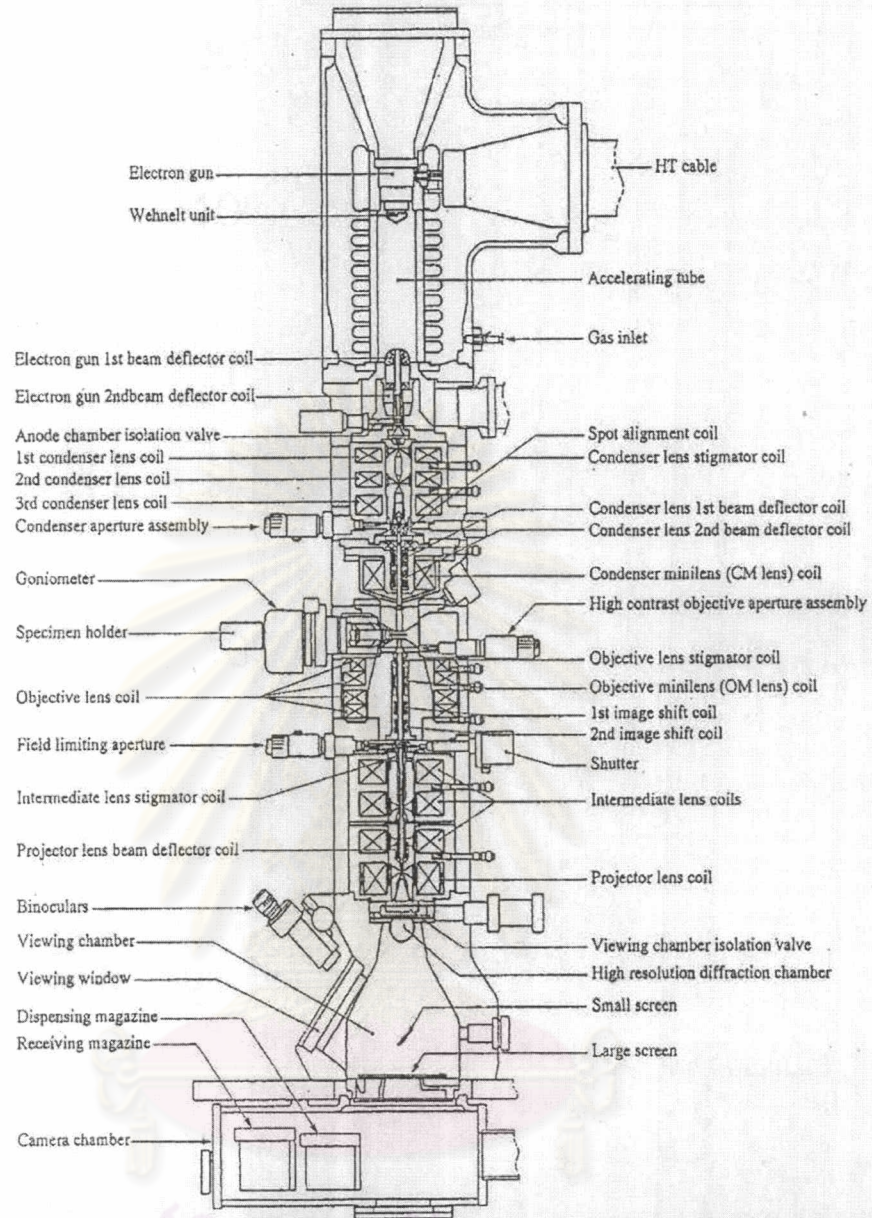


บทที่ 2

ทฤษฎีบทและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จุลทรรศน์อิเล็กตรอน (electron microscopy) เกิดจากการคิดค้นเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการมองเห็นวัตถุของจุลทรรศน์ให้สามารถแจจแจงรายละเอียดของภาพได้มากขึ้นกว่าเดิม โดยการประยุกต์เอาอิเล็กตรอนที่มีช่วงความยาวคลื่นสั้นมาใช้แทนความยาวคลื่นแสงและใช้เลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าแทนเลนส์กระจก และมีตัวตรวจวัดที่จะมาจับสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนไปกระทบผิวตัวอย่าง จากนั้นมีอุปกรณ์ในการแปลงสัญญาณที่ได้ให้ไปเป็นสัญญาณภาพปรากฏบนจอรับภาพต่อไป ผลที่ได้ คือ ภาพของวัตถุที่มีกำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่า ถึงระดับมากกว่า 1,000,000 เท่า และสามารถแจจแจงรายละเอียดของภาพซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะตัวอย่างได้จนถึงระดับนาโนเมตร ในขณะที่จุลทรรศน์แบบแสงธรรมดาที่มีกำลังแยกแยะต่ำ (resolution) ขณะใช้ดูวัตถุเล็กสุดเพียง 0.2 ไมครอนเท่านั้น สำหรับจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscopy, TEM) จะใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแทนการใช้ลำแสงในการสร้างภาพจากวัตถุที่มีขนาดเล็กมากให้กลายเป็นภาพขยายที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ความต่างศักย์ที่ใช้ในจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน มีค่าอยู่ระหว่าง 100 – 400 กิโลโวลต์

หลักการทำงานของจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน คือ การใช้เลนส์คอนเดนเซอร์ (condenser lens) จำนวน 2 อัน รวมลำอิเล็กตรอนให้ขนานกับคอลัมน์ของกล้อง จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะส่องผ่านชิ้นงานที่ถูกเตรียมให้บาง (≤ 500 นาโนเมตร) โดยลำอิเล็กตรอนจะส่องผ่านหรือเกิดการเลี้ยวเบนจากการจัดเรียงตัวของอะตอมในชิ้นงาน ลำอิเล็กตรอนที่เกิดการเลี้ยวเบนจะมารวมกันโดยเลนส์วัตถุ (objective lens) เกิดเป็นจุดเลี้ยวเบนที่ระนาบด้านหลัง (the back focal plane) จากนั้นจะผ่านไปยังเลนส์แม่เหล็กอีก 2 ตัว เพื่อขยายภาพและแสดงภาพบนหน้าจอรับภาพ (fluorescent screen) ของเครื่องต่อไป ข้อมูลภาพที่ได้จากจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ ภาพขยาย (image) ซึ่งให้รายละเอียดของโครงสร้างจุลภาคในช่วงกำลังขยายตั้งแต่ 10,000 ถึง 1,000,000 เท่า และรูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ซึ่งให้รายละเอียดทางด้านโครงสร้างผลึก การจัดเรียงตัวของอะตอมภายในวัสดุ ในภาพที่ 2.1 แสดงลักษณะโครงสร้างของจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านเบื้องต้น



ภาพที่ 2.1 ส่วนประกอบของจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน⁽¹⁾

2.1 โครงสร้างของจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

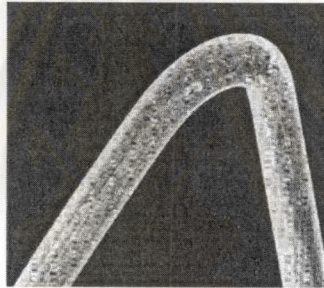
2.1.1 แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron source)

แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนในจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเป็นส่วนที่อยู่บนสุดของคอลัมน์ สามารถจำแนกตามกลไกในการกำเนิดอิเล็กตรอนได้เป็น 2 ประเภท ประเภทแรกเรียกว่า กลไกแบบเทอร์มิออนิก (thermionic source) ซึ่งจะมีการให้กระแสแรงดันสูงกับแหล่งกำเนิด ทำให้มีพลังงานความร้อนเกิดขึ้น เมื่อพลังงานความร้อนมากพอจะมีการปล่อยอิเล็กตรอนออกมาโดยอิเล็กตรอน

ดังกล่าวจะถูกดึงลงสูงเบื้องล่างซึ่งมีแผ่นแอโนดซึ่งเป็นประจุบวกอยู่ ประเภทที่ 2 เรียกว่าแหล่งกำเนิดแบบฟิลด์อีมิชัน (field-emission source) ซึ่งจะปล่อยอิเล็กตรอนออกโดยใช้หลักการทะลุผ่านกำแพงศักย์แบบควอนตัม สามารถแบ่งวัสดุแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งมีใช้อยู่ในปัจจุบันโดยสามารถแบ่งตามวัสดุและรูปร่าง เป็น 3 ชนิด คือ

(1) ลวดทังสเตน (tungsten filament)

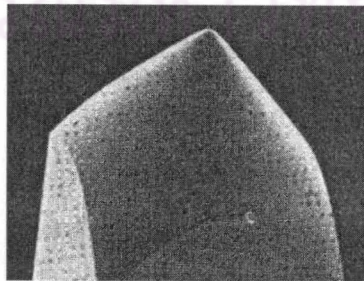
กลไกการทำงานของปืนอิเล็กตรอนชนิดนี้เป็นแบบเทอร์มิออนิก ทำจากลวดทังสเตน ซึ่งมีลักษณะโค้งเป็นรูปตัววีซึ่งมีสมบัติเป็นขั้วแคโทด เมื่อให้ความร้อนเพียงพออิเล็กตรอนที่มีปริมาณหนาแน่นที่ปลายยอดจะถูกปล่อยออกมาและดึงลงไปขั้วแอโนด และเกิดการบีบลำอิเล็กตรอนให้ขนานไปกับคอลัมน์โดยโลหะรูปกรวย (Wehnelt cylinder) จุดที่ลำอิเล็กตรอนตัดสลับกันเรียกว่าจุดครอสโอเวอร์ (the crossover point) โดยปกติลวดทังสเตนจะทำงานในสภาวะที่เป็นศักย์ลบ (negative potential) ในขณะที่ขั้วแอโนดจะทำงานในสภาวะที่ศักย์เป็นศูนย์ (ground potential) จึงเกิดความต่างศักย์ขึ้นภายในนั่นเอง ในภาพที่ 2.2 แสดงปลายยอดของทังสเตนฟิลาเมนต์



ภาพที่ 2.2 ปลายยอดของทังสเตนฟิลาเมนต์⁽²⁾

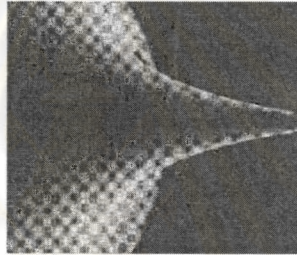
(2) ผลึกแลนทานัมเฮกซะโบไรด์ (LaB₆ sources)

ผลึกแลนทานัมเฮกซะโบไรด์ (LaB₆) มีกลไกการทำงานแบบเทอร์มิออนิกเช่นกัน สามารถให้ความสว่าง (brightness) สูงกว่าลวดทังสเตนประมาณ 10 เท่า และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า แต่มีข้อจำกัดตรงที่ต้องการสภาพที่เป็นสุญญากาศมากกว่าลวดทังสเตน ภาพที่ 2.3 แสดงผลึกแลนทานัมเฮกซะโบไรด์



ภาพที่ 2.3 ผลึกของแลนทานัมเฮกซะโบไรด์⁽²⁾

(3) แหล่งกำเนิดแบบฟیلด์อิมิชัน (Field emission sources or field emission guns, FEGs) สำหรับแหล่งกำเนิดชนิดนี้ประกอบด้วยแอโนดจำนวน 2 อัน โดยแอโนดอันแรกซึ่งเป็นประจุบวกจะเป็นตัวดึงอิเล็กตรอนออกจากปลายยอด และแอโนดอันที่สองจะทำหน้าที่เร่งอิเล็กตรอนขึ้นไป 100 กิโลโวลต์ หรือสูงกว่านั้น ซึ่งจะทำหน้าที่เสมือนอิเล็กโตรแมกเนติกเลนส์หรือเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งทำหน้าที่รวบรวมประจุอิเล็กตรอนจำนวนมากที่เกิดให้เป็นลำอิเล็กตรอนดังที่แสดงในภาพที่ 2.4 สำหรับแหล่งกำเนิดชนิดนี้สามารถให้ความสว่างสูงกว่าผลึกเลนทานัมเฮกซะโบไรด์ประมาณ 1,000 เท่า แต่มีข้อเสียที่มีราคาสูงและต้องการสภาวะที่เป็นสุญญากาศสูงกว่าชนิดอื่นเพื่อป้องกันการเกิดสิ่งสกปรกไปติดที่ปลายยอดของแหล่งกำเนิด นอกจากนี้ฟیلด์อิมิชันยังแยกย่อยได้เป็น 3 ชนิด คือ โคลด์ฟیلด์อิมิชัน (cold field emission gun) เทอร์มัลแอสซิสต์ฟیلด์อิมิชัน (thermally assisted cold field emission gun) และเทอร์มัลฟیلด์อิมิชัน (thermal field emission gun) ความแตกต่างของปืนอิเล็กตรอนชนิดต่างๆได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1



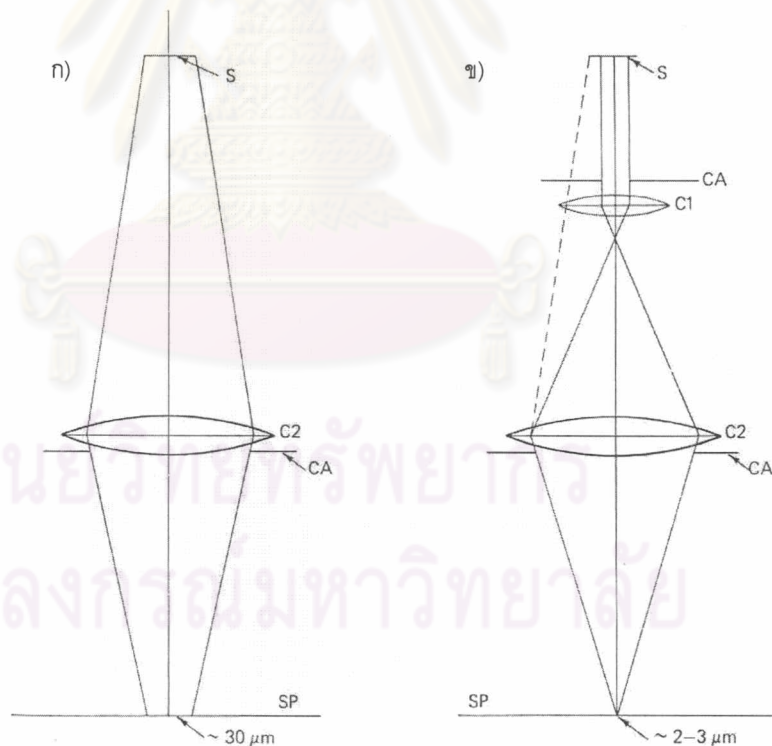
ภาพที่ 2.4 ปลายยอดของแหล่งกำเนิดแบบฟیلด์อิมิชัน⁽²⁾

