

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สรุปสาระสำคัญของเอกสารและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากเอกสารและผลงานวิจัยที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการลิโธกราฟีมีเอกสารที่เกี่ยวข้องในหัวข้อต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

2.1.1 เทคนิคโฟโตลิโธกราฟีที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปของอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไคลด์

2.1.2 การประยุกต์ใช้ลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์

2.1.1 เทคนิคโฟโตลิโธกราฟีที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปของอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไคลด์

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี คือ การถ่ายแบบของรูปแบบ

ที่อยู่บนแผ่นโฟโตมาส์กให้ลงไปยังผิวหน้าของชิ้นงาน เพื่อเป็นการกำหนดลวดลายลงบนชิ้นงานนั้นๆ ซึ่งเทคนิคนี้ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้วงการ Micro Fabrication เป็นอย่างมาก จากการทบทวนบทความและงานวิจัยต่างๆ พบว่ามีงานวิจัยจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาการขึ้นรูปแบบลายวงจร (Photolithography) ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งที่ประสบความสำเร็จอย่างมากในวงการ Micro Fabrication Younan และ George (1998) ได้เขียนบทความเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้การขึ้นรูปแบบ Soft lithography โดยกล่าวว่าความท้าทายของการขึ้นรูปแบบ Photolithography จะมาถึงข้อจำกัดที่ต้องการความละเอียดน้อยกว่า 100 นาโนเมตรด้วยข้อจำกัดของ Photomask ซึ่งได้คาดการณ์ไว้ว่าในปี 2010 การใช้ Advance Lithography ได้แก่ EUV Soft X-ray ซึ่งมีความละเอียดที่ต่ำกว่า 100 นาโนเมตร จะเริ่มถูกนำไปใช้งานอย่างไรก็ตามเทคนิคนี้กำลังอยู่ระหว่างการพัฒนาเพื่อให้สามารถนำมาประยุกต์ในวงการอุตสาหกรรมได้ ทางผู้เขียนบทความจึงเสนออีกทางเลือกหนึ่งคือ Non-Photolithography ซึ่งทำการศึกษารูปแบบ Soft Lithography ได้แก่ Micro Contact Printing (mCP) Replica Molding (REM), Micro Transfer Molding (mTM), Micro Molding In Capillaries (MIMIC), and Solvent-Assisted Micromolding (SAMIM)

Kuao และ Guang (2004) ได้ทำการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของขนาดช่องว่างและผนังที่เกิดจากเทคนิคการขึ้นรูปแบบ Photolithography โดยทางคณะวิจัยทำการศึกษารูปแบบที่มีอัตราส่วนความลึก (High Aspect Ratio) อยู่ที่ 1:5 โดยใช้รังสี Deep Ultra Violet (DUV) ที่ความยาว

คลื่น 248 นาโนเมตร โดยมีการเลือกใช้สารไวแสงต่างชนิดกัน ที่มีความหนาเท่ากัน รวมทั้งสิ้น 3 ชนิด ได้แก่ SEPR-451, SEPR-432 และ SEPR-450H ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นความไม่ราบเรียบที่เกิดขึ้นที่ผนัง และเกิดพื้นผิวที่มุมขอบ (Wall Angle)

Harriott (2001) ได้เขียนบทความเกี่ยวกับกระบวนการลิโธกราฟีถือได้ว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดสำหรับอุตสาหกรรมเซมิคอนดักเตอร์ โดยในกระบวนการผลิตวงจรรวมในปัจจุบัน ยังคงใช้กระบวนการลิโธกราฟีในการผลิต แต่ในส่วนวิธีการและการดำเนินการรวมถึงแหล่งพลังงานแสงที่ใช้นั้น ได้ถูกพัฒนาให้มีสมรรถภาพเพิ่มมากขึ้นมาโดยตลอด โดยแหล่งกำเนิดแสงนั้นมีทั้งการใช้แสงอัลตราไวโอเลตฉายผ่านหน้ากากกั้นแสงแบบหนึ่งต่อหนึ่ง หรือการฉายแบบผ่านเลนส์เพื่อย่อขนาดของชิ้นงานลง ซึ่งในบางครั้งวิธีการดังกล่าวจะค่อนข้างมีปัญหาเกี่ยวกับความคมชัดหลังจากการฉายแสงเสร็จสิ้น โดยทั่วไปแล้วในการฉายแสงแบบหนึ่งต่อหนึ่งจะใช้ร่วมกับเครื่องฉายแสงอัลตราไวโอเลต (UV Mask Aligner) ซึ่งกำเนิดแสงในย่านแสงอัลตราไวโอเลต ความยาวคลื่นประมาณ 365-405 นาโนเมตร ซึ่งกระบวนการลิโธกราฟีจากแหล่งกำเนิดแสงดังกล่าวนี้ ความสูงของชิ้นงานจะสามารถเพิ่มได้ถึงระดับ 100 ไมโครเมตร แต่ในบางครั้งมีความต้องการสร้างชิ้นงานที่มีความสูงของชิ้นงานหลายร้อยไมโครเมตร จึงได้มีการใช้แสงอัลตราไวโอเลตพลังงานสูง DUV ซึ่งแสงดังกล่าวมีความยาวคลื่นประมาณ 200-290 นาโนเมตร กระบวนการ DUV ดังกล่าวสามารถสร้างชิ้นงานที่มีความละเอียดของชิ้นงานได้ถึงประมาณ 1 ไมโครเมตร (Pelzer *et al.*, 2006) ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในการสร้างชิ้นงานระดับสูงขึ้นไปซึ่งต้องการความละเอียดของชิ้นงานมากขึ้น

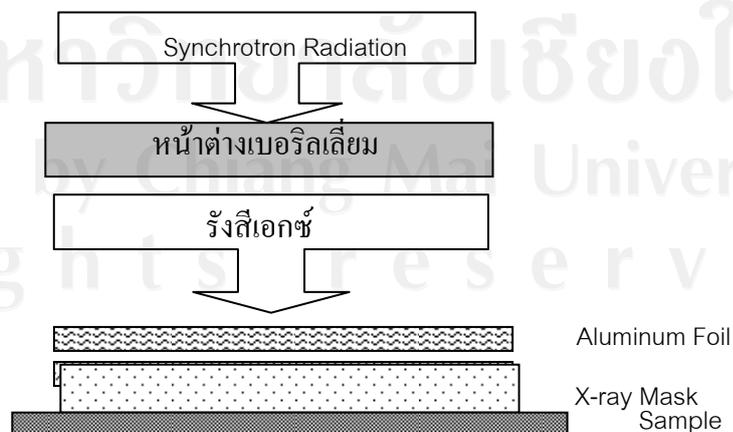
ในวงการการผลิตฮาร์ดดิสก์ได้นำเทคนิคโฟโตลิโธกราฟี ไปประยุกต์ใช้ในการขึ้นรูปหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ Zhang *et al.* (2006) ได้ทำการศึกษาปัญหาผลกระทบที่เกิดจากการขบของผนังที่เกิดขึ้นในรูปแบบต่างๆ โดยขอบของผนังที่เกิดขึ้นเกิดจากกระบวนการ Ion-milling ซึ่งเกิดมุมอับขึ้นบริเวณขอบผนังทำให้ไม่สามารถกัดได้ โดยขอบผนังที่เกิดขึ้นจะส่งผลกระทบต่อระดับการบินของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ (Flying Height) Kim *et al.* (2005) ได้ทำการศึกษาพัฒนาลักษณะการบินในรูปแบบต่างๆ ในการบันทึกลงในแผ่นจานอ่านด้วยเทคโนโลยีแก๊วนำแสง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ในระดับที่แตกต่างกัน

Yang *et al.* (2009) ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพความกว้าง และ การเกิดช่องว่างที่ขอบผนัง (Wall Angle) โดยการใช้กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เนื่องจากแสงอัลตราไวโอเลตยังมีข้อจำกัดในการใช้งานซึ่งก่อให้เกิดปัญหาบริเวณผนังและช่องว่างของชิ้นงานในอัตราส่วน (Aspect Ratio) 5:1 ซึ่งข้อจำกัดของความยาวคลื่นที่ 350-450 nm ทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับสาร Photo Mask ได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้เกิดพื้นผิวของขอบผนัง (Wall Angle) ซึ่งจะ

ส่งผลต่อระดับการบินของหัวอ่าน (Flying Height) โดยได้ทำการดำเนินการศึกษาวิจัยในการควบคุมการโฟกัสที่ดีที่สุดโดยเฉพาะการสำรวจความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแสงและความกว้าง และปรากฏการณ์ของผนังสีขาวที่สร้างโดยโฟกัสซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวข้องกับความกว้าง ขนาดของแสงและปริมาณที่เหมาะสมของขอบผนัง (Wall Angle) โดยการใช้การเคลือบภาพถ่ายของความต้านทานขององค์ประกอบที่แตกต่างกันที่มีความหนาเดียวกันบนพื้นผิวของแผ่นเวเฟอร์ซิลิกาผสม ผลการวิจัยพบว่าปริมาณแสงที่ไม่เพียงพอจะส่งผลต่อการเปลี่ยนความกว้างของเส้นและยังส่งผลสำคัญที่ขอบผนัง (Wall Angle) ปัจจัยที่สำคัญที่สุดคือปริมาณแสงที่เป็นส่วนประกอบของความไวของความต้านทานภาพ

2.1.2 การประยุกต์ใช้ลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์

กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์นั้น โดยปกติแล้วแหล่งกำเนิดของรังสีเอกซ์ที่ใช้จะใช้แหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน และทำการกรองเฉพาะรังสีเอกซ์มาใช้ในกระบวนการ โดยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์นั้นจะเป็นกระบวนการในลักษณะเดียวกันกับกระบวนการลิโธกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต แต่จะเปลี่ยนแสงที่ใช้ในกระบวนการจากแสงอัลตราไวโอเล็ตมาเป็นรังสีเอกซ์ ซึ่งพลังงานที่ได้นั้นจะค่อนข้างมาก ดังนั้นในกระบวนการจึงเกิดความร้อนขึ้นมากกว่ากระบวนการที่ใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการหลายจึงต้องเปลี่ยนแปลงไปตามความเหมาะสมกับการใช้งาน และในบางขั้นตอนหากใช้วิธีการที่เหมือนกับกระบวนการที่ใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตอาจทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายได้ (Yi *et al.*, 2006) ทำให้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์นั้น บางขั้นตอนจะแตกต่างจากกระบวนการลิโธกราฟีด้วยแสง รวมถึงขั้นตอนจะมากขึ้นและค่าใช้จ่ายในกระบวนการก็มากขึ้นด้วย ลำดับอุปกรณ์ที่ติดตั้งในการฉายรังสีเอกซ์นั้นจะคล้ายกับกระบวนการลิโธกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต แต่จะมีการเพิ่มอุปกรณ์บางชนิดเข้าไปดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลำดับอุปกรณ์ที่ติดตั้งสำหรับการฉายรังสีเอกซ์ในกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์

สารไวแสงที่ใช้ในกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์นั้น หนึ่งในสารไวแสงมาตรฐานในกระบวนการคือ PMMA ซึ่งเป็นสารไวแสงที่สามารถเคลือบบนชิ้นงานให้ได้ความหนามากถึง 3 มิลลิเมตร และให้ลวดลายที่คมชัด ให้ความละเอียดสูง ความแน่นอนของลวดลายสูงและผิวเรียบ แต่อย่างไรก็ตามข้อเสียของ PMMA ที่เห็นได้ชัดคือ มีความไวต่อรังสีเอกซ์น้อยมาก หากความหนาของฟิล์มถึงระดับมิลลิเมตรแล้ว ต้องฉายรังสีเอกซ์เป็นเวลาอย่างน้อย 10 ชั่วโมง (Shew *et al.*, 2004) ด้วยเหตุผลดังกล่าว ทำให้เวลาในการฉายรังสีเอกซ์แต่ละครั้งต้องใช้เวลาค่อนข้างนาน จึงได้มีการนำสารไวแสง SU-8 มาใช้ในกระบวนการ ซึ่งสารไวแสง SU-8 นั้นสามารถช่วยลดเวลาในการฉายรังสีลงได้อย่างมาก เนื่องจากสารไวแสง SU-8 นั้นมีความไวต่อรังสีเอกซ์มากกว่าสารไวแสง PMMA (Jian *et al.*, 2003) ที่ความหนาของสารไวแสงเท่ากันนั้นสารไวแสง SU-8 และ PMMA จะใช้เวลาในการฉายแสงต่างกันค่อนข้างมาก ดังแสดงในตารางที่ 2.1 (Jian *et al.*, 2003)

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบเวลาในการฉายรังสีเอกซ์บนชิ้นงานระหว่างสารไวแสง PMMA และ SU-8 ที่ความหนาของฟิล์มไวแสงต่าง ๆ

ชนิดของสารไวแสง	ความหนาของสารไวแสง	เวลาในการฉายรังสี
PMMA	500 ไมโครเมตร	40 นาที
SU-8	500 ไมโครเมตร	8 วินาที
PMMA	1000 ไมโครเมตร	80 นาที
SU-8	1000 ไมโครเมตร	20 วินาที
PMMA	2000 ไมโครเมตร	3.5 ชั่วโมง
SU-8	2000 ไมโครเมตร	1 นาที
PMMA	4000 ไมโครเมตร	10 ชั่วโมง
SU-8	4000 ไมโครเมตร	2 นาที

จากการเปรียบเทียบเวลาในการฉายแสงข้างต้น จะเห็นได้ชัดว่าเมื่อใช้สารไวแสง SU-8 แทน PMMA นั้น จะทำให้สามารถลดเวลาในการฉายแสงลงได้อย่างมาก ซึ่งข้อดีที่ตามมาอีกอย่างหนึ่งคือ ความร้อนสะสมในชิ้นงานขณะทำการฉายรังสีเอกซ์ก็จะลดลงตามไปด้วย ทำให้ชิ้นงานไม่เกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความร้อน และส่วนของหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ก็ต้องสามารถรับความร้อนได้เช่นเดียวกัน ทั้งยังต้องมีคุณสมบัติหลายประการที่แตกต่างจากหน้ากากกั้นแสงในกระบวนการลิโธกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

Ullerich *et al.*(1999) ได้ทำการขึ้นรูปตัวเปลี่ยนขนาดจุด (Integrated Spot Size Converters) ด้วยการขึ้นรูปแบบการไล่สีเทา-ดำ (Gray Tone Lithography) และทำการกัดแห้ง (Dry

Etching) โดยทำการสร้างหน้ากาก จากโครเมียมลงบนหน้ากากควอตซ์ (Quartz Mask) ระยะห่างระหว่างพิเซล (Pitch) 250 nm สร้างหน้ากากโดยใช้การขึ้นรูปด้วยลำแสงอิเล็กตรอน (Electron Beam Lithography) ที่ 50 nm เพื่อให้การไล่ระดับความสูงของชั้นงานมีความราบเรียบเลือกใช้การไล่ที่ 200 ระดับด้วยความกว้างแต่ละระดับ 10 μm จากนั้นจึงนำไปกัดด้วย RIE โดยใช้ $\text{CF}_4 + \text{H}_2$ ขึ้นรูปชั้นงาน 600 ชั้น

Hartmut *et al.*(2001) ได้ทำการศึกษาการผลิตมาส์กที่มีความแม่นยำสูงจากการใช้ความเข้มแสงรังสีเอกซ์โดยการใช้ลำแสงอิเล็กตรอน (Electron Beam Lithography) ที่ 40 kV ซึ่งได้ทำการมาส์กโดยการถ่ายโอนรังสีเอกซ์ จากการใช้ลำแสงอิเล็กตรอนผ่านกลางมาส์กโดยตรงเพื่อถ่ายลาลงบนชั้นงาน โดยได้นำระบบ Leica ZBA series ที่ได้รับการยอมรับจากวิธี PMMA และได้ทำการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) จากผลการทดลองพบว่า การใช้ลำแสงอิเล็กตรอนโดยการปรับใช้ Leica ZBA 23-40 kV ทำให้ได้มาส์กที่มีความแม่นยำ และสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการผลิตได้อีกด้วย

Masatoshi *et al.*(2005) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับมาส์กสำหรับการถ่ายลายวงจรโดยการใช้รังสีเอกซ์ ซึ่งมาส์กสำหรับรังสีเอกซ์จะประกอบไปด้วยตัวดูดซับ (Absorber) บนเมมเบรน (Membrane) ซึ่งเมมเบรนนี้จะทำหน้าที่คล้ายกระจกในการเป็นซับสเตรต (Substrate) ในการสร้าง Photomask โดยวัสดุที่นิยมใช้ในการทำเมมเบรนคือ Si, SiN, SiC และ เพชร (Diamond) สำหรับตัวดูดซับที่นิยมใช้คือ ทองคำ (Au), แทนทาลัม (Ta), ทังสเตน (W) และสารประกอบ โดยแต่ละชนิดจะมีความหนาแน่นที่ต่างแตกต่างกัน ซึ่งสิ่งที่เราจะต้องคำนึงคือ สัมประสิทธิ์ในการดูดซับ ค่าความเครียดความสามารถในการแพตเทต (Pattern) ที่ต่ำกว่า 100 nm คุณสมบัติทางเคมี และความทนทานของรังสี และการง่ายในการผลิต โดยทองคำจะมีสัมประสิทธิ์ในการดูดซับที่กว้าง คือ 1.5×10^{-5} ทำให้ง่ายต่อการสร้างทำแพตเทต (Pattern) ที่ได้รูปทรง ส่วนแทนทาลัม ทังสเตน และสารประกอบ จะง่ายต่อการสร้างแพตเทตในการกัดแบบแห้ง โดยการผลิตมาส์กโดยการใช้รังสีเอกซ์ นั้นจะมีขั้นตอนการทำคือ 1. กระบวนการ ซึ่งจะมี 2 กระบวนการ คือ กระบวนการเมมเบรน และ กระบวนการ Wafer Process 2. การทำ E-Beam Writing 3. การกัดแห้ง (Dry Etching) และ การทำพันธะเฟรม (Framebonding)

