บทที่ 2
การปลูกผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์และอะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ โดย Molecular Beam Epitaxy

โครงสร้างควันตัมเวลล์ของแกลเลียมอาร์เซไนด์/อะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ ประกอบขึ้นจากสารกึ่งตัวนำสองชนิด คือ แกลเลียมอาร์เซไนด์และอะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์เรียงสลับกันเป็นชั้นเวลล์และชั้นกำแพงตามลำดับ ดังนั้นในการปลูกผลึกโครงสร้างควันตัมเวลล์จึงจำเป็นต้องอาศัยการปลูกผลึกของสารกึ่งตัวนำทั้งสอง และเทคโนโลยีการปลูกผลึกสารกึ่งตัวนำต่างชนิดที่มีคุณภาพสูง ในบทนี้จะกล่าวถึงเทคโนโลยีการปลูกผลึกที่เรียกว่า molecular beam epitaxy (MBE) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการปลูกผลึกโครงสร้างควันตัมเวลล์ของแกลเลียม-อาร์เซไนด์/อะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ และขั้นตอนการปลูกผลึกโดยสังเขปของแกลเลียมอาร์เซไนด์และอะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์จากเครื่อง MBE รุ่น 32P ของบริษัท RIBER ประเทศฝรั่งเศส

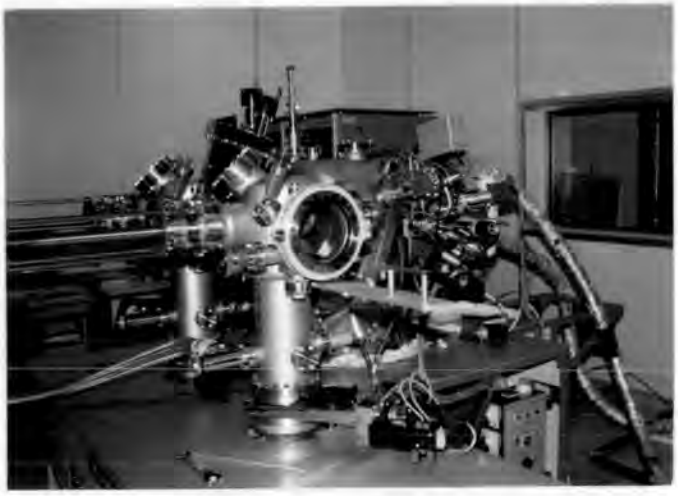
2.1 Molecular Beam Epitaxy

เหตุผลสำคัญที่ทำให้เกิดการพัฒนาของโครงสร้างควันตัมเวลล์ เพื่อใช้ในสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์คือการพัฒนาของเทคโนโลยีการปลูกผลึกคุณภาพสูงที่ทันสมัย และถึงแม้ว่าเทคโนโลยีการปลูกผลึกแบบ liquid phase epitaxy (LPE) จะได้รับการพัฒนามาเป็นระยะเวลานาน แต่ก็มีข้อจำกัดหลายประการด้วยกัน เช่น การผลิตให้เป็นพื้นที่ใหญ่ได้ยาก และไม่สามารถปลูกผลึกที่มีโครงสร้างซับซ้อนมากๆได้ ดังนั้นสิ่งประดิษฐ์ทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพสูงมากมายในปัจจุบัน จึงถูกวิจัยและพัฒนาขึ้นโดยอาศัยเทคโนโลยีการปลูกผลึกที่มีคุณภาพสูงกว่า molecular beam epitaxy เป็นอีกวิธีหนึ่งของเทคโนโลยีที่ใช้การปลูกผลึกโดยลำโมเลกุลของธาตุภายใต้ความดันที่ต่ำมาก (ultra-high vacuum) จนทำให้ได้โครงสร้างผลึกที่มีคุณสมบัติเฉพาะที่ดีและมีความบริสุทธิ์สูง ความแตกต่างระหว่างเทคโนโลยีการปลูกผลึกแบบ molecular beam epitaxy และ liquid phase epitaxy ก็คือ molecular beam epitaxy ไม่จำเป็นต้องอาศัยเงื่อนไข

สภาวะสมดุลระหว่างของแข็งและของเหลว แต่ molecular beam epitaxy อาศัยกลไกของกระบวนการทางพลังงานจลน์ของอะตอมที่ผิวหน้า (surface kinetic process) แทน ทำให้เกิดเป็นข้อดีในการปลูกผลึก [1] อันได้แก่