ตารางที่ 2.1 สรุปคุณสมบัติที่สำคัญของแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนชนิดต่างๆ⁽³⁾

แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน	ความสว่าง ($A\text{ cm}^{-2}\text{sr}^{-1}$)	ขนาดของแหล่งกำเนิด	การแผ่พลังงาน (อิเล็กตรอนโวลต์)
ลวดทังสเตน	3×10^5	50 ไมครอน	3
ผลึกเลนทานัมเฮกซะโบไรด์	3×10^6	1 ไมครอน	1.5
โคลด์ฟیلด์อิมิชัน	109	5 นาโนเมตร	0.3
เทอร์มัลฟیلด์อิมิชัน	109	20 นาโนเมตร	0.7

2.1.2 ระบบคอนเดนเซอร์ (The condenser lens)

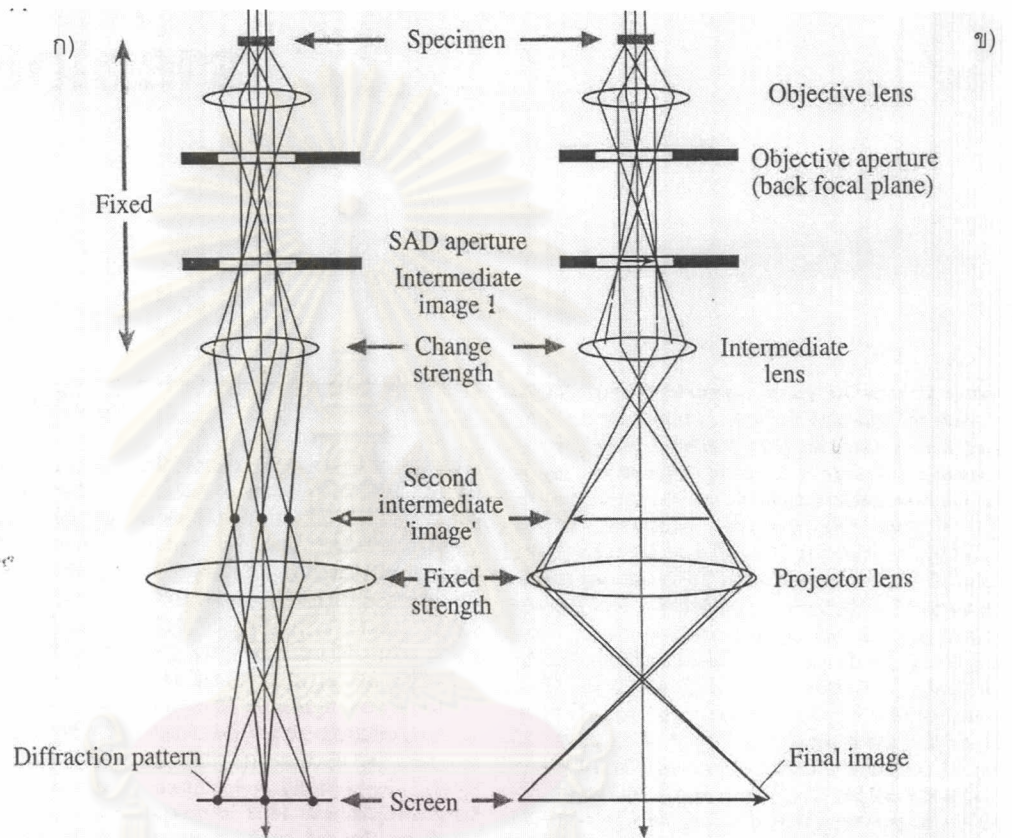
หน้าที่ของเลนส์คอนเดนเซอร์ คือ ปรับลำอเล็กตรอนที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดไปยังชิ้นงานให้มีขนาดเล็กลงเพื่อเป็นการเพิ่มความเข้มของลำอเล็กตรอน จากนั้นลำอเล็กตรอนจะวิ่งลงสู่เบื้องล่าง ผ่านไปยังเลนส์วัตถุต่อไป สำหรับระบบเลนส์คอนเดนเซอร์อย่างง่ายนั้น เลนส์คอนเดนเซอร์จะอยู่ที่ตำแหน่งประมาณกึ่งกลางระหว่างแคโทดกับระนาบวัตถุ นั่นคือเมื่อเกิดการบีบลำอเล็กตรอนลงบนระนาบวัตถุ พื้นที่หน้าตัดของลำอเล็กตรอนที่ได้จะรวมเป็นจุดเดียวกันซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับแหล่งกำเนิด (~30-50 ไมครอน) (ดังที่แสดงในภาพที่ 2.5 (ก)) อย่างไรก็ตามระบบนี้ไม่เป็นที่นิยมมากนัก เนื่องจากเลนส์คอนเดนเซอร์ระบบคู่ได้ถูกพัฒนาให้มีความสมบูรณ์กว่าโดยมีการเพิ่มเลนส์คอนเดนเซอร์เข้าไปอีกหนึ่งอัน ซึ่งจะทำให้ลดขนาดของลำอเล็กตรอนลงไปได้ ในภาพที่ 2.5 (ข) เลนส์อันที่ 1 ซึ่งมีความยาวโฟกัสสั้น ใช้ในการบีบลำอเล็กตรอนให้เล็กลง (เส้นผ่านศูนย์กลาง ~1 ไมครอน) ส่วนเลนส์อันที่ 2 ใช้ปรับลำอเล็กตรอนให้ตกกระทบบนวัตถุ กล่าวคือเมื่อลำอเล็กตรอนตกบนวัตถุจะมีขนาดเหลือเพียง 2-3 ไมครอนเท่านั้น



ภาพที่ 2.5 เปรียบเทียบระบบคอนเดนเซอร์ประเภทเดี่ยวและคู่ (ก) ระบบคอนเดนเซอร์ประเภทเดี่ยว (ข) ระบบคอนเดนเซอร์ประเภทคู่⁽³⁾

ยิ่งไปกว่านั้นแอฟเฟอร์เจอร์ในเลนส์คอนเดนเซอร์อันที่ 2 จะควบคุมปริมาณอิเล็กตรอนที่ตกกระทบชิ้นงานวัตถุ ซึ่งเป็นการป้องกันไม่ทำให้ชิ้นงานได้รับปริมาณรังสีมากเกินไป และควบคุมรังสีที่เกิดจากอิเล็กตรอนวิ่งไปกระทบกับส่วนต่างๆในคอลัมน์

2.1.3 เลนส์วัตถุ (The objective lens)



ภาพที่ 2.6 แผนภาพการเกิดภาพเบื้องต้นในจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (ก) รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) (ข) ภาพขยาย (image)⁽²⁾

เลนส์วัตถุเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดในจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเนื่องจากลำอิเล็กตรอนที่เกิดการเลี้ยวเบนจะมารวมกันที่เลนส์วัตถุสร้างภาพรูปแบบการเลี้ยวเบน (DP) บนระนาบด้านหลัง จากนั้นจะรวมตัวกันเกิดเป็นจุดเลี้ยวเบนขึ้น ซึ่งการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน จะเป็นไปตามสมการของแบรกก์ (Bragg's equation) คือ

$$2 d_{hkl} \sin \theta = n \lambda \tag{2.1}$$

โดยที่ d_{hkl} คือระยะระหว่างระนาบ (hkl), θ คือมุมตกกระทบ, λ คือความยาวคลื่น และ n คือเลขจำนวนเต็ม (1,2,3,...) สำหรับภาพรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ศึกษากันโดยทั่วไป $n = 1$

ภาพที่ 2.6 (ก) แสดงจุดเลี้ยวเบนเมื่อทำการปรับระบบเลนส์โดยใช้โมดดิฟแฟรกชันที่ทำให้เกิดภาพ หลังจากนั้นซึ่งจุดเลี้ยวเบนนี้จะฉายลงบนหน้าจอรับภาพ แต่หากใช้เป็นโมดรับภาพปกติภาพที่ได้จะมาจากระนาบวัตถุ ซึ่งจะฉายลงบนหน้าจอรับภาพต่อไป ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.6 (ข)

2.1.4 แท่นวางชิ้นงาน (The specimen stage)

ชิ้นงานจะถูกใส่ลงในตัวยึดชิ้นงาน (specimen holder) ก่อนนำเข้าเครื่อง ซึ่งตัวยึดชิ้นงานนี้ใช้สำหรับยึดชิ้นงานไว้ที่ตัวเลนส์วัตถุ ตัวยึดชิ้นงานที่ใช้ทั่วไปมี 2 แบบ คือ แบบที่ 1 เรียกว่า ตัวยึดชิ้นงานแบบซิงเกิลทิลท์ (single tilt specimen holder) ซึ่งจะสามารถปรับเอียงชิ้นงานได้เพียงแนวเดียว แบบที่ 2 เรียกว่า ตัวยึดชิ้นงานแบบดับเบิลทิลท์ (double tilt specimen holder) ซึ่งจะสามารถปรับเอียงชิ้นงานได้ 2 ทิศทาง ข้อดีของตัวยึดชิ้นงานคือ ช่วยยึดชิ้นงานไว้ไม่ให้ปลิวหายไปเมื่อใส่เข้าไปในเครื่องซึ่งมีสถานะเป็นสุญญากาศ ยิ่งไปกว่านั้นตัวยึดชิ้นงานยังมีการออกแบบมาหลายรูปแบบเพื่อให้เหมาะกับการใช้งานในแต่ละการทดลอง

2.1.5 ระบบการฉายภาพ (The projector system)

ระบบนี้จะมีความสัมพันธ์กับกำลังขยายในจุลทรรศน์ สำหรับกำลังขยายที่ดีที่สุดในการมองเห็นภาพนั้นจะเป็นผลจากกำลังแยกแยะของตัวเครื่องเอง คุณภาพของฟิล์มถ่ายภาพ รวมไปถึงความสามารถในการมองเห็นของตามนุษย์ ภาพที่ 2.6 (ข) แสดงแนวรังสีที่สมบูรณ์ที่เกิดขึ้นในจุลทรรศน์อิเล็กตรอน กำลังขยายสุดท้ายของภาพ (M_T) เกิดจากการรวมของกำลังขยายในแต่ละเลนส์ นั่นคือ

$$M_T = M_0 \times M_1 \times M_2 \quad (2.2)$$

เมื่อ

M_0 คือ กำลังขยายของเลนส์วัตถุ

M_1 คือ กำลังขยายของเลนส์ฉายภาพอันที่ 1

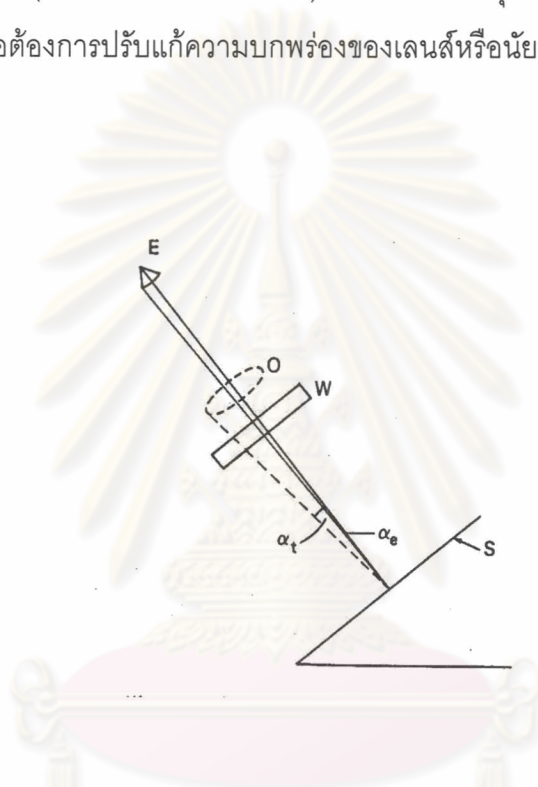
M_2 คือ กำลังขยายของเลนส์ฉายภาพอันที่ 2

โดยปกติจะทำการเปลี่ยนกำลังขยายโดยใช้เลนส์ฉายภาพอันที่ 1

2.1.6 ระบบการมองเห็นภาพ (Viewing system)

(1) การมองเห็นภาพ

ภาพจากเครื่องมือจะถูกฉายลงบนจอร์รับภาพ ภาพที่ได้นี้จะขึ้นอยู่กับกลไก (mechanism) ที่สำคัญ 2 ชนิด คือ กลไกเฟสคอนทราสต์ที่มีกำลังแยกแยะสูง (high-resolution phase contrast mechanism) ซึ่งใช้ในการถ่ายภาพที่ต้องการกำลังแยกแยะน้อยกว่า 10 \AA และกลไกดิฟแฟรกชันคอนทราสต์ (diffraction contrast mechanism) ซึ่งใช้ในการถ่ายภาพที่ต้องการกำลังแยกแยะสูงกว่า 10 \AA ข้อดีของจอร์รับภาพ คือ ผู้ปฏิบัติงานสามารถดูภาพเพื่อเลือกตำแหน่งซึ่งเฉพาะที่ต้องการวิเคราะห์ได้ก่อนทำการถ่ายภาพ ในภาพที่ 2.7 แสดงการเกิดภาพบนจอผ่านจากกล้องขยายที่ติดตั้งภายนอกตัวเครื่อง (an external binocular) ซึ่งจะช่วยให้มุมมองในการมองเห็นให้ชัดเจนยิ่งขึ้น เมื่อต้องการปรับแก้ความบกพร่องของเลนส์หรือหน้าตาของมนุษย์ที่ยังไม่ได้โฟกัส (astigmatism)



ภาพที่ 2.7 แสดงการใช้กล้องที่ติดตั้งภายนอกตัวเครื่อง (สัญลักษณ์ O) เพื่อช่วยเพิ่มมุมมองในการมองเห็นภาพ⁽³⁾

(2) การบันทึกภาพ

ฟิล์มที่ใช้ในปัจจุบันทำจากสารโพลีเมอร์เคลือบด้วยซิลเวอร์แฮไลด์ (silver halide) ซึ่งเป็นสารไวแสง เมื่อทำการถ่ายภาพลงบนฟิล์ม จะเกิดการเก็บแสงไว้ในรูปของพลังงานเคมี ซึ่งเมื่อทำการล้างฟิล์มจะเกิดการถ่ายเทประจุ ได้ออกมาเป็นฟิล์มแบบเนกาทีฟ (negative film) เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลต่อไป โดยที่กำลังแยกแยะของภาพ (resolution) ยังคงเดิม อีกวิธีหนึ่งในการบันทึกภาพที่ใช้ปัจจุบันคือภาพดิจิตอล ซึ่งสามารถเก็บบันทึกข้อมูลภาพได้หลายครั้ง นอกจากนี้ยังมีราคาถูกลงและสะดวกกว่าการล้างอัดภาพแบบเดิม โดยภาพที่ได้จะไม่เสื่อมคุณภาพลงเมื่อทิ้งไว้เป็นระยะเวลาานาน