Yi *et al.*(1996) ได้นำเสนอการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์ที่ใช้ในกระบวนการ LIGA ซึ่งจะนำไปใช้ร่วมกับแสงซินโครตรอน โดยได้นำเสนอกระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์ ด้วยกระบวนการสร้างแบบสองชั้น โดยการสร้างหน้ากากชั่วคราวขึ้นมาก่อน หลังจากนั้นจึงนำหน้ากากชั่วคราวมาสร้างเป็นหน้ากากจริงต่อไป และวัสดุดูดกลืนรังสีเอกซ์ที่จะใช้ในหน้ากากกันรังสีเอกซ์นั้น ใช้ทองคำความหนา 15 ไมโครเมตร โดยให้แนวคิดว่าการสร้างโดยตรงจะค่อนข้าง

ยาก จึงนำเสนอการสกรีนแบบสองชั้น ชั้นแรกจะเป็นการสกรีนหน้ากากชั่วคราว (Intermediate Mask) โดยใช้กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีบนสารไวแสงบาง โดยฐานรองจะเป็นแผ่นซิลิโคนปิดทับด้วยโพลิอีไมด์ และเคลือบอีกชั้นด้วยฟิล์มทองคำความหนา 1.5 ไมโครเมตร จากนั้นจึงเคลือบสารไวแสงลงไป เมื่อสร้างลวดลายลงบนสารไวแสงแล้ว ทำการกัดแผ่นฟิล์มทองคำด้วยไอออนของอาร์กอน (Ar^+) และกัดแผ่นเวเฟอร์ทิ้ง จะได้หน้ากากชั่วคราวที่มีทองคำหนา 1.5 ไมโครเมตร เป็นวัสดุคูกลิ้นรังสีเอกซ์อยู่บนฐานที่เป็นโพลิอีไมด์ หนา 4 ไมโครเมตร จากนั้นนำหน้ากากชั่วคราวที่สร้างเสร็จ ไปสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์โดยใช้สารไวแสง PMMA หนา 15 ไมโครเมตรร่วมกับแสงซินโครตรอน โดยฐานรองจะเป็นแผ่นเวเฟอร์ ปิดทับด้วยโพลิอีไมด์ ต่อด้วยเคลือบทองคำ 100 อังสตรอม และเคลือบสารไวแสง PMMA ลงบนฐานดังกล่าว ก่อนนำไปสร้างลวดลายด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์และจากนั้นลวดลายที่เป็นหลุมไปทำการชุบทองคำด้วยไฟฟ้าลงบนฐานที่สร้างลวดลายแล้ว โดยใช้ความหนาของทองคำประมาณ 15 ไมโครเมตร ก่อนทำการกัดแผ่นเวเฟอร์ทิ้ง โดยกระบวนการทั้งหมดที่กล่าวมานั้น จะเห็นว่าการขึ้นขั้วยาก และมีขั้นตอนก่อนข้างหลายขั้นตอน

Bogdanov และ Peredkov (2000) ได้อธิบายถึงกระบวนการถ่ายแบบลายวงจรถ้าสำหรับความเข้มแสงรังสีเอกซ์ โดยการใช้ยาไวแสงเชิงลบ SU-8 ซึ่งการเคลือบของสารด้านทานนี้ส่งผลต่อคลื่นความถี่รังสีเอกซ์ (X-ray) บนความคมชัดของภาพ จึงได้มีการคำนวณเกี่ยวกับการถ่ายแบบลายวงจรถ้าและองค์ประกอบที่เหมาะสม ของรังสีเอกซ์ (X-ray) บนชั้นหน้ากาก (Mask) โดยการควบคุมความหนาของชั้นความต้านทานของฟิล์มในระหว่างขั้นตอนการหล่อ และการปรับอุณหภูมิในการอบเพื่อให้มั่นใจว่าการอบมีความปลอดภัยสูงสุดสำหรับสารด้านทานความไวแสงนี้ และได้พัฒนาในขั้นตอนการล้างสาร ซึ่งจะได้ออกแบบสารด้านทานที่มีอัตราส่วนสูงถึง 100:1 (ความสูง : ความกว้าง) และ Wisitsora *et al.* (2010) ได้ทำการวิจัยสำหรับการลดต้นทุนในการสร้างหน้ากาก (Mask) สำหรับรังสีเอกซ์ (X-ray) โดยการพัฒนาสปีเตอร์พิมพ์สารตะกั่ว (Pb) บนพื้นผิวแผ่นใส (Mylar) ซึ่งได้ทำการทดลองหน้ากาก (Mask) สำหรับรังสีเอกซ์โดยใช้ SU-8 เป็นยาไวแสงทางลบ (Negative Photoresist) ต่อพื้นผิวซัพสเตรตสแตนเลส ซึ่งชั้นพื้นผิวตะกั่วนี้จะถูกสปีเตอร์บนซัพสเตรตผ่านหน้ากากนิกเกิลอิเล็กโตรพอสิต (Ni - Electroplated) ซึ่งมีความหนาแตกต่างกัน 8-19 μm การสปีเตอร์เป็นกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบความหนาของฟิล์มตะกั่ว เนื่องจากผลผลิตสปีเตอร์ของมันสูง โดยรูปแบบของการทดสอบคือความกว้าง 100 μm ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อผลิตชิป Microfluidic จากนั้นจะใช้สารไวแสง SU-8 ที่ความหนา 150-350 μm ทำการสปีเตอร์บนพื้นผิวสแตนเลส จะได้หน้ากาก (Mask) ตะกั่วซึ่งจะใช้สำหรับการถ่ายลายวงจรถ้าโดยรังสีเอกซ์ซึ่งรังสีเอกซ์นี้ได้ถูกผลิตมาจากห้องปฏิบัติการสยาม ศูนย์ซินโครตรอน จากผลการ

ทดลองยังพบว่าความหนาของฟิล์มตะกั่วที่มากกว่า 10 μm จะสามารถป้องกันความหนาของสารไวแสงSU-8ได้ 200 μm สำหรับปริมาณรังสีเอกซ์ 4,200 mJ/cm^2 ในสายการผลิตลำแสงอิเล็กตรอนปัจจุบัน 70 mA ซึ่งจะทำให้ได้ความหนาเกือบ 2 เท่าที่จำเป็นสำหรับการดูดซับที่ใช้ทองคำซึ่งมีค่าที่ 6 μm แต่จะต้องใช้ความหนาของตะกั่วสูงกว่าทองคำ จะเห็นได้ว่าการใช้หน้ากากระกั่วสำหรับรังสีเอกซ์จะทำให้สามารถลดต้นทุนได้มากและได้กระบวนการที่ง่ายต่อการผลิต

2.2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 แสงซินโครตรอน

แสง (Light) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) ที่มีความสำคัญยิ่งต่อวงการวิทยาศาสตร์ที่จะนำไปสู่การพัฒนาชีวิตและความเป็นอยู่ของมนุษย์ที่ดีขึ้นแสงเป็นกุญแจที่สำคัญที่ทำให้เราเห็นภาพหรือเข้าใจสิ่งต่าง ๆ ในธรรมชาติไม่ว่าสิ่งนั้นเป็นวัตถุที่มีขนาดเล็ก เช่น อะตอม โมเลกุล ไปจนถึงสิ่งที่มีขนาดใหญ่อย่างเช่นจักรวาล แสงมีคุณสมบัติทวิภาคนั่นคือแสงมีคุณสมบัติที่เป็นได้ทั้งอนุภาคและคลื่นกรณีที่แสงถูกพิจารณาว่าเป็นอนุภาคนั้นแสงคือกลุ่มของอนุภาคที่ไม่มีมวลเรียกว่าโฟตอน (Photon) พลังงานของโฟตอน (E) และความถี่ของคลื่นแสง (ν) มีความสัมพันธ์กันตามสมการ $E=h\nu$ นั่นคือโฟตอนแต่ละตัวมีพลังงานเท่ากับค่าความถี่ของคลื่นแสงคูณกับค่าคงที่ของพลังค์ (h) ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอนในหน่วยของ eV และความยาวคลื่นในหน่วยของ nm สามารถหาได้จากสมการ 2.1 ดังต่อไปนี้

$$E = 1239.842 \text{ eV} \cdot \text{nm} \quad (2.1)$$

แสงมีชื่อเรียกแตกต่างกันขึ้นอยู่กับว่าแสงนั้นอยู่ในช่วงความถี่หรือช่วงความยาวคลื่นใด แสงที่เป็นที่รู้จักคุ้นเคยได้แก่ คลื่นวิทยุ (Radio Wave) คลื่นไมโครเวฟ (Microwaves) อินฟราเรด หรือแสงใต้แดง (Infrared) แสงที่มนุษย์มองเห็นได้ (Visible Light) อัลตราไวโอเลตหรือแสงเหนือม่วง (Ultraviolet) อัลตราไวโอเลตสุญญากาศ (Vacuum Ultra Violet ; VUV) รังสีเอกซ์พลังงานต่ำ (Soft X-rays) รังสีเอกซ์พลังงานสูง (Hard X-rays) และรังสีแกมมา (Gamma Rays) แสงที่มีความยาวคลื่นที่แตกต่างกันจะมีความสามารถในการตรวจวัดวัตถุที่มีขนาดแตกต่างกัน แสงที่มีความยาวคลื่นยิ่งสั้นก็ยิ่งมีความสามารถที่จะตรวจวัดหรือตรวจวิเคราะห์วัตถุที่มีขนาดยิ่งเล็ก ดังนั้นแสงในแต่ละช่วงความยาวคลื่นจึงถูกนำไปใช้ประโยชน์แตกต่างกันออกไป การที่แสงซินโครตรอนมีสเปกตรัมที่กว้างนี้ทำให้สเปกตรัมการใช้ประโยชน์กว้างตามไปด้วย

เมื่ออนุภาคมีประจุเช่นอิเล็กตรอนถูกเร่งให้มีความเร็วใกล้ความเร็วของแสงและบังคับให้เคลื่อนที่ในแนววงกลมภายในสุญญากาศอิเล็กตรอนจะสูญเสียพลังงานบางส่วนโดยการปลดปล่อยออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือแสงที่เรียกว่าแสงซินโครตรอนซึ่งเป็นแสงที่มีคุณลักษณะ

พิเศษที่โดดเด่นหลายประการเช่น มีความสว่างจ้ามาก ความเข้มแสงสูงและมีลำแสงที่คมมีสเปกตรัมต่อเนื่องโดยให้แสงที่มีความถี่ตั้งแต่ย่านอินฟราเรดจนถึงเอกซ์เรย์ทำให้เป็นแหล่งกำเนิดแสงชนิดเดียวที่สามารถเลือกช่วงความยาวคลื่นหรือพลังงานที่ต้องการใช้งานได้แสงมีคุณสมบัติโพลาไรเซชันนอกจากนี้ยังมีความเป็นพัลส์ที่สั้นมาก (Very Short Pulsed)

เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน

เครื่องกำเนิดแสงสยามเป็นเครื่องกำเนิดแสงที่ใช้ในการผลิตแสงซินโครตรอนเครื่องแรกของประเทศไทยมีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ

1. เครื่องเร่งอนุภาค (Accelerator) มีหน้าที่เร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงและมีอัตราเร็วเข้าใกล้อัตราเร็วของแสงประกอบด้วยเครื่องเร่งอนุภาคในแนวเส้นตรง (Linear Accelerator หรือ Linac) เร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงถึง 40 MeV เครื่องเร่งอนุภาคในแนววงกลม (Booster Synchrotron) เร่งอิเล็กตรอนจากส่วน Linac ซึ่งมีพลังงาน 40 MeV ให้มีพลังงานสูงขึ้นเป็น 1 GeV
2. วงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอนทำหน้าที่กักเก็บอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงซึ่งถูกเร่งมาจากส่วนเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนที่วิ่งภายในวงแหวนจะถูกบังคับให้เคลื่อนที่ในแนวโค้งโดยใช้สนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กสองขั้วที่เรียกว่า Bending Magnet ขณะที่อิเล็กตรอนเกิดการเลี้ยวเบนจะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปแสงซินโครตรอนในทิศทางสัมผัสกับวงโคจรของอิเล็กตรอนระบบลำเลียงแสงซินโครตรอน (Beamlines) แสงซินโครตรอนที่ปลดปล่อยออกมาจาก Bending Magnet, Undulator หรือ Wiggler จะถูกลำเลียงไปใช้ประโยชน์ในส่วนที่เรียกว่าสถานีทดลอง (Experimental Station) ระบบลำเลียงแสงซินโครตรอน ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ

2.1 Front-End เป็นส่วนที่มีหน้าที่ดังต่อไปนี้

- 2.1.1 ป้องกันไม่ให้ผู้ทำการทดลองชั้นได้รับอันตรายทางรังสีที่เกิดขึ้นในส่วนเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน
- 2.1.2 ป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนอันเนื่องมาจากการเกิดอุบัติเหตุในส่วนของสถานีทดลองหรือในส่วนของระบบลำเลียงแสงซินโครตรอน
- 2.1.3 ป้องกันอันตรายจากแสงซินโครตรอนที่ตกกระทบท่อสุญญากาศ หรือส่วนต่างๆของระบบลำเลียงแสงซินโครตรอน

2.2 Optical Beamline เป็นส่วนกำหนดพลังงาน ขนาดและความเข้มของแสงซินโครตรอนที่นำไปใช้งาน ซึ่งจะประกอบด้วยอุปกรณ์หลักคือ Monochromator ซึ่งเป็นส่วนที่ทำหน้าที่เลือกค่า

พลังงานของแสงซินโครตรอนที่จะนำไปใช้ประโยชน์และระบบกระจกสำหรับรวมแสงทั้งก่อนและหลังจากผ่าน Monochromator (Pre-and Post-Focusing Mirror Systems)

ระบบลำแสงซินโครตรอน BL6a: DXL เพื่อการอบรังสีเอกซ์ลงบนวัสดุ และการประดิษฐ์โครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างระบบลำแสง BL6a

BL6a เป็นระบบลำแสงซินโครตรอนในย่านรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ สำหรับกระบวนการประดิษฐ์โครงสร้างจุลภาคสัดส่วนสูง (High-Aspect-ratio Micromachining) และการอบรังสีวัสดุ (Material X-Ray Exposure) แสงซินโครตรอนที่เกิดจากการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนพลังงานสูง ณ บริเวณแม่เหล็กไฟฟ้า BM-6 ของเครื่องกำเนิดแสงสยาม ถูกลำเลียงไปใช้งานที่สถานีอบรังสี (Exposure Station) โดยระบบลำแสง BL-6 การลำเลียงแสงเพื่อนำออกมาใช้งานดังกล่าวมีข้อพิจารณาสามประการคือ

1. ตามปกติแล้วการอบรังสีเอกซ์ลงบนวัสดุจะดำเนินการในบรรยากาศซึ่งมีความดันย่าน $10^{-2} - 10^{-4}$ torr แต่เนื่องจากบรรยากาศภายในเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน มีความดันเพียง $10^{-9} - 10^{-11}$ torr ดังนั้นระบบลำแสงที่ใช้จะต้องมีส่วนที่แยกบรรยากาศที่แตกต่างกันมากดังกล่าวออกจากกัน

2. เนื่องจากแสงที่กำเนิดจากแม่เหล็ก BM-6 มีความยาวคลื่นในย่านกว้าง ดังนั้นจึงต้องทำการกรองแสงให้เฉพาะที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 1.24 nm (ย่านรังสีเอกซ์ขึ้นไป) ในย่านที่ต้องการผ่านออกไปยังสถานีอบรังสีได้

3. ลำแสงซินโครตรอนมีลักษณะเป็นแถบแบนดังนั้นจึงต้องมีกลไกขับเคลื่อนวัสดุหรือชิ้นงานให้เคลื่อนที่ตัดผ่านแถบแสงจึงจะสามารถอบรังสีเอกซ์ในบริเวณกว้างได้

โครงสร้างของระบบลำแสง BL6a ได้รับการออกแบบโดยคำนึงถึงข้อพิจารณาสามประการข้างต้น ซึ่งแบ่งออกเป็นสามส่วนได้แก่ ระบบลำแสงส่วนหน้า (Front-End) ระบบลำแสงในโถงทดลองและระบบขับเคลื่อนชิ้นงาน (X-Ray Scanner)

