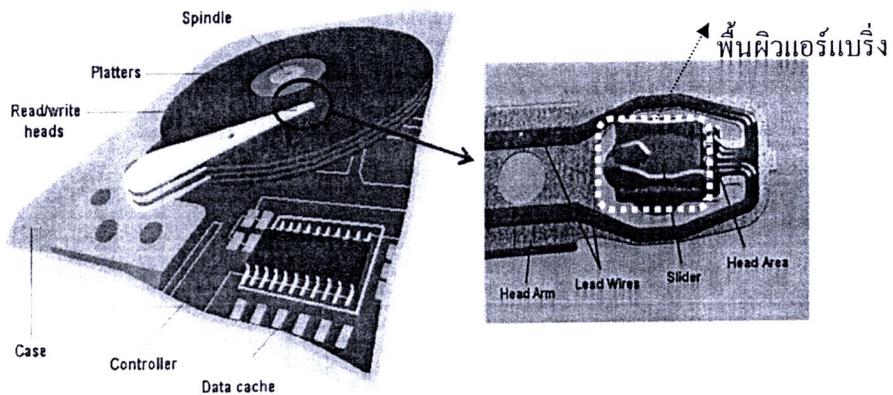


บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 องค์ประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard-disk drive หรือ HDD) งานบันทึกแบบแข็ง คือ อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ที่บรรจุข้อมูลแบบไม่ลบเลือน ถูกประดิษฐ์ขึ้นเป็นครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2499 โดยนักประดิษฐ์ชื่อ นายเรย์ โนลด์ จอห์นสัน จากบริษัทไอบีเอ็ม (International Business Machines coporation หรือ IBM) โดยข้อมูลจะถูกเก็บลงบนเซกเตอร์และแทร็ก ที่เป็นรูวงกลมที่อยู่บนจานโลหะที่เคลือบด้วยสารแม่เหล็ก (Platters) โดยในขณะที่ทำงาน จานโลหะจะหมุนอย่างรวดเร็วที่ความเร็วตั้งแต่ 5,400 จนถึง 10,000 รอบต่อนาที (Round per minutes หรือ RPM) และจะมีหัวอ่าน/เขียน (Read/write head) บินอยู่เหนือจานโลหะในระดับความสูง (Fly height) ในระดับนาโนเมตร ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำผ่านจานโลหะ และนำสัญญาณที่ได้ดังกล่าวมาแปลงเป็นข้อมูลต่อไป ทั้งนี้หัวอ่าน/เขียน จะถูกสร้างอยู่บนหัวสไลเดอร์ (Slider head) ซึ่งจะมีพื้นผิวแอร์เบริง (Air bearing surface หรือ ABS) เป็นโครงสร้างจุลภาคสามมิติ (3-dimensional microstructure หรือ 3-D) ที่ถูกสร้างที่ผิวด้านข้างของหัวอ่าน/เขียน ทำหน้าที่สร้างแรงดัน (Pressure) ในบริเวณช่องว่างระหว่างหัวอ่าน/เขียน กับจานโลหะ[9] เพื่อให้หัวสไลเดอร์สามารถลอยตัวอยู่เหนือจานโลหะด้วยระยะช่องว่างที่คงที่ ในขณะที่หัวอ่าน/เขียนทำการบันทึก/อ่านข้อมูลจากจานโลหะ ทั้งนี้เพื่อให้สัญญาณแม่เหล็กที่หัวอ่าน/เขียน ตรวจจับได้นั้น มีความสม่ำเสมอ และมีความแรงของสัญญาณที่เพียงพอต่อการนำไปแปลงเป็นข้อมูลต่อไป นอกจากนี้แรงดันที่สร้างโดยพื้นผิวแอร์เบริงนั้น จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้หัวอ่าน/เขียน ไปสัมผัสหรือสร้างรอยขีดข่วนกับจานโลหะที่หมุนด้วยความเร็วสูง อันอาจเป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหายต่อข้อมูลที่เก็บไว้ที่จานโลหะได้ โดยองค์ประกอบทั่วไปของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จะแสดงในรูปที่ 2.1

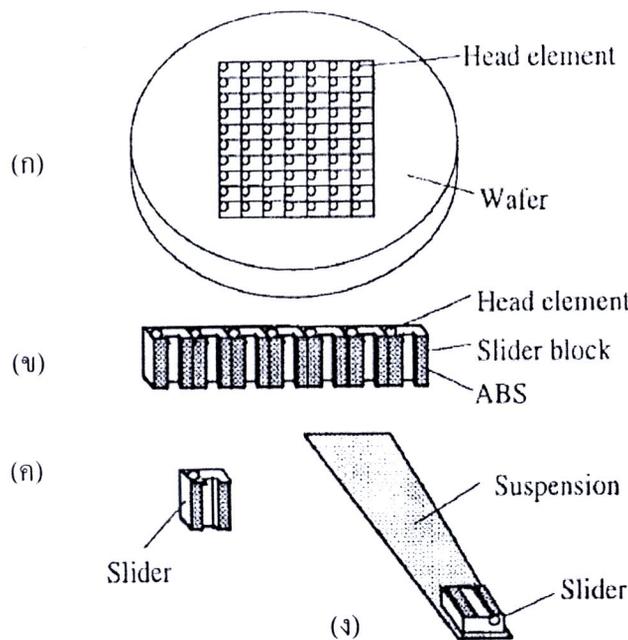


รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบทั่วไปของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [10-11]

(ที่มา : Dave และ Charles, ปี พ.ศ. 2553)

2.2 การสร้างพื้นผิวแอร์แบร์ริง

โดยทั่วไปพื้นผิวแอร์แบร์ริง (Air bearing surface หรือ ABS) จะถูกสร้างลงบนผิวด้านข้างของหัวอ่าน/เขียน หรือคือด้านความหนาของแผ่นซิลิกอนที่ได้ผ่านกระบวนการสร้างโครงสร้างของหัวอ่าน/เขียน มาเรียบร้อยแล้ว [4] โดยปกติหัวอ่าน/เขียน จะถูกสร้างลงบนแผ่นฐานหรือแผ่นเวเฟอร์ (Wafer) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว สร้างจากวัสดุประเภทอลูมิเนียม ไททานเนียมคาร์ไบด์ (Aluminum Titanium Carbide หรือ AlTiC) และนำมาตัดเป็นแท่งตามแนวยาว (Bar) โดยในแต่ละบาร์จะประกอบด้วยหัวอ่าน/เขียนประมาณ 25-40 หัว ทั้งนี้ขึ้นกับขนาดและการออกแบบของหัวอ่าน/เขียนดังกล่าว จากนั้นจะนำบาร์มาจัดเรียงลงบนแผ่นฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว (Three inch palette หรือ TIP) โดยหันด้านที่เป็นความหนาของแผ่นฐาน 6 นิ้ว ขึ้นด้านบน ทั้งนี้เพื่อที่จะใช้พื้นที่ในส่วนนี้ทำการสร้างโครงสร้าง ABS ในขั้นตอนต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งโดยทั่วไปโครงสร้าง ABS นั้นจะเป็นโครงสร้างจุลภาค 3 มิติ ซึ่งประกอบไปด้วยจำนวนชั้นที่มีความลึกในการกัดที่แตกต่างกัน ประมาณ 3-4 ชั้น (Layer) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



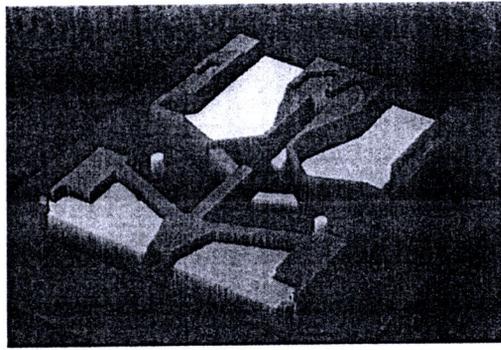
รูปที่ 2.2 การสร้างสไลเดอร์

(ก) บริเวณสร้างหัวอ่าน/เขียนลงบนแผ่นเวเฟอร์

(ข) บาร์ที่มีสไลเดอร์อยู่หลายตัว

(ค-ง) ตัดสไลเดอร์แต่ละตัวออกมาติดบนแกนซัสเพนชัน [12]

