

### บทที่ 3

#### รายละเอียดการทดลอง

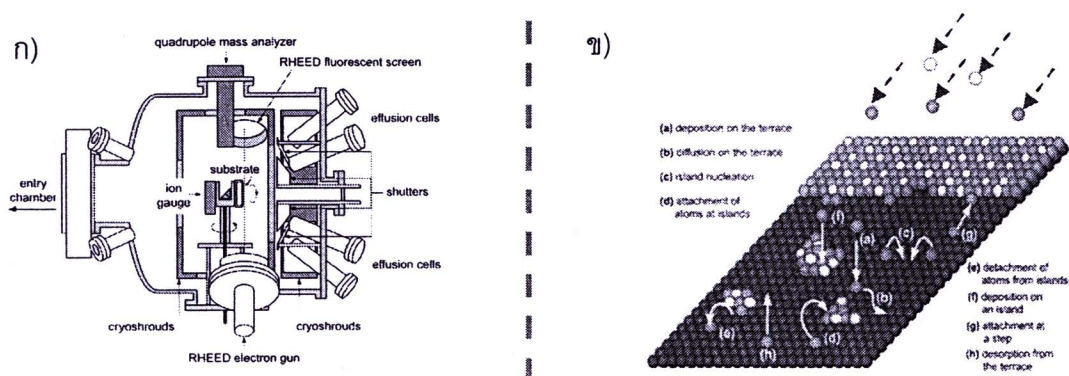
รายละเอียดการทดลองที่จะอธิบายในบทนี้ประกอบไปด้วยเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ เอพิแทกซีแบบลำโมเลกุล (Molecular beam epitaxy) และเครื่องมือต่างๆที่ใช้ในการวัดและวิเคราะห์ผล โดยจะอธิบายการทำงานของเครื่องมือต่างๆโดยละเอียด พร้อมกันนี้ยังแสดงขั้นตอนทั้งหมดที่กระทำ เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์

#### 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 เอพิแทกซีแบบลำโมเลกุล (Molecular beam epitaxy) (MBE)

เอพิแทกซีแบบลำโมเลกุลหรือ MBE เป็นเครื่องมือปลูกชั้นฟิล์ม (film) บางที่ทันสมัยและมีความยืดหยุ่นสูง สามารถเลือกใช้สารในกระบวนการได้อย่างหลากหลาย กระบวนการปลูกทั้งหมดควบคุมโดยเครื่องมือที่มีความแม่นยำ อีกทั้งยังสามารถวิเคราะห์สภาพผิวหน้ารวมถึงสภาพแวดล้อมได้อย่างทันที

##### 3.1.1.1 หลักการทำงาน



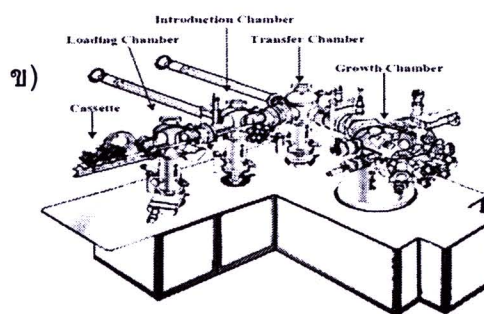
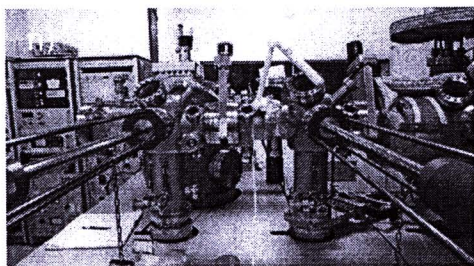
รูปที่ 3.1 ก) ภาพตัดขวางแสดงส่วนประกอบภายในห้องปลูกผลึก และ ข) หลักการทำงานโดยคร่าวๆของเครื่อง MBE [61]

ภายในเครื่องดังแสดงในรูปที่ 3.1 ก) ประกอบไปด้วยเบ้าหลอมเล็กๆที่บรรจุสาร สารแต่ละชนิดที่ถูกบรรจุอยู่ในเบ้าหลอมจะถูกเลือกและกำหนดอุณหภูมิอย่างเหมาะสมเพื่อให้เกิดลำโมเลกุลของสาร เมื่อทำการปลูกสารในลักษณะของลำโมเลกุลจะถูกปล่อยออกไปยังชั้นสุญญากาศ

อะตอมหรือโมเลกุลของสารเมื่อไปถึงชั้นสเตรตอะตอมของสารจะเกิดการเคลื่อนที่และถ่ายเทพลังงานจลน์ (kinetic energy) บนผิวน้ำชั้นสเตรต จากนั้นเมื่อพลังงานลดลง จะเกิดการก่อตัวบริเวณ nucleation site ทำให้เกิดชั้นฟิล์มบางของสารขึ้นบนชั้นสเตรตดังในรูปที่ 3.1 ข) โดยชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นมีอัตราการเกิดที่ช้ามาก (ในหน่วย ML/s) ทำให้สามารถควบคุมความหนาได้อย่างแม่นยำและชั้นของสารที่ได้มีความเรียบสูง

### 3.1.1.2 ลักษณะโดยทั่วไปของเครื่อง MBE

ชิ้นงานที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทั้งหมดจะปลูกโดยเครื่อง RIBER 32P solid source MBE ระบบโดยทั่วไปของเครื่องเมื่อมองจากภายนอกประกอบไปด้วย 4 ห้อง (chamber) เชื่อมติดกัน ได้แก่ ห้องบรรจุ (Loading chamber), ห้องอินโทรดักชัน (Introduction chamber), ห้องส่งผ่าน (Transfer chamber) และ ห้องปลูก (Growth chamber) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ทั้ง 4 ห้อง มีหน้าที่ที่สำคัญดังนี้

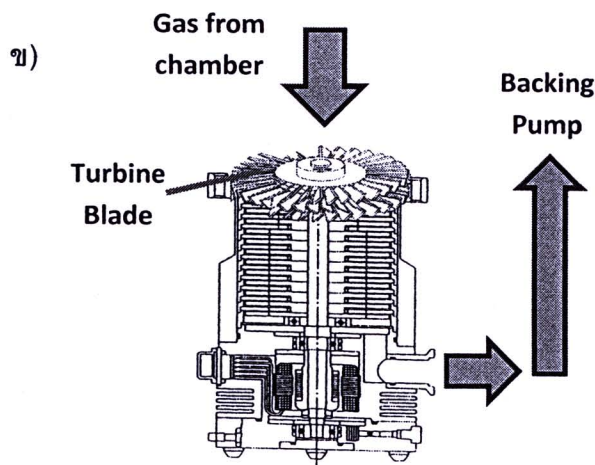
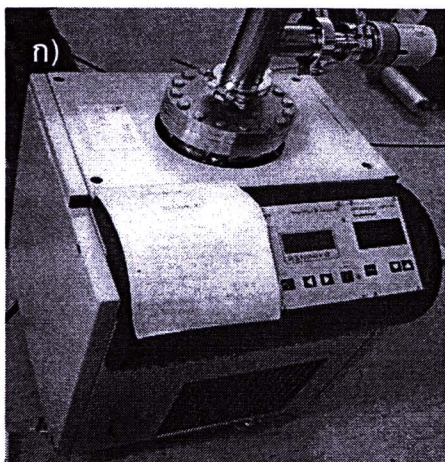


รูปที่ 3.2 ก) ภาพถ่าย และ ข) โครงสร้างระบบปลูกหลักของเครื่องปลูกลำโมเลกุล RIBER รุ่น 32P

#### ห้องบรรจุ (Loading chamber)

เป็นทางเข้าออกของชิ้นงานจากภายนอกสู่ตัวเครื่อง ในห้องนี้ประกอบไปด้วยวาล์วก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen gas valve) และปั๊มโมเลกุลเทอร์โบ (Turbo molecular pump) แยกกันทำงานตอนนำเข้าหรือนำออกของชิ้นงานจากตัวเครื่อง สำหรับวาล์วก๊าซไนโตรเจนทำหน้าที่เปิดให้ก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่ห้องบรรจุเพื่อปรับความดันให้เท่ากับภายนอก ซึ่งจะใช้งานเมื่อต้องการเปิดฝาของห้องบรรจุออกสู่ภายนอก สำหรับปั๊มโมเลกุลเทอร์โบจะใช้หลังจากปิดฝาลังห้องบรรจุหลังจากเชื่อมต่อกับภายนอก ปั๊มโมเลกุลเทอร์โบจะทำหน้าที่ดูดอากาศออกจากห้องบรรจุเพื่อปรับความดันให้เหมาะสมก่อนจะเปิดเชื่อมต่อกับห้องอินโทรดักชันซึ่งอยู่ติดกัน ปั๊มโมเลกุลเทอร์โบมีลักษณะทั่วไปและส่วนประกอบดังแสดงในรูปที่ 3.3 ประกอบไปด้วยโรเตอร์ (rotor) และ สเตเตอร์ (stator) ประกบคู่กัน ขณะทำงานเครื่องจะดูดก๊าซหรืออากาศเข้าไปในเครื่อง โรเตอร์ซึ่งประกอบไปด้วยใบพัดเล็กๆจำนวนมากจะเพิ่มโมเมนตัม (momentum) ให้กับโมเลกุลของก๊าซที่ดูดเข้าไป โมเลกุลของก๊าซจึงมีความเร็วมากขึ้นเมื่อผ่าน