2.1.7 ระบบสุญญากาศ (Vacuum system)

เนื่องจากภายในคอลัมน์ของจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน จำเป็นต้องทำงานภายใต้สุญญากาศเพื่อกันไม่ให้อิเล็กตรอนถูกกระเจิงกลับด้วยอะตอมของแก๊ส ซึ่งระบบสุญญากาศส่วนใหญ่ที่ใช้ในปัจจุบันจะถูกควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ ระบบสุญญากาศระดับหยาบ (rough vacuums) จะมีความดันอยู่ที่ $1-10^{-3}$ Torr ระบบสุญญากาศระดับต่ำ (low vacuums) จะมีความดันอยู่ที่ $10^{-3}-10^{-6}$ Torr ระบบสุญญากาศระดับสูง (high vacuums, (HV)) จะมีความดันอยู่ที่ $10^{-6}-10^{-9}$ Torr ระบบสุญญากาศระดับสูงมาก (ultrahigh vacuum, (UHV)) จะมีความดันต่ำกว่า $< 10^{-9}$ Torr

2.1.8 แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Electrical Supply)

แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้านับเป็นส่วนที่สำคัญส่วนหนึ่ง เนื่องจากแหล่งจ่ายกำลังไฟสำหรับจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะเป็นตัวจ่ายกระแสในการให้ความร้อนกับฟิลาเมนต์และผลิตลำอิเล็กตรอนขึ้นเพื่อให้เกิดภาพ ฟิลาเมนต์นี้ต้องการพลังงานในช่วงระหว่าง 2.5-3.0 แอมแปร์ ซึ่งแหล่งจ่ายไฟฟ้าโดยปกติจะใช้ไฟกระแสตรงเพื่อหลีกเลี่ยงระลอกคลื่น (ripples) ซึ่งจะมีผลทำให้ลำอิเล็กตรอนมีความเข้มลดต่ำลง และในการเร่งการเปล่งลำอิเล็กตรอนต้องการใช้ค่าความต่างศักย์ที่มีค่ามาก กระแสไฟฟ้าซึ่งค่าความต่างศักย์สูงต้องจ่ายจะมีค่าไม่เกิน 0.1 มิลลิแอมแปร์ นอกจากนี้ยังต้องมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปที่เลนส์แต่ละตัว (ไม่เกิน 1 ในล้านส่วน) แหล่งจ่ายไฟที่ใช้ส่วนใหญ่นี้เป็นทรานซิสเตอร์และทำงานที่ความต่างศักย์ต่ำ

2.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

2.2.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทั่วไป

ในการวิเคราะห์และศึกษาการใช้เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เพื่อให้ได้ภาพที่ดีนั้น นอกจากจะขึ้นกับประสิทธิภาพของเครื่องแล้ว ยังขึ้นกับชนิดของตัวอย่างและเทคนิคการเตรียมตัวอย่างที่เหมาะสมอีกด้วย หากชิ้นงานไม่ดีพอ ผลการทดลองที่ได้อาจคลาดเคลื่อน เช่น โครงสร้างของชิ้นงานอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเตรียมตัวอย่าง ทำให้การตีความผลการทดลองผิดพลาดได้

สำหรับชิ้นงานที่ใช้เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านจะต้องเป็นชิ้นงานที่มีบริเวณที่หนาน้อยกว่า 500 นาโนเมตร เพื่อให้ลำอิเล็กตรอนสามารถทะลุผ่านได้ นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงขนาดของชิ้นงานด้วยเนื่องจากแผ่นวางชิ้นงาน (specimen grid) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียง 3 มิลลิเมตร นั่นคือชิ้นงานดังกล่าวต้องมีขนาดเท่ากับหรือเล็กกว่าแผ่นวางชิ้นงาน ซึ่งเป็นไปได้ว่าชิ้นงานที่มีขนาดเล็กและบางมากจะแตกหักระหว่างการเตรียมตัวอย่าง ขั้นตอนหลักในการเตรียมตัวอย่าง ได้แก่

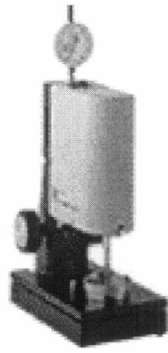
(1) การตัดชิ้นงานให้ได้ขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร

วิธีการตัดโดยใช้อัลตราโซนิคส์เป็นวิธีการที่เหมาะสมกับการตัดวัสดุที่เปราะ โดยการเจาะเอาชิ้นงานขนาดตามต้องการออกจากชิ้นงานขนาดใหญ่โดยมีตัวหัวเจาะเป็นตัวควบคุมรูปทรงของชิ้นงาน โดยทั่วไปมักเจาะชิ้นงานให้เป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับ 3 มิลลิเมตร หากชิ้นงานเริ่มต้นมีความหนามากเกินไปและทำให้ตัดยาก ควรเปลี่ยนไปทำการตัดให้ชิ้นงานมีขนาดเล็กลงด้วยการตัดด้วยเครื่องตัดแบบลวด (wire saw) หรือเครื่องตัดแบบเพชร (diamond wafering blade) เสียก่อน ซึ่งก่อนที่จะนำชิ้นงานเข้าเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน จะต้องนำชิ้นงานไปติดบนแผ่นวางชิ้นงาน (specimen grid) อีกทีเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน

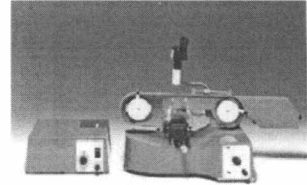
(2) การขัดให้ชิ้นงานมีความหนาประมาณ 100 ไมโครเมตร

ขั้นตอนนี้เป็นการขัดเชิงกล โดยนำชิ้นงานมาติดกับแท่นขัดเพื่อความสะดวกเวลาขัด และเลือกใช้กระดาษขัดที่มีความละเอียดขนาดต่าง ๆ ให้เหมาะสมกับการขัดชิ้นงาน ซึ่งจะทำการขัดหยาบจนมีความหนาประมาณ 100 ไมโครเมตร แล้วจากนั้นจึงทำการขัดมัน (polish) จนได้ผิวหน้าของชิ้นงานที่เรียบมัน หากชิ้นงานเป็นชิ้นงานโดยทั่วไปที่ต้องการคุณสมบัติของชิ้นงานทั้งชิ้น (bulk) และมีผิวหน้าที่ไม่เรียบทั้งสองด้าน จะต้องขัดชิ้นงานจากทั้ง 2 ด้านให้เรียบ เมื่อได้ชิ้นงานที่มีความหนาประมาณ 100 ไมโครเมตรแล้ว ในการที่จะทำให้บริเวณเฉพาะบางจนลำอิเล็กตรอนสามารถผ่านได้นั้น อาจใช้เครื่องมืออื่นช่วยเพื่อลดเวลาทั้งหมดที่ต้องใช้ในการเตรียมชิ้นงาน ซึ่งเครื่องมือช่วยที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมี 2 ชนิดคือ ดิมเพิลกรายน์เดอร์ (dimple grinder) และ ไตรพอดโพลิชเซอร์ (tripod polisher) โดยที่เครื่องมือทั้งสองชนิดช่วยให้สามารถลดความหนาของชิ้นงาน ณ บริเวณเฉพาะได้จนลำอิเล็กตรอนเกือบผ่านไปได้

ก)



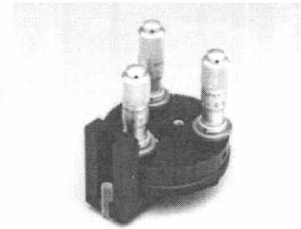
ข)



ค)



ง)

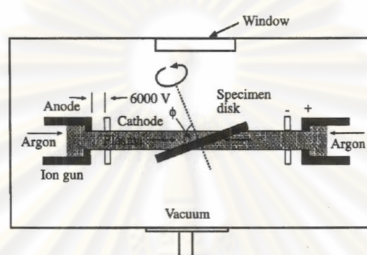


ภาพที่ 2.8 เครื่องมือในการเตรียมตัวอย่าง (ก) เครื่องตัดอัลตราโซนิก (ข) เครื่องตัดแบบลวด
(ค) ดิมเพิลกราฟีเตอร์ (ง) ไตรพอดโพลิชเซอร์⁽⁷⁾

(3) การทำให้ชิ้นงานบางส่วนมีความหนาลดลงจนลำอิเล็กตรอนสามารถผ่านได้

ในขั้นตอนนี้เวลาที่ให้จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ความหนาของชิ้นงาน และวิธีการที่ใช้ ซึ่งชิ้นงานที่ดีควรมีบริเวณที่ลำอิเล็กตรอนผ่านได้แค่เพียงบางส่วนเท่านั้น เพื่อให้บริเวณที่หนากว่าไม่แตกหักง่ายจนเกินไปเมื่อหยิบจับ หากไม่สามารถเลือกทำให้บริเวณเล็ก ๆ เท่านั้นให้บางมาก ๆ ได้ ควรใช้แผ่นวางชิ้นงานติดบนชิ้นงานก่อนที่จะหยิบจับชิ้นงาน ซึ่งวิธีการทำให้ชิ้นงานบางลงนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่นการขัดเงาด้วยสารเคมี (chemical polishing) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและประหยัดที่สุด แต่เหมาะสำหรับวัสดุที่มีเฟสเดียวเท่านั้น ถ้าหากมีเฟสมากกว่า 1 เฟส แต่ละเฟสอาจจะหลุดออกมาในอัตราที่ต่างกัน การกัดบางด้วยลำไอออน (ion beam thinning) ซึ่งวิธีนี้ใช้หลักการยิงไอออนและอะตอมที่มีพลังงานสูงใส่ผิวหน้าของชิ้นงาน เพื่อกัดเซาะชิ้นงานให้บางพอที่ลำอิเล็กตรอนจะผ่านได้ โดยทั่วไปมักใช้แก๊สเฉื่อยเช่นอาร์กอน หรือ ฮีเลียม เพื่อไม่ให้ทำ

ปฏิกิริยากับชิ้นงาน แต่อาจใช้แอกทีฟไอออน (active ions) เช่นไฮโดรเจนเพื่อเร่งให้การกัดบาง เกิดเร็วขึ้นได้ ภาพที่ 2.9 แสดงหลักการทำงานของวิธีการกัดบางด้วยลำไอออน การปรับความต่างศักย์ มุมที่ไอออนตกกระทบลงบนพื้นผิว อุณหภูมิ และชนิดของไอออน ล้วนมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงาน และคุณภาพของชิ้นงาน โดยทั่วไปแล้วเครื่องกัดบางด้วยลำไอออนที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมักจะใช้แก๊สอาร์กอนโดยทั่วไปแล้วความต่างศักย์เริ่มต้นที่มักใช้กันคือ 4-6 กิโลโวลต์ ส่วนมุมเริ่มต้นนั้นขึ้นอยู่กับเครื่องมือที่ใช้ ซึ่งเครื่องที่ทำการทดลองคือ Precision Ion Polishing System (PIPS) โดยทั่วไปมักจะเริ่มต้นที่ $8-10^\circ$ และหยุดที่ $2-3^\circ$



ภาพที่ 2.9 ภาพแสดงหลักการทำงานของวิธีการกัดบางด้วยลำไอออน⁽²⁾

2.2.3 การสอบเทียบกำลังขยายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

อุปกรณ์สำหรับสอบเทียบค่ากำลังขยายของจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านโดยทั่วไปคือ เกรตติง (grating) ซึ่งเป็นชิ้นงานมาตรฐานสำหรับสอบเทียบกำลังขยายของจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านจาก บริษัทผู้ผลิต โดยเกรตติงที่ใช้เป็นแบบ Diffraction Grating Replicas มีเส้นขนานกันตลอดความยาว 1 มิลลิเมตร จำนวน 1200 เส้น และมีระยะระหว่างเส้นขนานที่ติดกันเป็น 833 นาโนเมตร การสอบเทียบกำลังขยายทำโดยวัดค่าระยะระหว่างเส้นขนานที่ติดกันจากภาพถ่ายไบรท์ฟิลด์ (bright field image) ในสภาวะเครื่องขณะนั้น แล้วนำผลมาเปรียบเทียบกับอัตราส่วนระหว่างระยะระหว่างเส้นที่วัดได้จากภาพถ่าย กับระยะระหว่างเส้นที่เป็นค่าจริง จะได้ผลออกมาเป็นตัวคูณสอบเทียบ เพื่อนำไปใช้เป็นค่าสอบเทียบกำลังขยายกับภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านที่ได้ แต่สำหรับจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านที่กำลังแยกแยะสูงๆ จะใช้พิโลฟิลไลท์ (pilophillite) แทนซึ่งจะมีความละเอียดสูงกว่า โดยมีระยะห่างระหว่างแต่ละเส้นเท่ากับ 0.45 นาโนเมตร

2.2.4 การประยุกต์ใช้จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านควบคู่กับอุปกรณ์วิเคราะห์ชนิดอื่น ๆ

สำหรับจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านที่มีอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุประกอบอยู่ด้วย จะเป็นการวิเคราะห์เฉพาะจุด (spot analysis) หรือพื้นที่เล็กๆ โดยรับสัญญาณที่เกิดจากการยิงอิเล็กตรอนลงไป ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเฉพาะตัว (characteristic x-ray) สำหรับเอเนอร์ยีดิสเพอร์ซีฟเอกซเรย์สเปกโทรเมทรี (Energy Dispersive X-ray Spectrometry, EDS) หัววัดรังสีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ หัววัดรังสีแบบ Si(Li) ซึ่งเหมาะสำหรับการวัดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่มีพลังงานในช่วง 1 – 30 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งจะเปลี่ยนพลังงานของรังสีให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าในรูปของศักย์ไฟฟ้า จากนั้นจะทำการแปลสัญญาณต่อไป จะทำให้ทราบว่ามีธาตุใดบ้างปรากฏในชิ้นงานที่ทำการศึกษา นอกจากนี้ยังทำการวิเคราะห์หาสารประกอบโดยเบื้องต้นโดยใช้เอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction) และการวิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy Analysis) เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบเพิ่มเติม