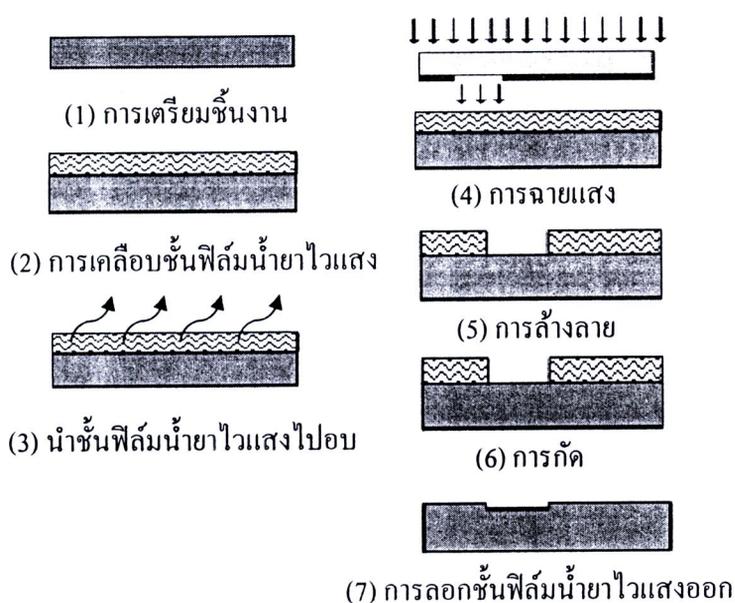
(ที่มา : Imamura, ปี พ.ศ. 2541)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างจุลภาคสามมิติของพื้นผิวแอร์แบร์ริง

สำหรับการสร้างโครงสร้าง ABS ที่เป็นโครงสร้างจุลภาคสามมิติ นั้น โดยทั่วไปจะใช้กระบวนการถ่ายแบบลายวงจร (Photolithography process) ร่วมกับกระบวนการกัด (Etching) หลายขั้นตอน [13] โดยเริ่มจาก (1) การเตรียมชิ้นงาน (Sample preparation) ซึ่งจะนำแผ่น AlTiC มาล้างทำความสะอาดพื้นผิวด้วยสารเคมีที่กำหนด (2) การเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง (Photoresist film coating) ซึ่งในขั้นตอนนี้จะเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง (Photoresist หรือ PR) ลงบนแผ่นฐาน ซึ่งโดยทั่วไปจะนิยมเคลือบด้วยเทคนิคการหมุนเคลือบ (Spin coating) หรือการพ่นเคลือบ (Spray coating) เพื่อให้ได้ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่มีความหนา (Photoresist film thickness) และความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์ม (PR film thickness uniformity) ตามที่ต้องการ จากนั้น (3) นำชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงไปอบ (Prebake) เพื่อไล่ตัวทำละลาย (Solvent) และความชื้น (Humidity) ให้ออกจากชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง และ (4) นำชิ้นงานที่เคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงมาทำการฉายแสง (Exposure) เพื่อถ่ายลวดลายจากแผ่นกระจกต้นแบบ (Photomask) ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นกระจกต้นแบบชนิดไบนารี (Binary intensity mask หรือ BIM) ลงบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง โดยใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet หรือ UV) โดยส่วนที่เป็นชั้นฟิล์มโครเมียมบนแผ่นกระจกต้นแบบ จะกันไม่ให้แสง UV ทะลุผ่านไปยังชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง ดังนั้นแสง UV จะผ่านทะลุแผ่นกระจกต้นแบบในส่วนที่ไม่มีชั้นฟิล์มโครเมียมปกคลุมเท่านั้น ด้วยหลักการนี้ จึงสามารถกำหนดส่วนที่ถูกฉายแสง (Exposed area) และส่วนที่ไม่ถูกฉายแสง (Unexposed area) บนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงได้ ทั้งนี้ถ้าเป็นการสร้างลวดลายชั้นที่ 2 หรือชั้นที่ 3 จะต้องทำการซ้อนลาย (Overlay) ดังกล่าว ให้มีตำแหน่งตรงกับลวดลายในชั้นที่หนึ่ง จากนั้น (5) นำชิ้นงานไปทำการล้างลาย (Develop) ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้เทคนิคการพ่นน้ำยาล้างลาย (Spray develop) ลงไปที่ผิวของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง โดยแรงทางกลและปฏิกิริยาทางเคมีของน้ำยาล้างลาย จะละลายส่วนของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ถูกฉายแสงออก และคงเหลือเฉพาะชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงในส่วนที่ไม่ถูกฉายแสง ในกรณีที่ใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก (Positive photoresist) ซึ่งจะช่วยให้ได้ลวดลายจุลภาคสามมิติ บนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหมือนกับลวดลายที่ปรากฏบนแผ่นกระจกต้นแบบ เมื่อได้ลวดลายบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงแล้ว จะต้อง (6) นำชิ้นงานไปทำการกัด (Etching) โดยอาจใช้

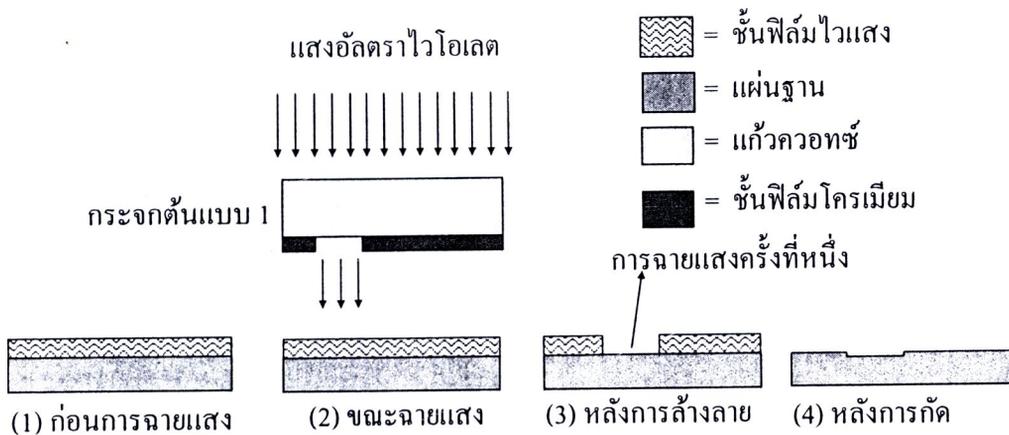
เทคนิคการกัดแบบแห้งด้วยพลาสมา (Dry plasma etching) หรือที่เรียกว่าเทคนิคการกัดแบบรีแอ็กทีฟไอออน (Reactive ion etching หรือ RIE) หรืออาจใช้เทคนิคการกัดแบบเปียกด้วยเคมี (Wet chemical etching) ก็ได้ ทั้งนี้ส่วนของพื้นผิว AlTiC ที่มีชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงปกคลุมนั้น จะไม่ถูกกัด และส่วนที่ไม่มีชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงปกคลุมนั้น พื้นผิว AlTiC จะถูกกัดออกไป ตามความลึกที่กำหนด ทั้งนี้ต้องพิจารณาในส่วนของอัตราการกัด (Etch rate) การเลือกกัด (Etch selectivity) เมื่อผ่านกระบวนการกัดแล้ว จะต้อง (7) ลอกชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่หลงเหลืออยู่บนผิวชิ้นงานออก (Photoresist strip) ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้สารละลายอะซิโตน (Acetone) หรือแอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol) [14] โดยภาคตัดขวางของขั้นตอนการสร้างลวดลายบนแผ่นฐานด้วยกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรและกระบวนการกัด จะแสดงในรูปที่ 2.4