ใบพัดและจะวิ่งออกไปยังรูปหล่อก๊าซที่อยู่ในสเตเตอร์ ก๊าซในห้องจึงถูกดูดออกอย่างรวดเร็วมีผลให้ความดันภายในห้องลดลงในที่สุด



รูปที่ 3.3 ก) ภาพเครื่องปั๊มโมเลกุลเทอร์โบ และ ข) หลักการทำงานเบื้องต้น [62]

#### ห้องอินโทรดักชัน

เป็นห้องที่ใช้สำหรับทำความสะอาดชิ้นงานโดยการให้ความร้อนเบื้องต้น (Pre-heat) ภายในเครื่องมือมีแขนแม่เหล็ก (magnetic arm) ใช้สำหรับหยิบจับชิ้นงานไปยังตำแหน่งของห้องให้ความร้อนเบื้องต้น ภายในห้องดังกล่าวประกอบไปด้วยฮีตเตอร์ (heater) เป็นตัวที่ให้ความร้อนแก่ชิ้นงานเพื่อให้สิ่งสกปรกระเหยหลุดออกไป

#### ห้องส่งผ่าน

เป็นห้องสำหรับพักเก็บชิ้นงานก่อนส่งต่อไปยังห้องปลูก ภายในประกอบไปด้วยแขนแม่เหล็กใช้สำหรับบรรจุหรือถ่ายเทชิ้นงานจากรถบรรจุชิ้นงานไปยังตำแหน่งของห้องบรรจุชิ้นงานบนมานิปูเลเตอร์ (manipulator) ภายในห้องปลูกสำหรับการปลูก

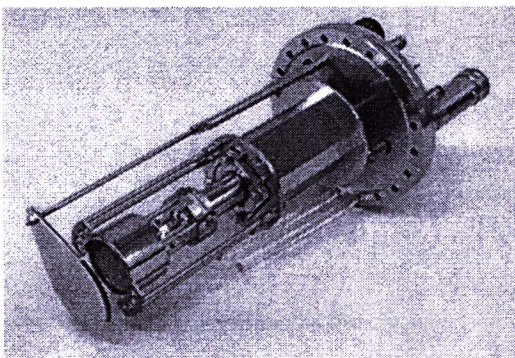
#### ห้องปลูก

การปลูกทั้งหมดที่เกิดขึ้นจะอยู่ในห้องนี้ ภายในประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆที่สำคัญดังนี้คือ

##### 1. ชับสเตรตมานิปูเลเตอร์ (Substrate manipulator)

ลักษณะทั่วไปของซับสเตรตมานิปูเลเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ทำหน้าที่เป็นแท่นวางของชิ้นงานในการปลูก สามารถปรับองศาของแท่นวางได้แบบ 3 มิติ พร้อมกันนี้ยังสามารถตรวจจับอุณหภูมิของชิ้นงานผ่านทางเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) และควบคุมอุณหภูมิชิ้นงานผ่านทางฮีตเตอร์ นอกจากนี้

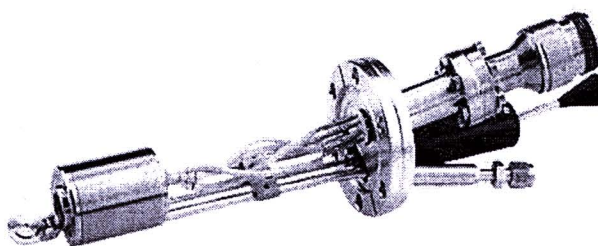
แท่นวางชิ้นงานยังสามารถหมุนได้  $360^\circ$  ผ่านทางมอเตอร์ (motor) การหมุนของชิ้นงานเป็นไปเพื่อให้ลำโมเลกุลของสารตกใส่ผิวของชิ้นงานได้อย่างสม่ำเสมอ ที่บริเวณด้านหน้าของตัวจัดแนวยังมีแผ่นชัตเตอร์สามารถปิดได้เมื่อไม่ต้องการให้ลำโมเลกุลตกกระทบชิ้นงาน



รูปที่ 3.4 ลักษณะทั่วไปของชัตเตอร์มานิพูเลเตอร์ [63]

## 2. Effusion cell

เป็นที่บรรจุสารที่ใช้ในการปลูก เช่น Ga, In และ As ในรูปของของแข็ง เมื่อใช้งานสารที่บรรจุอยู่จะถูกทำให้ร้อนขึ้นด้วยขดลวดนำความร้อนที่พันอยู่รอบๆ จากของแข็งสารจะระเหิดเปลี่ยนตัวเองเป็นไอ ไอที่เกิดขึ้นจะถูกบังคับให้ออกสู่ภายนอกในช่องทางเล็กๆ เกิดเป็นลักษณะของลำโมเลกุลของสารซึ่งใช้ในการปลูกต่อไป ภายในห้องการปลูกมี Effusion cell มีทั้งหมด 9 เซลล์ (cell) แต่ละเซลล์จะมีชัตเตอร์ (shutter) กันเพื่อป้องกันสารลวดออกมาขณะยังไม่ใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ลักษณะทั่วไปของ Effusion cell [64]

### 3.1.1.3 ระบบสุญญากาศ

การทำงานของเครื่อง MBE จำเป็นต้องทำงานภายในระบบสุญญากาศ ทุกห้องยกเว้นห้องบรรจุ จะมีระบบปั๊มควบคุมให้ภายในเป็นสุญญากาศ ระบบปั๊มดังกล่าวมี 2 ชนิดทำงานร่วมกัน ได้แก่

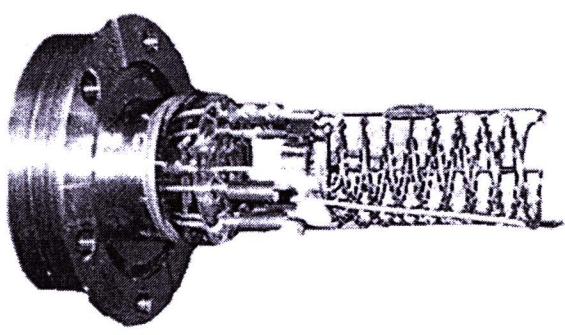
1. บั้มระเหิดไทเทเนียม (Titanium sublimation pump) ทำงานโดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าแรงสูง (ประมาณ 40 Amps) แบบเป็นคาบๆ ไปยังขดลวดไทเทเนียม (titanium) ด้วยกระแสไฟฟ้างด่งกล่าวทำให้ไทเทเนียมบางส่วนบนขดลวดระเหิดออกมาปกคลุมรอบๆ ห้องไทเทเนียมที่ระเหิดออกมาจะมีคุณสมบัติที่ไวต่อปฏิกิริยาโดยเฉพาะกับก๊าซที่หลงเหลืออยู่ในห้อง ซึ่งไทเทเนียมจะไปจับกับก๊าซดังกล่าวแล้วเกิดเป็นสารประกอบของของแข็ง ซึ่งมีผลในการลดความดันในห้องต่างๆ
2. ไอออนปั๊ม (Ion pump) เป็นปั๊มอีกชนิดหนึ่ง ทำงานโดยทำให้ก๊าซแตกตัวเป็นไอออน จากนั้นจึงใช้ศักย์ไฟฟ้าแรงสูงประมาณ 3-7 kV กวาดไอออนของก๊าซดังกล่าวไปยังแท่งขั้วไฟฟ้า ทำให้ก๊าซในห้องลดน้อยลงไอออนปั๊ม โดยทั่วไปสามารถทำให้เกิดสุญญากาศในห้องได้ในระดับ  $10^{-11}$  mbar

### 3.1.2 In-situ measuring Equipment

ในการปลูกผลึกโดยเครื่อง MBE จำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือวัดเพื่อบ่งบอกถึงลักษณะและสถานะโดยรวมของการปลูกที่เกิดขึ้น โดยเครื่องมือเหล่านั้นจะติดตั้งภายในเครื่อง MBE เครื่องมือเหล่านั้นได้แก่ ระบบวัดความดัน, Reflection high-energy electron diffraction (RHEED) และ Quadrupole mass spectrometer