ระบบลำแสงส่วนหน้า

มีหน้าที่หลักในการเปิดและปิดการลำแสงซินโครตรอนจากแหล่งกำเนิดออกไปยังโถงทดลอง นอกจากนี้ยังเป็นส่วนที่กำหนดขนาดและรูปร่างของลำแสงด้วย

ระบบลำแสงในโถงทดลอง

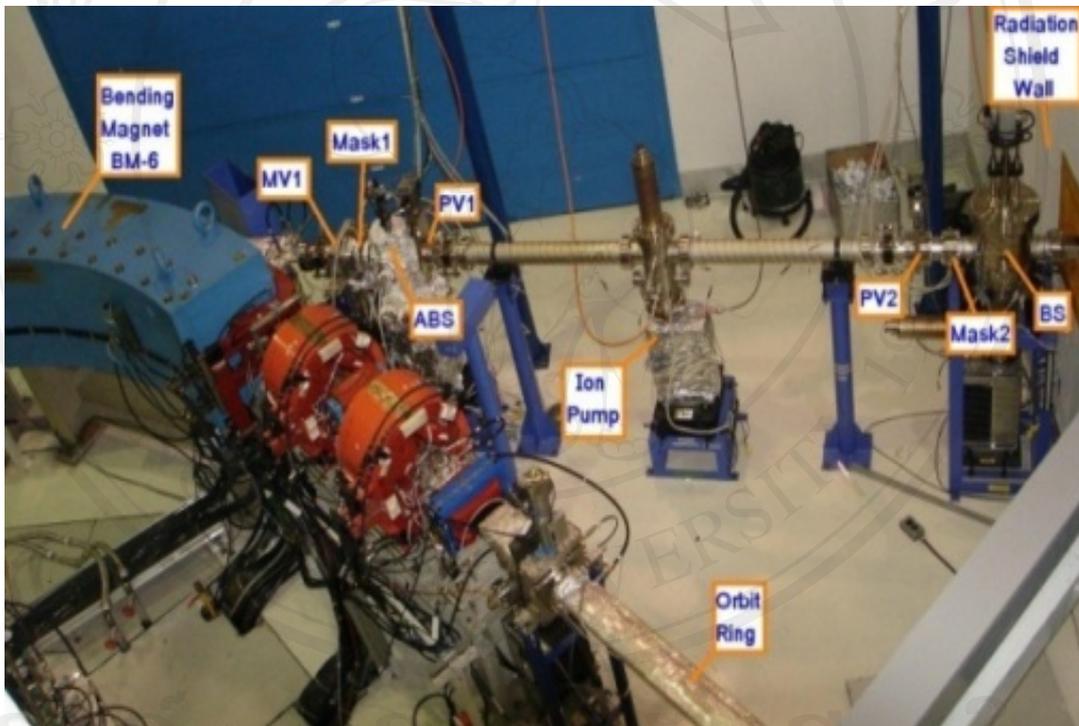
ทำหน้าที่แยกบรรยากาศซึ่งมีความดัน $10^{-9} - 10^{-11}$ torr ออกจากบรรยากาศซึ่งมีความดัน $10^{-2} - 10^{-4}$ torr และกรองแสงในย่านความยาวคลื่นที่ไม่ต้องการออกไปโดยใช้ผลึก Be ที่มีความหนา 100 ไมโครเมตรเป็นฟิลเตอร์ ซึ่งจะยอมให้แสงที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 1.24 nm (ย่านรังสีเอกซ์

ขึ้นไป) เดินทางผ่านไปยังสถานีออบรังสีได้

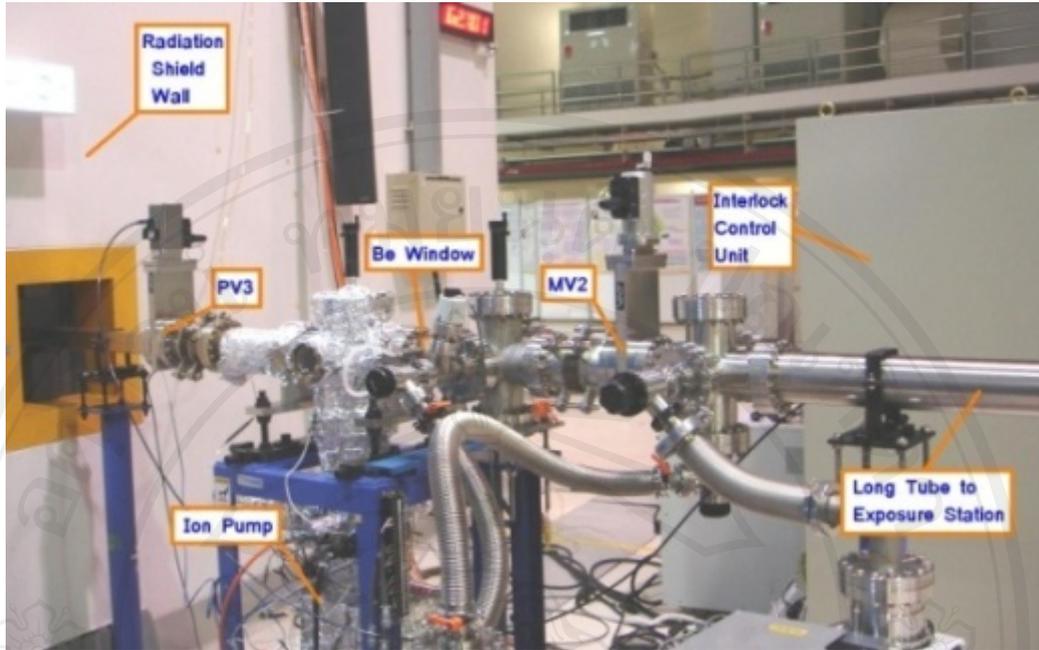
ระบบขับเคลื่อนชิ้นงาน

ใช้สำหรับจับยึดชิ้นงานและขับเคลื่อนชิ้นงานให้ตัดผ่านแถบแบนของแสงซินโครตรอน เพื่อให้มีพื้นที่ออบรังสีเพิ่มมากขึ้น

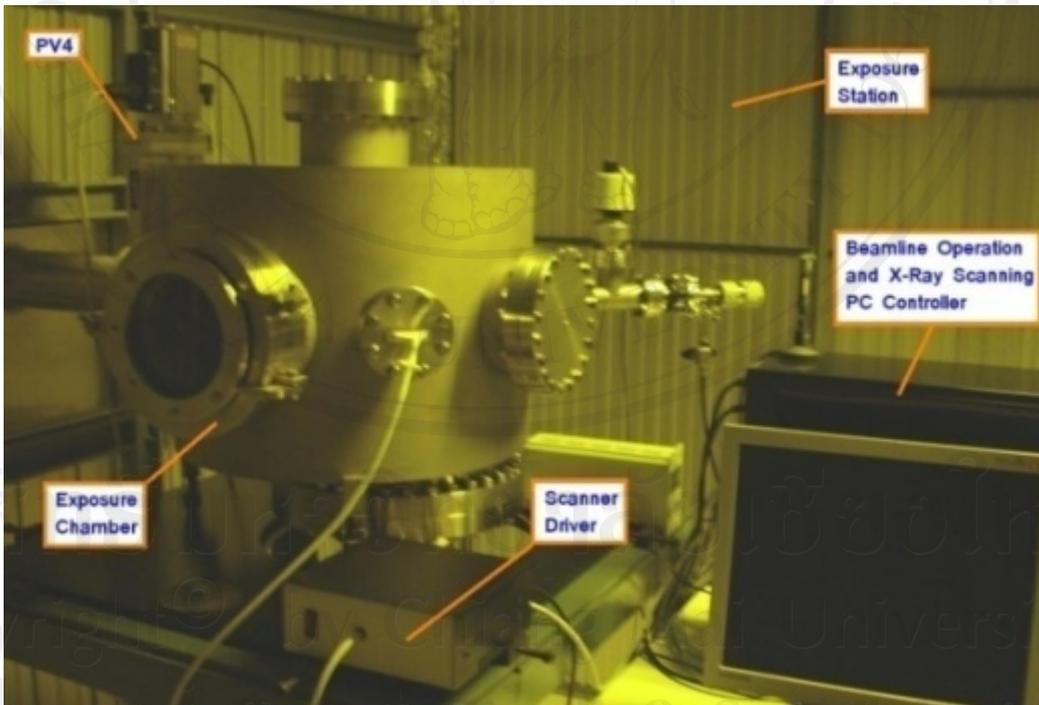
รูปที่ 2.2 และ 2.3 แสดงภาพส่วนประกอบของระบบลำเลียงแสงส่วนหน้า และในโถงทดลอง ตามลำดับ ส่วนรูปที่ 2.4 แสดงอุปกรณ์ภายในสถานีออบรังสี หน้าที่ของส่วนประกอบต่างๆ ในระบบลำเลียงแสง BL-6 แสดงดังตารางที่ 2.2 ข้อมูลทางเทคนิคของระบบลำเลียงแสงและสเปกตรัมของแสงที่ผลิตได้ แสดงในตารางที่ 2.3 และรูปที่ 2.5 ตามลำดับ



รูปที่ 2.2 ระบบลำเลียงแสง BL-6 ส่วนหน้า (ภายในกำแพงกันรังสี)



รูปที่ 2.3 ระบบลำเลียงแสง BL-6 ในห้องทดลอง



รูปที่ 2.4 อุปกรณ์ภายในสถานีอานรังสี

ตารางที่ 2.2 รายละเอียดส่วนประกอบต่างๆ ในระบบลำเลียงแสง BL-6

อุปกรณ์	ตำแหน่ง	หน้าที่
Bending Magnet (BM-6)	แทรกใน Orbit Ring	บังคับให้อิเล็กตรอนพลังงานสูงที่โคจรใน Orbit Ring เลี้ยวเบนและกำเนิดแสงซินโครตรอนซึ่งมีความยาวคลื่นในย่านกว้างออกมา
Manual Valve 1 (MV1)	ระหว่าง BM-6 และ Mask1	แยกระบบลำเลียงแสงออกจาก Orbit Ring ในกรณีทำการซ่อมบำรุง ตามปกติจะเปิดไว้ตลอดเวลา
Photon Mask 1 (Mask1)	ระหว่าง MV1 และ ABS	ใช้กำหนดขนาดของลำแสงซินโครตรอนที่แผ่ออกมาจากแม่เหล็ก BM-6 ในมุมกว้าง เพื่อป้องกันไม่ให้ท่อลำเลียงถูกชนด้วยลำแสง
Heat Absorber (ABS)	ระหว่าง Mask1 และ PV1	ใช้ปิดกั้นลำแสงไม่ให้ผ่านเข้าไปในระบบลำเลียงแสง ซึ่งจะเกิดความร้อนขึ้นอย่างมาก ดังนั้นจึงต้องทำการหล่อเย็นอย่างต่อเนื่อง
Pneumatic Valve 1 (PV1)	ระหว่าง ABS และ Ion Pump	วาล์วสุญญากาศควบคุมการเปิด-ปิดด้วยоргันอากาศ ใช้แยกระบบลำเลียงส่วน ABS ออกจากส่วนลำเลียงถัดไป
Ion Pump	ระหว่าง PV1 และ PV2	ใช้สร้างสุญญากาศระดับความดัน 10^{-9} - 10^{-11} ภายในระบบลำเลียงแสงส่วนหน้า
Pneumatic Valve 2 (PV2)	ระหว่าง Ion Pump และ Mask2	วาล์วสุญญากาศควบคุมการเปิด-ปิดด้วยоргันอากาศ ใช้แยกระบบลำเลียงส่วน Ion Pump ออกจากส่วนลำเลียงถัดไป
Photon Mask 2 (Mask2)	ระหว่าง PV2 และ BS	ใช้กำหนดขนาดของลำแสงซินโครตรอนที่แผ่ออกมาจาก Heat Absorber เพื่อป้องกันไม่ให้ท่อลำเลียงถูกชนด้วยลำแสงในระยะถัดไป
Beam Shutter (BS)	ระหว่าง Mask2 และ Radiation Shield Wall	ใช้ปิดกั้นรังสีทุติยภูมิ ที่แผ่ออกมาจาก Heat Absorber ไม่ให้ผ่านออกไปยังระบบลำเลียงแสงในโถงทดลอง

ตารางที่ 2.2 รายละเอียดส่วนประกอบต่างๆ ในระบบลำเลียงแสง BL-6 (ต่อ)

อุปกรณ์	ตำแหน่ง	หน้าที่
Radiation Shield Wall	ระหว่าง BS และ PV3	มีหน้าที่กั้นรังสีที่กำเนิดจาก Orbit Ring, แม่เหล็ก BM-6 และระบบลำเลียงแสงส่วนหน้า ไม่ให้ออกมายังโถงทดลอง
Pneumatic Valve 3 (PV3)	ระหว่าง Radiation Shield Wall และ Ion Pump	ใช้แยกระบบลำเลียงแสงส่วนหน้าออกจากระบบลำเลียงแสงในโถงทดลอง
Ion Pump	ระหว่าง PV3 และ Be Window	ใช้สร้างสุญญากาศระดับความดัน 10^{-9} - 10^{-11} ภายในระบบลำเลียงแสงในโถงทดลอง ส่วนที่อยู่ระหว่าง PV3 และ Be Window
Be Window	ระหว่าง Ion Pump และ MV2	ใช้แยกระบบลำเลียงแสงในโถงทดลองส่วนความดันสูง(ด้านสถานีออบรังสี) ออกจากส่วนความดันต่ำ (ส่วนหน้า) และใช้กรองแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 1.24 nm ไม่ให้ผ่านออกไปยังห้องออบรังสีเพื่อให้ได้แสงที่นำไปใช้งานอยู่ในย่านรังสีเอกซ์พลังงานต่ำขึ้นไป
Manual Valve 2 (MV2)	ระหว่าง Be Window และ Long Tube	ใช้แยก Long Tube ออกจาก Be Window ในกรณีทำการซ่อมบำรุง MV2 ตามปกติจะเปิดไว้ตลอด
Long Tube	ระหว่าง MV2 และ PV4	เป็นส่วนต่อขยายความยาวของระบบลำเลียงแสง เพื่อให้พื้นที่แสงตกกระทบบนชิ้นงานมีขนาดใหญ่ขึ้น ความดันภายในระบบลำเลียงแสงส่วนความดันสูง ขณะทำการออบรังสีลงบนชิ้นงาน อยู่ในช่วง 10^{-2} - 10^{-4} torr
Interlock Control Rack	บริเวณใกล้กับ Be Window	ส่วนควบคุมการทำงานของระบบวาล์วสุญญากาศ ซึ่งจะต้องป้องกันไม่ให้อากาศภายนอกรั่วไหลเข้าไปใน Orbit Ring ซึ่งจะก่อความเสียหายแก่เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนอย่างร้ายแรง ระบบนี้ควบคุมการทำงานด้วย PLC (programmable logic controller)

ตารางที่ 2.2 รายละเอียดส่วนประกอบต่างๆ ในระบบลำเลียงแสง BL-6 (ต่อ)

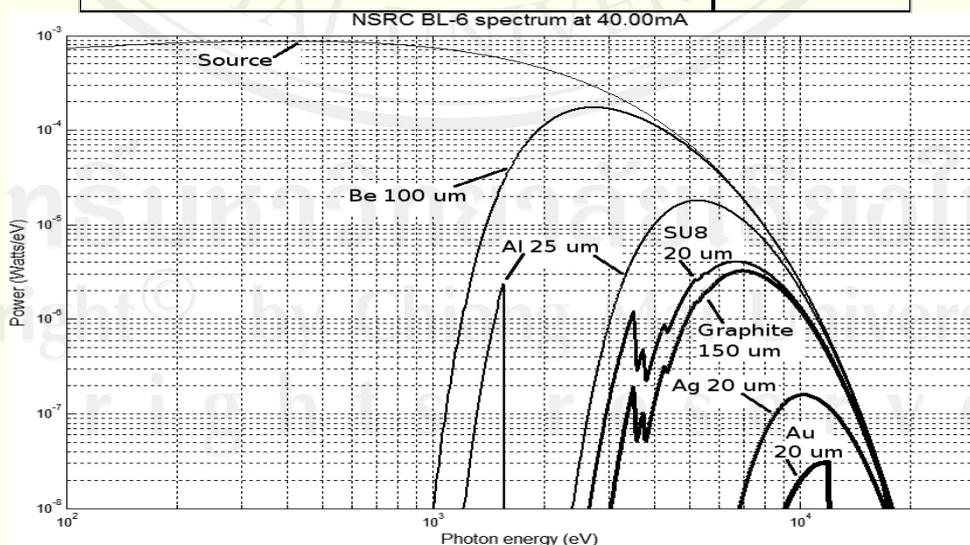
อุปกรณ์	ตำแหน่ง	หน้าที่
Exposure Station	ปลายสุดของ Long Tube	ใช้ควบคุมความสะอาดของอากาศ และควบคุมแสงรอบๆห้อง ออบรังสี เนื่องจากฝุ่นละอองในอากาศและแสงสีขาวยจะทำให้ ชีงงานซึ่งมีลวดลายต้นแบบขนาดเล็กมากและไวต่อแสงสีขาว เกิดความเสียหายได้ อากาศที่ผ่านเข้าไปยังสถานีออบรังสีจะถูก กรองด้วย HEPA filter ตลอดเวลา ทำให้ความดันอากาศภายใน สถานีออบรังสีสูงกว่าภายนอกห้องเล็กน้อย ซึ่งจะป้องกันไม่ให้ ฝุ่นละอองในอากาศเล็ดลอดเข้าไปตามช่องประตู
Pneumatic Valve 4 (PV4)	ปลายสุดของ Long Tube ภายใน Exposure Station	ใช้แยก Long Tube ออกจากห้องออบรังสี โดยจะปิดวาล์วตัวนี้ ขณะทำการเปิดฝาห้องออบรังสีเพื่อนำชิ้นงานเข้า-ออก ทำให้ใช้ เวลาในการสร้างสุญญากาศสั้นลงเนื่องจากต้องดูดอากาศเฉพาะ ส่วนที่เป็นห้องออบรังสีเท่านั้น
Exposure Chamber	ปลายสุดของ ระบบลำเลียง แสง ถัดจาก PV4	เป็นห้องออบรังสี ซึ่งบรรจุระบบขับเคลื่อนชิ้นงานให้ตัดผ่าน ลำแสง เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่มากขึ้น
X-Ray Scanner	ภายใน Exposure Chamber	เป็นระบบขับเคลื่อนชิ้นงานให้ตัดผ่านลำแสง เพื่อให้ครอบคลุม พื้นที่มากขึ้น โดยทำการขับเคลื่อนให้ชิ้นงานเคลื่อนที่ขึ้น-ลงใน แนวตั้งจนกว่าชิ้นงานจะได้รัฟพลังงานเพียงพอตามความต้องการ
Exposure Control PC	บริเวณใกล้ กับ Exposure Chamber	ส่วน ควบคุม การเปิด-ปิด วาล์ว สุญญากาศ โดยผ่าน ทาง Interlock Control Rack และควบคุมระบบขับเคลื่อนชิ้นงาน โดยผ่านวงจรควบคุมการขับเคลื่อนชิ้นงาน นอกจากนี้ยังใช้ บันทึกรหัสข้อมูลการออบรังสีลงบนชิ้นงานอีกด้วย

