

โฟโตลูมิเนสเซนส์ของโครงสร้างนาโนแกลเลียมอาร์เซไนด์บิสไมด์ควอนตัมริง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PHOTOLUMINESCENCE OF GaAsBi QUANTUM RING NANOSTRUCTURES



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	โฟโตลูมิเนสเซนส์ของโครงสร้างนาโนแกลเลียมอาร์เซไนด์ บิสไมต์ควอนตัมริง
โดย	นายอภิรักษ์ สร้อยสน
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.ทรงพล กาญจนชูชัย

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.ทรงพล กาญจนชูชัย)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สกุลธรรม เสนาะพิมพ์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.นพดล นันทวงศ์)	

อภิรักษ์ สร้อยสน : โฟโตลูมิเนสเซนส์ของโครงสร้างนาโนแกเลียมอาร์เซไนด์บิสไมด์ควอนตัมริง. (PHOTOLUMINESCENCE OF GaAsBi QUANTUM RING NANOSTRUCTURES) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.ทรงพล กาญจนชูชัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการปลูกโครงสร้างนาโน GaAsBi ควอนตัมริงบนแผ่นฐาน GaAs ด้วยระบบเอพิแทกซีลำโมเลกุล (MBE) ซึ่งงานถูกศึกษาที่สถาบันวิทยาศาสตร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) และสมบัติเชิงแสงด้วยโฟโตลูมิเนสเซนส์สเปกโทรสโกปี (PL) โครงสร้างนาโนควอนตัมริงถูกปลูกโดยใช้เทคนิคการปลูกเอพิแทกซี (Droplet Epitaxy) หยด GaBi ปลูกปล่อยลงบนแผ่นฐาน GaAs ในอัตราส่วน Ga:Bi 0.95:0.05, 0.90:0.10 และ 0.85:0.15 ตามลำดับ หยดโลหะถูกขึ้นรูปผลึกภายใต้ความดันไอของ As เพื่อเปลี่ยนหยดโลหะให้เป็นโครงสร้างนาโน GaAsBi ควอนตัมริง ปัจจัยที่สำคัญในการเกิดโครงสร้างนาโนควอนตัมริง คือ ความหนาของหยด GaBi, อุณหภูมิของแผ่นฐานในขณะที่ปล่อยหยดโลหะ, และความดันไอของ As กล่าวคือ ความหนาของหยด GaBi ต้องมากกว่า 5 ML เพื่อขนาดโครงสร้างนาโนควอนตัมริงที่เหมาะสม เส้นผ่านศูนย์กลางของควอนตัมริงปลูกที่อุณหภูมิ 225°C มีขนาดน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 300°C เนื่องจาก หยด GaBi สามารถแพร่ออกจากจุดศูนย์กลางของหยดได้น้อยกว่าที่อุณหภูมิปลูกต่ำ ความดันไอของ As ต้องมากพอและถูกปล่อยอย่างรวดเร็วขณะทำการระเหิดการตกผลึก โครงสร้างนาโนควอนตัมริง และควอนตัมดอท สามารถเกิดได้ด้วยกระบวนการตกผลึกที่ช้าและเร็ว ตามลำดับ เนื่องจากลักษณะเฉพาะของแหล่งกำเนิดไอ As งานวิจัยนี้จึงจำกัดขอบเขตเฉพาะโครงสร้างนาโนควอนตัมริงเท่านั้น

โฟโตลูมิเนสเซนส์ของโครงสร้างนาโน GaAsBi ควอนตัมริงกลบทับด้วย GaAs ซึ่งปลูกที่อุณหภูมิสูง (500°C) และอุณหภูมิต่ำ (300°C) ถูกศึกษา สำหรับการกลบทับที่อุณหภูมิสูง ซึ่งงานแสดงการเปล่งแสงที่เด่นชัดของ LT-GaAs เท่านั้น อันเป็นผลเนื่องมาจากการอบขณะที่ปลูกชั้นกลบทับ สำหรับการกลบทับที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งงานแสดงการเปล่งแสงช่วงความยาวคลื่นอินฟราเรดใกล้ของโครงสร้างนาโน GaAsBi ควอนตัมริง อย่างไรก็ตาม ซึ่งงานมีความเข้มของแสงต่ำเนื่องจากความเป็นผลึกของชั้นกลบทับที่ต่ำ

CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6170325221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: Gallium Arsenide Bismide, Quantum Ring, Droplet Epitaxy, Nanostructures

Apirak Soison : PHOTOLUMINESCENCE OF GaAsBi QUANTUM RING NANOSTRUCTURES.