#### 3.1.2.1 ระบบวัดความดัน

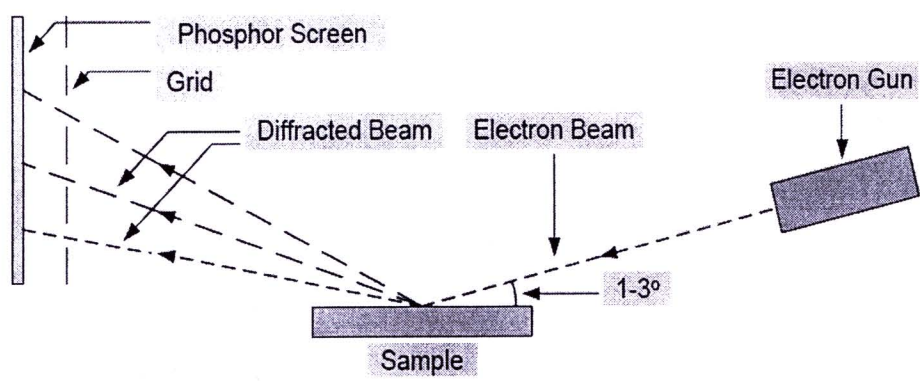
ความดันภายใน chamber ต่างๆสามารถวัดได้โดยการใช้ hot filament ionization gauge เกจ (gauge) ชนิดนี้มีความไวต่อการวัดความดันมากในระดับ  $10^{-3}$  -  $10^{-11}$  Torr ซึ่งเหมาะสมกับความดันภายในเครื่อง MBE ตัวอุปกรณ์ประกอบไปด้วย แท่งโลหะแคโทด 3 ชนิด ได้แก่ คอลเลกเตอร์ (collector), ฟิลาเมนต์ (filament) และกริด (grid) ดังแสดงในรูป 3.6 ตัวเกจจะทำงานโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังฟิลาเมนต์เพื่อปล่อยอิเล็กตรอนออกมา อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะถูกดึงดูดโดยแท่งกริดซึ่งเรียงตัวคล้ายเกลียว ระหว่างทางที่อิเล็กตรอนจะเข้าไปยังแท่งกริด อิเล็กตรอนจะชนกับก๊าซที่อยู่รอบๆ ตัวเกจ ทำให้ก๊าซเหล่านั้นแตกตัวเป็นไอออน ไอออนของก๊าซเหล่านั้นเนื่องจากมีประจุหรือไอออนจะถูกดึงดูดโดยแท่งคอลเลกเตอร์ตรงกลางซึ่งถูกทำให้เป็นประจุลบ เมื่อไอออนของก๊าซเหล่านั้นมาถึงแท่งคอลเลกเตอร์กระแสไฟฟ้าจะเกิดขึ้นซึ่งมีค่ามากน้อยตามค่าความดันของก๊าซรอบตัวเกจ จากนั้นจึงนำกระแสไฟฟ้าที่ได้ไปขยายและแปลงเป็นค่าความดันแสดงผลต่อไป นอกจากวัดค่าความดันทั่วไปในห้องต่างๆ แล้ว hot filament ionization gauge ยังใช้เป็นตัวอ้างอิงค่าฟลักซ์ (flux) ของลำโมเลกุลของสารที่ถูกปล่อยออกมาจากเซลล์ขณะปลูกอีกด้วย



รูปที่ 3.6 ลักษณะทั่วไปของ hot filament ionization gauge ประกอบไปด้วยแท่งโลหะ 3 ชนิด  
ฟิลาเมนต์, กริด และคอลเลกเตอร์ [65]

3.1.2.2 Reflection high-energy electron diffraction (RHEED)

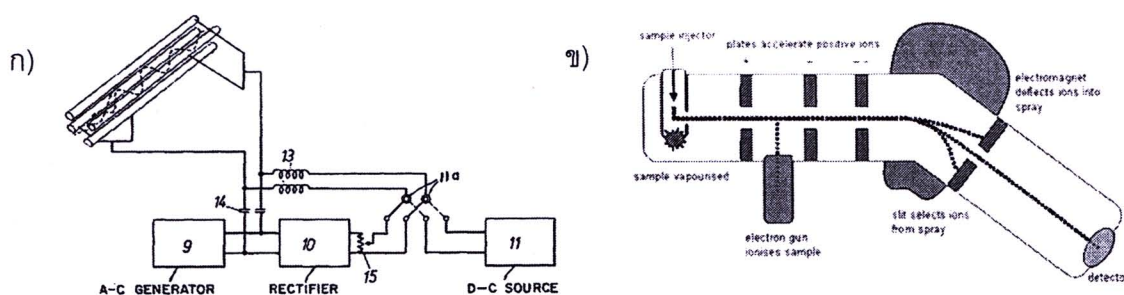
Reflection high-energy electron diffraction หรือ RHEED เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างผิวหน้า โดยการยิงลำอิเล็กตรอน ซึ่งสร้างโดยปืนอิเล็กตรอน (electron gun) ไปตกกระทบบนชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.7 โดยลำอิเล็กตรอนซึ่งมีขนาดเล็กจะเกิดการสะท้อนกับโครงสร้างผลึกของชิ้นงานในระดับอะตอม แสงสะท้อนที่เกิดขึ้นจะไปตกกระทบบนฉากฟอสฟอรัสและเกิดจุดสว่างขึ้น แต่เนื่องจากโครงสร้างผลึกหรือผิวหน้าที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดการสะท้อนออกที่ไม่เท่ากัน แสงที่สะท้อนออกมาจึงเกิดการแทรกสอด เกิดเป็นแถบมืดสว่างขึ้นบนฉากฟอสฟอรัสในรูปแบบเฉพาะตัว รูปแบบของแถบมืดสว่างที่เกิดขึ้นจึงสามารถใช้เป็นตัวบ่งบอกโครงสร้างผลึกผิวหน้าได้



รูปที่ 3.7 โครงสร้างของระบบ RHEED [66]

3.1.2.3 Quadruple mass spectrometer

Quadruple mass spectrometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดปริมาณของสารชนิดต่างๆภายในห้องปลูก ประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ ตัวกำเนิดไอออน (ion source), ตัววิเคราะห์มวล (mass analyzer) และตัวตรวจจับ (detector) ประกอบกันตามรูปที่ 3.8 ก) การทำงานของเครื่อง เริ่มจากสารที่หลุดเข้าไป



รูปที่ 3.8 ก) โครงสร้างและการทำงานโดยย่อของ Quadruple mass spectrometer และ ข)

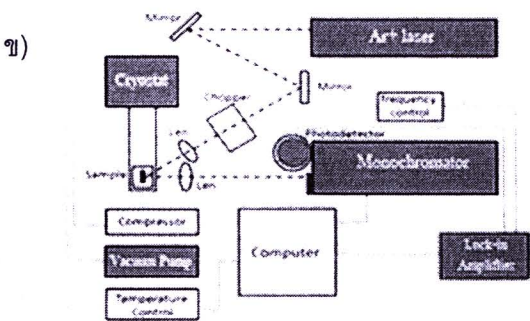
วงจรการทำงานแท่งโลหะ 4 แท่งใน Quadruple mass spectrometer [67,68]

จะถูกทำให้แตกตัวออกเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กๆผ่านเข้าไประหว่างแท่งโลหะขนานกัน 4 แท่ง (รูปที่ 3.8 ข)) โดยแท่งโลหะที่อยู่ตรงข้ามกันจะถูกเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าและทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่เท่ากับคลื่นวิทยุร่วมกับ (superimpose) แรงดันกระแสตรง ขณะที่โมเลกุลที่มีน้ำหนักหรือไอออน (ion) ของสารเคลื่อนผ่านแท่งโลหะเหล่านี้จะเกิดการสั่นขึ้นหรือลงเนื่องจากสนามไฟฟ้าระหว่างแท่งโลหะ โดยไอออนที่มีค่ามวลต่อประจุ ( $m/z$ ) ที่เหมาะสมเท่านั้นจึงจะเคลื่อนที่ผ่านไปยังตัวตรวจจับได้ ซึ่งตัวตรวจจับจะวัดและแปลงข้อมูลเป็นปริมาณสารรวมถึงชนิดของสารต่อไป นอกนั้น ไอออนอื่นๆจะถูกทำให้เคลื่อนที่ชนกับแท่งโลหะ การคัดเลือกสารต่างๆจึงกระทำได้ตามแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแท่งโลหะ

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผล

#### 3.2.1 โฟโตลูมิเนสเซนส์ (Photoluminescence)

โฟโตลูมิเนสเซนส์ หรือ PL คือการศึกษาการเปล่งแสงของของชิ้นงานเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์ลักษณะโดยทั่วไปของระบบวัด PL แสดงในรูป 3.9 ชิ้นงานจะถูกกระตุ้นให้เปล่งแสงโดยแสงเลเซอร์  $Ar^+$  ที่มีความยาวคลื่น 477 nm ที่ผ่านกระบวนการช็อป (chop) ให้เป็นสัญญาณพัลส์ (pulse signal) และโฟกัสด้วยเลนส์ก่อนที่จะตกกระทบบนชิ้นงาน แสงที่ได้จากชิ้นงานจะถูกโฟกัสเข้าไปในโมโนโครเมเตอร์ (monochromator) จากนั้นโมโนโครเมเตอร์จะเพิ่มความเข้มแสงและถูกวัดพร้อมกับขยายสัญญาณเป็นสัญญาณไฟฟ้าโดยโฟโตมัลติไฟเออร์ (photomultiplier) จากนั้นจึงส่งสัญญาณและกรองผ่านโดยล็อก-อิน แอมพลิไฟเออร์ (lock-in amplifier) ซึ่งจะแสดงผลต่อไปบนคอมพิวเตอร์

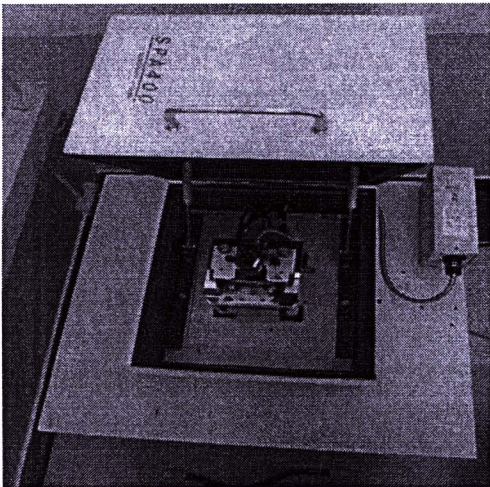


รูปที่ 3.9 ก) รูปถ่ายของระบบวัด PL ข) Schematic ของระบบวัด PL [69]