ตารางที่ 2.3 สรุปข้อมูลทางเทคนิคของระบบลำเลียงแสง BL-6

Electron energy	1.2 GeV
Bending magnet radius	2.78 m
Bending magnet field strength	1.44 T

ตารางที่ 2.3 สรุปข้อมูลทางเทคนิคของระบบลำเลียงแสง BL-6 (ต่อ)

Natural emittance	41 nm.rad
Critical photon energy	1.38 keV
Gaussian width at 10-degree port	H: 320 microns V: 47 microns
Opening angle of 100 micron-thick Be window	H: 5.3 mrad V: 1.1 mrad
Transmitted band-pass spectrum	2 keV - 8 keV
Source-to-sample distance	17.44 m
Beam size at sample	H: 87.2 mm V: 7.4 mm
Vertical scanning length of sample	100 mm
Opening diameter of circular sample holder	80 mm
Scanning speed	0.8 mm/s
Time duration in which a point on the sample passes through the beam height	9.25 s
Time duration in which the sample travels for 1 cm	0.21 minutes



รูปที่ 2.5 สเปกตรัมของแสงซินโครตรอนจากระบบลำเลียงแสง BL-6 เปรียบเทียบกำลังแสงที่ผ่านชั้นฟิลเตอร์ชนิดต่างๆที่มา:สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

2.2.2 กระบวนการกัดด้วยเครื่อง Reactive Ion Etching (RIE)

การกัด (Etching) แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การกัดโดยใช้สารเคมี (Wet Chemical Etching) และการกัดโดยใช้พลาสมา (Dry Plasma Etching) ซึ่งการกัดโดยใช้สารเคมีเป็นวิธีที่เก่ากว่าแต่สามารถใช้ได้ง่ายกว่า การกัดโดยใช้สารเคมี (Wet Chemical Etching) คือการใช้สารละลายโดยมากนิยมใช้กรด เพื่อทำหน้าที่ในการกัดชิ้นงานในบริเวณที่ไม่ต้องการออก โดยการเลือกชนิดของสารเคมีนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของชิ้นงานที่นำมาใช้ ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ในทางทฤษฎี สารละลายที่ใช้ในการกัด จะทำปฏิกิริยากับวัสดุที่ต้องการกัดออกไป และจะไม่ทำปฏิกิริยากับวัสดุอื่นๆ แต่ในทางปฏิบัติวัสดุอื่นๆที่ไม่มีสารเคลือบไว้ก็จะเกิดปฏิกิริยากับสารละลายที่ใช้กัดได้ แต่จะทำปฏิกิริยากันน้อยกว่าวัสดุที่ต้องการกัดออกไป และหากไม่มีการควบคุมที่ดีพอในขณะกัด อาจส่งผลให้เกิดการกัดที่ไม่สมบูรณ์ คือ การกัดสิ่งที่ต้องการกำจัดออกได้ไม่หมด และการกัดชิ้นงานที่ไม่ต้องการกัด

ส่วนการกัดโดยใช้พลาสมา (Dry Plasma Etching) เป็นการใช้อิออนของก๊าซในการกัด ส่วนที่ต้องการกำจัดออกไป ซึ่งอิออนของก๊าซสามารถถูกสร้างจากการนำก๊าซมาผสมกันในห้องสุญญากาศ และใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อแตกตัวก๊าซบางส่วนให้ได้อิออนออกมา ซึ่งเราเรียกว่าพลาสมา เมื่อพลาสมาที่มีพลังงานสูงไปกระทบกับผิวชิ้นงาน อิออนของก๊าซจะเป็นตัวกัดส่วนที่ไม่ต้องการออก การกัดโดยใช้พลาสมามีอยู่หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมผลิตฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟนั้นเป็นการกัดด้วยเครื่อง Reactive Ion Etching (RIE) ซึ่งเป็นการกัดโดยใช้พลาสมา และการกัดโดยการทำปฏิกิริยาของอิออน

พลาสมาเกิดจากการแตกตัวของก๊าซ ประกอบด้วย อิเล็กตรอน และโมเลกุลที่เป็นกลางทางไฟฟ้า เพื่อที่จะทำปฏิกิริยาเคมีอย่างรุนแรงกับบริเวณชิ้นงานที่ถูกฉายแสง ก๊าซที่นิยมใช้ในการผลิตพลาสมา คือ ก๊าซฟลูออรีนและก๊าซคลอรีน โดยทั่วไปแล้วการกัดแบบใช้พลาสมา (Dry Plasma Etching) จะมีปัญหามากกว่าการกัดโดยใช้สารเคมี (Wet Chemical Etching)

ส่วนการกัดโดยการทำปฏิกิริยาของอิออนเป็นการกัดส่วนที่ไม่ต้องการออกทางกายภาพคืออะตอมจะเป็นตัวกัดส่วนที่ไม่ต้องการออกจากผิวหน้าของชิ้นงาน โดยวิธีการวิ่งชนซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งของการกัดทางกายภาพ เรียกว่า Sputtering Etching แม้ว่าเทคนิคนี้จะนิยมนำไปใช้ในการผลิตเซมิคอนดักเตอร์ แต่ก็นิยมที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับการกัดโดยใช้พลาสมา (Dry Plasma Etching) ซึ่งเป็นวิธีที่รู้จักกันในชื่อ การกัดโดยการทำปฏิกิริยาของอิออน

ข้อดีของการกัดโดยใช้พลาสมา (Dry Plasma Etching) คือลักษณะของการกัดจะเป็นแอนไอโซทรอปิกมากกว่า ซึ่งดีกรีความเป็นแอนไอโซทรอปิกสามารถหาได้จากอัตราส่วนดังสมการ

$$A = \frac{d}{u} \quad (2.2)$$

โดยที่ A คือดัชนีการเป็นแอนไอโซทรอปิก, d คือความลึกของการกัด และ u คือขนาดที่ทำกรกัดเกินโดยปกติแล้วการกัดโดยใช้สารเคมี (Wet Chemical Etching) ค่าดัชนีการเป็นแอนไอโซทรอปิกจะอยู่ประมาณ 1.0 ส่วนในการกัดโดยการทำปฏิกิริยาของไอออนค่าดัชนีการเป็นแอนไอโซทรอปิกจะมีค่าเข้าสู่ค่าอนันต์ ซึ่งเกือบจะเป็นแอนไอโซทรอปิกอย่างสมบูรณ์ ตารางที่ 2.4 สารเคมีที่ใช้ในการกัดทั่วไปในกระบวนการผลิตเซมิคอนดักเตอร์

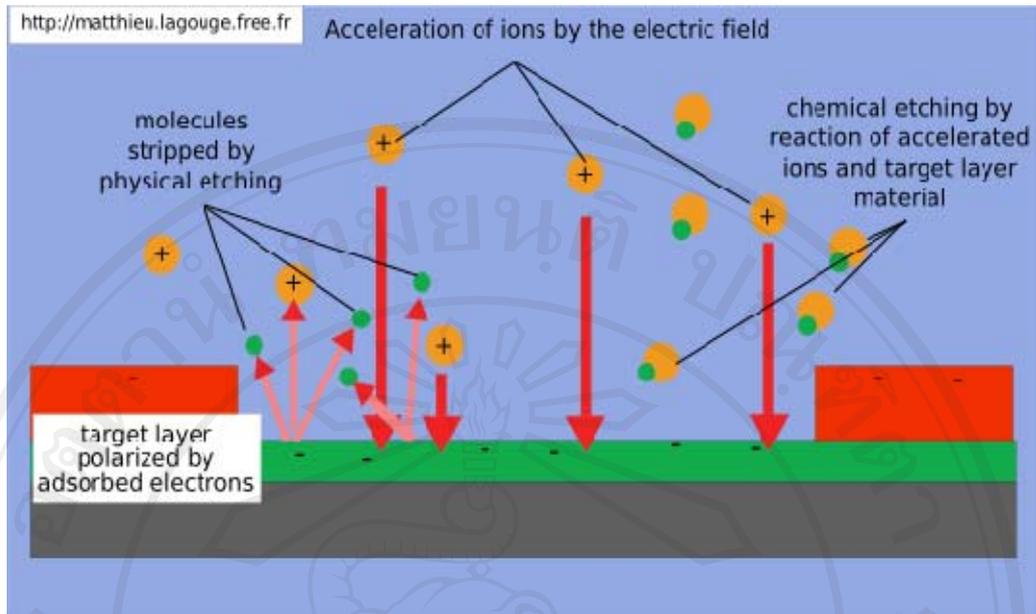
Material to Be removed	Etchant (usually in aqueous solution)
Aluminum (Al)	Mixture of Phosphoric Acid (H_3PO_4), Nitric Acid (HNO_3), and Acetic Acid (CH_3COOH)
Silicon (Si)	Mixture of Nitric Acid (HNO_3) and Hydrofluoric Acid (HF)
Silicon dioxide (SiO_2)	Hydrofluoric Acid (HF)
Silicon nitride (Si_3N_4)	Hot Phosphoric Acid (H_3PO_4)

Groover (1996)

การทำงานของกระบวนการกัดด้วยเครื่อง Reactive Ion Etching (RIE)

กระบวนการกัดด้วยเครื่อง Reactive Ion Etching (RIE) เป็นกระบวนการกัดโดยใช้พลาสมา โดยมีวิธีการกัดทั้ง การกัดทางกายภาพหรือการกัดโดยการชนของไอออน (Physical Etching) และการกัดแบบการเกิดปฏิกิริยาเคมี (Chemical Etching)

การทำงานของเครื่อง RIE เริ่มจากการโหลดชิ้นงานเข้าไปในห้อง (Chamber) จากนั้นทำการดูดอากาศออกโดยใช้ปั๊ม จนกระทั่งภายในห้องมีความดันเท่ากับ 0 mTorr (ห้องสุญญากาศ) ปล่อยก๊าซเข้าไปในห้องสุญญากาศนั้น จากนั้นทำการต่อแหล่งจ่ายคลื่นวิทยุเข้ากับ Coil และ Platen เมื่อตัวนำได้รับพลังงานก็จะเกิดสนามไฟฟ้ารอบๆ บริเวณตัวนำ ซึ่งเมื่อเกิดสนามไฟฟ้ามากพอ จะทำให้เกิดการแตกตัวของก๊าซ ซึ่งประกอบไปด้วย อิเล็กตรอน, ไอออน และ โมเลกุลที่เป็นกลางทางไฟฟ้า อยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน ส่วนที่วางชิ้นงานเมื่อได้รับพลังงานจะทำให้ชิ้นงานมีศักย์ไฟฟ้าที่เป็นลบ ซึ่งเป็นตัวดึงให้ไอออนบวกมาชนชิ้นงาน เรียกว่า Physical Etching และในขณะเดียวกัน หากชิ้นงานสามารถทำปฏิกิริยากับ โมเลกุล หรืออะตอมของก๊าซได้ จะทำให้เกิดการกัดเชิงเคมี หรือเรียกว่า Chemical Etching



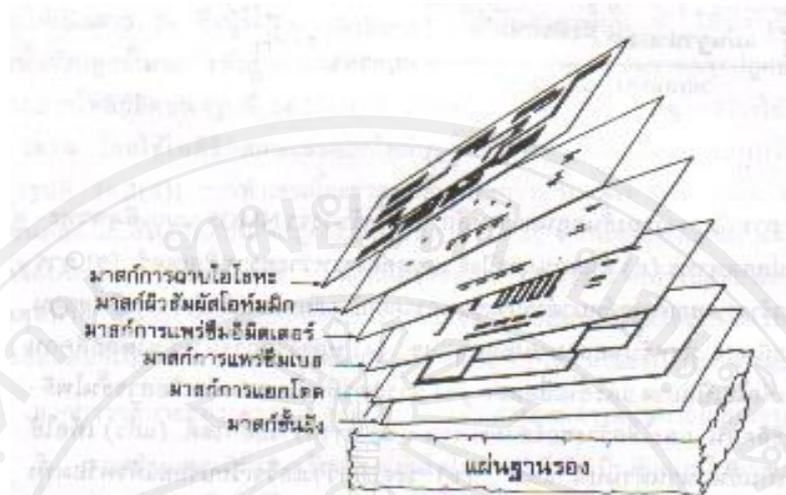
รูปที่ 2.6 แสดงการกัดแบบ Physical Etching และ Chemical Etching ในเครื่อง RIE

2.2.3 กระบวนการสร้างลวดลายโครงสร้างจุลภาค

2.2.3.1 การสร้างแผ่นโฟโตมาส์ก์

โดยทั่วไปเมื่อทำการทดสอบหรือจำลองการทำงานของวงจรถูกออกแบบจนเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนแรกในการสร้างไอซีก็คือ การสร้างรูปแบบที่เป็นรูปทรงเรขาคณิตของวงจรรูปแบบต่าง ๆ ที่สร้างขึ้นจะประกอบด้วยการวาดส่วนประกอบต่าง ๆ ของวงจรถูกแบ่งออกเป็นหลายระดับ อย่างเช่น ขั้วไฟฟ้าจะถูกวาดในระดับหนึ่ง การเชื่อมต่อของชั้น โลหะจะถูกวาดในอีกระดับหนึ่ง เป็นต้น ทั้งนี้ขึ้นกับกระบวนการสร้างไอซีที่จะกระทำในแต่ละขั้นตอน อย่างเช่น การฝากสารเจือโดยการแพร่ซึม การฝังไอออน หรือกระบวนการฉาบไอระเหยของโลหะ เป็นต้น จึงทำให้แผ่นโฟโตมาส์ก์ที่จะสร้างต้องมีระดับต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน ดังนั้นโดยปกติการสร้างวงจรรวมหนึ่ง ๆ ให้เสร็จสิ้นสมบูรณ์ จึงจำเป็นต้องใช้โฟโตมาส์ก์หลาย ๆ อัน ประกอบกันเป็นชุดดังเช่นแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นชุดโฟโตมาส์ก์ที่ใช้ในการสร้างวงจรรวมแบบหนึ่ง โดยมีทั้งหมด 6 แผ่นตามลำดับขั้นตอนของการสร้างวงจรรวม โดยที่สามารถสรุปขั้นตอนการออกแบบสร้างโฟโตมาส์ก์ได้ดังนี้คือ

Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2.7 ชุดโฟโตมาสก์ที่ใช้ในการสร้างวงจรรวม

1. เขียนภาพรูปร่างเรขาคณิตส่วนประกอบของวงจรรวมที่จะสร้าง
2. จัดตำแหน่งที่อยู่ของส่วนประกอบแต่ละส่วนในวงจรรวมให้เหมาะสมโดยให้เหลือที่ว่าง (Space) ระหว่างส่วนประกอบให้น้อยที่สุด การเดินสายต่อภายในระหว่างส่วนประกอบแต่ละส่วนต้องทำให้สั้นและง่าย นอกจากนี้ต้องสะดวกต่อการต่อสายออกไปยังวงจรรายนอกอีกด้วย
3. ทำการแยกระดับมาสก์กึ่งของส่วนประกอบออกเป็นระดับต่าง ๆ เพื่อให้สร้างโฟโตมาสก์แต่ละแผ่น

ขั้นตอนการทำทั้ง 3 ขั้นตอนที่กล่าวถึงสามารถใช้เครื่องคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยได้