- ความดันที่ต่ำมาก ทำให้อะตอมของสารเจือปน เช่น ออกซิเจน และคาร์บอนถูกกำจัดออกไป ชั้นผลึกที่ได้จึงมีความบริสุทธิ์สูง และส่งผลให้ค่าความคล่องตัว (mobility) มีค่าสูงตามไปด้วย
- สามารถควบคุมอัตราการปลูก (growth rate) ได้ในระดับอะตอม ทำให้ผิวของผลึกมีความราบเรียบ
- สามารถทำการปลูกผลึกลงบนแผ่นฐาน (substrate) ที่มีอุณหภูมิต่ำ จึงเป็นการช่วยลดการแพร่ซึมของอะตอมระหว่างชั้นผลึกที่ปลูกติดกัน

ในปี พ.ศ. 2535 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ทำการติดตั้งเครื่อง MBE รุ่น 32P ของบริษัท RIBER ประเทศฝรั่งเศส ที่สามารถทำการปลูกผลึกลงบนแผ่นฐานที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 -3 นิ้ว



รูปที่ 2.1 Molecular Beam Epitaxy ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

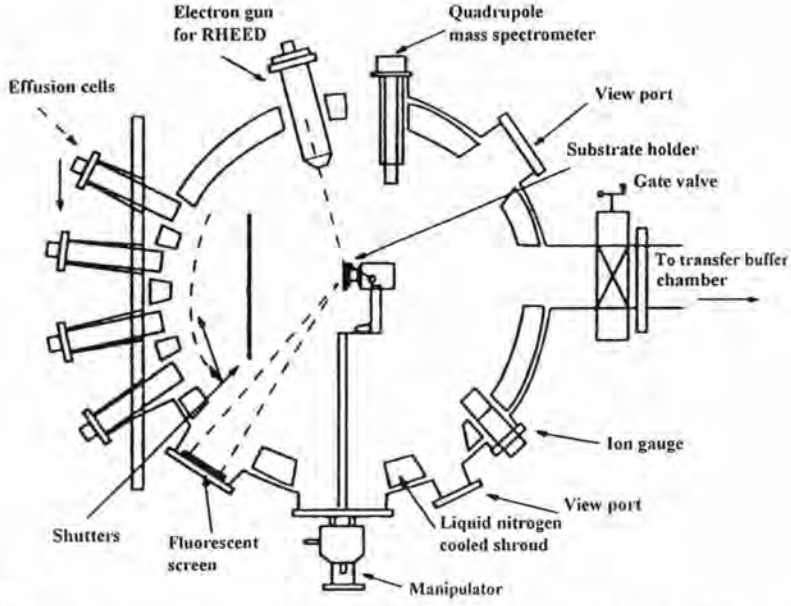
เครื่อง MBE รุ่น 32P นี้ ประกอบด้วย chamber ต่างๆทั้งหมด 3 ส่วนด้วยกัน โดยมีระบบปั๊มสุญญากาศของ ion pump และ titanium sublimation pump ดูดให้มีความดันที่ต่ำมาก ส่วนประกอบภายในและหน้าที่ของแต่ละ chamber มีรายละเอียด ดังนี้คือ

1 Cassette introduction chamber เป็น chamber แรก ทำหน้าที่เป็นทางนำเข้าของแผ่นฐานที่เปรียบเสมือนเป็นเมล็ดผลึก (seed) สำหรับใช้ในการปลูกผลึก และเป็นทางนำออกของแผ่น

ฐานที่ได้ทำการปลูกผลึกแล้ว ภายใน chamber ประกอบด้วยส่วนของ thermal treatment stage ซึ่งจะให้ความร้อนแก่แผ่นฐานเพื่อไล่สารเจือปนให้หลุดออกจากผิว โดยความดันภายใน chamber นี้มีค่าประมาณ 10^{-10} Torr

2 *Transfer buffer chamber* เป็น chamber ที่อยู่ถัดจาก chamber แรก ทำหน้าที่เป็นทางผ่านระหว่าง cassette introduction chamber และ growth chamber โดยความดันภายใน chamber นี้มีค่าประมาณ 10^{-10} Torr

3 *Growth chamber* (รูปที่ 2.2) เป็น chamber สุดท้าย ทำหน้าที่สำหรับการปลูกผลึก ดังนั้นความดันภายใน chamber นี้จะมีค่าต่ำมากประมาณ 10^{-11} Torr ภายในมีส่วนประกอบที่สำคัญๆโดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.2 Growth chamber ของ Molecular Beam Epitaxy (จาก P. Bhattacharya, Semiconductor Optoelectronic Devices, 1994 [1])