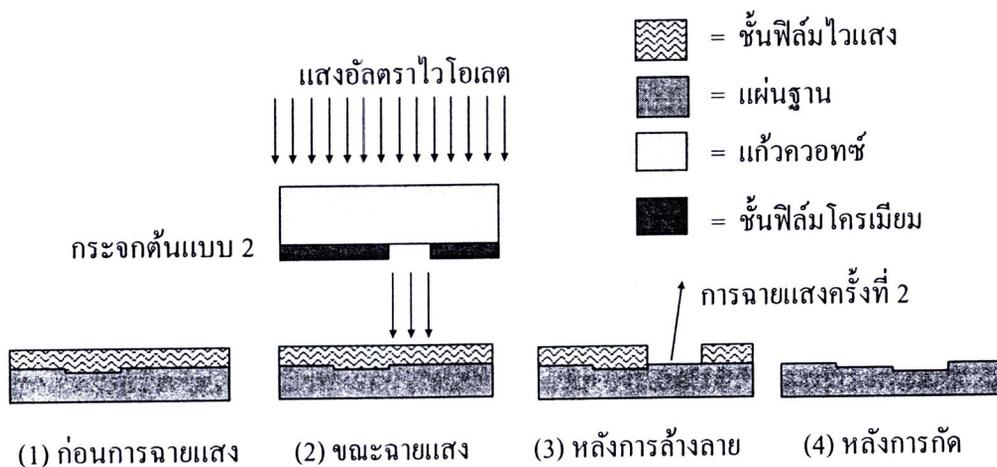
รูปที่ 2.4 กระบวนการถ่ายแบบลายวงจร

โดยในปัจจุบัน สายการผลิตฮาร์ดดิสก์จะใช้เทคนิคการถ่ายแบบลายวงจรร่วมกับกระบวนการกัดหลายขั้นตอน เพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาคสามมิติ ชนิด ABS ซึ่งในขั้นตอนการฉายแสงนั้น จะนิยมใช้กระจกต้นแบบชนิดไบนารี (BIM) ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่ไม่มีชั้นฟิล์มโครเมียมและส่วนที่มีชั้นฟิล์มโครเมียม เมื่อฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบชนิดนี้ แสงจะผ่านทะลุไปยังชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงด้านล่างได้เฉพาะในส่วนที่ไม่มีโครเมียมปกคลุม ในขณะที่ส่วนที่มีโครเมียมปกคลุมนั้นแสงไม่สามารถผ่านไป [15] ทำให้เมื่อผ่านการล้างลายวงจร ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงชนิดบวกส่วนที่ถูกฉายแสงจะอ่อนตัวและละลายไปกับน้ำยาล้างลาย ในขณะที่ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงส่วนที่ไม่ถูกฉายแสงนั้นยังคงเหลืออยู่ และเมื่อผ่านการกัดลายวงจรส่วนที่มีน้ำยาไวแสงปกคลุมจะไม่ถูกกัด ในขณะที่ส่วนที่ไม่มีชั้นฟิล์ม

น้ำยาไวแสงปกคลุมนั้น ชั้นฟิล์มด้านล่างจะถูกกัด โดยกระจกต้นแบบชนิด BIM นี้ จะมีราคาถูก ผลิตไม่ยาก แต่ก็มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถใช้สร้างโครงสร้างจุลภาคสามมิติในการฉายแสงเพียงครั้งเดียวได้ แต่จะต้องผ่านกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรหลายๆครั้ง ซึ่งแต่ละครั้งจะต้องฉายแสงและกัดลายวงจร จากนั้นต้องนำชิ้นงานไปเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงใหม่และผ่านการฉายแสงและการกัดลายวงจรไปเรื่อยๆ ดังตัวอย่างการฉายแสงเพื่อสร้างลายวงจรชั้นที่หนึ่งรูปที่ 2.5 และการนำชิ้นงานไปฉายแสงเพื่อสร้างลายวงจรชั้นที่สองรูปที่ 2.6 ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่ายมาก



รูปที่ 2.5 การสร้างโครงสร้างจุลภาคสามมิติ ชั้นที่หนึ่งโดยใช้กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารี ด้วยการฉายแสงหลายครั้งในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรหนึ่งขั้นตอน

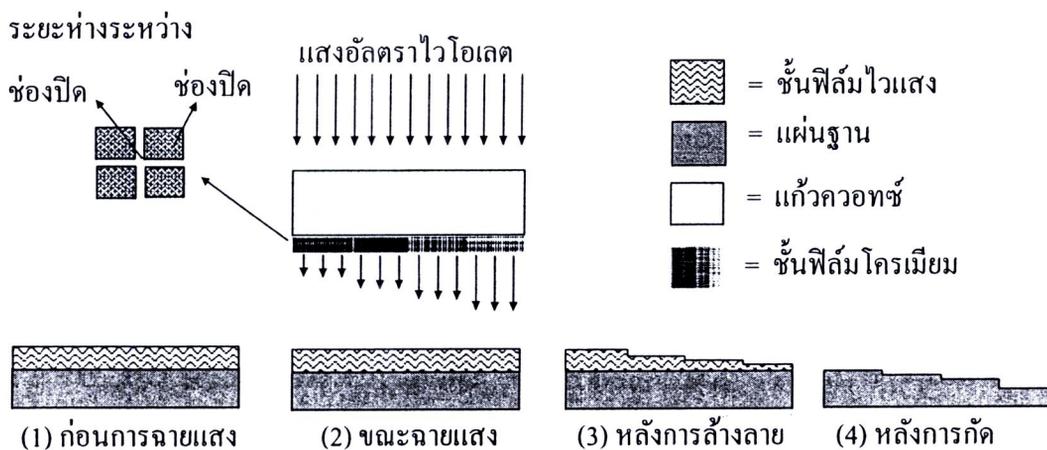


รูปที่ 2.6 การสร้างโครงสร้างจุลภาคสามมิติ ชั้นที่สองโดยใช้กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีด้วยการฉายแสงหลายครั้งในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรหนึ่งขั้นตอน

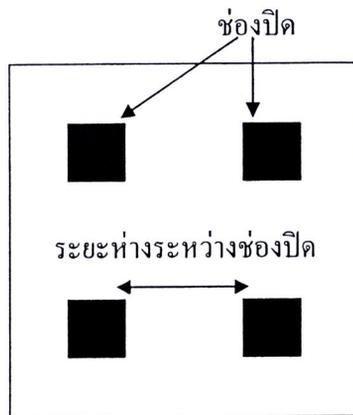
จากข้อจำกัดของเทคนิคข้างต้น จึงมีงานวิจัยหลายชิ้นที่มุ่งศึกษาและพัฒนาเทคนิคการสร้างโครงสร้างจุลภาคสามมิติ เช่น (1) การถ่ายแบบลายวงจรถ้วยกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล (Gray-scale lithography mask หรือ GSL-mask) (2) การถ่ายแบบลายวงจรถ้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ (Multi-film thickness mask หรือ MFT-mask) และ (3) กระบวนการถ่ายแบบลายวงจรถ่ายเพียงครั้งเดียวผ่านกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารี แล้วปรับเปลี่ยนค่าพลังงานในการฉายแสง (Multi-level exposure technique) โดยแต่ละเทคนิคจะมีรายละเอียดต่อไปนี้

2.2.1 การถ่ายแบบลายวงจรถ้วยกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล

กระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล นิยมใช้เพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาคสามมิติบนชั้นฟิล์มนำยาไวแสงเพื่อสร้างเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค เนื่องจากกระจกต้นแบบชนิดนี้มีคุณสมบัติในการกรองพลังงานและความเข้มของแสงเพื่อถ่ายแบบลายวงจรรไปยังผิวชิ้นงาน [16-17] ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างจุลภาคสามมิติบนชั้นฟิล์มนำยาไวแสงได้โดยการฉายแสงเพียงครั้งเดียว เช่น นำยาไวแสงเบอร์ Clariantz AZ-P4620 [18] จากนั้นอาศัยกระบวนการกัดแบบรีแอคทีฟไอออนเอชชิง (Reactive Ion Etching หรือ RIE) เพื่อถ่ายโครงสร้างจุลภาคสามมิติ จากชั้นฟิล์มนำยาไวแสงไปยังชั้นฟิล์มด้านล่าง [19] ทำให้เกิดลายที่มีควมลึกแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ลายวงจรถบนกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกลจะประกอบไปด้วยช่องปิดและระยะห่างระหว่างช่องปิด ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 การสร้างโครงสร้างจุลภาคสามมิติ โดยการถ่ายแบบลายวงจรถ้วยกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล



รูปที่ 2.8 ช่องปิดและระยะห่างระหว่างช่องปิดบนแผ่นกระจกตันแบบ [16]

(ที่มา : Brian, ปี พ.ศ. 2547)

โดยถ้ามีการปรับเปลี่ยนขนาดของช่องปิดและระยะห่างระหว่างช่องปิด จะทำให้แสงเกิดการแทรกสอดของแสงและเกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสง [20] ทำให้มีพลังงานแสงเพียงบางส่วนที่สามารถส่องผ่านกระจกตันแบบไปยังชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง ทำให้น้ำยาไวแสงในแต่ละตำแหน่งรับพลังงานแสงไม่เท่ากัน ความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงภายหลังการล้างลายวงจรจึงมีขนาดไม่เท่ากัน เกิดเป็นโครงสร้างจุลภาคสามมิติได้ โดยช่องปิดและระยะห่างระหว่างช่องปิด จะต้องมีขนาดเล็กกว่าความละเอียดของเครื่องถ่ายแบบลายวงจร [19] ตามความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$W_{min} = P - \sqrt{\frac{P_c^2}{2}} \quad (2.1)$$