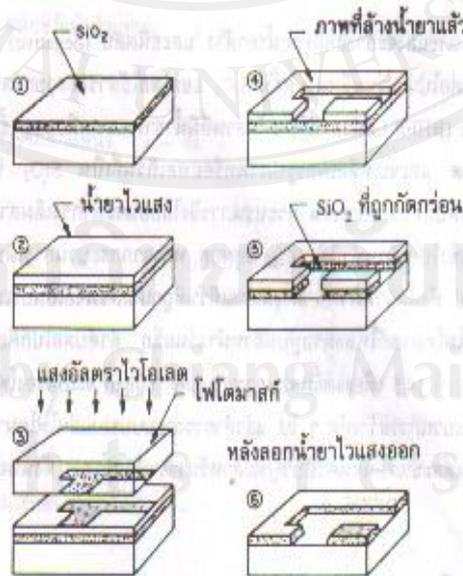
โดยการเขียนรูปแบบแต่ละระดับให้มีขนาดใหญ่กว่าขนาดจริง โดยทั่วไปขนาดวงจรที่ออกแบบขยายตั้งแต่ 100 ถึง 2,000 เท่า เมื่อทำการออกแบบเรียบร้อยแล้วจะเก็บข้อมูลไว้ในเทป จากนั้นงานการสร้างโฟโตมาสก์จริงจึงเริ่มขึ้น โดยตั้งต้นจากการถ่ายย่อเลย์เอาต์ของรูปแบบแต่ละโฟโตมาสก์ให้มีขนาดเล็กลงเหลือเป็น 10 เท่าของขนาดที่ต้องการ ต่อไปจึงใช้เครื่องมือที่เรียกว่า กล้องถ่ายรูปแบบสเตปแอนดรีพีต (Step-And-Repeat Camera) หรือ สเตปเปอร์ (Stepper) ทำการถ่ายย่ออีก 10 เท่า เพื่อสร้างรูปแบบที่ซ้ำ ๆ กันเป็นแอร์เรย์บนแผ่นกระจก และในที่สุดต้นแบบของโฟโตมาสก์ก็จะถูกสร้างขึ้นและนิยมเรียกว่า แผ่นมาสเตอร์ (Master Plate) แผ่นมาสเตอร์จะนำไปเป็นต้นแบบของโฟโตมาสก์ เพื่อสร้างโฟโตมาสก์ที่เหมือนกันขึ้นอีกจำนวนมาก เพื่อนำไปใช้เป็นโฟโตมาสก์สำหรับถ่ายรูปแบบแต่ละระดับของวงจรรวมลงบนผิวหน้าเว่นผลึกในกระบวนการสร้างไอซี โดยทั่วไปโฟโตมาสก์ที่ใช้งานมักเป็นแผ่นแก้วโปร่งใสหรือควอตซ์ และเคลือบด้วยวัสดุไวแสง (Mask Coating Material) ในบริเวณที่มีการสร้างรูปแบบของโฟโตมาสก์ วัสดุที่ใช้เคลือบมักเป็นอิมัลชัน (Emulsion) (คล้ายกับสารที่เคลือบบนแผ่นฟิล์มถ่ายภาพ) หรือวัสดุที่มีผิวหน้าแข็ง

อย่างเช่น โครเมียม โครเมียมออกไซด์ เหล็กออกไซด์ หรือซิลิคอน แผ่นโฟโตมาส์ที่เคลือบด้วยอิมัลชันจะมีราคาถูก แต่สามารถใช้ในการถ่ายแบบวงจรที่มีขนาดพิเชอร์ (Feature Size) $\geq 3 \mu\text{m}$ หากเป็นมาส์ที่เคลือบด้วยวัสดุที่มีผิวหน้าแข็งจะใช้ในการถ่ายแบบวงจรที่มีขนาดพิเชอร์ $\approx 1 \mu\text{m}$ อย่างไรก็ตามราคาของแผ่นมาส์ดังกล่าวนี้จะแพงกว่าแผ่นมาส์ที่เคลือบด้วยอิมัลชัน

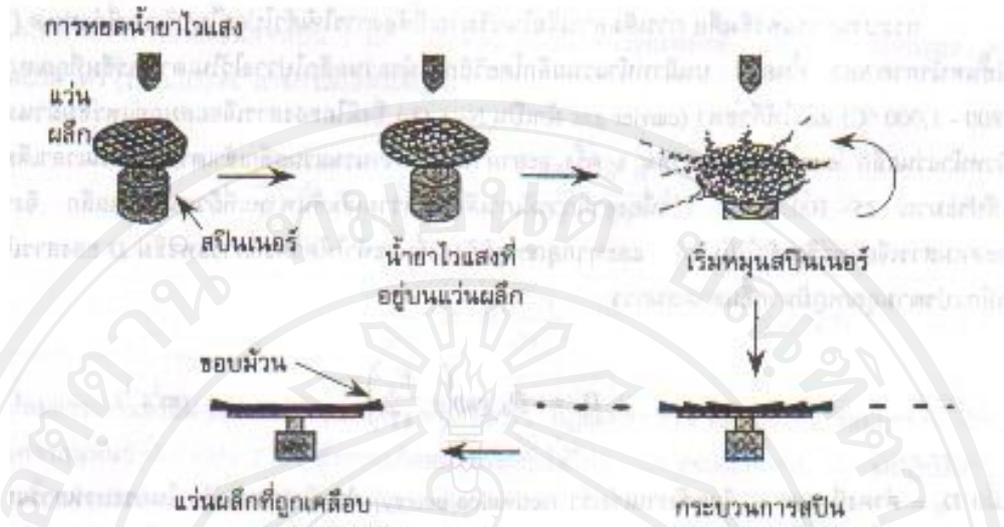
สำหรับวงจรที่มีขนาดพิเชอร์เล็ก ($< 1 \mu\text{m}$) จะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า ลำอิเล็กตรอน (E-Beam) ช่วยในการวาดรูปแบบของเลย์เอาต์โดยตรงลงบนเว่นผลึก โดยไม่ต้องอาศัยแผ่นมาส์ช่วยในการถ่ายแบบ

2.2.3.2 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photo Lithography)

จุดประสงค์ของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี คือ การถ่ายแบบของรูปแบบที่อยู่บนแผ่นโฟโตมาส์ให้ลงไปยังผิวหน้าของเว่นผลึก Si รูปที่ 2.8 แสดงกระบวนการถ่ายแบบที่เป็นแบบแผน โดยขั้นแรกทำการปลูกชั้นออกไซด์เพื่อทำให้เกิดเป็น SiO_2 โดยปกติหนาประมาณ $1,000\text{--}10,000 \text{ \AA}$ จากนั้นจะทำการหยคน้ำยาไวแสงบนผิวหน้าเว่นผลึกซึ่งติดอยู่บนเครื่องสปินเนอร์ (Spinner) ด้วยการดูดสุญญากาศ ขั้นต่อไปทำการหมุนสปินเนอร์เพื่อทำให้น้ำยาไวแสงเคลือบสม่ำเสมอลงบนเว่นผลึกและหนาประมาณ $1 \mu\text{m}$ (รูปที่ 2.9) หลังจากเคลือบน้ำยาไวแสงและอบแห้งแล้วจึงทำการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (บางครั้งอาจใช้แสงในช่วงความยาวคลื่นอื่น ๆ ก็ได้ เช่น DUV) ผ่านแผ่นโฟโตมาส์ลงบนผิวหน้าที่เคลือบน้ำยาไวแสงในช่วงเวลาสั้นๆ (คล้ายกับการเปิดหน้ากล้องเพื่อให้แสงผ่านมาที่ฟิล์มถ่ายรูปเพื่อบันทึกภาพ)



รูปที่ 2.8 หลักการของกระบวนการถ่ายแบบ



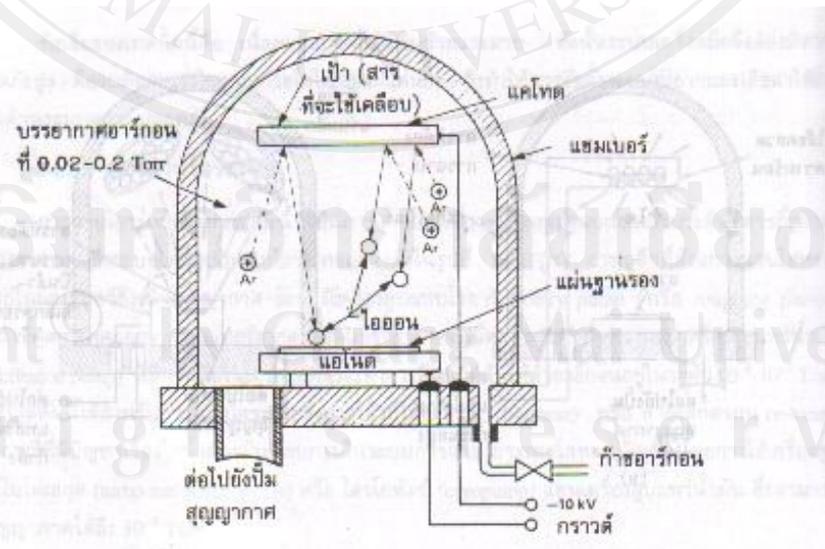
รูปที่ 2.9 กระบวนการหมุนเคลือบ (Spin Coating) เพื่อทำให้น้ำยาไวแสงเคลือบสม่ำเสมอบนผิวหน้าแว่นผลึก

จากนั้นจึงนำแว่นผลึกไปล้างด้วยน้ำยาล้าง (Developer) ในกรณีนี้สมมติว่าการล้างน้ำยาจะละลายน้ำยาไวแสงออกในส่วนผิวหน้าแว่นผลึกที่ไม่ถูกแสงฉาย [โดยทั่วไปน้ำยาไวแสงมี 2 ประเภท คือ ชนิดบวก (Positive) เป็นน้ำยาที่บริเวณที่ถูกฉายจะล้างออกด้วยน้ำยาล้าง และชนิดลบ (Negative) เป็นน้ำยาที่บริเวณที่ไม่ถูกแสงจะถูกล้างออก] ขั้นต่อไปนำแว่นผลึกมากัดชั้น SiO_2 ออกโดยใช้สารละลายกรดบัฟเฟอร์ไฮโดรฟลูออริก (Buffered Hydrofluoric : BHF) แต่น้ำยานี้จะไม่กัดส่วนที่มีน้ำยาไวแสงเคลือบอยู่ ขั้นตอนสุดท้ายทำการล้างน้ำยาไวแสงออกให้หมด และจะเหลือเพียงรูปภาพหรือรูปแบบที่เป็น SiO_2 ซึ่งใช้เป็นหน้ากากสำหรับกระบวนการสร้างในลำดับถัดไป อย่างเช่น กระบวนการฝังไอออนจะทำการเติมสารเจือลงบนผิวหน้า Si ที่เปิด แต่จะไม่มีสารเจือเข้าไปในผิวหน้าที่มี SiO_2 คลุมอยู่ หลังจากกระบวนการเติมสารเจือเสร็จสิ้นลงจะทำการลอกชั้น SiO_2 ทิ้งไป ดังนั้นผิวหน้า Si ก็จะมีรูปแบบที่ถูกเติมสารเจือเป็นบริเวณซึ่งเป็นการคัดลอกแบบจากรูปแบบที่อยู่บนโฟโตมาส์กให้ลงมาอยู่บนผิวหน้าแว่นผลึก ลำดับต่อไปก็คือ การทำซ้ำเดิมตั้งแต่ต้นคล้าย ๆ กันที่แสดงในรูปที่ 2.9 เพียงแต่ขั้นตอนการปรับแต่ง (Align) จะเป็นของโฟโตมาส์กแผ่นอื่น ๆ ตามลำดับขั้นตอนสำหรับกระบวนการสร้างถัด ๆ ไป แล้วทำการถ่ายแบบของแผ่นโฟโตมาส์กแต่ละระดับ จากนั้นจึงผ่านกระบวนการสร้างแต่ละขั้นตอนจนครบบริบูรณ์สำหรับวงจรที่ออกแบบ ดังนั้นจะได้วงจรรวมที่สร้างเสร็จบนผิวหน้าแว่นผลึก

2.2.3.3 การปลูกฟิล์ม

2.2.3.3.1 สปีดเตอริง (Sputtering)

สปีดเตอริงเป็นเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางอีกชนิดหนึ่งซึ่งอาจเป็นโลหะ สารกึ่งตัวนำ หรือฉนวนก็ได้ หลักการของกระบวนการสปีดเตอริง (แบบดีซี ซึ่งเป็นแบบที่ง่ายที่สุด) แสดงดังในรูปที่ 2.10 ในระบบนี้แผ่นฐานรองจะวางอยู่บนแอโนดซึ่งมีอุปกรณ์ทำความร้อนอยู่ข้างใต้เพื่อใช้เพิ่มอุณหภูมิให้แก่แผ่นฐานในขณะที่เคลือบชั้นฟิล์ม (อุณหภูมิ $\approx 150 - 250^{\circ}\text{C}$) และทางขั้วแคโทดจะมีเป้า ซึ่งเป็นวัสดุที่จะทำการเคลือบหรือฝากลงบนแผ่นฐานที่วางอยู่ เมื่อทำการดูดอากาศออกจากแชมเบอร์ (หรือ Belljar) จนได้ความดันต่ำเท่าที่ต้องการ (Background Pressure อยู่ในช่วง 10^{-5} - 10^{-6} Torr) จากนั้นจะทำการป้อนแรงดันค่าสูงให้ระหว่างขั้วแอโนด - แคโทด และปรับความดันของก๊าซเฉื่อย (มักใช้ Ar เนื่องจากเป็นธาตุที่มีน้ำหนักอะตอมค่อนข้างมาก จึงเหมาะกับการใช้ระดมยิงเป้า) ที่จะเข้ามาในระบบให้มีขนาดตามต้องการ (อยู่ในช่วง 0.02 - 0.2 Torr) หลังจากนั้น Ar จะแตกตัวเป็นไอออนอันเนื่องจากสนามไฟฟ้าค่าสูงที่ใช้ทำเป้า จึงทำให้อะตอมหรือกลุ่มอะตอมของวัสดุดังกล่าวหลุดจากผิวหน้าเป้ามายังฝากหรือเคลือบลงบนแผ่นฐานรอง เนื่องจากในขณะที่ทำการปลูกฟิล์มความดันภายในแชมเบอร์มีค่าต่ำ ดังนั้นเมื่ออะตอมของวัสดุหลุดจากผิวหน้าเป้าแล้วจะมีโอกาสชนกันเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลยก่อนที่จะฝากลงบนผิวหน้าฐานรอง ด้วยเหตุนี้ชั้นฟิล์มที่ปลูกได้จึงอาจมีลักษณะคล้ายกับการฉาบไอระเหยของโลหะ นั่นคือ มีลักษณะสเตปคอฟเวอเรจเกิดขึ้น ซึ่งวิธีที่ช่วยลดการเกิดสเตปคอฟเวอเรจ สามารถกระทำได้โดยการใช้แผ่นเป้าที่มีหน้าตัดใหญ่ขึ้น



รูปที่ 2.10 ระบบเครื่องมือสปีดเตอริง

อันที่จริงแล้วเทคนิคสปีดเตอริงสามารถใช้กับวัสดุใด ๆ ก็ได้ รวมทั้งโลหะ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำที่มีจุดหลอมละลายสูง นอกจากนี้ยังสามารถทำการสปีดเตอริงพวกสารประกอบ และอัลลอยได้ แม้ว่าการควบคุมองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ประกอบเป็นสารประกอบจะกระทำได้ลำบากอันเนื่องมาจากอัตราการสปีดเตอริงที่แตกต่างกันของส่วนประกอบของสาร ในปัจจุบันเทคนิคสปีดเตอริงมักนิยมใช้กับการปลูกฟิล์มโลหะเป็นหลักสำหรับเครื่องมือสปีดเตอริงที่ใช้โดยทั่วไปสามารถแบ่งได้ดังนี้คือ

1. ดีซีหรืออาร์เอฟสปีดเตอริง (DC หรือ RF Sputtering) : ถ้าเป้าที่ใช้เป็นวัสดุนำไฟฟ้าสามารถใช้เครื่องมือทั้งสองประเภทได้ แต่ถ้าเป้าเป็นพวกสารไดอิเล็กตริกจะต้องใช้การกระตุ้นแบบอาร์เอฟ
2. แมกนีตรอนสปีดเตอริง (Magnetron Sputtering) : จะมีการวางแม่เหล็กถาวรหรือขดลวดเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไว้ข้างหลังเป้า เพื่อทำหน้าที่ช่วยบังคับพลาสมาที่มีอะตอมของวัสดุให้ฝากลงบนผิวหน้าแผ่นฐานรองได้ดีขึ้น และเป็นการช่วยเพิ่มอัตราการฝาก
3. รีแอกทีฟสปีดเตอริง (Reactive Sputtering) : ก๊าซปฏิกิริยาบางชนิดสามารถเดิมเข้ามาในพลาสมาได้เพื่อช่วยปลูกฟิล์มของวัสดุที่ต้องการ อย่างเช่น ถ้าต้องการปลูกฟิล์มติทานเนียมไนไตรด์ สามารถกระทำได้โดยการสปีดเตอริงติทานเนียมในบรรยากาศของไนโตรเจนที่ผสมกับก๊าซเฉื่อย