2.3 ซิลิกอนเจอร์เมเนียมสำหรับทรานซิสเตอร์แบบจุด

ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ซิลิกอนเป็นวัสดุที่ครองตลาดกว่า 95 % ของการผลิต เนื่องจากซิลิกอนมีราคาถูกลงและได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีจนสามารถนำมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง แต่ซิลิกอนก็มีข้อจำกัดตรงที่มีความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลต่ำจึงทำให้ผลิตได้เพียงอุปกรณ์ที่มีความถี่ต่ำด้วยซึ่งได้มีการนำวัสดุกลุ่ม III-V เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) มาประยุกต์ใช้แทน^(9,10) อย่างไรก็ตามวัสดุกลุ่ม III-V มีข้อเสียตรงที่วิธีการผลิตสลับซับซ้อนและต้นทุนการผลิตสูง

ซิลิกอนเจอร์เมเนียมจึงเป็นทางเลือกในการใช้วัสดุที่มีต้นทุนในการผลิตต่ำซึ่งสามารถปลูกผลึกได้บนแผ่นซิลิกอนที่ใช้มาแต่เดิมเพื่อช่วยพัฒนาสมบัติต่างๆ เช่น ค่าแถบพลังงาน (bandgap) โครงสร้างของแถบพลังงาน (energy band structure) ค่าแอฟเฟคทีฟแมสส์ (effective masses) ตลอดจนความสามารถในการเคลื่อนที่ (mobility) และประการสำคัญที่สุดคือยังคงสามารถใช้เครื่องมือทดลองจนกระบวนการการผลิตแบบเดิมกับที่ใช้ในการผลิตซิลิกอนได้

⁽¹¹⁾ ซิลิกอนเจอร์เมเนียม (SiGe) เป็นสารประกอบที่ประกอบไปด้วยซิลิกอนและเจอร์เมเนียม ในปี ค.ศ. 1939 Stohr และ Klemm ได้เตรียมสารประกอบซิลิกอนเจอร์เมเนียมขึ้นมาเป็นครั้งแรก⁽¹²⁾ ต่อมา Levitas⁽¹³⁾ ได้ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะและสรุปว่าการกระเจิงของโลหะ (alloy scattering) จะเป็นตัวบ่งชี้ให้เห็นถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในโลหะแต่ละชนิด ต่อมา Joyce และ Bradely ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเทคโนโลยีในการปลูกผลึกซิลิกอน⁽¹⁴⁾

แต่เพิ่งเริ่มนำมาใช้กับการปลูกผลึกซิลิกอนเจอร์เมเนียมเมื่อ 28 ปีก่อน⁽¹⁵⁾ ในปี ค.ศ 1982 ทางไอบีเอ็มได้พัฒนากระบวนการทางเคมีที่มีความดันต่ำและมีความเป็นสุญญากาศสูงขึ้น (UHV-CVD technique) เพื่อให้ในการปลูกผลึกซิลิกอนเจอร์เมเนียมที่อุณหภูมิต่ำ (500°C) ได้สำเร็จ⁽¹⁶⁾ ในปี ค.ศ 1987 ได้มีการผลิตซิลิกอนเจอร์เมเนียมสำหรับทรานซิสเตอร์แบบเฮเทอโรจังก์ชันไบโพลาร์ (SiGe base Heterojunction Bipolar Transistor, HBT) ขึ้น ประเด็นสำคัญอยู่ที่ความแตกต่างของค่าคงที่ทางผลึกระหว่างซิลิกอนและเจอร์เมเนียมอยู่ที่ 4.2 % จึงเป็นการยากที่จะปลูกผลึกซิลิกอนเจอร์เมเนียมลงบนซิลิกอนขึ้นมาโดยไม่ทำให้เกิดข้อบกพร่องขึ้นภายในชิ้นงาน ราวต้นปี ค.ศ.1990 จึงได้มีการค้นคว้าเกี่ยวกับซิลิกอนเจอร์เมเนียมชนิดเอ็นและชนิดพีสำหรับสำหรับทรานซิสเตอร์ชนิดมอสเฟตขึ้น⁽¹⁷⁾

ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติที่สำคัญของซิลิกอนและเจอร์เมเนียม จากตารางพบว่าค่าการเคลื่อนที่ของโฮลในเจอร์เมเนียมค่าสูงกว่าในซิลิกอน ดังนั้นจึงได้มีการนำซิลิกอนเจอร์เมเนียมมาใช้แทนซิลิกอนเพื่อให้ได้ทรานซิสเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

ตารางที่ 2.2 สมบัติของซิลิกอนและเจอร์เมเนียม ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน⁽¹⁰⁾

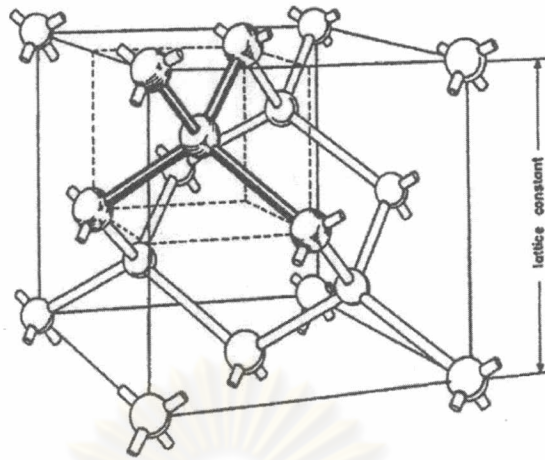
ธาตุ	ค่าแอฟเฟคทีฟแมสส์ของอิเล็กตรอน	ค่าแอฟเฟคทีฟแมสส์ของโฮล	ความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$)	ความสามารถในการเคลื่อนที่ของโฮล ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$)	ค่าแถบพลังงาน (eV)	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
เจอร์เมเนียม	0.22	0.29	3900	1900	0.7	16
ซิลิกอน	0.33	0.55	1500	450	1.1	12

2.3.1 สารประกอบซิลิกอนเจอร์เมเนียม (SiGe material system)

(1) โครงสร้างผลึก (crystal structure)

ซิลิกอนและเจอร์เมเนียมจัดเรียงตัวกันด้วยพันธะโควาเลนต์เป็นโครงสร้างผลึกแบบเพชรดังแสดงในภาพที่ 2.10 ในหน่วยเซลล์ประกอบด้วย 8 อะตอมซึ่งจัดเรียงตัวอยู่ในตำแหน่งดังต่อไปนี้:

$$\begin{array}{cccc} 0 & 0 & 0 & \\ 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} \end{array} \quad \begin{array}{cccc} \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & \\ \frac{3}{4} & \frac{1}{4} & \frac{3}{4} & \frac{3}{4} \end{array} \quad \begin{array}{cccc} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & \\ \frac{3}{4} & \frac{3}{4} & \frac{1}{4} & \end{array}$$



ภาพที่ 2.10 โครงสร้างแบบเพชร⁽¹²⁾

สำหรับซิลิกอนเจอร์เมเนียมมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเพชรเช่นเดียว ในปี ค.ศ 1964 Dismukes และคณะผู้วิจัย⁽²¹⁾ พบว่าค่าคงที่ของแลตติซของซิลิกอนเจอร์เมเนียม ($\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$) สามารถหาได้จากสมการของเวการ์ต (Vegard's rule) จะได้ว่า

$$a(x) = 0.002733x^2(\text{nm}) + 0.01992x(\text{nm}) + 0.5431(\text{nm}) \quad (2.3)$$

เมื่อกำหนดให้ $a(x)$ คือค่าคงที่ของแลตติซ

เมื่อปริมาณความเข้มข้นของเจอร์เมเนียมน้อยมากๆ จะได้ว่า

$$a(x) = 0.5431(\text{nm}) + 0.00417x(\text{nm}) \quad (2.4)$$

(2) ชั้นซิลิกอนเจอร์เมเนียมที่ได้รับความเครียดบนชั้นซิลิกอน (Strained $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ epilayer structure)

เนื่องจากการปลูกผลึกซิลิกอนเจอร์เมเนียมลงบนซิลิกอนจะเกิดความเครียดขึ้นภายในเสมอจึงเป็นสาเหตุสำคัญที่จะต้องเลือกสภาวะที่ใช้ในการปลูกผลึกให้เหมาะสม ในภาพที่ 3.2 (ก) แสดงหน่วยเซลล์ของซิลิกอนและเจอร์เมเนียมซึ่งมีค่าคงที่ทางผลึกเท่ากับ 0.5431 และ 0.56573 ตามลำดับ ซึ่งค่าความแตกต่างของค่าคงที่ทางผลึก (The lattice mismatch, m) สามารถคำนวณได้จากสมการ:

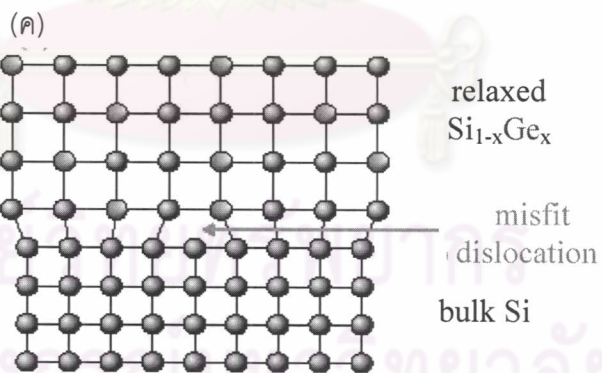
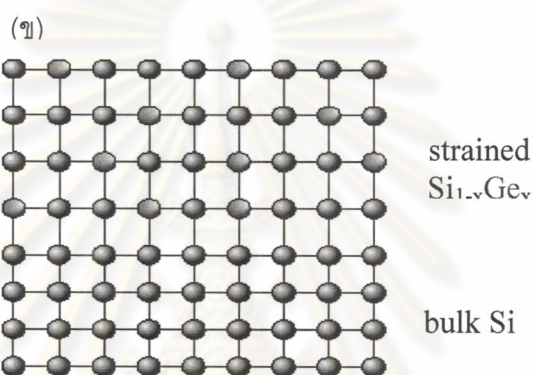
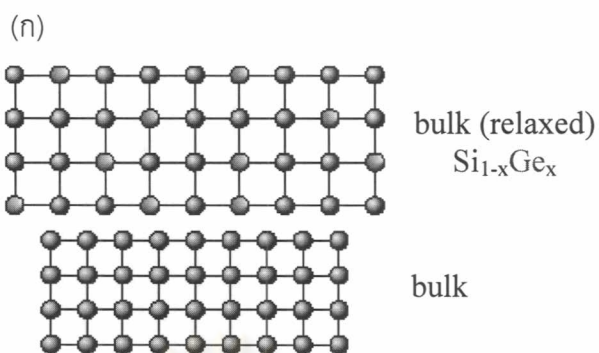
$$m = \frac{(a_{\text{Ge}} - a_{\text{Si}})}{a_{\text{Si}}} 100 \% \quad (2.5)$$

เมื่อ a_{Si} คือ ค่าคงที่ของแลตติซของซิลิกอน และ a_{Ge} คือ ค่าคงที่ของแลตติซของเจอร์เมเนียม

นั่นคือจะได้ว่าความแตกต่างของค่าคงที่ทางผลึกระหว่างซิลิกอนและเจอร์เมเนียมอยู่ที่ 4.2 % นั่นเอง ภายใต้ค่าความหนาวิกฤต (ค่าความหนาวิกฤตคือความหนาที่มากที่สุดของชั้นวัสดุที่มีความเครียดซึ่งสามารถปลูกผลึกได้ก่อนโครงสร้างผลึกจะเปลี่ยนแปลงไป) เมื่อทำการปลูก $Si_{1-x}Ge_x$ ลงบนซิลิกอน ซิลิกอนเจอร์เมเนียมที่ได้รับความเครียดจะแสดงค่าความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลมากกว่าของซิลิกอนธรรมดา ดังที่แสดงไว้ในภาพที่ 2.11 (ข) แต่เมื่ออยู่ในสภาวะที่สูงกว่าค่าความหนาวิกฤต $Si_{1-x}Ge_x$ จะเกิดการรีแลกซ์ (relax) และเกิดความบกพร่อง (defect) ขึ้นในชั้นงาน เช่น misfit dislocation ดังที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 2.11(ค) ซึ่งโครงร่างของแนวบกพร่องที่เกิดขึ้นจะปรากฏบนพื้นผิวที่เรียกว่ารอยกากบาท (cross hatch) ซึ่งมองเห็นเป็นเส้นขนานยาวได้อย่างชัดเจน ซึ่งลักษณะพื้นฐานนี้สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อทำการตรวจสอบโดยใช้จุลทรรศน์แบบแสงแบบ Differential interference contrast (DIC, Nomarski)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 2.11 โครงสร้างผลึกซึ่งเป็นชั้นของซิลิกอนเจอร์เมเนียมและซิลิกอน (ก) เมื่อทำการแยกชั้น

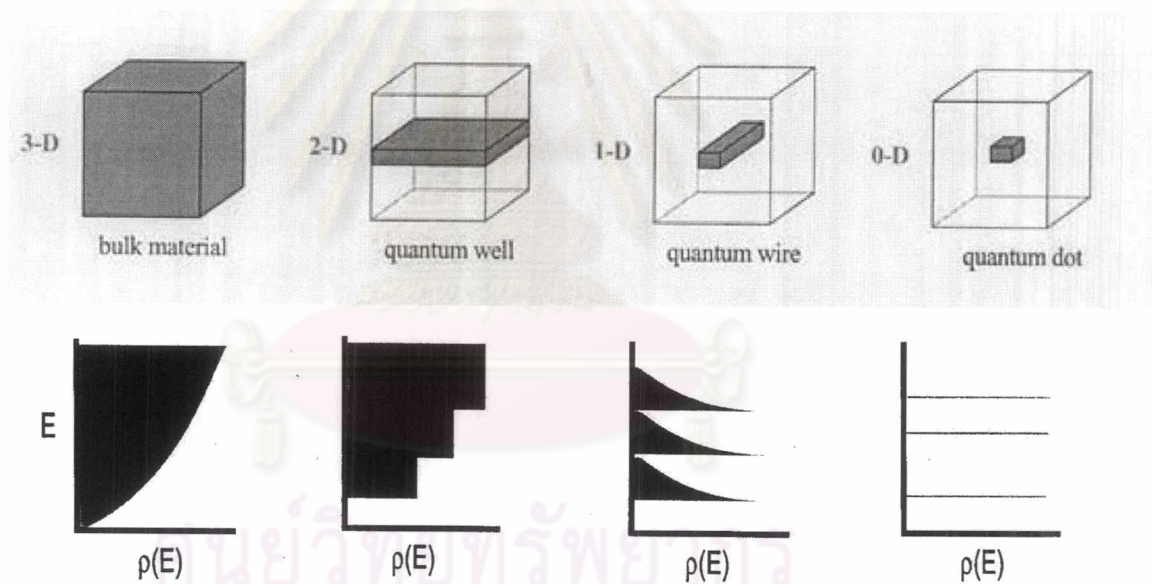
(ข) ชั้นของ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ บนชั้นซิลิกอนภายใต้ความหนาวิกฤต (critical thickness)