3.1 Effusion cell ทำหน้าที่บรรจุวัสดุที่ใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับการปลูกผลึกสารกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V อันได้แก่ แกลเลียม อาร์เซนิก และอะลูมิเนียม โดยภายในแต่ละ effusion cell จะประกอบด้วยเบ้าหลอม (crucible) ที่มีขดลวดทำความร้อน และมีชัตเตอร์ (shutter) ทำหน้าที่ในการเปิดและปิดเซลล์ อัตราการไหลของโมเลกุลหรือฟลักซ์ของโมเลกุล (flux) ที่ตกลงบนแผ่นฐานจะถูกควบคุมโดยขดลวดสำหรับทำความร้อนของแต่ละเซลล์

3.2 Substrate holder ทำหน้าที่ยึดแผ่นฐานขณะที่ทำการปลูกผลึก และที่ด้านหลังจะมีขดลวดสำหรับทำความร้อนให้แก่แผ่นฐาน

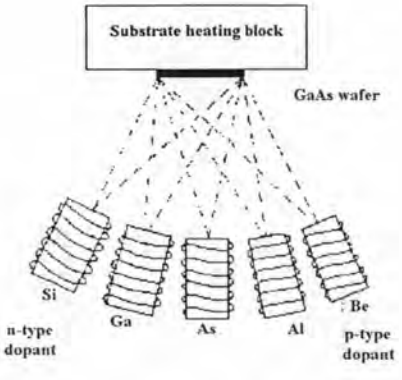
3.3 Manipulator เป็นอุปกรณ์ที่อยู่ภายนอก chamber ใช้สำหรับเพื่อขยับตำแหน่งและหมุน substarte holder ให้ทำมุมพอดีกับลำโมเลกุลที่ออกจากเซลล์

3.4 Reflection High Energy Electron Diffraction (RHEED) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจวัดคุณภาพของผลึกโดยอาศัยลำของอิเล็กตรอนจาก electron gun ที่ถูกยิงไปยังผิวของผลึกและจะสะท้อนไปเกิดเป็นภาพที่จอเรืองแสง (fluorescent screen)

3.5 Quadrupole mass spectrometer เป็นอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดหาชนิดของอนุภาคที่ยังหลงเหลืออยู่ภายใน chamber

นอกจากนี้ภายใน growth chamber ยังมีส่วนของ view port ไว้สำหรับมองจากภายนอกเข้าไปใน chamber และมีท่อสำหรับส่งไนโตรเจนเหลวเพื่อทำความเย็นให้แก่ผนังของ chamber และบริเวณรอบๆเซลล์แต่ละเซลล์ซึ่งจะมีอุณหภูมิสูงในระหว่างที่ทำการปลูกผลึก

Molecular beam epitaxy เป็นเทคโนโลยีที่สามารถปลูกผลึกสารกึ่งตัวนำต่างชนิดที่มีการเรียงซ้อนกันหลายๆชั้น เช่น โครงสร้างควันตัมเวลล์ได้อย่างง่ายๆโดยอาศัยการเปิดและปิดชัตเตอร์ของเซลล์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้น โดยในระหว่างที่ทำการปลูกผลึกจำเป็นต้องรักษาความดันภายในของ growth chamber ให้มีค่าต่ำมากๆเพื่อเป็นการทำให้ค่าระยะทางเฉลี่ยปลอดการชน (mean free path) ของลำโมเลกุลมีค่าเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นโมเลกุลที่เคลื่อนตัวออกจากเซลล์จะมีการกระเจิง (scattering) ค่อนข้างน้อย และสามารถเคลื่อนที่ตรงมายังแผ่นฐานเพื่อทำการปลูกผลึก สำหรับกรณีของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V เช่น อะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์จะใช้อุณหภูมิของแผ่นฐานประมาณ $600^{\circ}C$ [1,17]



รูปที่ 2.3 กระบวนการปลูกผลึกของ Molecular Beam Epitaxy (จาก P. Bhattacharya, Semiconductor Optoelectronic Devices, 1994 [1])

2.2 ขั้นตอนการปลูกผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์และอะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์