2.2.3.3.2 เทคนิคการสร้างชั้นสารจากไอสารเคมี (Chemical Vapor Deposition ; CVD)

หลักการโดยทั่วไปของระบบนี้แสดงดังในรูปที่ 2.11 (ก) ซึ่งตัวอย่างที่แสดงเป็นการปลูกฟิล์มซิลิคอนอสัณฐาน (Hydrogenated Amorphous Silicon; a-Si:H) ในระบบนี้ก๊าซดิบที่ใช้ปลูกฟิล์มคือ ก๊าซไซเลน (SiH_4) (หากในกรณีที่ต้องการเจือให้ชั้นฟิล์มที่ปลูกเป็นสารพิษจะเติมก๊าซไดโบเลน (B_2H_6) หรือหากต้องการเจือให้ฟิล์มเป็นสารเอ็น จะเติมก๊าซฟอสฟิน (PH_3) ร่วมด้วย) ก๊าซดิบที่ต้องการใช้ปลูกฟิล์มจะถูกปล่อยเข้าไปในแชมเบอร์ที่ดึงความดันลงต่ำ (Background Pressure $\approx 10^{-3}$ Torr และความดันขณะปลูกฟิล์ม ≈ 1 Torr) จากนั้นจะกระตุ้นให้ก๊าซแยกสลายเป็นพลาสมาด้วยการประจุเรืองแสงด้วยสนามไฟฟ้าย่านความถี่คลื่นวิทยุ หรืออาร์เอฟ (13.56 MHz) อะตอมของ Si ที่แยกออกมาจะไปเกาะติดบนแผ่นฐานรองซึ่งวางไว้ในแชมเบอร์ ลักษณะเช่นนี้จะเป็นการปลูกฟิล์ม a-Si:H ลงบนแผ่นฐานที่เพิ่มอุณหภูมิไว้ ~ 150 °C สำหรับรูปที่ 2.11 (ข) แสดงภาพถ่ายของระบบอุปกรณ์ CVD



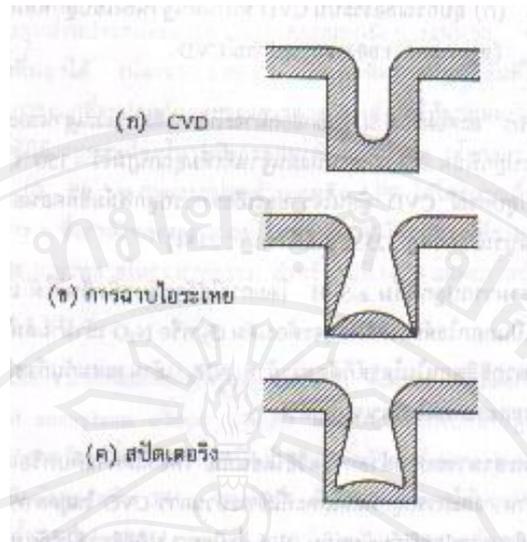
รูปที่ 2.11 (ก) อุปกรณ์ของระบบ CVD ที่เป็นพื้นฐานซึ่งใช้ปลูกฟิล์ม a-Si:H และ
(ข) ภาพถ่ายของระบบอุปกรณ์ CVD

นอกจากนี้ยังสามารถปลูกฟิล์ม a-Si:H โดยการใช้ออกซิเจนชนิดอื่นก็ได้ เช่น SiH_2Cl_2 หรือ SiCl_4 สำหรับการปลูกฟิล์มที่เป็นออกไซด์ของซิลิคอนจะต้องเติม O_2 หรือ N_2O เข้ามาผสมในก๊าซเฉื่อยที่ใช้ด้วยหรือหากต้องการปลูกฟิล์มพวกซิลิคอนไนไตรด์ก็ต้องนำก๊าซ NH_3 เข้ามาผสมกับก๊าซเฉื่อยเพื่อให้แผ่นฟิล์มที่ต้องการปลูกมีส่วนประกอบของอะตอมไนโตรเจนอยู่ด้วย ฟิล์มที่เป็นโลหะสามารถปลูกด้วยกรรมวิธีนี้เช่นกัน เพียงแต่ก๊าซเฉื่อยหรือไอของโลหะชนิดนั้น ๆ จะต้องเหมาะสมกับการใช้งาน และการปลูกฟิล์มโลหะที่ใช้กระบวนการ CVD ในอุตสาหกรรมการผลิตสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำในปัจจุบันคือ การปลูกฟิล์มทังสเตน (W) ซึ่งมีอยู่ 2 ปฏิกิริยาที่ใช้กันมากคือ



ปฏิกิริยา 2.3 WF_6 จะถูกรีดิวซ์ด้วย Si เพื่อปลูกฟิล์มทังสเตน ซึ่งกระบวนการนี้เป็นกระบวนการเลือกเฟ้นคือจะเลือกใช้เฉพาะบนผิวหน้า Si ที่ถูกฉายแสง และเป็นการปลูกฟิล์มบาง (20-200 nm) สำหรับปฏิกิริยา 2.4 เป็นกระบวนการรีดักชันของไฮโดรเจน ซึ่งเป็นกระบวนการเลือกเฟ้นเช่นกัน และจะเลือกใช้เฉพาะกรณีที่ต้องการปลูกชั้นทังสเตนที่หนา ($\approx 3.0 \mu\text{m}$) และใช้ปลูกฟิล์มในบริเวณที่มีการปลูกฟิล์มโลหะอยู่แล้วอัตราการปลูกฟิล์มในกระบวนการ CVD ส่วนใหญ่จะเกิดค่อนข้างช้าอยู่ในช่วง 30-300 nm/min

ดังนั้นจึงต้องการระบบที่สามารถป้อนแวนผลึกได้หลาย ๆ แผ่นให้ผ่านกระบวนการ CVD ในเวลาเดียวกันได้ ข้อได้เปรียบของ CVD คือ ฟิล์มที่ปลูกได้มักมีรูปทรงที่ดีกว่าการปลูกฟิล์มด้วยวิธีอื่น ถึงแม้จะปลูกฟิล์มลงบนพื้นผิวที่เป็นขั้นบันได ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ก็ตาม ซึ่งลักษณะนี้จะตรงกันข้ามกับฟิล์มบางที่ปลูกโดยเทคนิคการฉาบไอระเหยของวัสดุหรือสเปคเตอร์ริง ซึ่งให้ความหนาของชั้นฟิล์มที่ไม่สม่ำเสมอ



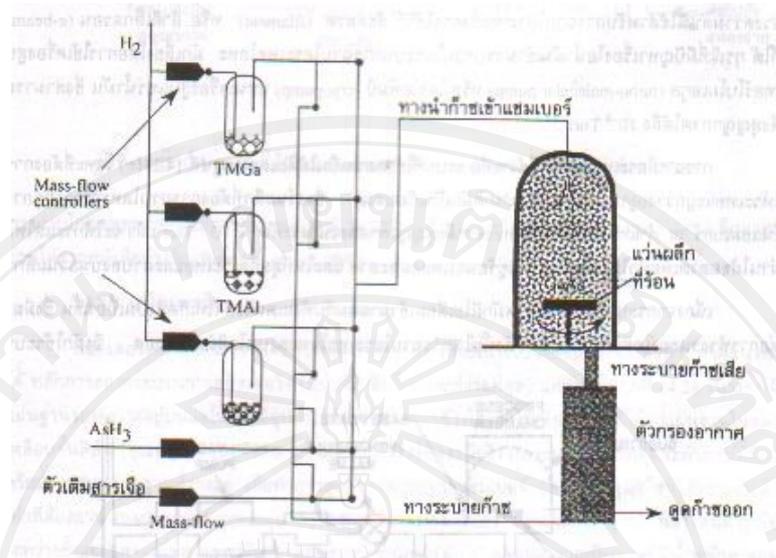
รูปที่ 2.12 สเตปคอฟเวอเรจ (Step Coverage) ที่มักเกิดขึ้น

นอกจากนี้ยังมีเทคนิค CVD ที่ใช้ปลูกฟิล์มสารประกอบกึ่งตัวนำกรุป III-V (เช่น GaAs, GaP, InAs เป็นต้น) และกรุป II-VI (เช่น ZnSe, CdTe, CdS เป็นต้น) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ค่อนข้างใหม่ นั่นคือ MOCVD (Metal Organic CVD) เทคนิคนี้เป็นการปลูกฟิล์มที่สำคัญอีกวิธีหนึ่งซึ่งใช้มากในการปลูกฟิล์มเฮเทอโรอีพิตอกซ์ เทคนิค MOCVD สามารถใช้สร้างผิวรอยต่อที่ชั้นในระดับชั้นเดียว (Monolayer) ระหว่างสารกึ่งตัวนำได้เหมือนอย่างเช่นเทคนิค MBE ระบบ MOCVD ที่เป็นแบบแผนแสดงดังในรูปที่ 2.13 ในที่นี้ใช้สารประกอบอินทรีย์ของธาตุที่ต้องการปลูกผลึกมาทำปฏิกิริยาเคมี อย่างเช่น ถ้าต้องการปลูกผลึกของ GaAs ก็จะใช้สารประกอบอินทรีย์ของแกลเลียม เช่น ไตรเมทิลแกลเลียม (Trimethyl Gallium (TMGa) ซึ่งถูกทำให้ร้อนในบรรยากาศของ H_2 และผสมกับ AsH_3 โดยการปลูกผลึกจะขึ้นกับปฏิกิริยาดังต่อไปนี้



เทคนิค MOCVD มีประโยชน์มากต่อการสร้างโครงสร้าง HEMT ของสาร $Al_xGa_{1-x}As$ บน GaAs เพื่อสร้างให้เป็นรอยต่อเฮเทอโรที่ชั้นมาก ซึ่งจำเป็นสำหรับการทำงานของสิ่งประดิษฐ์ดังกล่าว

ข้อเสียของเทคนิคนี้คือ เนื่องจากก๊าซที่ใช้มีพิษร้ายแรงมาก ดังนั้นระบบเครื่องมือจึงต้องมีความปลอดภัยสูง คือ จะเกิดการรั่วไหลของก๊าซไม่ได้เลยแม้แต่น้อย จึงทำให้การจัดตั้งระบบยุ่งยากและเสียค่าใช้จ่ายสูงในด้านระบบความปลอดภัย



TMGa : สารประกอบอินทรีย์ของแกเลเลียม

TMAI : สารประกอบอินทรีย์ของอะลูมิเนียม

AsH₃ : สารประกอบของอาร์เซนิก

รูปที่ 2.13 โคอะแกรมของระบบ MOCVD

2.2.3.3.3 การเติมสารเจือ

1. การเติมสารเจือด้วยการแพร่ซึม (Diffusion Doping)

กระบวนการแพร่ซึมคือ การเติมสารเจือในปริมาณที่ต้องการให้เข้าไปอยู่ในบริเวณที่กำหนด (ซึ่งไม่มีชั้นหน้ากัก SiO₂กั้นอยู่) บนผิวหน้าแว่นผลึกโดยวิธีการนำแว่นผลึกไปวางไว้ในเตาแพร่ซึมที่อุณหภูมิสูง (800-1,000 °C) แล้วให้ก๊าซพา (Carrier Gas มักเป็น N₂ + O₂) ซึ่งมีไอของสารเจือผสมอยู่แพร่ซึมผ่านลงบนผิวหน้าแว่นผลึก โดยปฏิกิริยาการแพร่ซึม 1 ครั้ง จะสามารถไหลลงจำนวนแว่นผลึกเข้าเตาแพร่ซึมในเวลาเดียวกันได้ประมาณ 25-100 แผ่น เนื่องจากการมีเกรเดียนต์ความเข้มข้นพาหะที่ผิวหน้าแว่นผลึก จึงทำให้อะตอมสารเจือแพร่ซึมเข้าไปใน Si และหากอุณหภูมิยิ่งสูงขึ้นจะทำให้ค่าคงที่การแพร่ซึม D ของสารเจือในผลึกแปรตามอุณหภูมิมากขึ้นตามสมการ 2.5

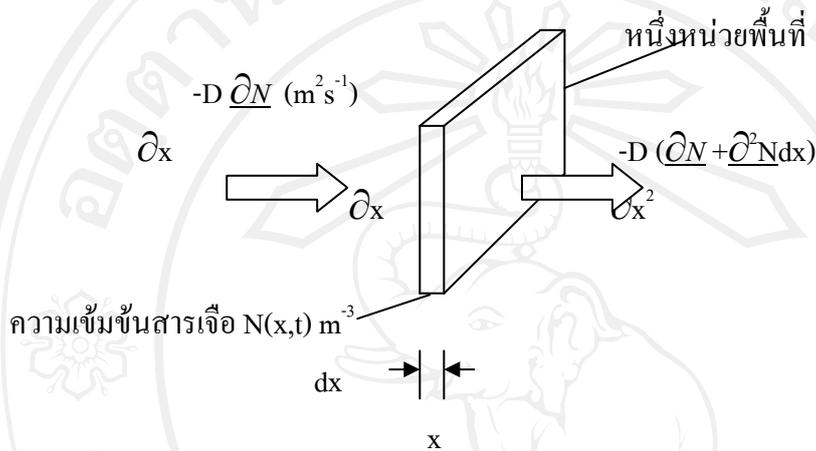
$$D = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) \quad (\text{m}^2 \text{s}^{-1}) \quad (2.6)$$

เมื่อ D_0 = ค่าคงที่ และ E_a คือพลังงานเร่งเร็ว (Activation Energy) สำหรับการแพร่ซึม ในกระบวนการแพร่ซึมพาราเมเตอร์ที่น่าสนใจ คือ การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นสารเจือ N (m⁻³) ตามระยะลึกทั้งนี้เนื่องจากโปรไฟล์สารเจือ $N(x)$ ใช้เป็นตัวกำหนดตำแหน่งของรอยต่อพีเอ็น ในระหว่างการแพร่ซึมความเข้มข้นสารเจือ $N(x,t)$ จะเป็นฟังก์ชันของทั้งตำแหน่งและ

เวลาซึ่งสามารถหาได้โดยการพิจารณาฟลักซ์การแพร่ซึมที่เข้าและออกจากปริมาตรเล็ก ๆ ที่ตำแหน่ง x ซึ่งมีความหนาเป็น dx (รูปที่ 2.14)

$$\text{ฟลักซ์ที่เข้าตำแหน่ง } x = -D \quad (\text{m}^2 \text{ s}^{-1}) \quad (2.7)$$

$$\text{ฟลักซ์ที่ออกจากตำแหน่ง } x + dx = -D + \left(-D \frac{\partial N}{\partial x} + D \left(\frac{\partial N}{\partial x} + \frac{\partial^2 N}{\partial x^2}\right)\right) \quad (\text{m}^2 \text{ s}^{-1}) \quad (2.8)$$



รูปที่ 2.14 การแพร่ซึมของสารเจือ

กำหนดให้พื้นที่หน้าตัดของชิ้นสารเป็น 1 m^2 และตั้งฉากกับทิศทางของฟลักซ์ อัตราการเปลี่ยนแปลงของ N ภายในปริมาตร $(1 \times 1 \times dx) \text{ m}^3$ สามารถแสดงได้เป็น

$$dx = -D \frac{\partial N}{\partial x} + D \left(\frac{\partial N}{\partial x} + \frac{\partial^2 N}{\partial x^2}\right) \quad (\text{m}^3 \text{ s}^{-1}) \quad (2.9)$$

$$\text{หรือ} \quad dx = D \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2}\right) \quad (\text{m}^3 \text{ s}^{-1}) \quad (2.10)$$

ซึ่งก็คือ สมการแพร่ซึม (Diffusion Equation) หรือเรียกว่า กฎข้อที่สองของ Fick จะเห็นว่าสมการดังกล่าว คือ สมการอนุพันธ์ที่มีตัวแปร 2 ตัว ซึ่งการแก้สมการกระทำได้ไม่ย่ายนัก อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติการแพร่ซึมเพื่อสร้างสิ่งประดิษฐ์ แบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ

1) ขั้นตอนการฝากสารเจือ (Pre-disposition Step) คือกระบวนการแพร่ซึมที่นำอะตอมสารเจือมาฝากลงบนผิวหน้าแว่นผลึกที่อุณหภูมิสูง ($\approx 1,000 \text{ }^\circ\text{C}$) โดยใช้เวลาในการแพร่ซึมสั้น (5-30 min) และที่ผิวหน้าแว่นผลึกมักจะมี ความเข้มข้นสารเจือถึงค่าสภาพละลายได้ของของแข็งของสาร (เป็นค่าความเข้มข้นสารเจือสูงสุดที่สามารถฝากลงบนผิวหน้าสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดได้ ซึ่งค่านี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารเจือ และอุณหภูมิที่แพร่ซึม) ขั้นตอนการแพร่ซึมนี้จะมีเงื่อนไขขอบเขตเป็น