Advisor: Prof. SONGPHOL KANJANACHUCHAI, Ph.D.

This thesis reports the growth of GaAsBi quantum ring nanostructures (QRNs) on GaAs substrate by molecular beam epitaxy (MBE). The samples are morphologically characterized by atomic force microscopy (AFM) and optically probed by photoluminescence spectroscopy (PL). QRNs are grown by droplets epitaxy technic (DE). GaBi droplets are deposited on GaAs substrate with the Ga:Bi ratios of 0.95:0.05, 0.90:0.10, and 0.85:0.15, respectively. Crystallization is performed under As flux pressure to transform the metal droplets to GaAsBi QRNs. The important factors for the QRN formation are the GaBi thickness, the growth temperature, and the As flux pressure. That is, the GaBi droplet must be thicker than 5 ML to obtain an appropriate size of the QRNs. The QRN diameter grown at 225°C is smaller than that grown at 300°C because the GaBi diffusion length from the droplet center is shorter at the lower growth temperature. The As flux pressure must be sufficiently and rapidly supplied during the crystallization process. QRNs and quantum dot nanostructures (QDNs) can be formed with a slow and rapid crystallization process, respectively. Owing to the character of As source cell, only QRNs are of interest in this research.

PL of GaAsBi QRNs capped with GaAs layers, which are grown at high temperature (500°C), and low temperature (300°C), is studied. PL for the high-temperature capped samples shows only a pronounced low-temperature (LT)-GaAs peak, resulting from a spontaneously annealing effect during the capping process. PL for the low-temperature capped samples shows near-infrared spectra emitted from the GaAsBi QRNs. However, the PL intensity for the latter case is low because of the low crystallinity of the low temperature grown capping layers.

Field of Study: Electrical Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2019

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์และเป้าหมายมิได้ หากผู้เขียนมิได้รับความอนุเคราะห์เครื่องมือการทดลองและวิจัยจากห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้เขียนขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร.ทรงพล กาญจนชูชัย ที่สละเวลาอันมีค่า เพื่อให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางที่มีประโยชน์ทั้งด้านการเรียน การวิจัย และการเขียนวิทยานิพนธ์ให้เสร็จสิ้นสมบูรณ์ จนผู้เขียนจบการศึกษาในระดับปริญญาโท

ผู้เขียนขอขอบพระคุณคณะกรรมการอนุมัติวิทยานิพนธ์และการสอบจบการศึกษา ทั้ง 3 ท่าน ซึ่งประกอบไปด้วย ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว รองศาสตราจารย์ ดร.สุกฤษธรรม เสนาะพิมพ์ และ ดร.นพดล นันทวงศ์

ผู้เขียนขอขอบพระคุณนักวิจัยหลังปริญญาเอก ดร.เฉลิมชัย อิมवास ที่คอยช่วยเหลือและให้คำปรึกษาการทำวิจัยตั้งแต่เริ่มต้นจนจบการวิจัย

ผู้เขียนขอขอบพระคุณพี่ๆห้องธุรการ ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ที่อำนวยความสะดวกด้านงานธุรการ และ เครื่องมือวิจัย ซึ่งประกอบไปด้วย พี่ศุภโชค และ พี่ขวัญเรือน ไทยน้อย พี่พัฒนา พันธวงศ์ และ พี่เวนิช ภูมิ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) และ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (NSTDA) ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจ ส่งเสริม และผลักดันในด้านการศึกษาจนทำให้ผู้เขียนสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาโท

อภิรักษ์ สร้อยสน

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฌ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	2
บทที่ 2 เนื้อหาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของโครงสร้างระดับนาโน.....	3
2.2 การสังเคราะห์โครงสร้างในระดับนาโนและผลของความเครียด.....	6
2.3 การปลูกที่อาศัยความสัมพันธ์ของค่าคงที่ผลึก.....	7
2.4 โครงสร้างในระดับ 0 มิติและการปลูก : ควอนตัมริง.....	9
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ Bi.....	11
บทที่ 3 การปลูกโครงสร้างและการวัดลักษณะสมบัติ.....	13
3.1 ระบบเอพิแทกซีลำโม่เลกุล (MBE).....	13
3.2 Reflection High Energy Electron Diffraction (RHEED).....	16
3.2.1 RHEED Pattern on GaAs Substrate.....	17
3.2.2 การเทียบอัตราการผลิตสารธาตุที่เป็นของแข็ง (Calibration of Solid Source).....	18