เมื่อ W_{min} คือ ขนาดของช่องปิดที่เล็กที่สุด

P คือ ระยะห่างระหว่างช่องปิด

P_c คือ ความละเอียดของเครื่องถ่ายแบบลายวงจร

โดยความละเอียดของเครื่องถ่ายแบบลายวงจรจะมีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นขอแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการฉายแสง ดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$P_c = k \frac{\lambda}{NA} \quad (2.2)$$

เมื่อ P_c คือ ความละเอียดของระบบเลนส์ของเครื่องถ่ายแบบลายวงจร

k คือ ค่าคงที่ของกระบวนการถ่ายแบบลายวงจร

λ คือ ความยาวคลื่นแสง

NA คือ ค่าความสามารถในการรวบรวมแสงของเลนส์

เมื่อออกแบบลายวงจร โดยกำหนดขอบเขตของช่องเปิดและระยะห่างระหว่างช่องเปิดให้เหมาะสมกับเครื่องถ่ายแบบลายวงจรที่มีอยู่ โดยใช้สมการที่ 2.1 และ 2.2 แล้ว จะสามารถคำนวณหาค่าการส่องผ่านของแสง (Light transmission) ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ช่องเปิดและระยะห่างระหว่างช่องเปิด [16] ดังแสดงในสมการที่ 2.3

$$\%T = \left(1 - \frac{A_{Pixel}}{A_{Pitch}}\right) \times 100 \quad (2.3)$$

เมื่อ $\%T$ คือ เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสง

A_{pixel} คือ พื้นที่รวมของช่องเปิด

A_{pitch} คือ พื้นที่รวมของระยะห่างระหว่างช่องเปิด

2.2.2 การถ่ายแบบลายวงจรด้วยกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ

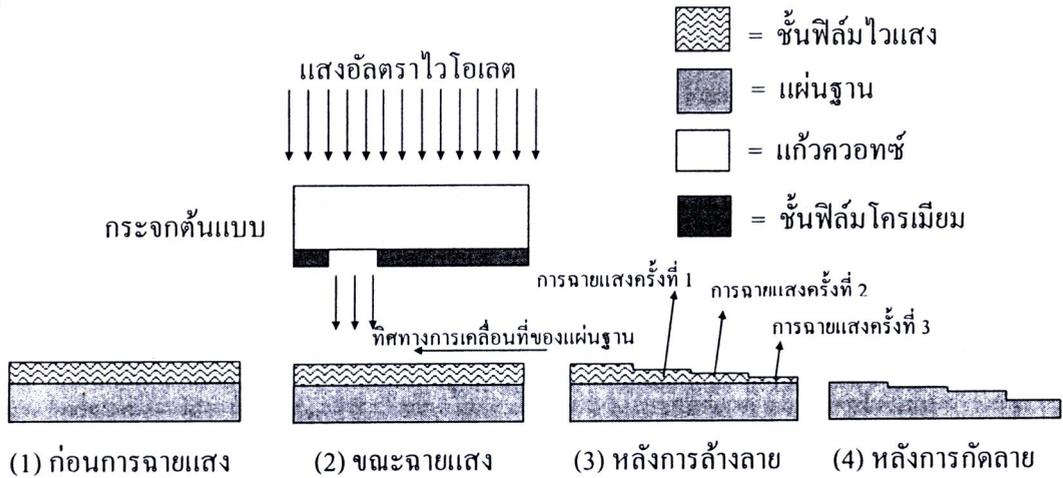
กระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับ เป็นกระจกต้นแบบที่คิดค้นเพื่อรวมข้อดีและชดเชยข้อบกพร่องของกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีและกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล กล่าวคือ กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีนั้น มีวิธีการสร้างที่ไม่ซับซ้อนและไม่ต้องใช้เครื่องจักรที่มีความละเอียดสูง แต่ไม่สามารถใช้สร้างโครงสร้างจุลภาคสามมิติได้ด้วยการฉายแสงและการกัดเพียงครั้งเดียว ในขณะที่กระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกลสามารถสร้างโครงสร้างจุลภาคสามมิติได้ แต่ต้องใช้เครื่องจักรที่มีความละเอียดสูงในการสร้างทำให้มีราคาแพงมาก ด้วยเหตุนี้จึงมีการคิดค้นกระจกต้นแบบชนิดชั้นฟิล์มหลายความหนาเพื่อสร้างโครงสร้างจุลภาคสามมิติ ด้วยการฉายแสงและการกัดเพียงครั้งเดียวได้เช่นกัน โดยอาศัยหลักการที่ว่า เมื่อความหนาของวัสดุเปลี่ยนไป คุณสมบัติในการส่องผ่านของแสงก็จะเปลี่ยนไปตามความหนาของวัสดุนั้นด้วย [22] ดังนั้นจึงสามารถสร้างกระจกต้นแบบชนิดนี้ได้ด้วยกระบวนการสร้างกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารี เพียงแต่ต้องกัดชั้นฟิล์ม โครเมียมบนแผ่นกระจกต้นแบบหลายๆครั้ง เพื่อให้ได้ความหนาที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ ทำให้พลังงานของแสงที่ฉายลงไปบนชิ้นงานมีความแตกต่างกัน เกิดเป็นโครงสร้างจุลภาคสามมิติ โดยการฉายแสงและกัดลายวงจรเพียงครั้งเดียวคล้ายการฉายแสงด้วยกระจกต้นแบบชนิดเกรย์สเกล แต่สามารถสร้างลายวงจรที่มีผนังแบบตั้งตรง (Vertical sidewall slope profile) เหมือนกระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารีได้เท่านั้น โดยเมื่อนำกระจกต้นแบบชนิดความหนาชั้นฟิล์มหลายระดับไปใช้ในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจร พบว่าแสงที่ส่องผ่านกระจก

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านต่างๆของกระจกตันแบบชนิดความเข้มแสง ใบนารี กระจกตันแบบชนิดเกรย์สเกล และกระจกตันแบบชนิดความหนาหลายชั้น

คุณสมบัติด้านต่างๆ	กระจกตันแบบชนิดความเข้มแสงใบนารี	กระจกตันแบบชนิดเกรย์สเกล	กระจกตันแบบชนิดความหนาหลายระดับ
1. ความละเอียดของลายวงจบบนแผ่นกระจกตันแบบ	ขนาดเท่ากับความละเอียดของเครื่องถ่ายภาพแบบลายวงจรร	ขนาดเล็กกว่าความละเอียดของเครื่องถ่ายภาพแบบลายวงจรร	ขนาดเท่ากับความละเอียดของเครื่องถ่ายภาพแบบลายวงจรร
2. ลักษณะของลวดลายบนแผ่นกระจกตันแบบ	เส้นและช่องเปิด	ช่องปิดและระยะห่างระหว่างช่องปิด	เส้นและช่องเปิด
3. แหล่งกำเนิดแสง	เลเซอร์	ลำอิเล็คตรอน	เลเซอร์
4. ต้นทุนในการสร้างลายวงจบบนแผ่นกระจกตันแบบ	ต่ำ	สูง	กลาง
5. ต้นทุนในการสร้างลายวงจบบนแผ่นซิลิกอน	สูง	ต่ำ	กลาง
6. ลักษณะโปรไฟล์	ตั้งตรง	โค้ง	ตั้งตรง
7. การควบคุมพลังงานแสงที่ผ่านกระจกตันแบบ	ง่าย	กลาง	ยาก

2.2.3 กระบวนการถ่ายภาพแบบลายวงจรรเพียงครั้งเดียวผ่านกระจกตันแบบชนิดความเข้มแสงใบนารี แล้วปรับเปลี่ยนค่าพลังงานในการฉายแสง

กระบวนการถ่ายภาพแบบลายวงจรรเพียงครั้งเดียวผ่านกระจกตันแบบชนิดความเข้มแสงใบนารี แล้วปรับเปลี่ยนค่าพลังงานในการฉายแสงเป็นเทคนิคการถ่ายภาพแบบลายวงจรรเพียงครั้งเดียวผ่านกระจกตันแบบชนิดความเข้มแสงใบนารี แล้วปรับเปลี่ยนค่าพลังงานในการฉายพร้อมกับการเปลี่ยนตำแหน่งของชิ้นงานในขณะที่ทำการฉายแสง จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการฉายแสงหลายๆครั้ง ไปกัดลายวงจรรเพียงครั้งเดียว ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ทำให้สามารถสร้างโครงสร้างจุลภาคสามมิติที่มีผนังแบบตั้งตรง (Vertical sidewall slope profile) ได้ [23]