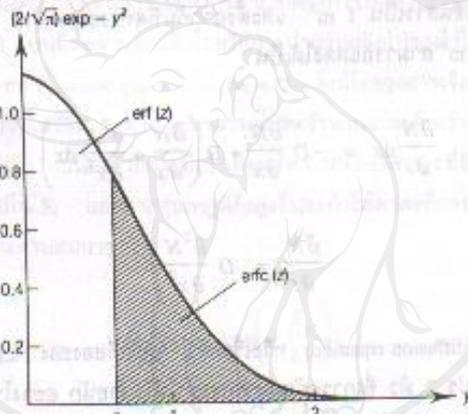
$$\left. \begin{aligned} N(0) &= N_0 \\ N(\infty) &= 0 \end{aligned} \right\} \text{ที่ทุก ๆ ค่าของ } T \text{ เมื่อ } t = \text{เวลาแพร่ซึม} \quad (2.11)$$

และผลเฉลยของสมการการแพร่ซึมที่มีเงื่อนไขขอบเขตดังกล่าวสามารถหาได้จากฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่ค่อนข้างสลับซับซ้อน โดยขั้นแรกจะกำหนดฟังก์ชันความผิดพลาด erf(z) เป็น

$$z = 2 \int_0^y \exp\left(-\frac{y^2}{\pi}\right) \quad (2.12)$$

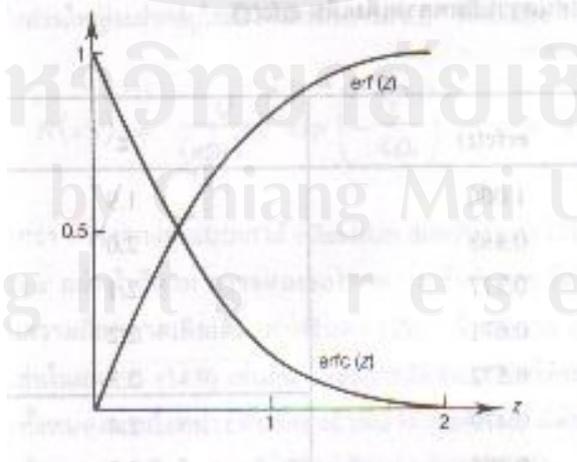
รูปกราฟ $\frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp(-y^2)$ แสดงดังในรูปที่ 2.15 ซึ่งพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมดมีค่าเป็น 1 และพื้นที่ที่ครอบคลุมมาถึงตำแหน่ง z เป็น erf(z) ส่วนพื้นที่ที่เหลือจากตำแหน่ง z ถึง ∞ จะเรียกว่าฟังก์ชันความผิดพลาดเติมเต็ม (Complementary Error Function) erfc(z) ดังนั้น

$$\text{erfc}(z) = 1 - \text{erf}(z) \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.15 ฟังก์ชันความผิดพลาด erf(z) และฟังก์ชันความผิดพลาดเติมเต็ม erf(z) ซึ่งแสดงด้วยพื้นที่ใต้กราฟ

และฟังก์ชันทั้งสองนี้ได้แสดงในรูปที่ 2.16 และค่า erfc(z) แสดงไว้ในตารางที่ 2.5



รูปที่ 2.16 ฟังก์ชัน erf(z) และ erfc(z)

จากการหาทางคณิตศาสตร์ ในที่สุดจะได้ผลเฉลยของสมการการแพร่ซึมในขั้นตอนการฝากสารเจือ ซึ่งก็คือ โปรไฟล์ของการฝากสารเจือนั่นเอง ดังนี้

$$(z, t) = N_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (2.14)$$

เนื่องจาก $\operatorname{erfc}(0) = 1$ ดังนั้นความเข้มข้นสารเจือที่ผิวหน้าแวนผลึกที่ตำแหน่ง $x = 0$ จึงมีค่า $= N_0$ เสมอ ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตตั้งที่กล่าวมาแล้ว และที่ค่า x มากขึ้น ความเข้มข้นสารเจือก็จะลดลงเรื่อยๆ สำหรับค่า $(Dt)^{1/2}$ ในสมการ (2.14) ก็คือ ค่าความยาวการแพร่ซึมที่อุณหภูมิสูง โดยทั่วไปความเข้มข้นสารเจือจะสามารถแพร่ซึมไปในเนื้อสารได้เพียงระยะ 2-3 เท่าของความยาวการแพร่ซึมเท่านั้นเนื่องจากฟังก์ชัน $\operatorname{erfc}(z)$ ลดลงอย่างรวดเร็วในขณะที่ z เพิ่มขึ้น

1. ขั้นตอนขับเคลื่อน (Drive in Step) ในทางปฏิบัติสำหรับการสร้างสิ่งประดิษฐ์บางชนิด อย่างเช่น ขั้นตอนการแพร่ซึมเบสของทรานซิสเตอร์ เป็นต้น หลังจากที่สิ้นสุดขั้นตอนการแพร่ซึมเพื่อฝากสารเจือแล้วจะตามด้วยการแพร่ซึมในอีกขั้นตอนหนึ่งที่เรียกว่า การขับเคลื่อน ทั้งนี้เพื่อผลึกอะตอมสารเจือให้อยู่ลึกเข้าไปในเนื้อสารต่อไปอีก โดยใช้เวลาในการแพร่ซึมนาน (ตั้งแต่ 1 ชั่วโมงขึ้นไป) ดังนั้นในขั้นตอนนี้ จึงไม่มีการเติมสารเจือชนิดใหม่เพิ่มเข้ามาเพียงแต่เป็นการกระจายซ้ำ (Redistribute) สารเจือที่มีอยู่เดิมในขั้นตอนการฝากสารเจือเท่านั้น ด้วยเหตุนี้สารเจือจะแพร่ซึมลึกต่อไปในเนื้อสาร และความเข้มข้นสารเจือที่ผิวหน้าของแวนผลึกก็จะลดลง ซึ่งถือเป็นการเตรียมผิวหน้าเพื่อเติมสารเจือใหม่ในขั้นตอนถัดไป โดยที่สารเจืออาจเป็นสารคนละชนิดก็ได้ อย่างเช่น การฝากสารเจือที่เบสเป็นชนิดพีและทำการขับเคลื่อน หลังจากนั้นจะทำการฝากสารเจือชนิดตรงข้ามลงบนเบสเพื่อสร้างเป็นอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ สำหรับขั้นตอนนี้จะมีเงื่อนไขขอบเขตเป็น

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial N}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial N}{\partial x} = 0 \\ N(\infty) = 0 \end{array} \right\} \text{ที่ทุก ๆ ค่าของเวลา } t \text{ เมื่อ } t = \text{เวลาขับเคลื่อน} \quad (2.15)$$

เงื่อนไขแรกบอกให้ทราบว่าไม่มีฟลักซ์การแพร่ซึมเกิดขึ้นที่ผิวหน้าสาร ซึ่งไม่เหมือนกับในกรณีขั้นตอนการฝากสารเจือ และถ้าสมมติว่าการกระจายความเข้มข้นสารเจือในตอนเริ่มแรกประมาณได้เป็นฟังก์ชันเดลตา (นั่นคือ ความเข้มข้นสารเจือส่วนใหญ่จะฝากอยู่ใกล้ผิวหน้าของสารมาก) ดังนั้นสมการการแพร่ซึมจะมีผลเฉลยเป็น

$$(z, t) = \frac{Q}{(\pi Dt)^{1/2}} \exp\left(\frac{-x^2}{4Dt}\right) \quad (2.16)$$

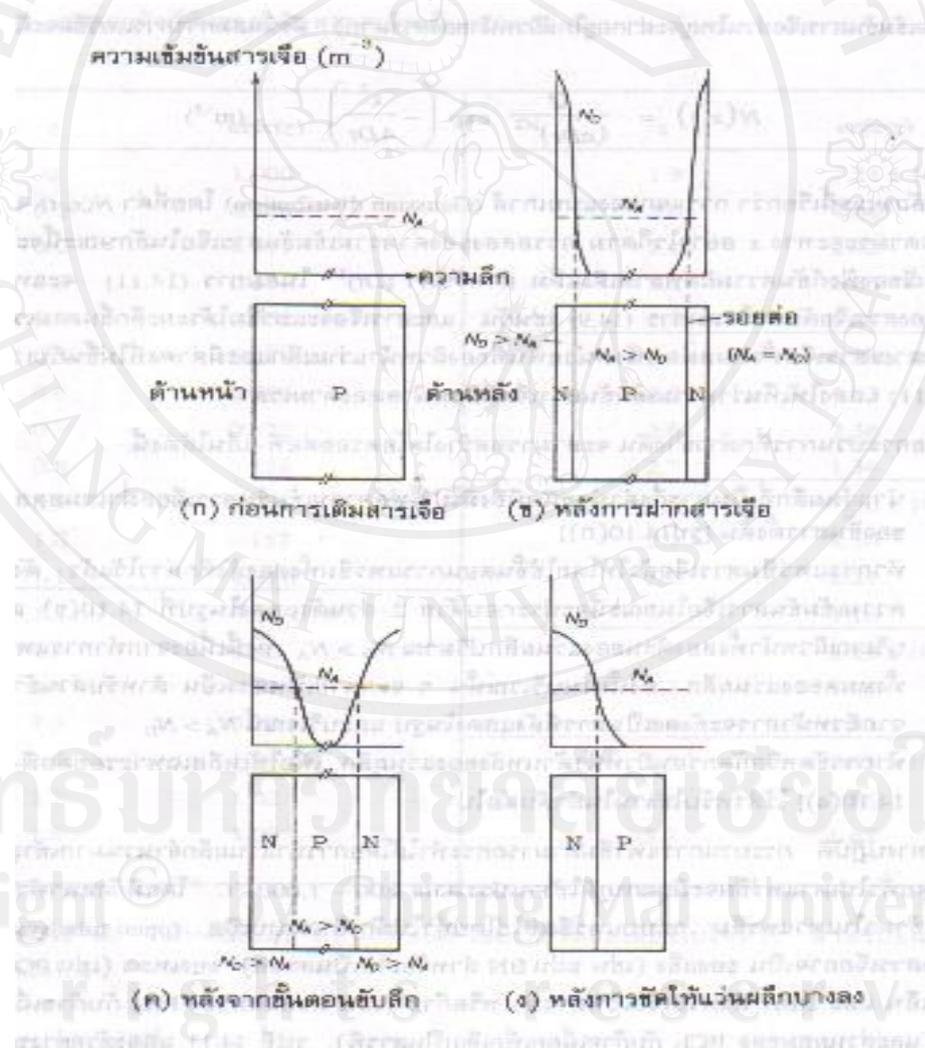
ตารางที่ 2.5 แสดงค่าฟังก์ชันความผิดพลาดเติมเต็ม $\text{erfc}(z)$

z	$\text{erf}(z)$	$\text{erfc}(z)$	z	$\text{erf}(z)$	$\text{erfc}(z)$
0	0	1	0.75	0.711	0.289
0.05	0.056	0.944	0.8	0.742	0.258
0.1	0.112	0.888	0.85	0.771	0.229
0.15	0.168	0.832	0.9	0.797	0.203
0.2	0.223	0.777	0.95	0.821	0.179
0.25	0.276	0.724	1	0.843	0.157
0.3	0.329	0.671	1.1	0.880	0.120
0.35	0.379	0.621	1.2	0.910	0.090
0.4	0.428	0.572	1.3	0.934	0.066
0.45	0.475	0.525	1.4	0.952	0.048
0.5	0.520	0.480	1.5	0.966	0.034
0.55	0.563	0.437	1.6	0.976	0.024
0.6	0.604	0.396	1.7	0.984	0.016
0.65	0.642	0.358	1.8	0.989	0.011
0.7	0.678	0.322	1.9	0.993	0.007

การกระจายลักษณะนี้เรียกว่า การแจกแจงแบบเกาส์ (Gaussian Distribution) โดยที่ค่า $N(x,t)$ จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วตามระยะทาง x อย่างไรก็ตาม การลดลงของค่าความเข้มข้นสารเจือในลักษณะนี้จะไม่ตกลงเร็วเท่ากับในกรณีของฟังก์ชันความผิดพลาดเติมเต็ม สำหรับค่า $(Dt)^{1/2}$ ในสมการ (2.16) จะแทนความยาวการแพร่ซึมของสารเจือดังเช่นในสมการ (2.14) เช่นกัน และสารเจือจะแพร่ซึมได้ระยะลึกขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น Q แทนปริมาณสารเจือทั้งหมดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของผิวหน้าแว่นผลึกและมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับเวลา ดังนั้นสมการ (2.15) แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นสารเจือที่ผิวหน้าลดลงตามเวลาด้วยกระบวนการที่กล่าวข้างต้นจะสามารถสร้างไดโอดรอยต่อพี-เอ็นได้ดังนี้

1. นำแว่นผลึกที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีซึ่งมีโปรไฟล์ความเข้มข้นสารเจือสม่ำเสมอตลอดความลึกของชนิดสารตั้งต้น รูปที่ 2.17 (ก)

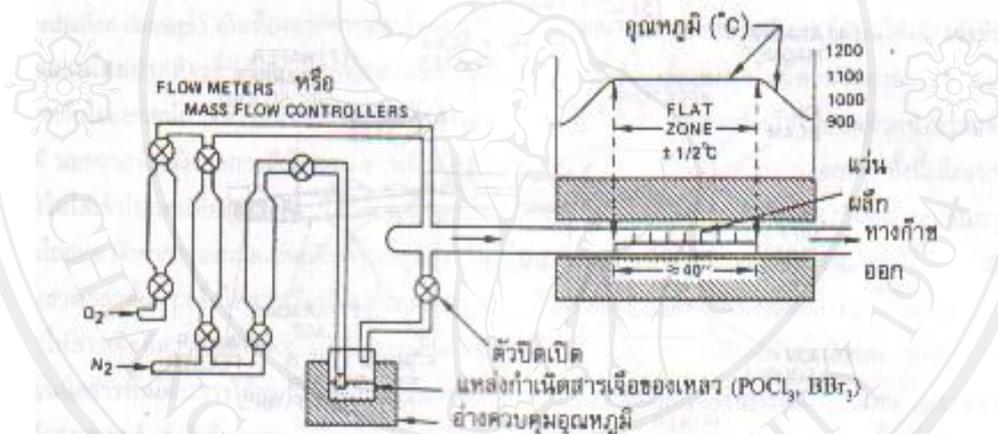
2. ทำการแพร่ซึมสารเจือตัวให้โดยใช้ขั้นตอนการแพร่ซึมทั้งสองดังที่กล่าวไว้แล้ว
 ดังนั้นโปรไฟล์ความเข้มข้นสารเจือในขณะนี้จะประกอบด้วย 2 ส่วนดังแสดงในรูปที่
 2.17 (ข) และ (ค) ที่บริเวณผิวหน้าทั้งสองด้านของแวนผลึกปริมาณ $N_D > N_A$ ทั้งนี้
 เนื่องจากทำการแพร่ซึมผิวหน้าทั้งหมดของแวนผลึก ดังนั้นในบริเวณนั้น ๆ จะ
 กลายเป็นสารเอ็น สำหรับส่วนข้างในที่อยู่ถัดจากผิวหน้าสารจะยังคงเป็นสารพีดัง
 แสดงในรูป และบริเวณนี้ $N_A > N_D$
3. ทำการขัดหรือกัดกร่อนผิวหน้าด้านหลังของแวนผลึก เพื่อให้เหลือเฉพาะรอยพี-เอ็น
 รูปที่ 2.17 (ง) ไว้สำหรับใช้งานในลำดับต่อไป



รูปที่ 2.17 การสร้างรอยต่อพี-เอ็นด้วยกระบวนการแพร่ซึม 2 ขั้นตอน

ในทางปฏิบัติกระบวนการแพร่ซึมสามารถกระทำได้โดยการนำแวนผลึกจำนวน
 มากเข้าสู่เตาแพร่ซึมพร้อมกัน โดยทั่วไปเตาแพร่ซึมจะมีอุณหภูมิประมาณ $800 - 1,000 \text{ } ^\circ\text{C}$ โดยมี

ก๊าซพาทำหน้าที่นำไอของสารเจือเข้ามาในเตาแพร่ซึม ระบบแพร่ซึมที่ใช้โดยทั่วไปมักเป็นระบบเปิด (Open-Tube-System) และแหล่งกำเนิดสารเจืออาจเป็นของแข็ง (เช่น แผ่น BN สำหรับเจือเป็นสารพี) ของเหลว (เช่น POCl_3 สำหรับเจือเป็นสารเอ็น และ BCl_3 สำหรับเจือเป็นสารพี) หรือก๊าซ (เช่น ส่วนผสมของ PH_3 กับก๊าซเฉื่อย เพื่อเจือเป็นสารเอ็น และส่วนผสมของ BCl_3 กับก๊าซเฉื่อย เพื่อเจือเป็นสารพี) รูปที่ 2.18 แสดงตัวอย่างระบบแพร่ซึมแบบเปิดที่ใช้แหล่งกำเนิดสารเจือที่เป็นของเหลว ซึ่งใช้ก๊าซ N_2 ในการก่อฟอง (Bubble) ผ่านของเหลวที่เป็นแหล่งกำเนิดสารเจือ เพื่อให้ของเหลวระเหยเป็นไอผ่านมายังท่อ นำก๊าซมารวมกับก๊าซพา (ในที่นี้คือ $\text{N}_2 + \text{O}_2$) เพื่อทำปฏิกิริยาและพาเอาสารเจือเข้าเตาแพร่ซึมเพื่อทำปฏิกิริยากับผิวหน้าเว่นผลึก ซึ่งลักษณะนี้คือการแพร่ซึมสารเจือลงบนผิวหน้าสารนั่นเอง