(ค) ชั้นของ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ บนชั้นซิลิกอนเหนือความหนาวิกฤต⁽²³⁾

2.3.2 จุดควอนตัม (A Quantum Dot)

โครงสร้างควอนตัมเป็นตัวกำหนดขอบเขตความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในวัสดุทั้งก้อนซึ่งอิเล็กตรอนจะสามารถเคลื่อนที่ได้ทุกทิศทาง ความแตกต่างระหว่างสถานะทางไฟฟ้า (electronic states) ในแต่ละวัสดุจะเป็นตัวกำหนดขบวนการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างอิสระ ถ้าขนาดของทิศทางการเคลื่อนที่ในโครงสร้างมีค่าใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนจะทำให้ผลของควอนตัมเพิ่มมากขึ้น

เริ่มต้นจากวัสดุทั้งก้อนเมื่อมองใน 3 มิติ แต่ละทิศทางสามารถทำให้เล็กลงได้ จึงเกิดเป็นโครงสร้างควอนตัม 3 แบบ คือ การทำให้วัสดุบางลงจนมีลักษณะเป็น 2 มิติ จะเรียกว่า กำแพงควอนตัม (quantum well) แต่ถ้าสามารถลดขนาดลงได้จนเหลือเพียงมิติเดียวจะเรียกว่า ลวดควอนตัม (quantum wire) แต่ถ้าสามารถทำให้มีขนาดเล็กลงในทุกทิศทาง (0-D) จะเรียกว่า จุดควอนตัม ในภาพที่ 2.12 แสดงแผนภาพโครงสร้างควอนตัมและ density of the states



ภาพที่ 2.12 โครงสร้างของวัสดุทั้งตัวนำเปรียบเทียบกับ density of the states, $\rho(E)$ ⁽²⁷⁾

ในกำแพงควอนตัมซึ่งเป็นวัสดุทั้งตัวนำที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ ตัวพาหะจะถูกดึงไปอยู่ในสารกึ่งตัวนำที่มีค่าแถบพลังงานต่ำ หากความหนาของชั้นน้อยมากๆ ตัวพาหะจะเกิดเป็น standing waves เมื่ออุณหภูมิต่ำเพียงพอพาหะทุกตัวทั้งอิเล็กตรอนและโฮลในกำแพงควอนตัมจะอยู่ใน quantum - confined state ซึ่งมีค่าต่ำที่สุด ซึ่งตัวพาหะสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ค่า density of states จะมีลักษณะเป็นรูปบันได โดยที่ค่า density of states นี้สามารถทำให้แบ่งแยกเป็นระดับชัดเจนขึ้นถ้าหากทิศทางในวัสดุถูกลดลงจนเหลือเป็นหนึ่งมิติ

(ลวดควอนตัม) หรือศูนย์มิติ (จุดควอนตัม) ระดับพลังงานจะในจุดควอนตัมจะเปลี่ยนรูปโดยสมบูรณ์เหมือนกับของอะตอม

จุดควอนตัมแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทเมื่อพิจารณาจากวิธีที่ใช้ในการผลิตจุดควอนตัม ประเภทแรก คือจุดควอนตัมแบบสามารถรวมตัวกันได้เอง (self – assembled quantum dot) ซึ่งสามารถผลิตได้โดยวิธีการ molecular – beam epitaxy หรือวิธี metal – organic chemical – vapor deposition โดยการทำให้เกิดความเครียด (strain-induced process) ประเภทที่ 2 คือจุดควอนตัมแบบกัด (etched quantum dot) ซึ่งอาศัยหลักการใช้ electron – beam lithography และทำการกัดจนได้เป็นช่วงแคบๆเกิดขึ้น

3.2.2 ทรานซิสเตอร์แบบจุด (A Quantum Dot Transistor)

ในปัจจุบันได้มีความพยายามเพิ่มจำนวนทรานซิสเตอร์ในแผงวงจรรวม วิธีหนึ่งที่ได้ผลดีคือการย่อขนาดของทรานซิสเตอร์ให้ลดลง เทคโนโลยีในการผลิตสามารถผลิตจุดควอนตัมให้มีขนาดเท่ากับหรือน้อยกว่า 1 ไมครอนได้ แต่ปัญหาที่พบเมื่อเมื่อทรานซิสเตอร์มีขนาดเล็ก 0.1 ไมครอนนั้น จะทำให้ source และ drain เขยิบเข้าใกล้กันมากขึ้น จนสนามศักย์ของเกตจะควบคุมการไหลของอิเล็กตรอนได้ยากขึ้น เพราะอิเล็กตรอนจะไหลได้เองง่ายขึ้น จนอาจจะไม่ต้องพึ่งสนามศักย์จากเกต ปัญหาที่สองคือ โดยปกติทรานซิสเตอร์จะต้องมีสนามไฟฟ้าช่วยควบคุมการไหลของกระแส โดยขนาดของสนามไฟฟ้านี้จะต้องมีขนาดมากพอที่จะไม่ถูกรบกวนจากสัญญาณรบกวน ในเมื่อทรานซิสเตอร์มีขนาดเล็กลงมากทำให้สนามไฟฟ้ากระทำกับระยะทางที่มีขนาดเล็ก เป็นผลทำให้ความเข้มข้นของสนามไฟฟ้ามีมากขึ้น ซึ่งอาจทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปมากจนควบคุมไม่ได้ นอกจากนี้ความสามารถของอิเล็กตรอนในการทะลุผ่านกำแพงศักย์ (tunneling) โดยที่อิเล็กตรอนสามารถที่จะลอดจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งของกำแพงศักย์ได้ โดยไม่จำเป็นต้องกระโดดข้ามกำแพงศักย์ที่มีความหนาไม่มากนัก นั่นคือเมื่อเพิ่มจำนวนทรานซิสเตอร์ให้มากขึ้นในพื้นที่ที่เล็กลง ทรานซิสเตอร์แต่ละตัวก็จะมาอยู่ใกล้กันมากขึ้นโอกาสที่อิเล็กตรอนในทรานซิสเตอร์ตัวหนึ่งๆ จะลอดไปรบกวนการทำงานของทรานซิสเตอร์ตัวอื่นๆก็จะมีมากขึ้น จึงได้มีการคิดค้นทรานซิสเตอร์แบบจุดขึ้น สำหรับทรานซิสเตอร์แบบจุดนั้นจะมีพื้นที่เล็กๆที่อยู่ระหว่างช่องทางเดินอิเล็กตรอนซึ่งเชื่อมระหว่าง source และ drain ซึ่งมีลักษณะเป็นคอคอดที่เรียกว่า คูลอมบ์บัสลอคเคทจึงทำให้สามารถควบคุมปริมาณอิเล็กตรอนให้ไหลผ่านในช่องทางเดินประจุที่ละตัวได้ ทรานซิสเตอร์แบบใหม่จะสามารถลดขนาดของทรานซิสเตอร์ภายในวงจรรวมลงได้

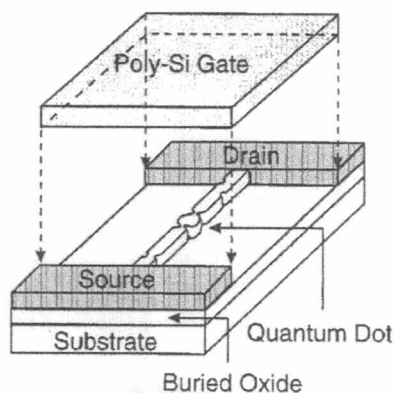
(1) ซิลิกอนเจอเมเนียมสำหรับทรานซิสเตอร์แบบจุด

สมบัติที่สำคัญตัวหนึ่งในการปรับปรุงทรานซิสเตอร์ให้ประสิทธิภาพสูงขึ้นคือ ค่าแถบพลังงาน (bandgap-engineering) ซึ่งตัวซิลิกอนเจอร์เมเนียมมีสมบัติเฉพาะตัวที่ดีกว่าการใช้ซิลิกอนเพียงอย่างเดียวในการผลิตทรานซิสเตอร์ เนื่องจากจะช่วยเพิ่มอิเล็กตรอนในชั้นของ conduction band ให้สูงขึ้นและในขณะเดียวกันจะลดโฮลใน valence band ลง ถึงแม้อิเล็กตรอนและโฮลในชั้นฟิล์มบางซิลิกอนเจอร์เมเนียมจะเกิดการกระเจิงได้ยาก แต่จะยังคงให้ค่าความสามารถในการเคลื่อนที่สูง (mobility) ได้เมื่อนำไปผลิตเป็นทรานซิสเตอร์ส่งผลให้สามารถแสดงผลที่ความถี่สูงขึ้นได้⁽¹⁷⁾

วิธีการผลิตชั้นซิลิกอนเจอร์เมเนียมที่มีคุณภาพดีสามารถผลิตได้จากวิธีกระบวนการทางเคมีที่ความดันต่ำ (LPCVD) ซึ่งเป็นเทคนิคซึ่งใช้ก๊าซเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาให้เกิดเป็นชั้นฟิล์มภายใต้สภาวะที่เป็นความดันต่ำและอุณหภูมิสูง ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำนิยมใช้ซิลิกอนหรือซิลิกอนเจอร์เมเนียมซึ่งมีความบริสุทธิ์สูงนี้ไปใช้งาน เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถของชิปให้ดีขึ้น ซิลิกอนเจอร์เมเนียมที่ผลิตโดยวิธีกระบวนการทางเคมีที่ความดันต่ำได้มีการนำมาใช้ในทรานซิสเตอร์ซึ่งทำหน้าที่เฉพาะอย่างกันไป

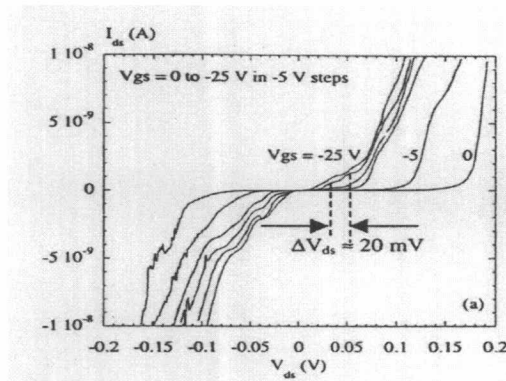
วัสดุฐานรองแบบเอสไอไอ (Silicon on Insulator substrate) ได้นำมาใช้ในทรานซิสเตอร์ เนื่องจากสามารถลดความจุไฟฟ้าภายในและช่วยให้ทรานซิสเตอร์สามารถทำงานได้เร็วกว่าใช้เพียงวัสดุฐานรองที่ทำจากซิลิกอนเพียงอย่างเดียว วัสดุฐานรองแบบเอสไอไอสามารถผลิตได้หลายวิธี หนึ่งในวิธีที่นิยมในการผลิตเรียกว่า the Separation by Implantation of Oxygen (SIMOX) ซึ่งออกซิเจนแทรกเข้าไปในแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์เพื่อที่จะผลิตเป็นชั้นออกไซด์ภายในแผ่นซิลิกอน (a buried oxide layer) กล่าวคือ SIMOX จะเป็นการเพิ่มปริมาณของออกซิเจน ($\sim 10^{18} \text{ cm}^{-2}$) ลงบนแผ่นซิลิกอนโดยตรงที่อุณหภูมิสูงมากๆ ซึ่งออกซิเจนจะจับตัวกับซิลิกอนเกิดเป็นชั้นฟิล์มบางซิลิกอนออกไซด์ขึ้นซึ่งสามารถสร้างพันธะกับชั้นซิลิกอนได้อย่างสมบูรณ์

ในปี ค.ศ 1989 Scott-Thomas และคณะผู้วิจัย⁽²²⁾ พบว่าที่อุณหภูมิต่ำการลำเลียงประจุในทรานซิสเตอร์ชนิดมอสเฟตที่มีช่องทางแคบมากๆ จะแตกต่างจากทรานซิสเตอร์ที่มีช่องทางกว้าง เนื่องจากผลของอิเล็กตรอนประจุเดี่ยว เมื่อช่องสัญญาณมีขนาดเล็กมากช่วงต่อระหว่าง source และ drain จะแคบลง การลำเลียงประจุในอุปกรณ์จะถูกควบคุมโดย tunnelling through potential barriers ซึ่งเมื่อช่องสัญญาณเล็กถึงจุดๆหนึ่ง จะสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิต่ำ ภาพที่ 2.13 แสดงโครงสร้างของอุปกรณ์ที่เรียกว่าทรานซิสเตอร์ชนิดมอสเฟตแบบจุดที่ปลูกผลึกบนวัสดุฐานรองแบบเอสไอไอ (SOI metal –oxide – semiconductor field effect transistor)



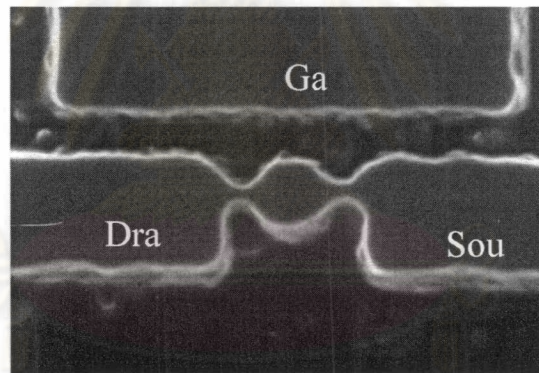
ภาพที่ 2.13 ทหรานซิสเตอร์แบบจุดที่ปลูกผลึกบนวัสดุฐานรองแบบเอสไอไอ⁽²²⁾