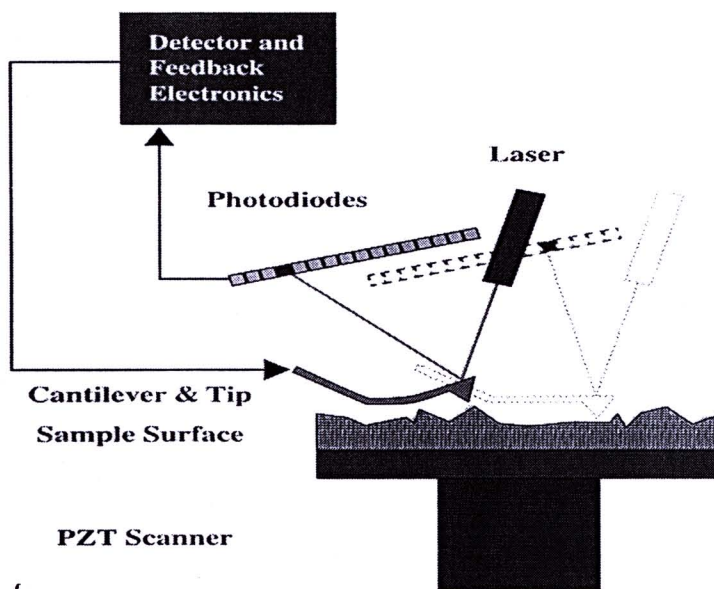
สำหรับการวัดสมบัติโพลาไรเซชัน (polarization) สามารถวัดได้โดยระบบ PL เดิมแต่ต้องดัดแปลงโดยการนำ แผ่น half-wave จะถูกวางไว้หน้าชิ้นงานเพื่อปรับทิศโพลาไรซ์ของแสงเลเซอร์ที่จะไปตกกระทบ แผ่นโพลาไรเซอร์ (polarizer) จะถูกวางไว้ระหว่างชิ้นงานและโมโนโครเมเตอร์ ในขั้นแรกจะมีการปรับจูนแสงที่ผ่านการโพลาไรซ์โดยโพลาไรเซอร์ ซึ่งทิศของโพลาไรเซอร์ที่วัดความเข้มได้มากที่สุดจะถูกตั้งให้เป็นจุดอ้างอิง ( $\theta = 0$ ) จากนั้นแผ่นโพลาไรเซอร์จะถูกปรับเปลี่ยนไปในองศาต่างๆเพื่อจะกวาดสเปกตรัมของ PL (PL spectrum) หรือบันทึกค่าความเข้มยอดพลังงานของ PL (PL energy peak) แสงที่ผ่านแผ่นโพลาไรเซอร์ในมุมต่างๆจะสอดคล้องกับกฎของมาลุส (Malus's law) สำหรับแสงโพลาไรซ์เชิงเส้น (linear polarized) ความเข้มของแสงจะเท่ากับ

$$I = I_0 \cos^2 \theta \tag{3.1}$$

3.2.2 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM)



รูปที่ 3.10 ภาพถ่ายของเครื่อง SEIKO SPA 400-AFM



รูปที่ 3.11 ภาพแสดงการทำงานอย่างง่ายของ AFM [70]

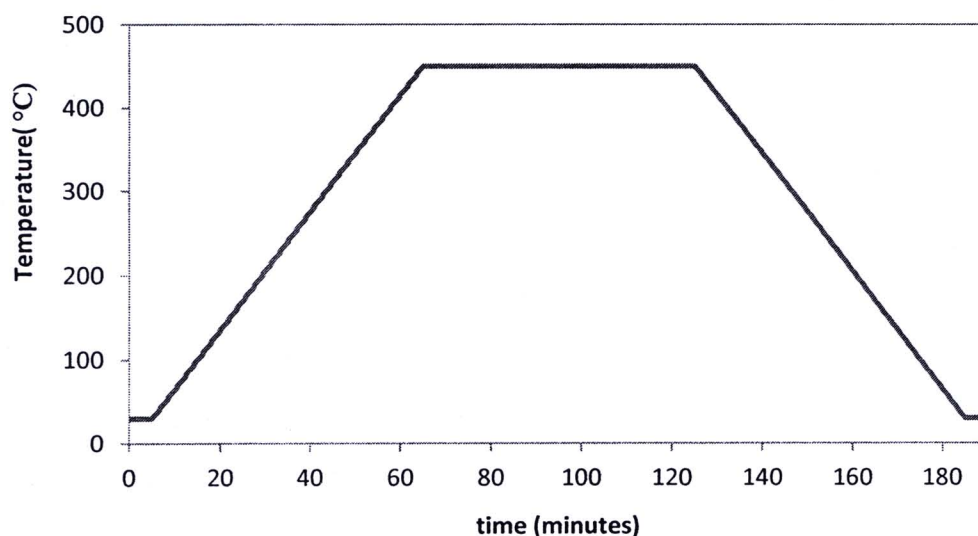
การวิเคราะห์สภาพผิวหน้าของชิ้นงานที่ได้จากการทดลองจะใช้เครื่อง SEIKO SPA 400-AFM (รูปที่ 3.10 ) ในโหมดแตะ (tapping) การทำงานของเครื่องจะประกอบไปด้วยคานยื่น (cantilever) ซึ่งตรงปลายจะมีทิป (tip) แหลขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 3.11 คานยื่นจะทำจากซิลิคอนหรือซิลิคอนไนไตรด์ (silicon nitride) ที่มีปลายแหลขนาดเล็กมาก เมื่อหัวทิปกวาดผ่านผิวหน้าชิ้นงานที่มีความขรุขระ หัวทิปจะมีการขยับไปตามลักษณะของผิวหน้าที่ตำแหน่งนั้นๆ การขยับของหัวทิปจึงบอกถึงลักษณะทางกายภาพของผิวหน้าในบริเวณที่กวาดผ่าน ส่วนการแปลงเป็นข้อมูลลักษณะทางกายภาพของผิวหน้านั้นจะใช้แสงเลเซอร์ยิงไปที่หัวทิปที่มีคุณสมบัติสะท้อนแสงเลเซอร์ได้ดี เมื่อหัวทิปมีการขยับตัวตรวจจับแสง (photodetector) จะตรวจจับความเข้มของแสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากหัวทิปซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามการขยับของหัวทิป ผลลัพธ์ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมคือสามารถแสดงภาพลักษณะทางกายภาพของผิวหน้าชิ้นงานจริงซึ่งมีขนาดเล็กมากได้ พร้อมทั้งบ่งบอกข้อมูลวัดที่สำคัญบางตัว เช่น ความสูง

### 3.3 การเตรียมชิ้นงาน

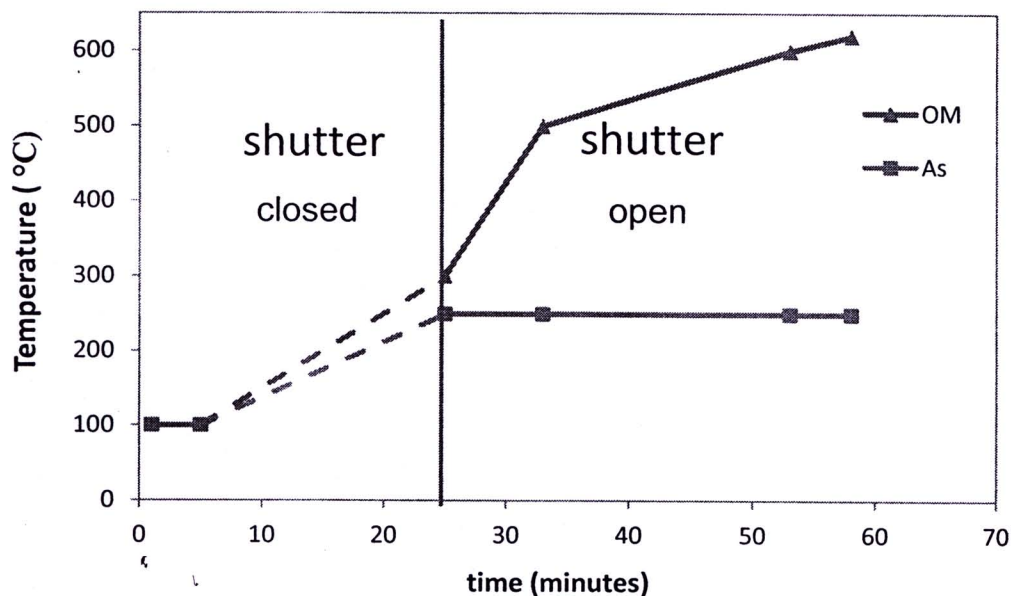
การเตรียมชิ้นงาน เริ่มต้นจากการติดซับสเตรตซึ่งในที่นี้คือ GaAs (100) บนโมลิบดีนัมบล็อก (molybdenum block) ด้วยกาวอินเดียม จากนั้นจึงโหลด (load) ชิ้นงานเข้าเครื่องผ่านทางห้องบรรจุ โดยปั๊มโมเลกุลเทอร์โบที่ติดอยู่กับห้องบรรจุจะทำงานเพื่อปรับให้มีความดันและสภาวะสุญญากาศที่เหมาะสม จากนั้นจึงเคลื่อนย้ายชิ้นงานต่อไปยังภายในห้องอินโทรดักชัน ชิ้นงานจะผ่านกระบวนการทำความสะอาดเบื้องต้นหรือที่เรียกว่า "pre-heat" กระบวนการ pre-heat จะเริ่มต้นจากการให้ความร้อนชิ้นงานในอัตราคงที่จนถึง 450 °C จึงทิ้งค้างที่อุณหภูมินี้ 1 ชั่วโมง จากนั้นจึงค่อยๆ ลดลงด้วยอัตราใน