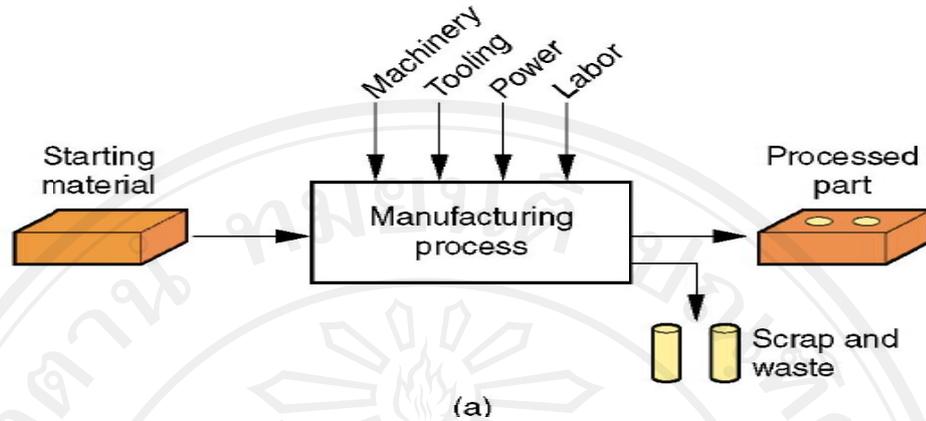
รูปที่ 2.18 ระบบแพร่ซึมแบบเปิดที่ใช้แหล่งกำเนิดสารเจือเป็นของเหลว

2.2.4 กระบวนการผลิต (Manufacturing)

Manufacturing หมายถึงการผลิตสินค้าที่สามารถจับต้องได้ เช่น รถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า อาหาร กระป๋องและอื่นๆผลผลิตที่ได้แบ่งออกเป็น

1. สินค้าเพื่อการอุปโภคบริโภค (Consumer goods) เช่น วิทยุ โทรทัศน์ เครื่องเรือน ยารักษาโรค และอื่นๆ
2. สินค้ากึ่งสำเร็จรูป (Producer goods) คือ สินค้าที่จะต้องนำไปผลิตต่อ เช่น เหล็กแผ่น เหล็กเส้น ยางแผ่น หนังสัตว์ที่ฟอกแล้วและอื่นๆ

ความหมายของกระบวนการผลิต คือ การประยุกต์ใช้กระบวนการทางกายภาพและทางเคมี เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัตถุดิบเพื่อผลิตเป็นชิ้นส่วน หรือผลิตภัณฑ์ต่างๆรวมถึงการประกอบชิ้นส่วนหลายชิ้นส่วนเข้าเป็นผลิตภัณฑ์



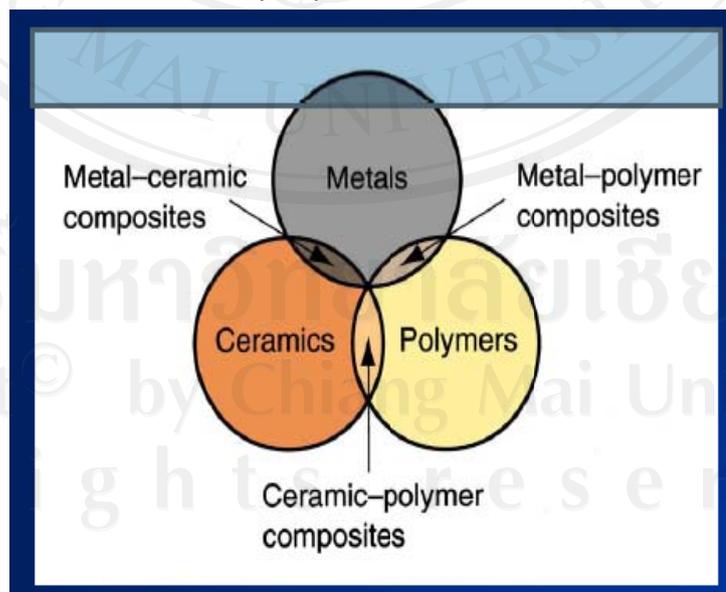
รูปที่ 2.19 แสดงตัวอย่างกระบวนการผลิต

วัสดุสำหรับการผลิต (Materials in Manufacturing)

วัสดุในการผลิตจะแบ่งเป็น 3 ประเภทดังนี้คือ

1. โลหะ (Metals)
2. เซรามิก (Ceramics)
3. โพลีเมอร์ (Polymers)

ซึ่งคุณสมบัติทางเคมี ทางกายภาพของวัสดุเหล่านี้มีความแตกต่างกัน ทำให้กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์จากวัสดุเหล่านี้ มีความแตกต่างกันนอกเหนือจากวัสดุทั้งสามแล้วยังมีวัสดุที่ได้จากการนำวัสดุทั้งสามมาผสมกันเรียกว่า วัสดุเชิงประกอบ Composites คือ วัสดุที่ได้จากการนำวัสดุเบื้องต้นทั้งสามมาผสมกัน ซึ่งจะได้วัสดุที่มีคุณสมบัติแตกต่างออกไป



รูปที่ 2.20 แสดงการแบ่งกลุ่มของวัสดุ

การแบ่งกลุ่มกระบวนการผลิต

กระบวนการผลิตมีพื้นฐานหลักสองประเภทคือ

1. กระบวนการการผลิตชิ้นส่วน โดยแปรรูปวัตถุดิบ ทั้งด้านคุณสมบัติทางเคมี ทางกายภาพ ให้เป็นผลิตภัณฑ์หรือชิ้นงานที่สามารถใช้งานได้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัตถุดิบหรือชิ้นส่วนนั้นๆ ซึ่งมีกระบวนการสามอย่างด้วยกันคือ

1.1 การขึ้นรูปวัสดุ Shaping Operations

1.2 การปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของวัสดุ Property-Enhancing Operations

1.3 การตกแต่งผิวสำเร็จ Surface Processing เช่น การขัด การเคลือบ

2. กระบวนการประกอบ เป็นการเชื่อมชิ้นส่วนที่มากกว่าสองชิ้นส่วนขึ้นไป เพื่อให้กลายเป็นชิ้นงานใหม่ที่สามารถทำงานได้มากขึ้น ได้แก่

2.1 กระบวนการเชื่อมต่อแบบถาวร (Permanent Joint Process) เช่น การเชื่อม บัดกรี

2.2 กระบวนการต่อทางกล(Mechanical Fastening) เช่น การต่อดูด้วยสกรู หมุดย้ำ สวมอัด

2.2.5 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE)

ถ้าต้องการให้การทดลองเกิดประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ผลได้สูงสุด เราจะต้องนำวิธีการทางวิทยาศาสตร์เข้ามาช่วยในการวางแผนการทดลอง คำว่า “การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experiment)” หมายถึงกระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อว่าจะได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ วิธีการออกแบบการทดลองในเชิงสถิติเป็นสิ่งจำเป็น ถ้าเราต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่เราได้อยู่ และถ้ายังมีปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการทดลอง (Experimental Error) วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการเพียงอย่างเดียวเท่านั้นที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญ 2 ประการสำหรับปัญหาที่เกี่ยวกับการทดลองก็คือ การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ซึ่งศาสตร์ทั้งสองนี้มีความเกี่ยวข้องกันอย่างมาก ทั้งนี้เพราะว่าวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นกับการออกแบบการทดลองที่จะนำมาใช้

หลักการพื้นฐาน 3 ประการสำหรับการออกแบบการทดลองคือ เรพลีเคชัน (Replication) แรนดอมไมเซชัน (Randomization) และ บล็อกกิง (Blocking) ในที่นี้เรากำหนดให้ว่า เรพลีเคชัน หมายถึงการทำการทดลองซ้ำ เรพลีเคชันมีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการคือ ประการแรกเรพลีเคชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ ตัวประมาณค่าความผิดพลาดนี้กลายเป็นหน่วยของการวัดขั้นพื้นฐานสำหรับพิจารณาว่า ความแตกต่างสำหรับข้อมูลที่

ได้จากการทดลองนั้นมีความแตกต่างกันในเชิงสถิติหรือไม่ ประการที่สองถ้าค่าเฉลี่ย (ตัวอย่างเช่น y) ถูก นำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลอง ดังนั้นเรพลีเคชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบนี้นี้ ตัวอย่างเช่น ถ้า σ^2 คือความแปรปรวนของข้อมูลแต่ละตัว และมี n เรพลีเคชัน ดังนั้นค่าความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยของตัวอย่างนี้ ดังสมการ 2.17 คือ

$$\sigma_{\bar{y}}^2 = \frac{\sigma^2}{n} \quad (2.17) \text{ ผลในทางปฏิบัติคือว่า ถ้าเรามี } n = 1 \text{ เร}$$

พลีเคชัน และค่าที่ได้จากการทดลอง $y_1 = 145$ (ใช้น้ำเป็นตัวดับความร้อน) และ $y_2 = 147$ (ใช้เกลือเป็นตัวดับความร้อน) เราอาจจะไม่สามารถที่จะสรุปอะไรเกี่ยวกับผลของการทดลองทั้งสองนี้ได้ นั่นคืออาจเป็นไปได้ว่าความแตกต่างที่สังเกตได้อาจจะเป็นผลมาจากความผิดพลาดในการทดลอง ในทางตรงกันข้าม ถ้า n มีค่ามากพอเพียง และความผิดพลาดจากการทดลองมีค่าน้อย ดังนั้นถ้าเราสังเกตได้ว่า $\bar{y}_1 \leq \bar{y}_2$ เราก็จะสามารถสรุปได้อย่างปลอดภัยว่าการใช้น้ำเกลือเป็นตัวดับความร้อนนั้นจะทำให้ค่าความแข็งของชิ้นงานมากกว่าการใช้น้ำเป็นตัวดับความร้อนสำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียม

แรนดอมไมเซชัน เป็นพื้นฐานหลักสำหรับการใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบการทดลอง แรนดอมไมเซชัน หมายถึงการทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับของการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) วิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูล (หรือความผิดพลาด) จะต้องเป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ แรนดอมไมเซชันจะทำให้สมมติฐานนี้เป็นจริง การที่เราแรนดอมไมซ์การทดลอง ทำให้เราสามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจจะปรากฏในการทดลองได้

บล็อกกิง เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้แก่การทดลอง บล็อกอันหนึ่งอาจจะหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่างๆภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้นได้จากการทำบล็อกกิง

หลักการพื้นฐานทั้งสามที่กล่าวมานี้มีความสำคัญอย่างมากต่อการทดลองทุกๆชนิด ดังนั้นเราจะต้องกล่าวถึงหลักการทั้งสามนี้บ่อยครั้ง เพื่อเป็นการแสดงและเน้นให้เห็นถึงประโยชน์ของหลักการดังกล่าว

แนวทางในการออกแบบการทดลอง

การใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ทุกคนที่เกี่ยวข้องในการทดลองจะต้องมีความเข้าใจอย่างถ่องแท้ล่วงหน้าว่า เรากำลังศึกษาอะไรอยู่ จะเก็บข้อมูลได้อย่างไร และจะวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บได้นั้นอย่างไร ขั้นตอนในการดำเนินการอาจจะทำได้ดังต่อไปนี้

1. ทำความเข้าใจถึงปัญหา บางคนอาจคิดว่าขั้นตอนนี้ง่ายและตรงไปตรงมา แต่ในความเป็นจริงแล้วขั้นตอนนี้ไม่ได้ง่ายอย่างที่คิด ในขั้นตอนนี้เราจะต้องพยายามพัฒนาแนวความคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง และบ่อยครั้งที่เราจะต้องหาข้อมูลอินพุตจากบุคคลหรือหน่วยงานต่างๆที่เกี่ยวข้อง เช่น แผนกวิศวกรรม แผนกประกันคุณภาพ แผนกผลิต แผนกการตลาด ผู้บริหาร ลูกค้า และแผนกบุคคล ถ้อยแถลงของปัญหาที่มีความชัดเจนจะมีผลอย่างมากต่อความเข้าใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์และคำตอบสุดท้ายของปัญหานั้นๆ ด้วยเหตุนี้เองการออกแบบการทดลองทุกครั้งจะมีการทำงานเป็นทีม
2. เลือกปัจจัย ระดับ และขอบเขต ผู้ทดลองต้องเลือกปัจจัยที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างทำการทดลอง กำหนดขอบเขตที่ปัจจัยเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลง และกำหนดระดับ (Level) ที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง จะต้องพิจารณาด้วยว่าจะควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ณ จุดที่กำหนดให้ได้อย่างไร และจะวัดผลตอบได้อย่างไร ดังนั้นในกรณีเช่นนี้ผู้ทดลองจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการอย่างมากซึ่งความรู้นี้อาจจะได้มาจากประสบการณ์และความรู้จากทางทฤษฎี มีความจำเป็นที่เราจะต้องตรวจสอบดูว่าปัจจัยที่กำหนดขึ้นมาทั้งหมดนี้มีความสำคัญหรือไม่ และเมื่อวัตถุประสงค์ของการทดลองคือ การกรองปัจจัย (Screening) เราควรที่จะกำหนดให้ระดับต่างที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนน้อยๆ การเลือกขอบเขตของการทดลองก็มีความสำคัญเช่นกัน ในการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเราควรเลือกขอบเขตให้มีความกว้างมากๆ หมายถึงว่าขอบเขตที่ปัจจัยแต่ละตัวจะเปลี่ยนแปลงได้ควรมีค่ากว้างๆ และเมื่อเราได้เรียนรู้เพิ่มขึ้นว่า ตัวแปรใดมีความสำคัญและระดับใดที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เราอาจจะลดขอบเขตลงมาให้แคบลงได้
3. เลือกตัวแปรผลตอบ ในการเลือกตัวแปรผลตอบ ผู้ทดลองควรแน่ใจว่า ตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ บ่อยครั้งที่ค่าเฉลี่ยหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (หรือทั้งคู่) ของกระบวนการจะเป็นตัวแปรผลตอบ เป็นไปได้ว่าในการทดลองหนึ่งอาจจะมีผลตอบหลายตัวและมีความจำเป็นอย่างมากที่เราจะต้อง

กำหนดให้ได้ว่า อะไรคือตัวแปรผลตอบ และจะวัดตัวแปรเหล่านี้ได้อย่างไร ก่อนที่จะเริ่มดำเนินการทดลองจริง

4. เลือกรูปแบบการทดลอง ถ้ากิจกรรมการวางแผนก่อนการทดลองทำได้ถูกต้อง ขั้นตอนนี้จะขั้นตอนที่ง่ายมาก การเลือกรูปแบบเกี่ยวข้องกับ การพิจารณาขนาดของตัวอย่าง (จำนวนเรพลีเคต) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูล และการตัดสินใจว่า ควรจะใช้วิธีบล็อกหรือใช้การ เรนดอมไมเซชันอย่างใดอย่างหนึ่งหรือไม่ ในการเลือกรูปแบบ เราจำเป็นจะต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองอยู่ตลอดเวลา ในการทดลองทางวิศวกรรม ส่วนมาก เราจะทราบตั้งแต่เริ่มต้นแล้วว่า ปัจจัยบางตัวจะมีผลต่อผลตอบที่เกิดขึ้น ดังนั้นเราจะหาว่าปัจจัยตัวใดที่ทำให้เกิดความแตกต่าง และประมาณขนาดของความแตกต่างที่เกิดขึ้น
5. ทำการทดลอง เมื่อทำการทดลองเราจะต้องติดตามดูกระบวนการทำงานอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน ถ้ามีอะไรผิดพลาดเกิดขึ้นเกี่ยวกับวิธีการทดลองในขั้นตอนนี้ จะทำให้การทดลองที่เกิดขึ้นนั้นใช้ไม่ได้ ดังนั้นการวางแผนในตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อความสำเร็จที่จะเกิดขึ้น
6. วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ เราควรจะนำวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อว่าผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง ถ้าการทดลองได้ถูกออกแบบไว้เป็นอย่างดี และถ้าเราทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ วิธีการทางสถิติที่จะนำมาใช้นั้นจะเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน ข้อได้เปรียบของวิธีการทางสถิติก็คือ ทำให้ผู้ที่ไม่มีอำนาจในการตัดสินใจมีเครื่องมือช่วยที่มีประสิทธิภาพ และถ้าเรานำเอาวิธีการทางสถิติมาผนวกกับความรู้ทางวิศวกรรม ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ และสามัญสำนึก จะทำให้ข้อสรุปที่ได้ออกมานั้นมีเหตุผลสนับสนุนและมีความน่าเชื่อถือ
7. สรุปและข้อเสนอแนะ เมื่อเราได้วิเคราะห์ข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ผู้ทดลองจะต้องหาข้อสรุปในทางปฏิบัติและแนะนำแนวทางของกิจกรรมที่จะเกิดขึ้น ในขั้นตอนนี้เราจะนำเอาวิธีการทางกราฟเข้ามาช่วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องการนำเสนอผลงานนี้ให้ผู้อื่นฟัง นอกจากนี้แล้วการทำทดลองเพื่อยืนยันผล (Confirmation testing) ควรจะ ทำขึ้นเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้นอีกด้วย