รูปที่ 2.10 การสร้างโครงสร้างจุลภาคสามมิติ โดยใช้กระจกต้นแบบชนิดความเข้มแสงไบนารี ด้วยกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรมัลติขั้นตอน

2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรมัลติขั้นตอน

จากเนื้อหาที่กล่าวมาข้างต้น จะพบว่า การสร้างโครงสร้างจุลภาคสามมิติ แบบ ABS นั้น สามารถทำได้หลายเทคนิค แต่ทุกเทคนิคนั้น ก็จะมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรมัลติขั้นตอนที่ค่อนข้างเป็นจำนวนมาก ทำให้การหาค่าเงื่อนไขที่เหมาะสมในการผลิตเป็นไปได้ยาก ใช้เวลานาน และมีต้นทุนสูง ด้วยเหตุนี้จึงมีความพยายามที่จะอธิบายปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์และเคมีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรมัลติขั้นตอนในรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ ทั้งนี้เพื่อนำสมการดังกล่าวมาใช้สร้างและพัฒนาโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical simulation software) [24] เพื่อใช้ในการศึกษาคุณสมบัติของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง เมื่อผ่านขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรมัลติขั้นตอน [25] หรือเพื่อศึกษาการเกิดของลวดลายจุลภาคสามมิติ และเพื่อพยากรณ์คุณภาพของลายวงจรมัลติขั้นตอนที่จะสามารถสร้างได้จริง จากเงื่อนไขในกระบวนการผลิตที่กำหนด อันจะทำให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการพัฒนากระบวนการผลิตได้มาก โดยการพัฒนาโมเดลคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรมัลติขั้นตอน เริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1970 โดยดิลล์ (Dill) และคณะ ได้นำเสนอสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของน้ำยาไวแสงในขั้นตอนการฉายแสง โดยดิลล์ได้อธิบายถึงการดูดซับค่าพลังงานแสง (Light absorption) ของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง โดยอาศัยกฎการดูดซับแสงในเนื้อวัตถุของแลมเบิร์ต (Lambert law) ซึ่งกล่าวไว้ว่าอัตราการดูดซับแสงในเนื้อวัตถุจะเป็นอัตราส่วนกลับกับระยะทางที่แสงส่องผ่านเข้าไปยังเนื้อวัตถุนั้นๆ ซึ่งในแต่ละวัสดุจะมีอัตราการดูดซับแสงที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การดูดซับแสง (Absorption coefficient หรือ α) ซึ่งจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความยาวคลื่นของแสง (Wavelength หรือ λ)

และดัชนีการหักเหของแสงในเนื้อวัสดุ (Light refraction หรือ n) เมื่อนำกฎของแลมเบิร์ตข้างต้น มาอธิบายปรากฏการณ์ทางเคมีและฟิสิกส์ที่เกิดขึ้นกับชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงในระหว่างขั้นตอนการฉายแสง ร่วมกับองค์ประกอบของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง อันประกอบด้วย (1) เรซิน (Resin หรือ R) (2) สารไวแสง (Photoactive compound (PAC หรือ M) (3) ตัวทำละลาย (Solvent หรือ S) และ (4) สิ่งเติมเต็ม (Additive) ก็จะได้ความสัมพันธ์กับผลผลิตที่เกิดจากการฉายแสง (Exposure product หรือ P) ดังแสดงในสมการที่ 2.4 [26]

$$\alpha = \alpha_M M + \alpha_P P + \alpha_R R + \alpha_S S \quad (2.4)$$

ถ้ากำหนดให้ความเข้มข้นของสารไวแสง PAC เริ่มต้น เมื่อยังไม่ถูกฉายแสง มีค่าเท่ากับ M_0 และ M คือ ค่าความเข้มข้นของสารไวแสงที่ถูกฉายแสงแล้ว (Fully-exposed) และกำหนดให้ผลผลิตที่เกิดขึ้นหลังการฉายแสงมีค่าเท่ากับ $P = M_0 - M$ ก็จะทำได้หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับแสงกับค่า M, R, S ในรูปแบบของคิลล์พารามิเตอร์ (Dill's parameter) ดังแสดงในสมการที่ 2.5 ถึงสมการที่ 2.8

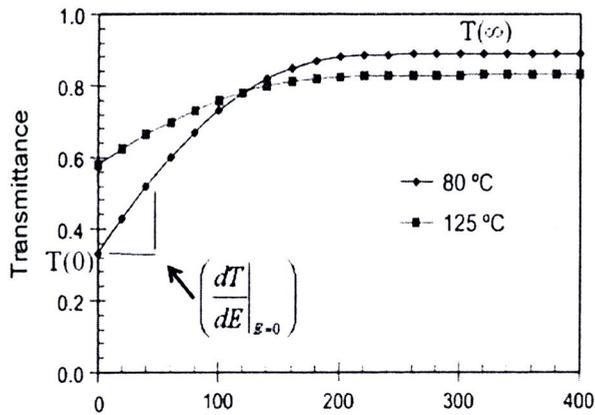
$$\alpha = Am + B \quad (2.5)$$

$$A = (\alpha_M - \alpha_P)M_0 \quad (2.6)$$

$$B = \alpha_P M_0 + \alpha_R R + \alpha_S S \quad (2.7)$$

$$m = M / M_0 \quad (2.8)$$

เมื่อ A คือ ค่าพารามิเตอร์ของคิลล์ตัวที่หนึ่ง (Dill's A) ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับแสงของน้ำยาไวแสงส่วนที่ถูกฉายแสง (Bleachable absorption coefficients) และ B คือ ค่าพารามิเตอร์ของคิลล์ตัวที่สอง (Dill's B) ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับแสงของน้ำยาไวแสงส่วนที่ไม่ถูกฉายแสง (Non-bleachable absorption coefficients) ซึ่งโดยทั่วไป ค่า A และ B นี้ สามารถหาได้จากการทดลองจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับแสงและค่าความยาวคลื่นของแสงที่ใช้ในการฉายแสง และเมื่อนำความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ A และ B มาพิจารณาในรูปแบบของการส่องผ่านของแสง (Light transmittance หรือ T) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ก็จะได้ความสัมพันธ์ของตัวแปรดังกล่าวเมื่อเทียบกับความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง (Photoresist film thickness หรือ D) ดังสมการที่ 2.9 และสมการที่ 2.10 นอกจากนี้ยังสามารถใช้ค่า A และ B เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ของอัตราการฉายแสงมาตรฐาน (Standard exposure rate constant) ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ของคิลล์ตัวที่สาม (Dill's C) ดังสมการที่ 2.11 และสมการที่ 2.12



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการส่งผ่านของแสง และค่าพลังงานในการฉายแสงของ Kodak 820 resist ที่ความยาวคลื่น 365 nm ที่ใช้อุณหภูมิในการอบต่างกัน [26] (ที่มา : Dill, ปี พ.ศ. 2517)

$$A = \frac{1}{D} \ln \left[\frac{T(\infty)}{T(0)} \right] \tag{2.9}$$

$$B = -\frac{1}{D} \ln \left[\frac{T(\infty)}{T_{12}} \right] \tag{2.10}$$

$$C = \left[\frac{A + B}{AT(0)[1 - T(0)]T_{12}} \right] \left(\frac{dT}{dE} \Big|_{E=0} \right) \tag{2.11}$$

$$T_{12} = 1 - \left(\frac{n_{resist} - 1}{n} \right)^2 \tag{2.12}$$

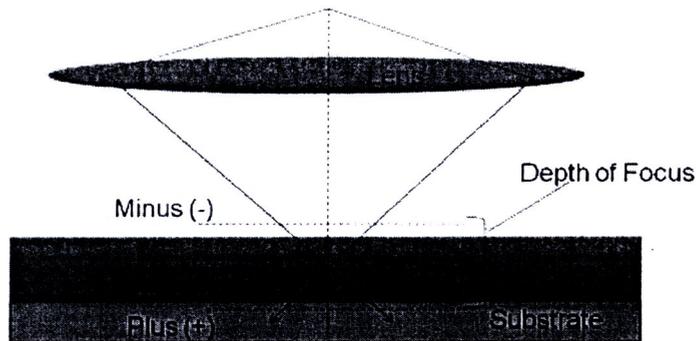
- | | | |
|-------|--|---|
| เมื่อ | T_{12} | คือ อัตราการส่งผ่านของแสงเมื่ออยู่ในสภาวะบรรยากาศปกติ |
| | $T(0)$ | คือ อัตราการส่งผ่านของแสงเมื่อน้ำยาไวแสงยังไม่ถูกฉายแสง |
| | $T(\infty)$ | คือ อัตราการส่งผ่านของแสงเมื่อน้ำยาไวแสงได้รับแสงเต็มที่แล้ว |
| | $\left(\frac{dT}{dE} \Big _{E=0} \right)$ | คือ ค่าความชันเริ่มต้นระหว่างกราฟอัตราการส่งผ่านของแสง กับกราฟค่าพลังงานในการฉายแสง |
| | D | คือ ค่าความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง |

โดยนอกจากพารามิเตอร์ของดิลล์แล้ว ปัจจัยที่ต้องพิจารณาเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในขั้นตอนการฉายแสง คือ ค่าพลังงานในการฉายแสง (Exposure dose หรือ E) ค่าระยะโฟกัสที่ใช้ในการฉายแสง (Focus distance หรือ F) ค่าความละเอียดของเครื่องฉายแบบลายวงจรถ (Exposure tool's resolution หรือ r) ค่าความยาวคลื่นแสง UV ที่ใช้ในการฉายแสง (Wavelength หรือ λ) และค่าความสามารถในการรวบรวมแสงของเลนส์ (Numerical aperture หรือ NA) ทั้งนี้ขนาดลายวงจรถวิกฤต (Critical dimension หรือ CD) ที่กระบวนการฉายแบบลายวงจรถดังกล่าวจะสามารถสร้างได้ และความลึกของโฟกัส (Depth-of-focus หรือ DOF) จะอธิบายได้ด้วยสมการ 2.13 และสมการที่ 2.14 [27]

$$r = k_1 \frac{\lambda}{NA} \quad (2.13)$$

$$DOF = k_2 \frac{\lambda}{NA^2} \quad (2.14)$$

เมื่อกำหนดให้ ค่า k_1, k_2 คือ ค่าคงที่ของกระบวนการผลิต (Process dependent constant) ซึ่งโดยทั่วไปจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.5 และการปรับเปลี่ยนค่าระยะโฟกัสว่ามีค่าเป็นบวก หรือเป็นลบนั้น จะอ้างอิงจากกึ่งกลางความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ความลึกของระยะโฟกัสในระบบเลนส์

ภายหลังได้มีการประยุกต์ใช้ค่าพารามิเตอร์ของดิลล์ไปใช้สร้าง โปรแกรมแบบจำลองกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรถ (Lithography Simulation) ที่ชื่อว่า SAMPLE ในปี ค. ศ. 1979 ซึ่งถือเป็นการปฏิวัติวงการถ่ายแบบลายวงจรถ เพราะทำให้นักวิทยาศาสตร์ได้เข้าใจปรากฏการณ์ต่างๆ และเกิดการพัฒนาระบบการถ่ายแบบลายวงจรถอย่างต่อเนื่อง [28-29] โดยที่ภาพจาก โปรแกรมจำลองที่ตรงกับภาพถ่ายจากเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope หรือ SEM) สามารถหาได้จากการควบคุมพารามิเตอร์ฟิล์มน้ำยาไวแสง (Resist parameters) ซึ่งไม่ใช่ค่าพลังงานในการฉายแสง แต่เป็นค่าพารามิเตอร์ในการล้าง (Development parameters) [30] โมเดลของการล้างในปัจจุบันนั้นมีหลายโมเดลด้วยกัน แต่ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โมเดลของแมค (Mack's development

model) โดยในปี ค. ศ. 1983 ทีมวิจัยของคริส ออลาน แมค (Chris Alan Mack) ได้อธิบายปรากฏการณ์ การเกิดรูปร่างของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงภายหลังการล้างลายในรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่ง อาศัยจลพลศาสตร์ของการล้างลายของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง (Photoresist development kinetics) ซึ่ง กล่าวว่าการละลายของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง (Photoresist dissolution) ในน้ำยาล้างลายนั้น จะขึ้นกับ (1) การแพร่ของน้ำยาล้างลายจากสารละลายเริ่มต้นไปยังผิวของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง (2) การ เกิดปฏิกิริยาของน้ำยาล้างลายกับชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง และ (3) การแพร่ของผลผลิตภายหลังการล้าง ลายกลับไปสู่สารละลาย โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองการละลายของ แมค (Mack 4-parameter dissolution rate model) ดังสมการที่ 2.15 และสมการที่ 2.16

$$R(m) = R_{max} \frac{(a+1)(1-m)^n}{a+(1-m)^n} + R_{min} \quad (2.15)$$

$$a = \frac{(n+1)}{(n-1)} (1 - M_{th})^n \quad (2.16)$$

โดยที่ n คือ ค่าการเลือกทำละลาย (Dissolution selectivity parameter)

M_{th} คือ ค่าเกณฑ์ความเข้มข้นของตัวยับยั้งปฏิกิริยา (Threshold inhibitor concentration)

R_{max} คือ อัตราการละลายของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงส่วนที่ถูกฉายแสง (Dissolution rate of fully exposed photoresist)

R_{min} คือ อัตราการละลายของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงส่วนที่ไม่ถูกฉายแสง (Dissolution rate of unexposed photoresist)

m คือ ค่าความเข้มข้นของส่วนประกอบสารไวแสงสัมพัทธ์ (Relative concentration of the photoactive compound หรือ PAC)

ค่าพารามิเตอร์ในการล้างนี้สามารถหาได้จากการใช้การตรวจสอบอัตราการล้าง (Development rate monitoring หรือ DRM) [31] ซึ่งต้องทำการเคลือบฟิล์มที่ความหนาตามการทดลองคือที่ 20 ไมโครเมตรแล้วอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำไปฉายแสงตั้งแต่พลังงาน การฉายแสงที่ 0 mJ/cm^2 ไปจนถึง $1,300 \text{ mJ/cm}^2$ โดยเพิ่มขึ้นทีละ 100 mJ/cm^2 ในแต่ละตำแหน่ง จากนั้นนำไปล้างโดยใช้เวลาในการล้างที่ต่างกันคือที่ 45 วินาที 60 วินาที 90 วินาที 120 วินาที และ 135 วินาที จากนั้นวัดค่าความหนาของฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือ แล้วทำมาหาค่า R_{max} ซึ่งเป็นค่าอัตรา การละลายของฟิล์มน้ำยาไวแสงส่วนที่ถูกฉายแสงอย่างเต็มที่ซึ่งจากการทดลองนี้คือที่ 800 mJ/cm^2 และ R_{min} ซึ่งเป็นค่าอัตราการละลายของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงส่วนที่ไม่ถูกฉายแสง ส่วนค่าพารามิเตอร์ M_{th} และ n นั้นจะหาได้จากการใส่ค่าโมเดลในการล้างนั้นลงในสมการ $R(m)$ และกราฟแสดง ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานการฉายแสงและค่าความหนาของฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือในแต่ละ

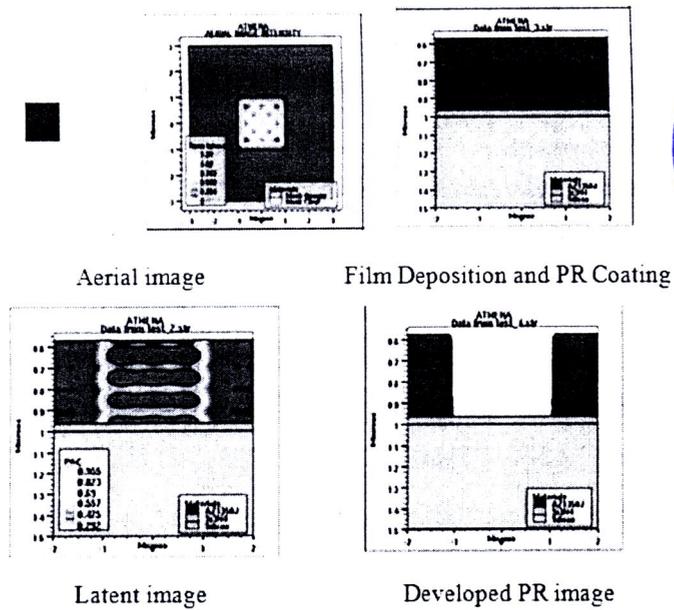
ระยะเวลาการล้าง [32] และต่อมาแมคได้พัฒนาการใช้งานพารามิเตอร์ของแมคร่วมกับพารามิเตอร์ของดิลล์ ทำให้มีการพัฒนาโปรแกรมแบบจำลองที่ชื่อว่า PROLITH (the Positive Resist Optical LITHography model) ในปี ค.ศ. 1985 ซึ่งยังคงเป็นโปรแกรมที่ได้รับความนิยมและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบันนี้