สำหรับชิ้นงานที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นแบบชนิด p ซึ่งเป็นชนิดที่มีช่องทางประจุเพียงช่องทางเดียว (p-type charge tunneling quantum dot transistors) ซึ่งผลิตขึ้นจากซิลิกอนเจอร์เมเนียมชนิดที่ปลูกผลึกบนวัสดุฐานรองชนิดเอสไอไอ (silicon on insulator, SOI) โดยใช้วิธีการปลูกผลึกด้วยกระบวนการทางเคมีที่ความดันต่ำ (low – pressure chemical vapor deposition, LPCVD) โดยใช้ซิลเลน (silane) และเจอร์เมเน (germane) เป็นแก๊สเริ่มต้นและมีไฮโดรเจนเป็นตัวทำละลาย วัสดุฐานรองชนิดเอสไอไอจะประกอบไปด้วยชั้นของซิลิกอนตามแนว (001) ซึ่งมีการปลูกชั้นของซิลิกอนออกไซด์ขนาดความหนา 400 นาโนเมตร และทำการปลูกชั้นของซิลิกอนขนาดความหนา 50 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งก่อนใช้กระบวนการทางเคมีที่ความดันต่ำ จะต้องมีการล้างทำความสะอาดด้วยวิธี RCA (ย่อมาจากคำว่า Radio Cooperation of America ซึ่งเป็นบริษัทที่มีการคิดค้นการทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์เป็นรายแรก) จากนั้นนำไปจุ่มลงในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ($H_2O:HF$ เป็น 100 :1) ความดัน 500 มิลลิทอร์ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส หลังจากที่ได้วัสดุฐานรองมาแล้วจะปลูกชั้น $Si_{0.9}Ge_{0.1}$ ขนาดความหนา 5 มิลลิเมตรขึ้นตามด้วยชั้นของ $Si_{0.9}Ge_{0.1}$ ที่มีการเจือด้วยโบรอนให้มีความหนา 30 นาโนเมตร ตามด้วยชั้นของ $Si_{0.9}Ge_{0.1}$ ที่ไม่มีการเจือสารขนาดความหนา 5 มิลลิเมตรและปิดท้ายด้วยชั้นของซิลิกอนอีกชั้นหนึ่ง ดังที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 2.16 ซิลิกอนเจอร์เมเนียมที่ได้รับความเครียด (strained SiGe) เมื่อถูกทำให้มีขนาดเล็กลงจะมีผลดีต่อการผลิตโหนดสำหรับทรานซิสเตอร์ชนิดมอสเฟต (metal oxide semiconductor field effect transistor, MOSFET) และให้ได้จุดควอนตัมที่ดี เนื่องจากซิลิกอนเจอร์เมเนียมมีความสามารถในการเคลื่อนที่ของโฮลสูงจึงสามารถแสดงผลได้ดี หลังจากนั้นโครงสร้างที่ถูกปลูกผลึกขึ้นมาจะถูกกัด (etch) ให้มีความกว้างของจุดควอนตัมเป็น 50 นาโนเมตรซึ่งสามารถแสดงค่า คูลอมป์บล็อกเคด (Coulomb Blockade) ได้ดีที่ 4.2 เคลวิน



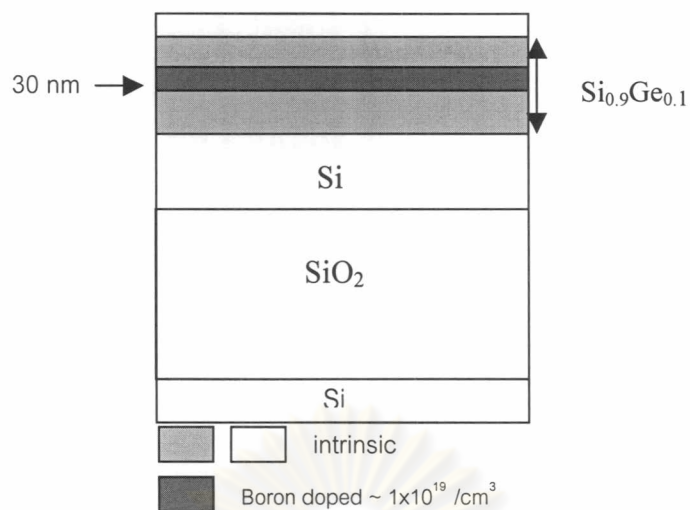
ภาพที่ 2.14 ค่า I - V_{ds} ของจุดควอนตัมที่สร้างขึ้น⁽²⁰⁾

เนื่องจากทรานซิสเตอร์แบบจุดควอนตัมที่ศึกษาในงานวิจัยนี้มีขนาดเล็กมาก ดังแสดงในภาพที่ 2.15 ซึ่งเป็นภาพจากจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ซึ่งแสดงโครงสร้างทางด้านบนของทรานซิสเตอร์แบบจุดควอนตัมที่ต้องการศึกษาที่มีช่องแคบของจุดควอนตัมมีขนาดประมาณ 50 นาโนเมตร



ภาพที่ 2.15 ภาพจากจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกราด (SEM) แสดงจุดควอนตัมขนาด 50 นาโนเมตร⁽¹⁹⁾

ภาพที่ 2.16 แสดงภาพโครงสร้างภาคตัดขวางของวัสดุเริ่มต้นก่อนที่จะมากัดโดยเทคนิค Reactive Ion Etching (RIE) เพื่อให้ได้ทรานซิสเตอร์แบบจุดควอนตัมแบบที่แสดงไว้ในภาพที่ 2.15 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างมีขนาดเล็กมาก จึงจำเป็นต้องใช้จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านที่สามารถถ่ายภาพยืนยันโครงสร้างของวัสดุนี้ได้



ภาพที่ 2.16: แผนภาพด้านข้างแสดงโครงสร้างในแนวตั้งของทรานซิสเตอร์แบบจุดควอนตัม⁽¹⁹⁾

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4 แกเลียมไนไตรด์สำหรับไดโอดเลเซอร์

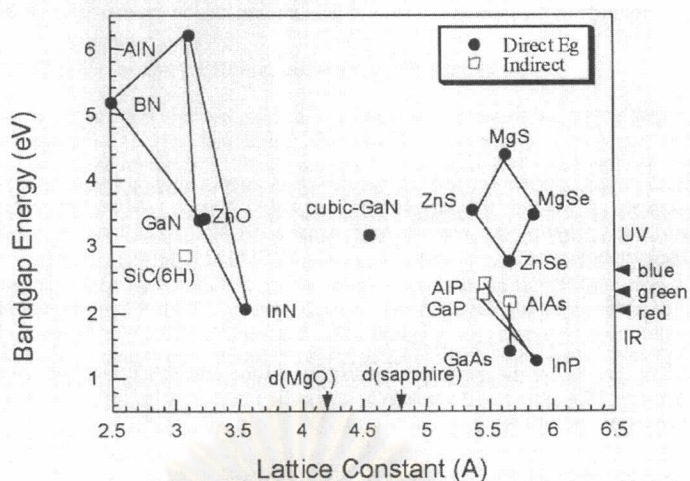
2.4.1. การสำรวจข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับชั้นฟิล์มบางแบบอิพิแทกซี III – nitride

(1) การเลือกวัสดุสำหรับอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์

(1.1) ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับวัสดุกลุ่ม III- nitride

วัสดุสารกึ่งตัวนำ III- nitride ซึ่งประกอบด้วยธาตุหมู่ 3 และไนโตรเจน เช่น แกเลียมไนไตรด์ (GaN) อินเดียมแกเลียมไนไตรด์ (InGaN) และ อะลูมิเนียมแกเลียมไนไตรด์ (AlGaN) กำลังเป็นที่สนใจอย่างยิ่งสำหรับอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode, LED) และ ไดโอดเลเซอร์ (laser diode, LD) และอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ทรานซิสเตอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำ (metal- semiconductor field- effect transistor, MESFET) ภาพที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแถบพลังงานและค่าคงที่ของผลึกของวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีค่าแถบพลังงานระหว่าง 1.1 – 6.1 อิเล็กตรอนโวลต์ สำหรับวัสดุ กลุ่ม III- nitride ซึ่งเป็นวัสดุที่มีส่วนผสมของ อะลูมิเนียมไนไตรด์, แกเลียมไนไตรด์ และอินเดียมไนไตรด์ ซึ่ง อินเดียมไนไตรด์มีค่าแถบพลังงานเท่ากับ 1.9 อิเล็กตรอนโวลต์ แกเลียมไนไตรด์มีค่าแถบพลังงานเท่ากับ 3.4 อิเล็กตรอนโวลต์ อะลูมิเนียมไนไตรด์มีค่าแถบพลังงานเท่ากับ 6.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ข้อดีของวัสดุ กลุ่ม III- nitride คือสามารถนำ อะลูมิเนียมไนไตรด์ แกเลียม ไนไตรด์ และอินเดียมไนไตรด์มาผสมในสัดส่วนต่างๆ ให้ได้ค่าแถบพลังงานที่ต้องการ อีกทั้งยังสามารถนำส่วนผสมดังกล่าวไปใช้ในไดโอดเปล่งแสงและไดโอดเลเซอร์ได้เนื่องจากทุกตัวมีแถบพลังงานกว้างและเป็นแบบตรง (direct bandgap) ทำให้มีประสิทธิภาพในการเปล่งแสงสูง

นอกจากนี้ยังพบว่า สามารถเปล่งแสงได้ตั้งแต่ช่วงแสงที่ตามองเห็น (ตั้งแต่แดงจนถึงม่วง) และช่วงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งในงานบางชนิดมีความจำเป็นต้องใช้แสงเลเซอร์ที่เปล่งแสงได้ในช่วงที่ตามองเห็น เช่น เลเซอร์ดิสก์ บาร์โค้ด เลเซอร์พริ้นเตอร์ ทั้งนี้เพราะถ้าตามองเห็นแสง จะสะดวกต่อการสังเกตและปรับแต่งลำแสงตามต้องการ ถึงแม้จะมีผู้ให้ความสนใจในวัสดุกลุ่มอื่น เช่น วัสดุในกลุ่ม II –V ซึ่งได้แก่ แมงกานีสซิลิไซด์ (MgSe) ซิงค์ซิลิไซด์ (ZnSe) และ แมงกานีสซัลไฟด์ (MgS) เป็นต้น แต่เมื่อนำไปประยุกต์ใช้ทำไดโอดเปล่งแสง พบว่าประสบปัญหาช่วงอายุการใช้งานสั้นกว่า มีความเสถียรต่ำ จึงนำไปใช้งานในเชิงพาณิชย์ได้ยาก แม้ว่าวัสดุในกลุ่มนี้จะมี แกเลียมอาร์เซไนด์เป็นวัสดุฐานรองที่เหมาะสมก็ตาม



ภาพที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแถบพลังงาน (bandgap) และค่าคงที่ของผลึก (Lattice constant) ของวัสดุในกลุ่ม III – nitride⁽³³⁾

นอกจากสมบัติทางแสง (ค่าแถบพลังงาน) ที่ดีมากของวัสดุในกลุ่ม III- nitride แล้วสมบัติทางกายภาพอื่นๆ ยังทำให้วัสดุในกลุ่มนี้เป็นวัสดุที่น่าสนใจอย่างมาก จากตารางที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าวัสดุในกลุ่ม III- nitride มีความแข็งแรงของพันธะสูงและมีอุณหภูมิในการหลอมเหลวที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุในกลุ่ม II – VI และ III – V จึงทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สามารถทำงานได้ในที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้วัสดุในกลุ่มนี้ยังมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนทางเคมีสูงจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ไฟฟ้านั้นได้

ตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติกายภาพของวัสดุในกลุ่ม III- nitride⁽³³⁾

	AlN	GaN	InN
จุดหลอมเหลว (K)	3500	2800	2150
พลังงานพันธะ (eV/Bond)	2.88	2.2	1.93
ความสามารถในการเคลื่อนที่ (300K)	-	900 cm ² /Vs	-

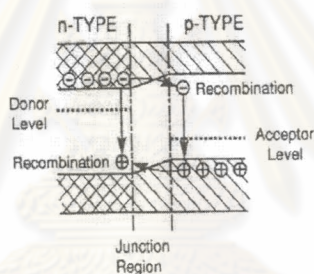
(1.2) การประยุกต์ใช้ชั้นฟิล์มบางแบบอพิเทกซี III-N

อุปกรณ์ที่มีความต้องการชั้นฟิล์มบางแบบอพิเทกซี III- nitride โดยเฉพาะแกเลียมไนไตรด์มากในขณะนี้คือ ไดโอดเปล่งแสง และ ไดโอดเลเซอร์ ทั้งนี้เพราะ ชั้นฟิล์มบางแบบอพิเทกซี III- nitride เมื่อถูกปลูกบนแผ่นฐานรองที่เหมาะสมในโครงสร้างที่มีชั้นฟิล์มบางหลายชั้น (heterostructure) จะสามารถเปล่งแสงสีฟ้าได้ หลักการทำงานของไดโอดเปล่งแสงคือ เกิดจาก

รอยต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบตรง สำหรับแกเลียมไนไตรด์ สารเจือปนชนิดพีได้แก่ แมงกานีส และสารเจือปนชนิดเอ็นได้แก่ ซีลีคอน จากภาพที่ 2.18 อิเล็กตรอนจะไหลจากด้านเอ็น เข้าสู่รอยต่อ และโฮลจะไหลจากด้านพีเข้าสู่รอยต่อ ที่บริเวณรอยต่อจะมีคู่อิเล็กตรอนและโฮลเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก เมื่ออิเล็กตรอนและโฮลรวมตัวกัน (recombination) จะเกิดการเปล่งแสงออกมาด้วยพลังงานโฟตอนเท่ากับช่องว่างพลังงานของรอยต่อ ความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมาจากไดโอดเปล่งแสง จะขึ้นกับความแตกต่างของระดับพลังงาน ΔE ของอิเล็กตรอนที่รวมกับโฮล ซึ่งค่าความยาวคลื่นของแสงที่เปล่งออกมาสามารถคำนวณได้จากสูตร

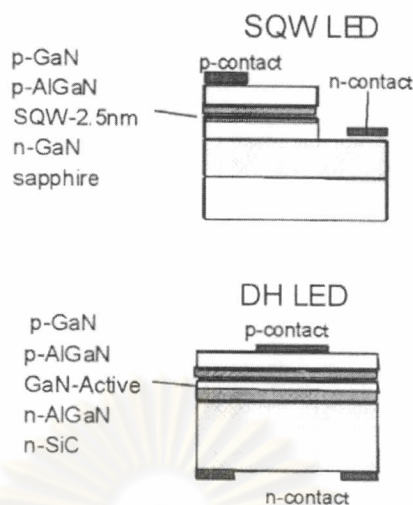
$$\lambda (\mu\text{m}) = 1.24 / \Delta E (\text{eV}) \quad (2.6)$$

ดังนั้นถ้าต้องการให้แสงที่เปล่งออกมาเป็นแสงที่ตามนุษย์มองเห็น นั่นคือความยาวคลื่นของแสงต้องมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.4 - 0.7 μm เพราะฉะนั้นจึงสามารถเลือกสารกึ่งตัวนำที่มีค่ามากกว่า 1.77 eV แต่ไม่เกิน 3.10 eV วัสดุกลุ่ม III-N จึงมีความเหมาะสม