3.2 การเตรียมชิ้นงานและการปลูกชั้นบัฟเฟอร์ .....	19
3.3 การปลูกผลึกโครงสร้างนาโน แบบรูปลายตาราง (CHP) บนแผ่นฐาน GaAs.....	20
3.3.1 การปลูก InGaAs CHP บนแผ่นฐาน GaAs.....	20
3.3.2 การปลูก InGaAsBi CHP บนแผ่นฐาน GaAs.....	20
3.4 การปลูกผลึก GaAsBi QRNs โดยเทคนิค DE.....	21
3.4.1 การปล่อยหยดโลหะ GaBi.....	22
3.4.2 การตกผลึกหยด GaBi.....	23
3.5 การตรวจวัดลักษณะสมบัติ.....	24
3.5.1 Atomic Force Microscopy (AFM) .....	24
3.5.2 X-Ray Diffraction Spectroscopy (XRD).....	25
3.5.3 Photoluminescence Spectroscopy (PL).....	26
3.5.4 RAMAN Spectroscopy.....	27
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	28
4.1 สัณฐานวิทยาพื้นผิว.....	28
4.1.1 InGaAs CHP/GaAs และ InGaAsBi CHP/GaAs.....	29
4.1.2 GaAsBi QRNs.....	31
4.2 สมบัติเชิงแสงของ GaAsBi QRNs.....	39
4.2.1 สมบัติเชิงแสงของ GaAsBi QRNs ที่ปลูกชั้นกลบทับที่อุณหภูมิสูง (500°C) .....	40
4.2.2 สมบัติเชิงแสงของ GaAsBi QRNs ที่ปลูกชั้นกลบทับที่อุณหภูมิต่ำ (300°C) .....	42
บทที่ 5 สรุป.....	44
บรรณานุกรม.....	46
ประวัติผู้เขียน.....	52



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 แสดงเงื่อนไขการปลูก GaAsBi QRNs ของแต่ละชิ้นงาน .....	31



## สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างวัสดุสารกึ่งตัวนำที่เมื่อมีขนาดลดลงจะแสดงความสัมพันธ์รูปแบบต่างๆ จาก ซ้ายไปขวา โครงสร้างสารกึ่งตัวนำแบบบัลก์ในระดับ cm โครงสร้างที่ทำหน้าเป็นคลื่นชี้้นำในระดับ um และ โครงสร้างที่สัมพันธ์กับสมการของเดอบรอย์ในระดับ nm ตามลำดับ [18].....	4
รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างวัสดุในระดับมิติจาก 3D – 0D กับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความ หนาแน่นของสถานะในแกน y และพลังงานในแกน x (D.O.S.-Energy) ซึ่ง (a) วัสดุแบบบัลก์, (b) ควอนตัมเวลล์, (c) นาโนไวร์ และ (d) ควอนตัมดอท ตามลำดับ [19].....	4
รูปที่ 2.3 แสดงสถานะถูกกระตุ้น (Excited State) และ การรวมตัวกัน (Recombination) ที่สถานะ พื้น (Ground State) ของพาหะอิเล็กตรอน (Electron) และโฮล (Hole) แล้วเกิดการปลดปล่อย พลังงานออกมาในรูปโฟตอน (Photon) ของ (a) วัสดุแบบบัลก์ และ (b) โครงสร้างนาโน QD [20]..	5
รูปที่ 2.4 แสดงแผนภาพ (a) Lattice-matched ของ Homogeneous Epitaxy (b) และ (c) Lattice-mismatched ของ Heterogeneous Epitaxy ที่เกิด Strain Effect แบบ Compressive และ Tensile Strain ตามลำดับ [21].....	6
รูปที่ 2.5 กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ของค่าความไม่เข้ากันของโครงร่างผลึก ( $\epsilon$ ) และ ความหนาของ ชั้นฟิล์ม (H) รวมทั้งโครงสร้างที่เกิดขึ้นเมื่อปลูกด้วยโหมด FM, SK, VW, $R_1$ , $R_2$ และ $R_3$ [22] .....	7
รูปที่ 2.6 แสดงกลไกการเกิดโครงสร้างควอนตัมดอท (QD) [24].....	9
รูปที่ 2.7 แสดงกลไกการเกิดโครงสร้าง InGaAs QRs [25].....	9
รูปที่ 2.8 กลไกการเกิดโครงสร้าง GaAs QRs ด้วยเทคนิค DE [9].....	10
รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ของ $E_g$ และ $a$ ของสารกึ่งตัวนำ III-V-Bi ที่ $T=295$ K [32].....	11
รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการปลูก - ความดันไอของ Bi [36] .....	12
รูปที่ 2.11 Ga-Bi Phase Diagram [17] .....	12
รูปที่ 3.1 ภาพถ่าย MBE รุ่น 32P ยี่ห้อ RIBER ของห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ.....	14
รูปที่ 3.2 ห้องปลูก (Growth Chamber).....	15
รูปที่ 3.3 แสดงแผนภาพการทำงานของ RHEED.....	16