แกลเลียมอาร์เซไนด์ทำหน้าที่เป็นชั้นเวลล์ และอะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ทำหน้าที่เป็นชั้นกำแพงในโครงสร้างควันตัมเวลล์ ดังนั้นคุณภาพผลึกของสารกึ่งตัวนำทั้งสองจึงเป็นสิ่งที่จะกำหนดคุณสมบัติที่ได้ของโครงสร้างควันตัมเวลล์ การปลูกผลึกบริสุทธิ์ของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดจากเครื่อง MBE นั้น จะต้องใช้สารตั้งต้นจากเซลล์ของแกลเลียมและอาร์เซนิกสำหรับการปลูกผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์ และจากเซลล์ของแกลเลียม อาร์เซนิก และอะลูมิเนียมสำหรับการปลูกผลึกอะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ ซึ่งมีขั้นตอนการปลูกผลึกโดยสังเขปดังต่อไปนี้คือ

1 นำแผ่นฐานของแกลเลียมอาร์เซไนด์เข้าสู่ cassette introduction chamber แล้วทำการให้ความร้อนแก่แผ่นฐานเพื่อไล่สารเจือปนให้หลุดออกจากผิว จากนั้นจึงนำแผ่นฐานส่งต่อไปยัง transfer buffer chamber และ growth chamber ตามลำดับ

2 เติมไนโตรเจนเหลวเพื่อทำความเย็นผนัง chamber และบริเวณรอบๆเซลล์

3 เพิ่มอุณหภูมิของเซลล์ต่างๆที่จำเป็นต้องใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับการปลูกผลึกให้ได้ค่าตามที่ต้องการ แล้วทำการวัดค่าฟลักซ์โมเลกุลของธาตุต่างๆ โดยทำการวัดฟลักซ์โมเลกุลของอาร์เซนิกหลังสุด เนื่องจากโมเลกุลของอาร์เซนิกจะกระจายไปทั่ว chamber จนทำให้ไม่สามารถวัดฟลักซ์โมเลกุลของธาตุอื่นๆได้ และจะต้องให้ฟลักซ์โมเลกุลของอาร์เซนิกมีค่ามากกว่า 20 เท่าของฟลักซ์โมเลกุลของแกลเลียม สำหรับการปลูกผลึกของอะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ให้มีส่วนประกอบของอะลูมิเนียมเป็น x หรือการปลูกผลึกของ $Al_xGa_{1-x}As$ สามารถทำได้โดยการกำหนดค่าฟลักซ์โมเลกุลของอลูมิเนียมและแกลเลียมให้เป็นไปตามสมการที่ (2.1) เมื่ออัตราส่วนการตอบสนองของเกจ (gauge sensitivity) ระหว่างฟลักซ์โมเลกุลของอะลูมิเนียมและแกลเลียมในเครื่อง MBE รุ่น 32P มีค่าเท่ากับ 0.92/1.68 [18]

$$\frac{Al\ flux}{Ga\ flux} = \frac{x}{1-x} = \frac{0.92}{1.68} \tag{2.1}$$

4 เพิ่มอุณหภูมิของแผ่นฐานเพื่อไล่สารเจือปนและออกซิเจนให้หลุดออกจากผิว โดยตรวจสอบคุณภาพของผลึกด้วย reflection high energy electron diffraction จากนั้นจึงลดอุณหภูมิของแผ่นฐานมาที่ค่าที่เหมาะสม เพื่อทำการปลูกผลึก

5 หลังจากทำการปลูกผลึกเสร็จแล้ว ทำการลดอุณหภูมิของแผ่นฐานและเซลล์ต่างๆลงสู่สภาวะปกติ

เมื่อมีการเปิด growth chamber ออกสู่ระดับความดันบรรยากาศเพื่อที่จะซ่อมแซมส่วนต่างๆภายใน หรือเพื่อเติมสารตั้งต้นที่ใช้หมดไป จะต้องอาศัยเวลาอย่างต่ำประมาณ 2 สัปดาห์ เพื่อที่จะลดความดันให้อยู่ในระดับปกติ รวมทั้งต้องทำการอบ chamber และทำการ out-gas เซลล์ทุกเซลล์ เพื่อนำสิ่งสกปรกออกและให้ผลึกที่ได้มีคุณภาพสูง นอกจากนี้เครื่อง MBE ยังมีขั้นตอนและรายละเอียดของการดูแลรักษาที่ต้องอาศัยความรู้และความเข้าใจระบบต่างๆที่ทำงานร่วมด้วยมากกว่าเทคโนโลยีการปลูกผลึกแบบอื่นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการดูแลรักษาระบบทำความดันต่ำของเครื่อง