หลักการคำนวณและการสร้างภาพเสมือนต่างๆ ของลวดลายบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงในโปรแกรมแบบจำลองของกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรมานั้น จะมีขั้นตอนดังแสดงในตารางที่ 2.2 ทั้งนี้จะมีการสร้างภาพเสมือนจำนวน 3 ขั้นตอน คือ (1) Aerial image ซึ่งเป็นภาพเสมือนแสดงการกระจายตัวของความเข้มแสงที่ผ่านจากช่องเปิดของแผ่นกระจกต้นแบบ (2) Latent image คือ ภาพเสมือนแสดงการกระจายตัวของความเข้มแสงในชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง และ (3) Developed PR image คือ ภาพเสมือนของรูปร่างลายวงจรมบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงภายหลังการล้างลาย ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งในการเกิดภาพเสมือนต่างๆ จะอธิบายโดยใช้ฟังก์ชันของ Normalized image log-slope (NILS) ดังแสดงในสมการที่ 2.17 [27] โดยจะไม่ขอกล่าวรายละเอียดของ NILS ไว้ในที่นี้

$$\text{Image Log - Slope} = \frac{1}{I} \frac{dI}{dx} = \frac{d \ln(I)}{dx} \quad (2.17)$$

ตารางที่ 2.2 หลักการคำนวณและการสร้างภาพเสมือนต่างๆ ของลวดลายบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงในโปรแกรมแบบจำลองของกระบวนการถ่ายแบบลายวงจร [27]
(ที่มา : Mack, ปี พ.ศ. 2549)

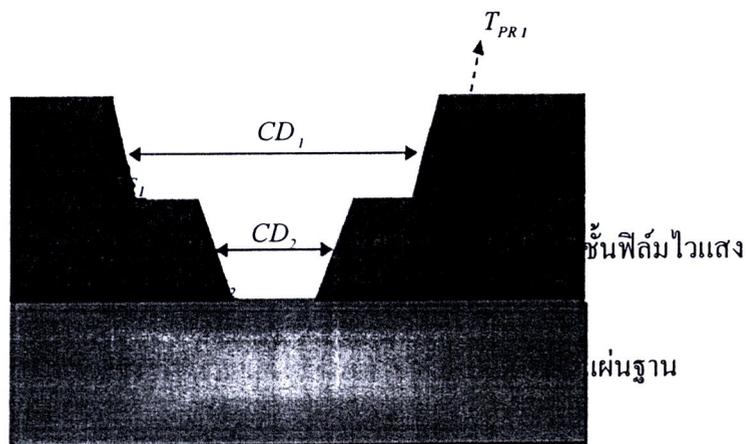
Process steps	Information	Information Metric
Design	Polygon, Binary	
Mask	Amplitude transmittance, $t_m(x,y)$	
Aerial Image	$I(x,y)$	NILS
Image in Resist	$I(x,y,z)$	NILS
Exposure	Latent Image $m(x,y,z)$ (before PEB)	Latent image gradient
Post-exposure Bake	Latent Image $m^*(x,y,z)$ (after PEB)	Latent image gradient
Development	Development Rate $R(x,y,z)$ +Resist Profile (CD, sidewall angle, resist loss)	Develop rate gradient, gamma, exposure latitude



รูปที่ 2.13 ขั้นตอนการสร้างลายวงจรโดยใช้โปรแกรม OPTOLITH [33]
(ที่มา : SILVACO Inc, ปี พ.ศ. 2554)

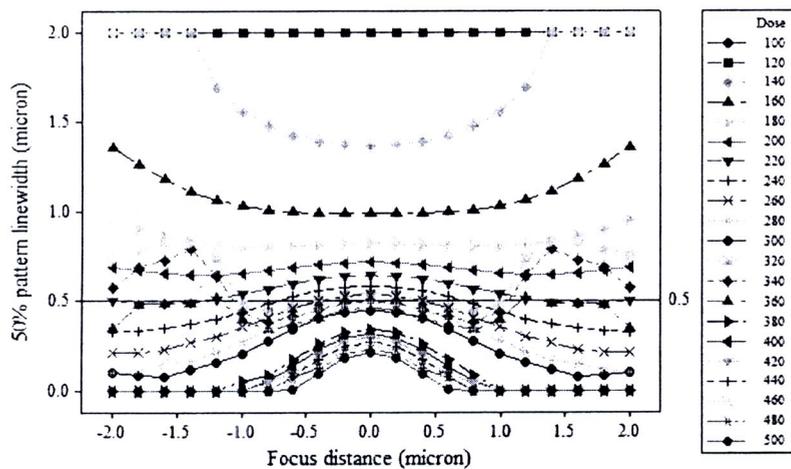
2.4 คุณภาพของลวดลายและการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจร

ในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจร จะต้องควบคุมคุณภาพของลวดลายที่เกิดขึ้นบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง คือ ขนาดของลายวงจรวิกฤติ (Critical dimension หรือ CD) ความมุมผนังลายวงจร (Sidewall profile, θ_s) และความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือภายหลังการล้างลาย (Photoresist remaining thickness หรือ T_{PR}) ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 คุณภาพของลายวงจรบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงภายหลังการล้างลาย

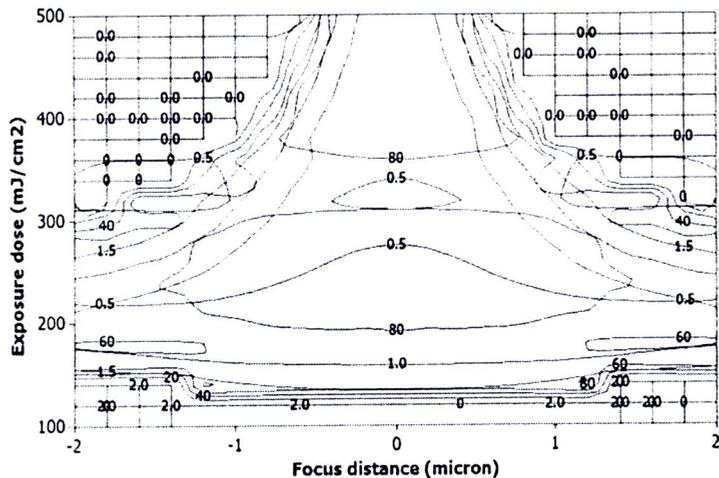
โดยในส่วนของขนาดของลายวงจรวิกฤติ (CD) นั้น โดยทั่วไปจะกำหนดให้มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 5 เปอร์เซ็นต์ จากขนาดที่ออกแบบไว้ (Designed linewidth) ในส่วนของมุมผนังลายวงจรถ (θ_s) นั้น โดยทั่วไปจะกำหนดให้มีความมากกว่า 80 องศา และความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่หลังการล้างลายนั้น ไม่ควรมีค่าน้อยกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ จากค่าความหนาเริ่มต้นของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง [27] โดยทั่วไปการควบคุมคุณภาพของลายวงจรถนั้น จะเกี่ยวข้องกับปัจจัยในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรถมากมาย เช่น ความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง (Photoresist thickness หรือ T_{PR}) อุณหภูมิในการอบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง เวลาในการอบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง (Prebake time หรือ t_{PB}) ค่าพลังงานในการฉายแสง (Exposure dose หรือ E) ระยะโฟกัสที่ใช้ในการฉายแสง (Focus distance หรือ F) และเวลาในการล้างลาย (Develop time หรือ t_{Dev}) เป็นต้น ซึ่งในขั้นตอนการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรถนั้น จะนิยมปรับเปลี่ยนค่าพลังงานในการฉายแสงและระยะโฟกัสเพียงเท่านั้น (E - F matrix) และนำเงื่อนไขต่างๆที่ได้ปรับเปลี่ยนค่า E และ F มาวาดกราฟความสัมพันธ์กับค่าเอาต์พุตที่ได้ เรียกกราฟชนิดนี้ว่า กราฟบอสซุง (Bossung plot) ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างการพล็อตกราฟความสัมพันธ์แบบบอสซุง (Bossung plot)