ลักษณะเดิมกับที่เพิ่มขึ้นจนถึง  $30^{\circ}\text{C}$  ดังแสดงในรูปกราฟที่ 3.12 เมื่อขึ้นงานผ่านกระบวนการ pre-heat จะมีความสะอาดในระดับหนึ่ง จากนั้นจึงส่งชิ้นงานต่อไปยังห้องส่งผ่านและห้องปลูก ตามลำดับ

ภายในห้องปลูกชิ้นงานจะผ่านกระบวนการเตรียมผิวหน้าก่อนที่จะปลูกซึ่งเป็นขั้นตอนที่เรียกว่า ขั้นตอน "de-ox" ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ชั้สเตรตจะถูกให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอย่างคงที่  $30^{\circ}\text{C/min}$  จนถึง  $300^{\circ}\text{C}$  ชั้สเตรตของเซลล์  $\text{As}_4$  จะถูกเปิดออกเพื่อให้ชิ้นงานอยู่ในบรรยากาศของไอ  $\text{As}_4$  ซึ่งในที่นี้มีค่าประมาณ  $8 \times 10^{-6}$  Torr หรือประมาณ 15-25 เท่าของค่าแรงดันไอ BEP (Beam Equivalent Pressure) มากที่สุดของลำโมเลกุลของธาตุหมู่ III ซึ่งในที่นี้คือแรงดันไอของ Ga ซึ่งใช้ปลูกชั้นบัฟเฟอร์ ( $3 \times 10^{-7}$  Torr) อุณหภูมิของชั้สเตรตยังถูกเพิ่มขึ้นอีกเรื่อยๆจนกระทั่งสังเกตเห็นลวดลายการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) บนฉาก RHEED (RHEED screen) ซึ่งเป็นรูปแบบที่ปรากฏให้เห็นเมื่อออกไซด์ได้หลุดออกจากผิวหน้าของชิ้นงาน ค่าอุณหภูมิดังกล่าว ( $T_{\text{deox}}$ ) ซึ่งถูกวัดโดยเทอร์โมคัปเปิลจะถูกบันทึกเป็นอุณหภูมิอ้างอิงที่  $580^{\circ}\text{C}$  ของผิวหน้าเพื่อใช้ในการปลูกชั้นบัฟเฟอร์ต่อไปจากนั้นจึงเพิ่มอุณหภูมิขึ้นอีก  $30^{\circ}\text{C}$  และคงอุณหภูมิทิ้งไว้จนกว่าปริมาณออกไซด์ซึ่งแสดงโดย mass spectrometer จะลดลงถึงในระดับที่ยอมรับได้ จากนั้นจึงลดอุณหภูมิมายังที่  $T_{\text{deox}}$  ขั้นสุดท้ายจึงทำการปลูกบัฟเฟอร์ (buffer) ของ GaAs ความหนา 300 nm ที่อุณหภูมิ  $580^{\circ}\text{C}$  หรือ  $T_{\text{deox}}$  ดังกล่าว เพื่อปรับพื้นผิวให้มีความเรียบก่อนทำการปลูกจริง



รูปที่ 3.12 โปรไฟล์อุณหภูมิ (Temperature profile) ของกระบวนการทำ pre-heat

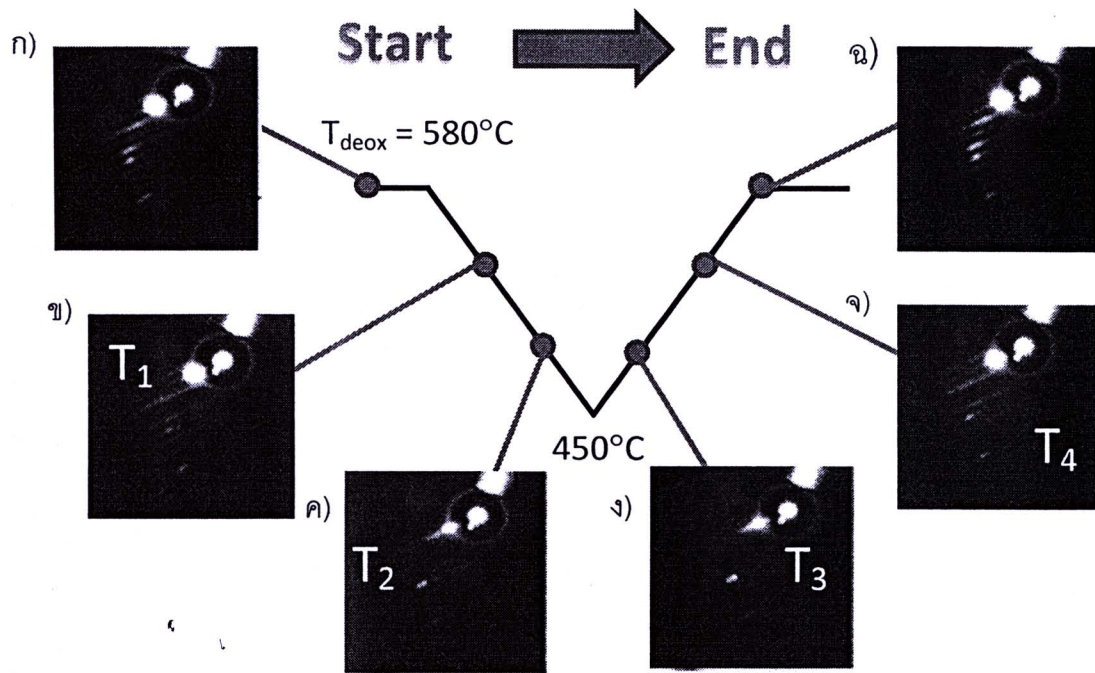


รูปที่ 3.13 โพรไฟล์อุณหภูมิของขั้นตอนการทำการ De-Ox พร้อมกระบวนการเปิดปิดชัตเตอร์

### 3.4 การวัดเทียบอุณหภูมิ

เนื่องจากค่าอุณหภูมิที่วัดได้โดย Thermocouple ไม่ใช่ค่าที่แท้จริงของผิวหน้า substrate ทำให้จำเป็นต้องหาค่าอุณหภูมิดังกล่าวเพื่อใช้ในการปลูกอื่นๆ RHEED pattern เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถที่ใช้หาอุณหภูมิผิวหน้าของซับสเตรตได้โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลง RHEED pattern ที่อุณหภูมิใด ๆ มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิซับสเตรต ซึ่งจำเป็นต้องขึ้นกับความดันไอ  $As_4$  ในขณะนั้นด้วย ค่าอุณหภูมิที่ได้จากการเปลี่ยนแปลง RHEED pattern คือค่าอุณหภูมิ Transition ( $T_{trans}$ ) การหาค่า  $T_{trans}$  เริ่มต้นหลังจากปลูกบัพเฟอร์ GaAs ที่อุณหภูมิ  $T_{deox}$  ซึ่งเทียบเท่าอุณหภูมิ 580 °C จากนั้นจึงเริ่มลดอุณหภูมิในช่วงแรกและเพิ่มอุณหภูมิในช่วงหลังกลับมาเท่าเดิมที่  $T_{deox}$  ดังแสดงในรูปที่ 3.14 รูปแบบของ RHEED pattern จะเปลี่ยนแปลงไปโดยตลอดเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน

ในช่วงแรก RHEED pattern จะปรากฏในรูปแบบ  $C(2 \times 4)$  (รูปที่ 3.14 ก)) ซึ่งเป็นรูปแบบ RHEED ทั่วไปของชั้น GaAs หลังจากทำการปลูกบัพเฟอร์ เมื่อเราทำการลดอุณหภูมิของซับสเตรตลงอย่างคงที่ ( $10^\circ C/min$ ) RHEED pattern จะเปลี่ยนจาก  $C(2 \times 4)$  เป็น รูปแบบในรูป 3.14 ข) ค่า  $T_1$  จะถูกบันทึก หลังจากนั้นเมื่ออุณหภูมิของซับสเตรต ลดลงอีก RHEED pattern จะเปลี่ยนเป็นอีกรูปแบบหนึ่ง คือ ในรูป 3.14 ค) หรือ  $C(4 \times 4)$  ค่าอุณหภูมิที่ได้ขณะนี้คือ  $T_2$  ซึ่งเมื่ออุณหภูมิลดลงจนถึง 450 °C อุณหภูมิจะถูกปรับให้สูงขึ้นในอัตราที่เท่ากันกับตอนที่ลดลง รูปร่างของ RHEED pattern จะเริ่ม