ภาพที่ 2.18 แสดงรอยต่อพีเอ็นที่กำเนิดแสงเลเซอร์ในไดโอดเปล่งแสง⁽³³⁾

ภาพที่ 2.19 แสดงตัวอย่างของโครงสร้างไดโอดเปล่งแสงสีฟ้า ภาพที่ 2.19 (ก) แสดงโครงสร้างของไดโอดเปล่งแสงชนิดซิงเกิลควอนตัมเวลล์ (Single Quantum well, SQW) ซึ่งมีแซฟไฟร์เป็นฐานรองรับ ซึ่งในโครงสร้างนี้เป็นรอยต่อพี-เอ็นที่ใช้วัสดุผลึกต่างชนิดกัน และมีช่องว่างพลังงานของพีและเอ็นต่างกันเพียงชุดเดียว ส่วนในภาพที่ 2.19 (ข) เป็นชนิดที่เป็นดับเบิลเฮเทอโร (Double Hetero, DH) ซึ่งมีซีลีคอนคาร์ไบด์เป็นฐานรองรับ ซึ่งชั้นเปล่งแสง (active layer) ภายในโครงสร้างมีช่องว่างพลังงานแคบและมีชั้นที่มีช่องว่างพลังงานกว้างกว่าจำนวน 2 ชั้นประกบไว้ทั้งด้านบนและล่าง (clad layer)



ภาพที่ 2.19 ตัวอย่างภาคตัดขวางของไดโอดเปล่งแสงชนิดแกเลียมไนไตรด์ (ก)ซึ่งเกิดควอนตัมเวลล์ (ข) ดับเบิลเฮเทอโรจังชัน⁽³³⁾

ไดโอดเปล่งแสงสีฟ้ามีประโยชน์มากต่ออุปกรณ์แสดงผล หรือจอแสดงผลโฆษณาขนาดใหญ่ เพราะในอดีตไดโอดเปล่งแสงที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำมีเพียงสีแดง สีเหลือง และสีเขียว ทำให้ไม่สามารถสร้างอุปกรณ์แสดงผลที่มีความสว่างสูงหรือมีแสงสีขาว และมีอายุการใช้งานนานได้ นอกจากนี้ไดโอดเลเซอร์สีฟ้ายังมีประโยชน์อย่างมากในอุตสาหกรรมออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ตัวอย่างเช่นการนำไดโอดเลเซอร์สีฟ้ามาใช้ในอุปกรณ์อ่านข้อมูล (data storage application) เนื่องจากความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ที่ถูกเปล่งออกมาเป็นตัวกำหนดความสามารถในการเก็บข้อมูลของอุปกรณ์อ่านข้อมูลแต่ละชนิด ดังสมการ

$$\Delta D = 1.22 \lambda / NA \quad (2.6)$$

เมื่อ ΔD คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำเลเซอร์

λ คือ ความยาวคลื่นของแสงที่เปล่งออกมาจากเลนส์วัตถุในเครื่องเล่นซีดี

NA คือ จำนวนของเลนส์วัตถุ

จะเห็นได้ว่าความสามารถในการเก็บข้อมูลเพิ่มขึ้นเมื่อลดขนาดความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ลงหากสามารถใช้ไดโอดเลเซอร์ที่ทำจากแกเลียมไนไตรด์ซึ่งเปล่งแสงเลเซอร์ความยาวคลื่นขนาด 410 นาโนเมตร ดีวีดีรอม (DVD-ROM) จะมีความสามารถในการเก็บข้อมูลได้ถึง 15 กิกะไบต์ สำหรับเทคโนโลยีปัจจุบัน ดีวีดีรอมมีความสามารถในการเก็บข้อมูลได้เพียง 4.7 กิกะไบต์ เพราะใช้ไดโอดเลเซอร์ที่ทำจากอะลูมิเนียมแกเลียมอินเดียมฟอสเฟต (AlGaInP) ที่เปล่งแสงเลเซอร์ความยาวคลื่นขนาด 650 นาโนเมตร

(2) เทคโนโลยีในการปลูกผลึก

(2.1) การศึกษาเบื้องต้นของการปลูกฟิล์มบางแบบอพิแทกซีของวัสดุในกลุ่ม III – nitride

คำว่า “อพิแทกซี” มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก ซึ่งแปลว่า “การจัดเรียงตัวบน” ถูกนำมาใช้ครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ.1928 โดย Roger Lavitas⁽⁹⁾ ซึ่งอพิแทกซีเกิดจากการที่ชั้นฟิล์มบางของโครงสร้างอะตอมของวัสดุที่ทำการปลูกผลึก พยายามจัดเรียงตัวให้ลักษณะโครงสร้างของผลึกเป็นไปตามโครงสร้างของวัสดุฐานรอง (substrate) ซึ่งจะทำให้ชั้นฟิล์มบางมีความสม่ำเสมอสูง เกิดข้อบกพร่องน้อยลงเพราะผลึกมีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งความแตกต่างของค่าคงตัวของผลึกสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$m = \frac{(b - a)}{a} 100 \% \quad (2.7)$$

เมื่อ b คือ ระยะห่างระหว่างอะตอมของวัสดุฐานรอง (substrate) ในระนาบที่ขนานไปกับชั้นวัสดุที่ทำการปลูกผลึก และ a คือค่าคงที่แลตติซของวัสดุที่ทำการปลูกผลึก

สำหรับวัสดุกลุ่ม III – nitride ที่นำไปผลิตเลเซอร์ เมื่อใช้วิธีการปลูกผลึกแบบอพิแทกซีจะให้สมบัติที่ดีในการเปล่งแสงเลเซอร์ แต่ปัญหาหลักในการปลูกฟิล์มบางอพิแทกซี III – nitride คือยังไม่สามารถหาวัสดุฐานรองคุณภาพดีที่มีค่าคงตัวของผลึกเท่ากันหรือใกล้เคียงกับ III – nitride ได้ จากภาพที่ 4.1 พบว่าค่าคงที่แลตติซของวัสดุ III – nitride และวัสดุฐานรองมีความแตกต่างกันมาก จึงยังทำให้ฟิล์มบางแบบอพิแทกซี III – nitride ที่มีใช้อยู่ทุกวันนี้มีปริมาณข้อบกพร่องสูง และทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ไม่นานเท่าที่ควร จำเป็นต้องทำการปรับปรุงให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น

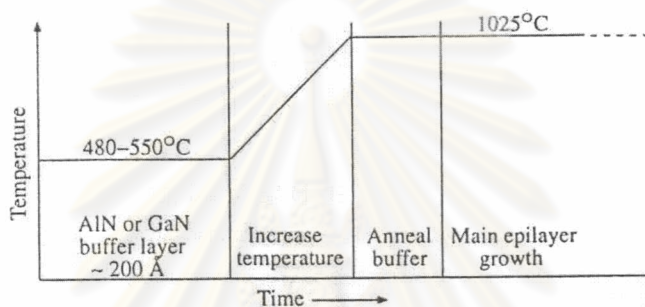
(2.2) เทคนิคที่ใช้ในการปลูกผลึกแบบอพิแทกซีในวัสดุกลุ่ม III – nitride

MOCVD ซึ่งย่อมาจากคำว่า Metalorganic Chemical Vapor Deposition เป็นวิธีการสังเคราะห์วัสดุสารกึ่งตัวนำบนพื้นฐานของปฏิกิริยาทางเคมีโดยสารตั้งต้นชนิด metal-organic ระเหยเป็นไอแล้วเกิดปฏิกิริยาในระบบแอมเบอร์สุญญากาศกลายเป็นสถานะของแข็ง หรือฟิล์มบางๆ เกิดการตกตะกอนสะสมบนวัสดุฐานรอง สำหรับสารตั้งต้นที่นิยมใช้ได้แก่ ไตรเมทิลแกลเลียม (TMGa) สำหรับ แกลเลียม ไตรเมทิลอะลูมิเนียม (TMAI) เป็นสารตั้งต้นของอะลูมิเนียม ไตรเมทิลอินเดียม (TMIn) เป็นสารตั้งต้นสำหรับ อินเดียม โดยปฏิกิริยาที่อธิบายกระบวนการสะสม (Deposition) แกลเลียมไนไตรด์ เป็นดังสมการ



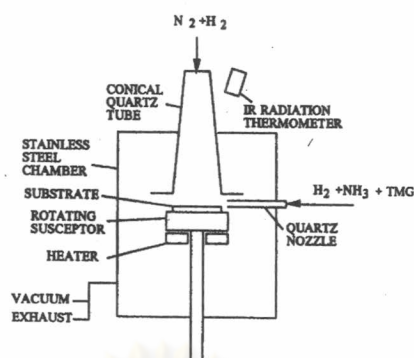
เมื่อ (g) = สถานะไอ และ (s) = สถานะของแข็ง

Amano, Hiramutsu, Akasaki และคณะผู้วิจัย⁽³⁵⁾ พบว่าชั้นฟิล์มบางที่ดีของวัสดุกลุ่ม III-nitride บนชั้นแซฟไฟร์ สามารถเตรียมได้เป็น 2 ขั้นตอน คือขั้นตอนแรกชั้นบัฟเฟอร์ของแกเลียมไนไตรด์หรืออะลูมิเนียมไนไตรด์ จะถูกปลูกที่อุณหภูมิต่ำ (ดังแสดงในภาพที่ 2.20) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ชั้นบัฟเฟอร์จะถูกแอนนิลที่อุณหภูมิที่เหมาะสมที่จะเกิดการโตของผลึกได้ (the growth temperature) หลังจากนั้นชั้นแกเลียมไนไตรด์หลักจะถูกปลูกขึ้น

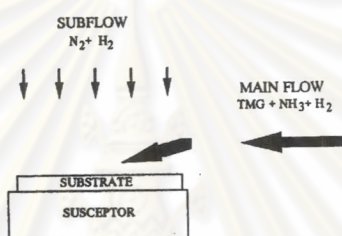


ภาพที่ 2.20 ขั้นตอนในการปลูกผลึกโดยใช้วิธีการ MOCVD⁽³⁵⁾

แต่สำหรับขั้นตอนในการปลูกผลึกแกเลียมที่นิยมในปัจจุบัน เรียกว่า MOCVD แบบ 2 ทิศทาง ซึ่งคิดค้นโดย Nagamura⁽³⁶⁾ ซึ่งวิธีการนี้จะประกอบไปด้วยท่อนำแก๊สที่มีตำแหน่งแตกต่างกัน 2 ตำแหน่ง (จากภาพที่ 2.21) โดยในตำแหน่งแรกเป็นท่อนำแก๊สหลักซึ่งจะนำแก๊สที่ทำปฏิกิริยากับวัสดุฐานรอง (reactant gas) ปล่อยออกมาในทิศทางขนานไปกับวัสดุฐานรอง ส่วนอีกท่อหนึ่งเรียกว่าท่อนำแก๊สรอง (subflow) จะนำแก๊สผสมระหว่างแก๊สไฮโดรเจนและไนโตรเจนซึ่งไม่ทำปฏิกิริยากับวัสดุฐานรอง (inactive gas) ปล่อยออกมาในทิศทางที่ตั้งฉากกับวัสดุฐานรอง เพื่อให้เป็นตัวเปลี่ยนทิศทางของแก๊สหลักให้ตกลงมาทำปฏิกิริยากับวัสดุฐานรองด้านล่าง โดยพบว่าแก๊สรองนี้มีความสำคัญมากในการช่วยทำให้ได้ฟิล์มบางที่ต่อเนื่อง ช่วยพัฒนาคุณภาพของชั้นแกเลียมไนไตรด์



ภาพที่ 2.21 แสดงระบบ 2 – Flow MOCVD⁽³⁶⁾

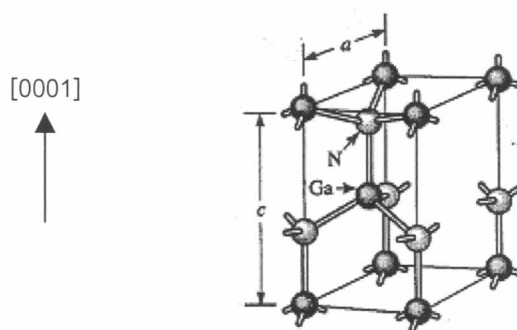


ภาพที่ 2.22 แสดงการตกตะกอนสะสมในระบบ 2 flow MOCVD⁽³⁶⁾

ทั้งนี้เทคนิคการปลูกผลึกด้วย MOCVD ได้มีการพัฒนาอย่างมากมาตั้งแต่ช่วงกลางทศวรรษที่ 90 และได้รับการพัฒนาเรื่อยมาจนกระทั่งปัจจุบัน ในขณะที่เทคนิค Molecular Beam Epitaxy หรือ MBE ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางกับซิลิกอนเจอร์เมเนียมและวัสดุ III – V อื่นๆอีกหลายชนิดกลับไม่ได้รับความนิยม ทั้งนี้สืบเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกผลึกด้วยเทคนิค MBE มีค่าต่ำ และแอมโมเนีย ซึ่งเป็นวัตถุดิบของไนโตรเจนมีความเสถียรที่อุณหภูมิต่ำด้วย จึงเป็นการยากในการผลิตด้วยวิธีนี้เพราะแกเลียมไนไตรด์เป็นวัสดุที่มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง

(2) การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับวัสดุฐานรองชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการปลูกฟิล์มบางแบบอพิแทกซี III – nitride

แกเลียมไนไตรด์ที่ใช้กันในอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ มีโครงสร้างแบบเฮกซาโกนอลที่มีชื่อเรียกว่าโครงสร้างแบบเวอร์ทไซต์ (Wurtzite) ซึ่งมีการจัดเรียงตัวกันแบบเฮกซาโกนอล



ภาพที่ 2.23: โครงสร้างอะตอมแบบเฮกซาโกนอลของแกเลียมไนไตรด์⁽³⁷⁾

ในการเลือกวัสดุที่มีความเหมาะสมพิจารณาจาก

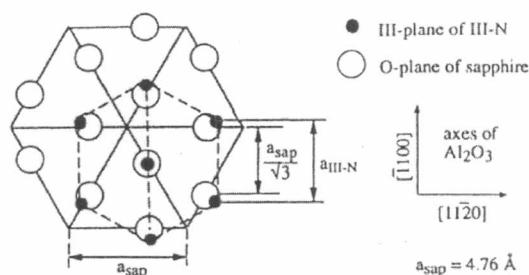
- ความเสถียรทางเคมีและอุณหภูมิในสภาวะที่ทำการปลูกผลึกแกเลียมไนไตรด์
- ผลของความแตกต่างของค่าคงตัวของผลึก
- ความแตกต่างของการขยายตัวของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน

นอกจากนี้ วัสดุที่เลือกใช้ต้องมีความเสถียรสูง ทั้งนี้เนื่องจากแกเลียมไนไตรด์ต้องทำการปลูกผลึกภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม เช่นที่อุณหภูมิสูง หากวัสดุฐานรองไม่เสถียรจะไม่สามารถทำการปลูกผลึกได้ ซึ่งวัสดุที่มีความเหมาะสมมีด้วยกัน 3 ชนิด ดังนี้

(2.1) แซฟไฟร์

แซฟไฟร์ (α - Al_2O_3) คือแผ่นฐานรองที่เป็นที่นิยมนำมาใช้งานมากที่สุดสำหรับการปลูกฟิล์มบางแบบอพิแทกซี III - nitride เพราะมีราคาไม่แพง โปร่งแสง และมีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้เทคโนโลยีในการปลูกฟิล์มบางแบบอพิแทกซี III - nitride บนแซฟไฟร์ ยังเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการพัฒนามาแล้วอย่างดี เนื่องจากแซฟไฟร์เป็นแผ่นฐานรองที่ใช้กันตั้งแต่เริ่มมีการวิจัยค้นคว้าการศึกษาเกี่ยวกับปลูกฟิล์มบางแบบอพิแทกซี III - nitride

ซึ่ง III- Nitride ที่ถูกปลูกลงบนระนาบ (0001) ของแซฟไฟร์ (c-plane) จะมีทิศทางการเรียงตัวของแกนกับทิศทางการเรียงตัวของผลึกแซฟไฟร์ แต่จะมีการหมุนของ unit cell 30° รอบๆ แกน [0001] ของแซฟไฟร์เมื่อเทียบกับผลึกของแซฟไฟร์ (ภาพที่ 2.23) จึงทำให้แกน $[\bar{1}\bar{1}00]$ ของ วัสดุกลุ่ม III - nitride ขนานกับแกน $[\bar{1}2\bar{1}0]$ ของแซฟไฟร์ โดยที่ความแตกต่างของค่าคงตัวของผลึกอยู่ที่ประมาณ 14 % ข้อเสียของแซฟไฟร์คือไม่นำไฟฟ้า



ภาพที่ 2.24 แสดงการเรียงตัวของอะตอมในผลึก III – nitride ที่ปลูกลงบนแซฟไฟร์⁽³⁸⁾

(2.2) ซิลิกอนคาร์ไบด์

ซิลิกอนคาร์ไบด์นับว่าเป็นวัสดุฐานรองที่มีคุณสมบัติดีหลายประการ เนื่องจากซิลิกอนคาร์ไบด์ (6H SiC) มีโครงสร้างอะตอมแบบเฮกซาโกนอลเช่นเดียวกับวัสดุ III-N จึงมีความแตกต่างของค่าคงตัวของผลึกเพียง 3.5 % และใกล้เคียงกับค่าคงตัวของผลึกจาก AlN (ภาพที่ 2.17) นอกจากนี้ยังสามารถนำไฟฟ้าได้ดี แต่มีข้อเสียคือมีราคาแพงมาก และยังไม่สามารถทำให้มีคุณภาพผลึกที่ดีและมีขนาดใหญ่เท่าแซฟไฟร์ได้

(2.3) ซิลิกอน

ไม่นานมานี้ งานวิจัยทางด้านการปลูกฟิล์มบางแบบอพิแทกซี III – nitride ได้ให้ความสำคัญกับแผ่นฐานรองซิลิคอนมาก เพราะมีราคาถูก มีคุณภาพผลึกที่ดี และเนื่องจากหากสามารถปลูกฟิล์มบางแบบอพิแทกซี III-N ได้บนซิลิคอน เราจะสามารถนำวัสดุกลุ่ม III – nitride ไปใช้ในเทคโนโลยีการผลิตซิลิคอนสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ และทำให้เกิดอุปกรณ์ไมโครและนาโนอิเล็กทรอนิกส์ที่เพิ่มข้อดีต่าง ๆ ของวัสดุกลุ่ม III – nitride ไปใช้ได้ อะตอมของซิลิคอนในระนาบ (111) มีการเรียงตัวกันแบบเฮกซาโกนอล จึงถูกนำมาใช้เป็นวัสดุฐานรองสำหรับวัสดุกลุ่ม III – nitride ได้ เมื่อนำมาใช้เป็นวัสดุฐานรองของแกเลียมไนไตรด์ จะมีค่าความแตกต่างของค่าคงตัวของผลึกของแกเลียมไนไตรด์ในระนาบ (0001) และซิลิคอนในระนาบ (111) เท่ากับ 17.7%

ซึ่งสามารถเปรียบเทียบคุณสมบัติของแผ่นฐานรองชนิดที่แซฟไฟร์, ซิลิกอนคาร์ไบด์ และซิลิกอนได้ ดังต่อไปนี้ คือ

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของเซฟไฟร์ ซิลิกอนคาร์ไบด์ และซิลิกอน (111)

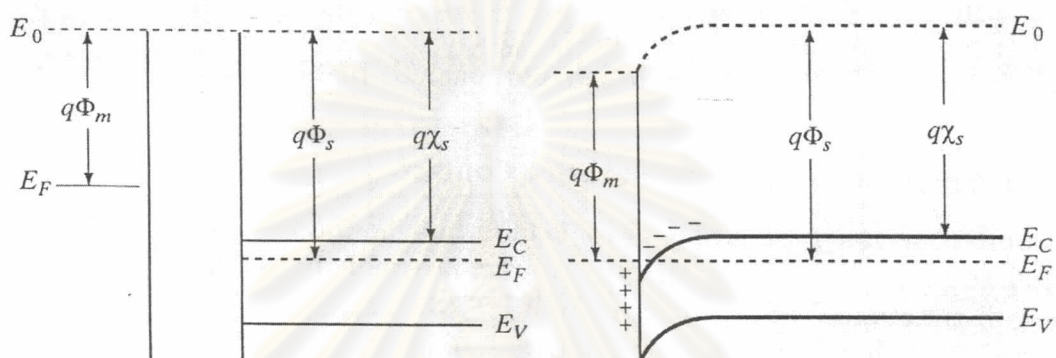
ชนิดของวัสดุฐานรอง	คุณสมบัติ
เซฟไฟร์	<p>ข้อดี</p> <ul style="list-style-type: none"> - ถูก - โปร่งแสง - เสถียรที่อุณหภูมิสูง <p>ข้อเสีย</p> <ul style="list-style-type: none"> - ค่าความแตกต่างของค่าคงตัวผลึกสูง - ไม่นำไฟฟ้า
ซิลิกอนคาร์ไบด์	<p>ข้อดี</p> <ul style="list-style-type: none"> - ความแตกต่างของค่าคงตัวของผลึก และความแตกต่างของการขยายตัวของวัสดุเมื่อได้รับความร้อนใกล้เคียงกับแกเลียมไนไตรด์ - ค่าคงตัวของผลึกมีค่าเหมาะสมกับอะลูมิเนียมไนไตรด์ - สารกึ่งตัวนำไฟฟ้า <p>ข้อเสีย</p> <ul style="list-style-type: none"> - ราคาแพง
ซิลิกอน (111)	<p>ข้อดี</p> <ul style="list-style-type: none"> - ราคาถูก สามารถหาได้ง่าย - คุณภาพสูง - เทคโนโลยีในการผลิตมีความก้าวหน้าสูง - สารกึ่งตัวนำไฟฟ้า <p>ข้อเสีย</p> <ul style="list-style-type: none"> - ค่าความแตกต่างของค่าคงตัวผลึกสูง

3) การศึกษาชั้นรอยต่อระหว่างโลหะชั้นฟิล์มบางแบบอพิเทกซี III – nitride

(3.1) ความสำคัญของรอยต่ออโฮ้มิก

รอยต่ออโฮ้มิก คือชั้นรอยต่อโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นโลหะและสารกึ่งตัวนำ ซึ่งกระแสที่ไหลผ่านวัสดุมีค่าแปรผันตามความต่างศักย์ข้ามวัสดุนั้น ชั้นรอยต่ออโฮ้มิกจะยอมให้กระแสไหลผ่านเข้าและออกจากวงจรได้โดยง่ายเท่ากัน จึงทำให้เกิดความต้านทานขึ้นภายในวงจรมีอยู่ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น รอยต่ออโฮ้มิกจะเกิดขึ้นเมื่อค่าเวิร์คฟังก์ชัน (work function) ของโลหะมีค่าน้อยกว่าค่าเวิร์คฟังก์ชันของสารกึ่งตัวนำซึ่งแทนด้วย $\Phi_M < \Phi_S$ ดังแสดงในภาพที่ 2.25 อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากโลหะสู่ระดับพลังงานชั้นที่ต่ำกว่าในสารกึ่งตัวนำจนกระทั่งเกิดการสมดุลและค่าระดับเฟอร์มีเป็นเส้นตรง หลังจากนั้นอิเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุลบจะไปสะสมอยู่

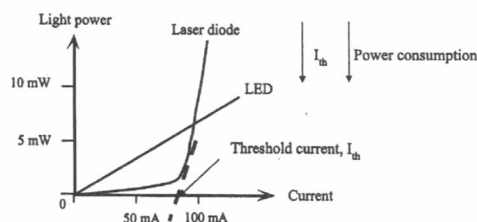
ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำและผิวของโลหะกลายเป็นประจุบวก หากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี รอยต่อโอห์มมิกจะเกิดขึ้น เมื่อ $\Phi_M > \Phi_S$ โดยเมื่อมีการสร้างรอยต่อเกิดขึ้น อิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำจะเคลื่อนที่ไปสู่โลหะเพื่อให้เกิดสภาวะสมดุลขึ้น เกิดเป็นโฮลขึ้นภายในสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นระดับพลังงานว่าง (empty state) ซึ่งโฮลจะสามารถเคลื่อนที่จากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำได้ เกิดเป็นรอยต่อโอห์มมิกเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 2.25 แสดงค่าแถบพลังงาน (energy band diagram) ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (น) ก่อนเกิดการสร้างรอยต่อ (ข) หลังการสร้างรอยต่อแบบโอห์มมิก⁽³⁹⁾

(3.2) งานวิจัยในการพัฒนาชั้นรอยต่อโอห์มมิก

เพื่อที่จะทำให้เกิดชั้นรอยต่อโอห์มมิกที่ดี ขั้วโลหะจะถูกสร้างขึ้นที่ด้านบนของชั้นฟิล์มบางอิพิแทกซี III – nitride ซึ่งขั้วไฟฟ้าที่ได้ควรมีความต้านทานต่ำ ขั้วบกร่องในโครงสร้างจุลภาคและโครงสร้างผลึกเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดความต้านทานที่สูงจนเกินไป ภาพที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่ได้และกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ไดโอดเปล่งแสงและไดโอดเลเซอร์ สำหรับไดโอดเลเซอร์กระแสไฟฟ้ามี่ค่าน้อย การเปล่งแสงจะเป็นแบบเกิดขึ้นเอง (spontaneous) และเมื่อเพิ่มกระแสให้สูงกว่ากระแสไฟฟ้าขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold current ; I_{th}) จะเกิดปรากฏการณ์ผกผัน (population inversion) เกิดการเปล่งแสงแบบเร้า (stimulated emission) ดังนั้นรอยต่อที่ดีที่มีค่าความต้านทานต่ำ จะสามารถทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าขีดเริ่มเปลี่ยนลดลงได้ ซึ่งก็จะทำให้ใช้พลังงานลดลง อุปกรณ์นั้นก็จะสามารถใช้งานได้นานขึ้นและมีประสิทธิภาพดีขึ้น



ภาพที่ 2.26 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่ได้และกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ไดโอดเปล่งแสงและไดโอดเลเซอร์⁽⁴⁰⁾

สำหรับชั้นฟิล์มบางแกเลียมไนไตรด์ชนิดพี ในขณะนี้ยังไม่สามารถพัฒนาความต้านทานจำเพาะ ณ รอยต่อ (specific contact resistivity) ให้ต่ำกว่า $10^{-4} \Omega$ ได้ เนื่องจากโลหะที่นำมาสร้างรอยต่อต้องมีค่า work function มากกว่าแกเลียมไนไตรด์ชนิดพี และยากที่จะปลูกฟิล์มบางแกเลียมไนไตรด์ชนิดพีให้มีความหนาแน่นของโฮลมากกว่า 10^{18} ตัวต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

แต่ในปัจจุบันความต้านทานจำเพาะ ณ รอยต่อ ของแกเลียมไนไตรด์ชนิดเอ็น ได้ถูกพัฒนาให้มีความต่ำถึง $10^{-6} - 10^{-8} \Omega$ โดยใช้โลหะ Ti/Al/Ni/Au^[41] หรือ Ti/Al/Pt/Al⁽⁴²⁾ นักวิทยาศาสตร์เชื่อกันว่าการเกิดเฟสของสารประกอบระหว่าง Al-Ti และ N เช่นสารประกอบที่มีทั้ง Al และ Ti⁽⁴³⁻⁴⁴⁾ หรือ Ti-N⁽⁴⁵⁾ หรือ Al-N⁽⁴⁶⁾ เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะ ณ รอยต่อที่ต่ำมาก

เมื่อไม่นานมานี้ W Zr และ V เป็นโลหะที่ได้เริ่มถูกนำมาใช้ในงานวิจัย เนื่องจาก W เป็นโลหะซึ่งให้ค่า work function สูง ในขณะเดียวกัน Zr และ V จะเกิดเป็นสารประกอบ Zr-N และ V-N ซึ่งจะช่วยเพิ่มตัวเพิ่มพาหะในการนำไฟฟ้า (carrier concentration) ให้กับชั้นฟิล์ม เนื่องจาก N จะถูกดึงออกมาจากชั้นของแกเลียมไนไตรด์ เกิดเป็นช่องว่างของ N (N vacancy) ซึ่งทำให้นำไฟฟ้าได้ดีขึ้น ในกรวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาชั้นงานแกเลียมไนไตรด์ที่มีรอยต่อกับชั้นโลหะทั้งสแตนและเซอร์โคเนียม และชั้นงานแกเลียมไนไตรด์ที่มีรอยต่อกับชั้นโลหะทั้งสแตนและเวเนเดียมที่ผ่านการอบแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ โดยได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแอนนัลต่อโครงสร้างระดับจุลภาคและโครงสร้างผลึกของชั้นรอยต่อโลหะทั้งสแตนและเซอร์โคเนียม และชั้นรอยต่อโลหะทั้งสแตนและเวเนเดียม เพื่อเปรียบเทียบกับสมบัติทางไฟฟ้าว่าแสดงสมบัติเป็นชั้นรอยต่อโอห์มิกที่ดีหรือไม่