรรยากาศ และจะถูกฉายแสงซ้ำด้วยแสงสีขาว (White light) ในบรรยากาศ นอกจากนี้ งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลของการฉายแสงหลายครั้ง (Multi-exposure) ซึ่งค่าพลังงานรวม E_c ที่ฉายไปในชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงนั้น จะมีลักษณะการกระจายตัวของพลังงานแบบเฉพาะ และแตกต่างกับการกระจายตัวของค่าพลังงานที่เกิดจากการฉายแสงเพียงครั้งเดียว (Single exposure) ทำให้ค่าการดูดซับแสงในชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงนั้น มีค่าต่างกัน ส่งผลให้ค่าดิลล์มาตรฐานของน้ำยาไวแสงชนิด AZ-P4620 ที่ทางบริษัทผู้ผลิตน้ำยาไวแสงดังกล่าวกำหนดมาในคู่มือการใช้งาน (Datasheet) นั้น คือ ดิลล์เอ (*Dill's A*) เท่ากับ 0.3697 ต่อตารางไมโครเมตร (μm^{-1}) ดิลล์บี (*Dill's B*) เท่ากับ 0.0243 μm^{-1}และดิลล์ซี (*Dill's C*) เท่ากับ 0.0203 ตารางเซนติเมตรมิลลิจูล (cm^2 mJ) นั้นไม่สามารถนำมาใช้เพื่อให้เกิดการคำนวณที่ถูกต้องได้

งานวิจัยนี้จึงจะใช้การปรับเปลี่ยนค่าดิลล์เอบีซี (*ABC* Dill's parameters) ในโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชนิด OPTOLITH โดยใช้สถิติชั้นสูงมาช่วยในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าดิลล์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ที่จะทำให้ค่าความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือภายหลังการล้างลาย จากการฉายแสงหลายครั้ง ที่เกิดจากการคำนวณนั้น มีค่าตรงตามผลการทดลองจริง โดยในการทดลองจะใช้แผ่นฐานชนิด AlTiC ที่เคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงชนิด AZ-P4620 หนา 20 ไมโครเมตร ที่ผ่านการอบอ่อนด้วย Hot plate ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ไปทำการฉายแสงเพื่อสร้างลวดลายแบบช่องเปิด (Hole pattern) ที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 5x5 ตารางไมโครเมตร โดยในขั้นตอนการฉายแสงนั้น จะปรับเปลี่ยนค่าพลังงานในการฉายแสง E_1 และ E_2 ตั้งแต่ 50 mJ/cm^2 ไปจนถึง 500 mJ/cm^2 ซึ่งจะทำให้ได้ค่าพลังงานรวมในการฉายแสง E_c สำหรับส่วนของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ถูกฉายแสง 2 ครั้ง มีค่าตั้งแต่ 100 mJ/cm^2 จนถึง 1,000 mJ/cm^2 โดยกำหนดค่าระยะโฟกัส (Focus distance หรือ *F*) ในการฉายแสงที่ 0.0 ไมโครเมตร จากนั้นนำชิ้นงานไปล้างลายด้วยน้ำยา KOH ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 วินาที

ทั้งนี้ในส่วนของการจำลองด้วยโปรแกรม OPTOLITH นั้น จะมีค่าอินพุตในส่วนของเงื่อนไขการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ได้อธิบายไปก่อนหน้า แต่ด้วยข้อจำกัดของขนาดตารางกริด (Grid) ของโปรแกรม OPTOLITH ทำให้ต้องกำหนดขนาดของหลุมที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถคำนวณได้ คือ 2x2 ตารางไมโครเมตร เท่านั้น นอกจากนี้ยังได้กำหนดค่าคงที่สำหรับการคำนวณดังนี้ (1) ค่าดัชนีหักเห (Refractive index หรือ *n*) ของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงเท่ากับ 1.64 (2) ความยาวคลื่นแสงอัลตราไวโอเลต

(λ) เท่ากับ 405 นาโนเมตร (3) ค่าความสามารถในการรวบรวมแสงของเลนส์(Numerical aperture หรือ *NA*) ของระบบเลนส์ เท่ากับ 0.16 (4) ระยะโฟกัส (Depth-of-focus หรือ DOF) ที่ 7.91 ไมโครเมตร และในส่วนของค่าคงที่ในสมการคณิตศาสตร์ของแมค (Mack's model) ซึ่งประกอบด้วย R_{min} R_{max} n และ M_{th} นั้น จะใช้ค่าที่ได้จากการทดลองที่ 3.3