รูปที่ 3.14 ภาพ RHEED patterns ที่ได้จาก RHEED Screen ของการเปลี่ยนแปลง RHEED pattern จาก C(2x4) ไปเป็น C(4x4) ของพื้นผิว GaAs ในการหาค่าอุณหภูมิ transition โดยเรียงลำดับจากรูป ก-ฉ

เปลี่ยนแปลงตัวเองอีกครั้งจนมาถึงอุณหภูมิ  $T_3$  รูป RHEED pattern จะปรากฏในรูป 3.9 ง) และขั้นสุดท้ายเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึงประมาณค่าที่ใช้ในการปลูกบัพเฟอร์เดิม RHEED pattern จะเริ่มเปลี่ยนกลับมาเช่นเดิมในรูปแบบ C(2x4) ในรูปที่ 3.14 จ) ที่อุณหภูมิ  $T_4$  ค่า  $T_1, T_2, T_3$  และ  $T_4$  ที่ได้นั้นจะถูกนำมาหาค่าเฉลี่ย ซึ่งค่าที่ได้จะถูกใช้อ้างอิงกับอุณหภูมิ 500 °C จากนั้นจึงปรับอุณหภูมิของซับสเตรตมาที่อุณหภูมิ  $T_{de-ox}$  อีกครั้งเพื่อทำการปลูกบัพเฟอร์และดำเนินขั้นตอนการปลูกในขั้นตอนต่อไป

### 3.5 การวัดเทียบอัตราการปลูก

ในการปลูกใดๆจำเป็นต้องทราบอัตราการปลูกของสารที่ใช้ เพื่อจะสามารถกำหนดความหนาและสัดส่วนของสารประกอบในแต่ละชั้นได้อย่างแม่นยำ อัตราการปลูกของ GaAs และ InAs สามารถหาได้จากการพิจารณาความเข้มของการกระปริบใน RHEED

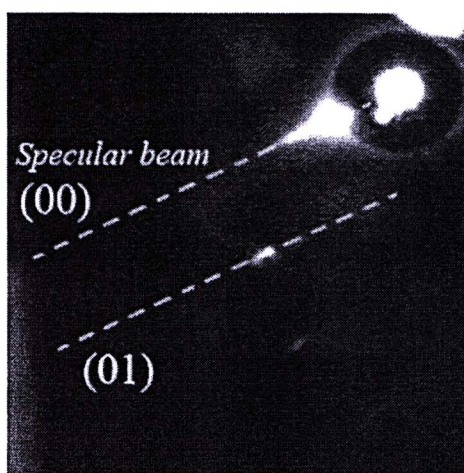
#### 3.5.1 การหาอัตราการปลูกของ GaAs

ในการปลูก GaAs ซึ่งเป็นแบบ 2 มิติ หรือชั้นต่อชั้น มีวิธีการดังนี้คือหลังจากการทำการปลูกชั้นบัพเฟอร์ของ GaAs แล้วปรับมาที่ค่าอุณหภูมิที่ต้องการปลูกพร้อมกับหยุดมอเตอร์แล้ว จึงทำการปรับหมุนชิ้นงานด้วยมือจนได้ zero-order diffracted RHEED beam ที่มีความเข้มสูงสุด (รูปที่ 3.15) จากนั้นจึงทำการปลูกชั้นบัพเฟอร์ของ GaAs ลงไปบนชิ้นงาน ซึ่งขณะทำการปลูกจะสังเกตเห็นภาพบน RHEED screen มีการแกว่ง (oscillate) การแกว่งไปมาที่เกิดขึ้นเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงของผิวหน้าชิ้นงาน

ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ซึ่งการแกว่ง 1 ครั้ง ประมาณเท่ากับความหนาชั้นบัพเฟอร์ 1 Monolayer (ML) [71] ในการทำการวัดเทียบ (calibrate) จริงจะทำการจับเวลาที่ใช้ในการแกว่งของ RHEED screen 10 ครั้ง จากนั้นจึงนำเวลามาหาค่าอัตราการปลูกของ GaAs ที่ใช้ในขณะนั้นที่อุณหภูมิผิวดังกล่าว ดังสมการ

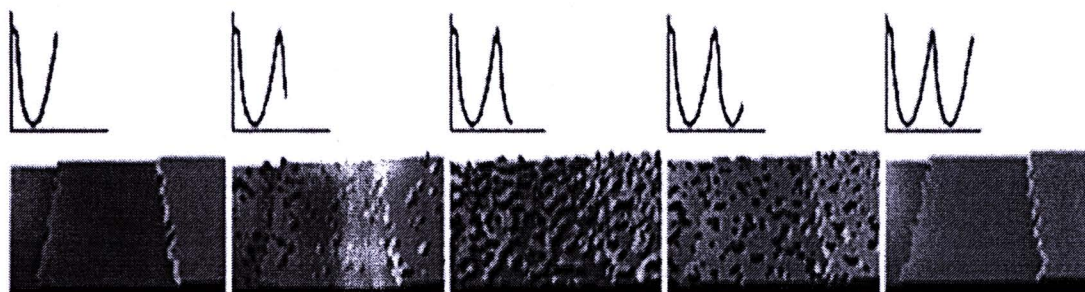
$$\text{อัตราการปลูก } GaAs = \frac{10}{\text{ระยะเวลาที่จับได้ทั้งหมด (sec)}} \quad (ML/s) \quad (3.2)$$

ซึ่งถ้ายังไม่ได้ตามค่าที่ต้องการจะทำการวัดเทียบ ใหม่หรือใช้การประมาณแบบเชิงเส้นเข้าช่วย ในกรณีที่ค่าที่ต้องการอยู่ระหว่างช่วงหรือค่าสองค่าที่ทำการวัดได้



รูปที่ 3.15 ตำแหน่งของ zero-order diffracted RHEED (00) beam บน RHEED Screen

➔ Growth time



รูปที่ 3.16 ลำดับขั้นต่างๆของการเกิดเกาะสองมิติ (2D islands) ของการปลูกชั้นต่อชั้นของ  $SrTiO_3$  และความเข้มของ zero-order diffracted RHEED beam ที่เปลี่ยนแปลงไป [72]

### 3.5.2 การหาอัตราการปลูกของ InAs

การหาอัตราการปลูกของ InAs จะแตกต่างจากของ GaAs ที่ต้องใช้การกระพริบ แต่สำหรับการหาอัตราการปลูกของ InAs จะใช้การพิจารณารูปแบบของ RHEED pattern ที่เปลี่ยนไปแทน การวัดเทียบจะทำหลังจากการปลูกบัพเฟอร์เหมือน GaAs แต่ไม่ต้องหยุดมอเตอร์ โดยหลังจากปรับอุณหภูมิพื้นผิวมาที่อุณหภูมิที่ต้องการจะทำการปลูกชั้น InAs ขึ้นบนพื้นผิว GaAs ของชิ้นงาน หลังจากเวลาปลูกผ่านไปสักพักจะเห็นรูปแบบของ RHEED Pattern ที่ค่อยๆเปลี่ยนไปจาก streaky (2D) ไปเป็น spotty (3D) ซึ่งจะทำให้การจับเวลาที่ใช้ทั้งหมดในการเปลี่ยนแปลงไปเป็นรูปแบบดังกล่าว (2D→3D) การคำนวณหาอัตราการปลูกจะทำได้อาศัยหลักการที่ว่า เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปแบบ RHEED จาก 2 มิติ ไปเป็น 3 มิติ มีค่าเท่ากับปลูกได้ความหนา 1.7 ML [73] ดังนั้นอัตราการปลูกของ InAs จึงเท่ากับ

$$\text{อัตราการปลูก InAs} = \frac{1.7}{\text{ระยะเวลาที่จับได้ทั้งหมด(sec)}} \quad (\text{ML/s}) \quad (3.3)$$

### 3.6 การปลูกชั้นผลึก

ชั้นผลึกที่ปลูกเพื่อศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีทั้งหมด 5 ชนิดตามโครงสร้างที่สนใจ ได้แก่ ชั้นบัพเฟอร์ ชั้นลายตาราง ชั้น GaAs Spacer ชั้นควอนตัมดอต และชั้นกลบทับ แต่ละชั้นประกอบขึ้นจากสารประกอบหลักๆชนิดใดชนิดหนึ่งจาก 3 ชนิดคือ GaAs, InGaAs และ InAs ทุกชั้นล้วนมีความสำคัญและมีคุณสมบัติเฉพาะตัวของตนเอง การปลูกชั้นต่างๆมีความแตกต่างกันสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ

#### 3.6.1 ชั้นบัพเฟอร์

ชั้นบัพเฟอร์ เป็นชั้นผลึกของ GaAs ที่มีความหนา 300 nm ปลูกขึ้นเพื่อทำหน้าที่ปรับสภาพพื้นผิวของแผ่นฐาน GaAs เดิมให้มีความเรียบมากยิ่งขึ้นก่อนจะทำการปลูกชั้นต่อไป คุณสมบัติโดยทั่วไปของชั้นคล้ายกับก้อนผลึก GaAs เนื่องจากเป็นชั้นที่มีความหนาในระดับหนึ่ง การปลูกชั้นบัพเฟอร์ของ GaAs บนแผ่นฐาน GaAs ทำได้โดยการปล่อยไอของ Ga ออกจากเซลล์ของเครื่อง MBE ภายใต้บรรยากาศของ  $\text{As}_4$  เมื่ออะตอมของ Ga ที่ปล่อยมาจากเซลล์มาถึงผิวหน้าชิ้นงาน ก็จะเกิดพันธะกับอะตอมของ As เกิดเป็นอะตอมของสารประกอบ GaAs ใหม่เกาะบนผลึก GaAs เดิมบนแผ่นฐาน การปลูกชั้นบัพเฟอร์กระทำที่อุณหภูมิพื้นผิว  $580^\circ\text{C}$  ที่อัตราการปลูก 0.6 ML/s

#### 3.6.2 ชั้นลายตาราง

ชั้นลายตาราง (crosshatch layer) เป็นชั้นความเครียดที่เกิดจากการปลูกชั้นผลึก InGaAs ลงบนชั้นบัพเฟอร์ GaAs ด้วยค่าคงตัวผลึกที่แตกต่างกันทำให้เกิดความเครียดขึ้นในระบบ ความไม่เข้ากันโครงผลึก (E) ที่เกิดขึ้นในชั้นนี้ถูกออกแบบให้มีค่าน้อย (1.07%) โดยเลือกใช้สารที่มีค่าคงตัวผลึก

แตกต่างจากชั้นบัฟเฟอร์ไม่มาก คือ  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  การเกิดชั้นผลึกจึงเป็นแบบสองมิติหรือรูปแบบ FM โดยตลอด

ความเครียดที่เกิดขึ้นในระบบแม้ว่าจะไม่พอสำหรับการเปลี่ยนการปลูกไปเป็น 3 มิติ แต่ทว่าความเครียดสะสมที่มากขึ้นตามความหนาที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิด dislocation ขึ้นอันเป็นผลจากความต้องการลดความเครียดสะสมในระบบ dislocation ที่เกิดขึ้น ทำให้ผิวหน้าของชั้นสารเปลี่ยนแปลงไปเป็นรูปลายตารางไว้ใช้ในการจัดเรียงตัวควอนตัมดอต ซึ่งได้กล่าวถึงโดยละเอียดในบทที่ 2 (หัวข้อที่ 2.3.2.2.2) เนื่องจากลายตารางเกิดจากการคลายตัวของพลังงานความเครียดในระบบเมื่อชั้นมีความหนามากขึ้น ดังนั้นเพื่อให้ได้ลายตารางดังที่ต้องการจำเป็นต้องกำหนดความหนาของชั้นให้เหมาะสมโดยพิจารณาจากค่าความหนาวิกฤติเป็นสำคัญ ความหนาของชั้นลายตารางที่ดีควรมีค่าอยู่ระหว่างค่าความหนาวิกฤติ ( $h_c$ ) และค่าความหนาวิกฤติ ( $h_p$ ) ซึ่งมีค่า 10 nm และ 76 nm [33] ตามลำดับ ความหนาในช่วงดังกล่าวเป็นความหนาที่สามารถควบคุมลักษณะการเกิดของลายตารางบนผิวหน้าได้ ความหนาของชั้น  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  ที่ใช้คือ 50 nm จึงเป็นความหนาของชั้นที่เหมาะสมและก่อให้เกิดลายตารางที่ควบคุมได้

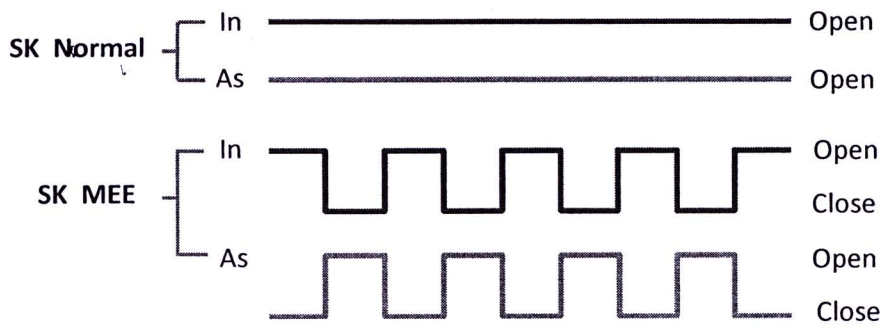
กระบวนการปลูกชั้นลายตารางของ InGaAs บน GaAs ใช้วิธีการเปิดมันขัดเตอร์ของเซลล์ In และ Ga พร้อมกันภายใต้บรรยากาศของ  $\text{As}_4$  ที่  $500^\circ\text{C}$  หรือ  $T_{\text{trans}}$  ทำให้เกิดเป็นชั้น InGaAs ขึ้น แต่ต้องคำนึงอัตราส่วนของ In ต่ออัตราส่วนของ Ga ซึ่งควรมีค่าไม่มากเกินไปตามสัดส่วนที่ได้จากการคำนวณโดยเปิดทิ้งไว้จนได้ความหนาตามต้องการ (จากการคำนวณรวมกับการวัดเทียบ (calibrate)) จากนั้นจึงปิดมันขัดเตอร์ของเซลล์ In และ Ga ทันที ส่วน  $\text{As}_4$  ให้เปิดทิ้งไว้ตามปกติ ก็จะได้ผิวหน้าที่เป็นชั้นลายตารางที่ต้องการ

### 3.6.3 ชั้น GaAs spacer

ชั้น GaAs spacer เป็นชั้นที่ใช้ในการปรับปรุงแผ่นฐานเสมือนลายตารางในเรื่องของ dislocation ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ลักษณะการปลูกคล้ายกับการปลูกชั้นบัฟเฟอร์ คือการปล่อยลำโมเลกุลของ Ga ภายใต้บรรยากาศของ  $\text{As}_4$  ไปบนผิวหน้าของชั้นงาน แต่จะกระทำที่อุณหภูมิ  $500^\circ\text{C}$  แทน  $580^\circ\text{C}$  เพื่อที่จะสร้างชั้นของ GaAs แต่มีอัตราการปลูกที่ช้ากว่า (0.1 ML/s) ในส่วนของชั้นนี้จะมี การปรับแต่งในเรื่องของความหนาของชั้นเป็นสำคัญ

3.6.4 ชั้นควอนตัมดอต

ชั้นควอนตัมดอตเป็นชั้นที่เกิดขึ้นจากการปลูก InAs ลงบนแผ่นฐานในโหมดการปลูกแบบ SK โดยแบ่งออก 2 ชนิดคือ SK ปกติ และ SK แบบ Migration Enhance Epitaxy (MEE) ซึ่งทั้งสองชนิดแตกต่างกันตามลักษณะการเปิดปิดชัตเตอร์ของ In และสาร As ขณะปลูกควอนตัมดอต ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ในการปลูกควอนตัมดอตชนิด SK แบบปกติ ชัตเตอร์ของ In และ As จะถูกเปิดอยู่ตลอดเวลาขณะปลูก แต่การปลูกใน SK แบบ MEE ชัตเตอร์ของ In และ As จะถูกเปิดปิดสลับกัน การปลูกในแบบ SK ทั้งสองมีเงื่อนไขการปลูกที่เหมือนกัน ดังแสดงแผนภาพสภาวะสมดุลในรูปที่ 3.18 คือต้องทำให้  $\epsilon$  และ  $H$  (ความหนาวิกฤติ) อยู่ในช่วง  $SK_1$  หรือ  $SK_2$  โดยจะให้อยู่ในช่วง  $SK_1$  เป็นสำคัญ

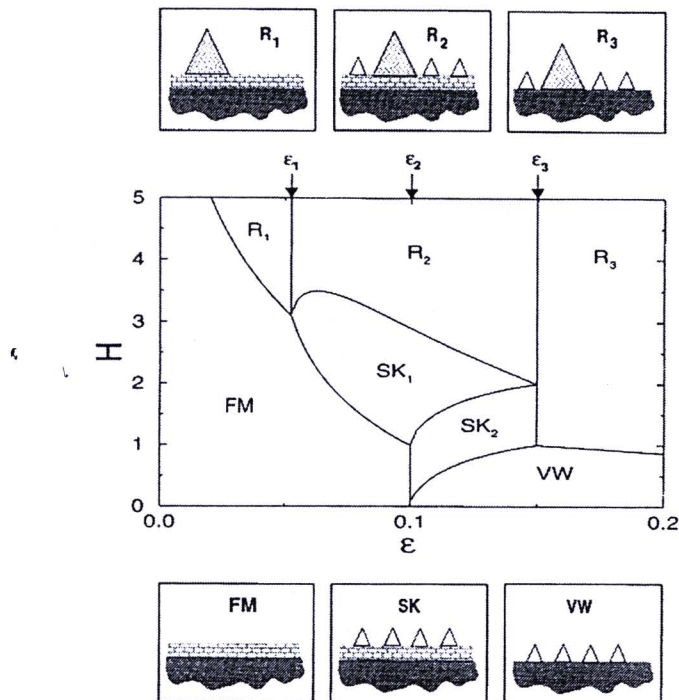


รูปที่ 3.17 ลักษณะการเปิดและปิดชัตเตอร์ของ In และ As ของการปลูก InAs ควอนตัมดอตแบบ SK แบบปกติและ SK แบบ MEE