ซึ่งการพล็อตกราฟแบบบอสซุงนั้น จะสะดวกในกรณีต้องการพิจารณาผลของ E และ F ต่อเอาต์พุตเพียงค่าเดียว แต่เนื่องจากคุณภาพของลวดลายนั้น จำเป็นต้องพิจารณาเอาต์พุต 3 ชนิด คือ CD , θ_s และ T_{PR} ทำให้การพิจารณาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการผลิต เพื่อให้ได้ค่าเอาต์พุตทั้ง 3 ชนิด อยู่ในขอบเขตค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดด้วยกราฟแบบบอสซุงนั้น ไม่มีความสะดวก จึงเกิดเทคนิคที่พล็อตข้อมูลเงื่อนไขต่างๆที่ได้ปรับเปลี่ยนค่า E และ F กับค่าเอาต์พุตที่ได้ในรูปแบบของกราฟพื้นที่แบบ 2 มิติ (Contour plot) จากนั้นนำ Contour plot ของเอาต์พุตทุกชนิดมาซ้อนทับกัน ก็จะทำให้เงื่อนไขที่ดีที่สุดในการฉายแสงเพื่อให้คุณภาพของลวดลายทั้ง 3 ชนิด อยู่ในขอบเขตความคลาด

เคลื่อนที่กำหนด ในช่วงพื้นที่ที่ซ้อนทับกันใน Contour plot โดยจะเรียกพื้นที่ส่วนนี้ว่า หน้าต่างของกระบวนการผลิต (Process window) ดังแสดงในรูปที่ 2.16

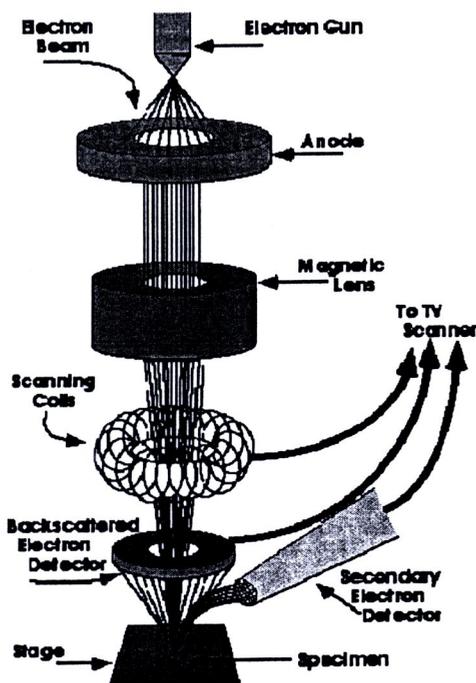


รูปที่ 2.16 ตัวอย่างการพล็อตกราฟแบบพื้นที่ (Contour plot) ซึ่งแสดงหน้าต่างของกระบวนการผลิต (Process window) [27]
(ที่มา : Mack, ปี พ.ศ. 2549)

2.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพของลวดลายบนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง

ในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาคุณภาพของลายวงจรร อันประกอบไปด้วย ขนาดของลายวงจรวจรวิกฤติ (Critical dimension หรือ CD) ค่ามุมผนังลายวงจรร (Sidewall profile หรือ θ) และความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลือภายหลังการล้างลาย (Photoresist remaining thickness หรือ T_{PR}) โดยในส่วนของ CD และ θ นั้น จะวิเคราะห์จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope หรือ SEM) ซึ่งเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology) หรือ โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) หลักการทำงานของ SEM นั้น จะเริ่มจากการให้แรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนไปที่ขั้วคาโทด ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun หรือ electron tip) โดยอาจทำมาจากวัสดุชนิดทังสเตน (Tungsten หรือ W) จนสามารถปล่อยอิเล็กตรอนให้หลุดออกมา กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดนั้นจะเรียกว่า อิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron) ซึ่งจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) ที่อยู่ในระบบสุญญากาศ (Vacuum system) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) และขนาดของรูรับแสงที่อยู่ภายในเลนส์ (Aperture) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา โดยลำ

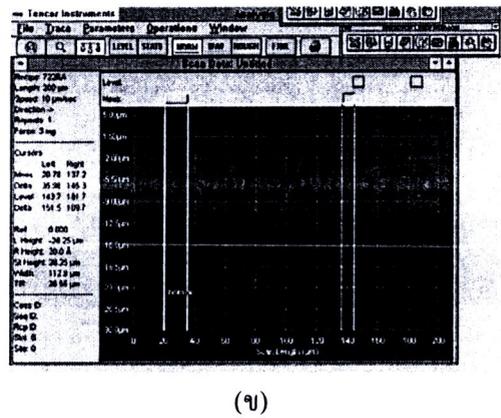
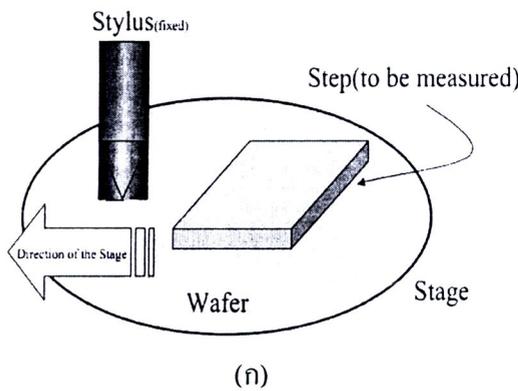
อิเล็กตรอนนี้จะถูกสแกนไปทั่วผิวชิ้นงานด้วยขดลวดกราด (Scanning coil) หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะสะท้อนไปที่ตัวตรวจจับอิเล็กตรอน (Detector) และสัญญาณดังกล่าวจะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอแสดงผลต่อไป อย่างไรก็ตาม การใช้ SEM วิเคราะห์วัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า เช่น โพลีเมอร์ หรือน้ำยาไวแสง (Photoresist) นั้น จะมีประจุลบอันเนื่องมาจากการสะสมอิเล็กตรอนบนผิวหน้าและไม่สามารถระบายออกไปได้ ทำให้เกิดประจุลบสะสมอยู่บนพื้นผิวตัวอย่าง ประจุเหล่านี้จะทำให้เกิดแรงผลักต่ออิเล็กตรอนจากลำอิเล็กตรอนที่กวาดไปบนพื้นผิวทำให้ความชัดของภาพลดลง จึงต้องลดค่าพลังงานและความเร็วของอิเล็กตรอนที่จะพุ่งชนผิวชิ้นงาน โดยใช้ความต่างศักย์หน่วง (Retarding voltage) โดยองค์ประกอบทั่วไปของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะแสดงในรูปที่ 2.17 โดยทั่วไปกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะมีกำลังขยายตั้งแต่ 3,000 เท่า จนถึง 500,000 เท่า โดยสามารถแยกแยะความละเอียดของภาพ (Resolution) ได้ถึง 3 นาโนเมตร จึงเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวแอร์แบร์ริงในงานวิจัยนี้



รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบเบื้องต้นของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [34]

(ที่มา : Syahir, ปี พ.ศ. 2554)

สำหรับการวัดความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงนั้น จะวัดโดยเครื่อง Step profiler ทฤษฎีและหลักการการทำงานของเครื่อง Step profiler นั้นสามารถอธิบายได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.18 (ก) เมื่อตัวอย่างโพลีคลงบนแท่นวาง หัวเข็มวัด (Stylus) ซึ่งอยู่ในตำแหน่งที่ต่ำกว่า จะสแกนผ่านพื้นผิวตัวอย่างเพื่อสัมผัสพื้นผิวและหาสัญญาณวิทยา (Morphology) ของพื้นผิว ผลที่ได้จากการกวาดหัวเข็มวัดบนพื้นผิวตัวอย่างจะแสดงผ่านหน้าจอมิตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.18 (ข) การอ่านค่าความหนาชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงนั้นทำได้โดยการชี้ระบุตำแหน่งของสองระดับความสูงที่ต่างกัน จากนั้นโปรแกรมจะคำนวณความหนาโดยหาเป็นค่าเฉลี่ยความต่างของทั้งสองตำแหน่งออกมาซึ่งสามารถอ่านค่าที่หน้าจอได้เลย ดังในรูปคือค่า St Height เท่ากับ 28.25 ไมโครเมตร



รูปที่ 2.18 หลักการทำงานของเครื่อง Step profiler

(ก) หลักการทำงาน [35]

(ข) ค่าที่ได้จากการวัด

(ที่มา : Sung, ปี พ.ศ. 2554)