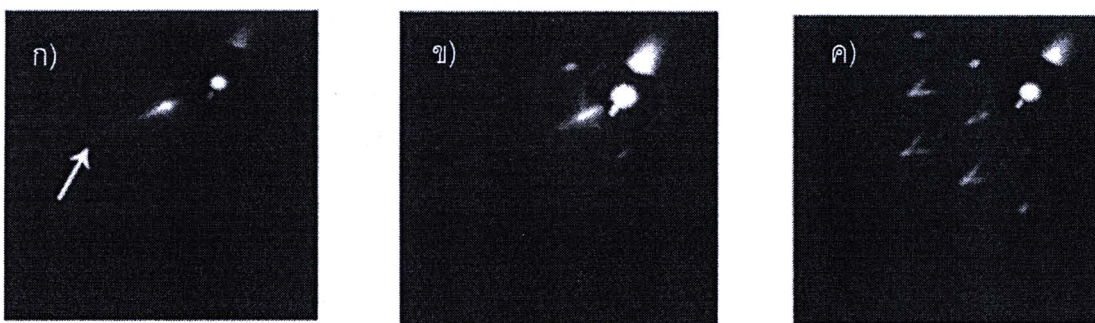
การเกิดควอนตัมดอตแบบ  $SK_1$  จะเกิดขึ้นของสารใน 2 มิติก่อนคือมี Wetting layer หนาปริมาณหนึ่งก่อน จากนั้นการปลูกจึงจะเปลี่ยนเป็นแบบ 3 มิติ และเริ่มเกิดควอนตัมดอตขึ้นในที่สุด การสังเกตการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวหรือการเกิดควอนตัมดอตสามารถทำได้โดยอาศัยภาพจาก RHEED เป็นตัวตัดสินใจ

ลักษณะภาพของ RHEED ขณะเปลี่ยนแปลงควอนตัมดอต ดังแสดงในรูปที่ 3.19 โดยเริ่มแรกขณะเปลี่ยนจากโหมดการปลูกจาก 2 มิติไปเป็น 3 มิติ ภาพของ RHEED จะเปลี่ยนจาก streaky pattern ไปเป็น spotty pattern หลังจากนั้นเมื่อสังเกตบริเวณใกล้กับ Specular beam ตรงที่ลูกศรชี้ในรูปที่ 3.19 ก) จะเริ่มเห็นจุดสว่างขึ้นมา จุดสว่างดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าควอนตัมดอตเริ่มเกิดขึ้นบ้างบนผิวหน้า ซึ่งถ้าหากปลูกควอนตัมดอตต่อไป ควอนตัมดอตจะเริ่มมีจำนวนมากขึ้นและขนาดยิ่งใหญ่ขึ้นผลที่ได้คือลักษณะภาพของ RHEED pattern จะเปลี่ยนอีกครั้งหนึ่ง โดยจะสังเกตเห็น Chevron pattern ล่างๆ เกิดขึ้น (รูปที่ 3.19 ข)) โดยชัดเจนมากขึ้นเมื่อทำการปลูกต่อไปเรื่อยๆ ดังปรากฏในรูปที่ 3.19 ค) แสดงถึงการมีควอนตัมดอตอยู่มากบนผิวหน้า Chevron pattern เป็นอีกรูปแบบหนึ่งของภาพ RHEED ที่แสดงให้เห็น

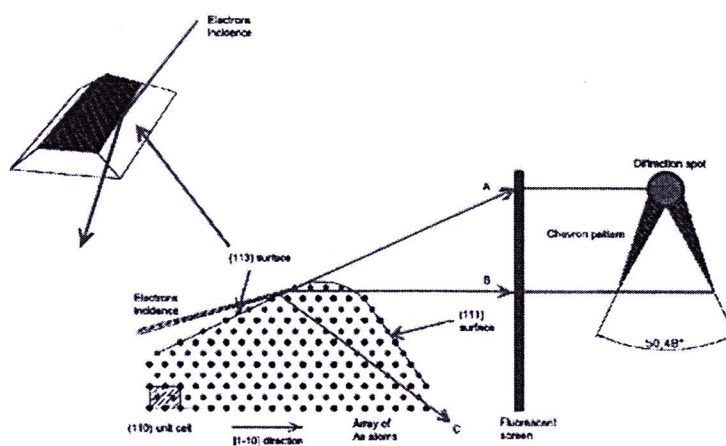
เห็นการมีอยู่ของควอนตัมดอตอย่างชัดเจน โดยควอนตัมดอตที่เกิดขึ้นจำเป็นที่จะต้องมีความสูงมากพอ เพื่อให้เกิดลักษณะของลวดลายการเลี้ยวเบนดังกล่าว (รูปที่ 3.20) ควอนตัมดอตที่ปลูกในการทดลองทั้งหมดเป็นควอนตัมดอต InAs โดยจะกระทำการปลูกด้วยความหนาเทียบเท่า  $\sim 1.8$  ML ที่  $500^\circ\text{C}$  ด้วยอัตราการปลูก  $0.01$  ML/s



รูปที่ 3.18 แผนภาพเฟสสมดุล (Equilibrium phase diagram) ในรูปของฟังก์ชันระหว่าง  $H$  กับ  $\epsilon$  โดยภาพประกอบด้านบนและล่างแสดงถึงลักษณะของผิวหน้าของโหมดต่างๆ ทั้ง 6 โหมด สามเหลี่ยมเล็กสีขาวแทนโครงสร้างเกาะสามมิติที่มีเสถียรภาพ สามเหลี่ยมใหญ่ระบายสีข้างในแทนโครงสร้างเกาะสามมิติที่โตเต็มที่ (Ripening island) เฟสแต่ละรูปแบบถูกแบ่งด้วยเส้นขอบเขต  $H_{c1}(\epsilon)$ : FM-R1, FM-SK1;  $H_{c2}(\epsilon)$ : SK1-R2;  $H_{c3}(\epsilon)$ : SK2-SK1;  $H_{c4}(\epsilon)$ : VW-SK2, VW-R3 [75]



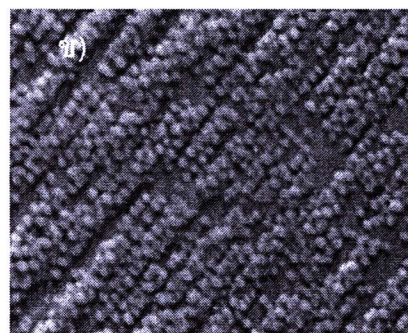
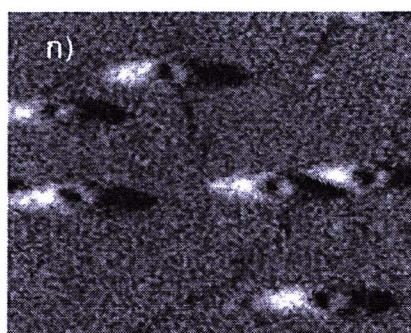
รูปที่ 3.19 ภาพจาก RHEED screen ขณะปลูกควอนตัมดอต InAs บนแผ่นฐานลายตาราง  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$  ก) เมื่อเริ่มเกิดควอนตัมดอต ข) เกิดควอนตัมดอตแล้ว ค) Chevron pattern [74]



รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์ของ Chevron pattern ต่อลักษณะทางกายภาพของควอนตัมดอต [75]

### 3.6.5 ชั้นกัลบหับ

ชั้นกัลบหับ (capping layer) ถูกใช้เพื่อกัลบหับชั้นบนสุดของโครงสร้างเพื่อกำจัดสถานะกับดัก (Trap) ที่ผิว โดยสถานะดังกล่าวจะรบกวนคุณภาพการเปล่งแสงของชิ้นงานเนื่องจากตัวมันเองมีการรวมตัวของพาหะแบบไม่เปล่งแสง (Non-radiative recombination) ชั้นกัลบหับจึงเป็นชั้นที่มีความสำคัญโดยเฉพาะในชิ้นงานที่ต้องการปลูกเพื่อวัดผลการเปล่งแสง ในบางกรณีอาจจะใช้ชั้นกัลบหับเพื่อจุดประสงค์อื่น ดังแสดงในรูปที่ 3.21 เช่น การกัลบหับควอนตัมดอตเพื่อเปลี่ยนรูปร่างเช่น ใช้สร้างหลุมนาโน (Nanohole) [76] (รูปที่ 3.21 ก)) หรือ โครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุล (Quantum dots molecule) [77] (รูปที่ 3.21 ข)) เป็นต้น การปลูกชั้นกัลบหับโดยทั่วไปทำได้โดยการเปิดชุดเตอร์ของ Ga ในบรรยากาศของ  $As_4$  เช่นเดียวกับการปลูกชั้นบัฟเฟอร์และชั้น GaAs spacer แต่มีความหนาที่น้อยลงมากคือ 100 nm และทำการปลูกที่ 500 ° C



รูปที่ 3.21 ก) การกัลบหับเพื่อทำ Nanohole ข) การกัลบหับแบบบางสำหรับปลูกโครงสร้างควอนตัมดอตความหนาแน่นสูง [77]