รูปที่ 3.4 2x4 Streaky Pattern ของแผ่นฐาน GaAs ภายใต้ความดันไอของ As-rich [37] .....	17
รูปที่ 3.5 4x6 Streaky Pattern ของแผ่นฐาน GaAs ภายใต้ความดันไอของ Ga-rich [37].....	17
รูปที่ 3.6 กราฟแสดงการเทียบอัตราการปลูกธาตุ Ga ที่อุณหภูมิ 790°C ที่อุณหภูมิแผ่นฐาน 500°C ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ .....	18
รูปที่ 3.7 (2x4) Streaky Pattern ของ GaAs (001) (a) [110] และ (b) [1-10] .....	19
รูปที่ 3.8 กระบวนการเตรียมชิ้นงานตั้งแต่ก่อนทำการ Preheating ไปจนถึงการปลูกชั้นบัฟเฟอร์ (a) ก่อนการ Preheat (b) หลังการ Preheat (c) หลังการ De-oxide (d) หลังการปลูกชั้นบัฟเฟอร์ ....	20
รูปที่ 3.9 ภาพตัดขวางชิ้นงานของโครงสร้างนาโน InGaAsBi/GaAs .....	21
รูปที่ 3.10 Ga-Bi Phase Diagram โดยวงกลมสีแดงแสดงเงื่อนไขที่ทำการวิจัย [17] .....	21
รูปที่ 3.11 ภาพ AFM ของหยด GaBi ที่มี Bi (a) 5% และ (b) 10% .....	22
รูปที่ 3.12 ภาพ AFM ของ GaAsBi NSs ที่หยด GaBi มี Bi 5% ความหนา 2 ML (a) ภาพ 2D และ (b) ภาพ 3D .....	23
รูปที่ 3.13 แสดงภาพตัดขวางของชิ้นงานและอุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกชิ้นงาน GaAsBi QRNs .....	24
รูปที่ 3.14 แผนภาพการทำงานของ AFM .....	25
รูปที่ 3.15 หลักการของการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (XRD) .....	25
รูปที่ 3.16 ระบบการวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ (PL) .....	26
รูปที่ 3.17 แผนภาพหลักการของเทคนิครามานสเปกโทรสโคปี (RAMAN) [42] .....	27
รูปที่ 4.1 ภาพ AFM โครงสร้างของ (a) InGaAs/GaAs และ (b) InGaAsBi/GaAs .....	29
รูปที่ 4.2 XRD Diffractogram ของ a) InGaAs/GaAs และ b) InGaAsBi/GaAs.....	30
รูปที่ 4.3 ภาพ AFM ของ GaAsBi QRNs ชิ้นงาน (a) Bi5-2ML, (b) Bi5-5ML และ (c) Bi5-8ML ..	32
รูปที่ 4.4 หยดโลหะ GaBi ของชิ้นงาน D-Bi5-5ML ที่อุณหภูมิห้อง (a) ภาพ AFM (b) Line scan..	33
รูปที่ 4.5 ภาพ AFM และ Line Scan ของ GaAsBi QRNs ชิ้นงาน (a) Bi0-225, (b) Bi5-225 และ (c) Bi10-225.....	34
รูปที่ 4.6 (4x6) Streaky Pattern ของ GaAsBi QRNs ที่ปลูก 300°C (a) [110] และ (b) [1-10] ..	35

รูปที่ 4.7 ภาพ AFM และ Line Scan ของ GaAsBi QRs ขึ้นงาน (a) Bi0-300, (b) Bi5-300, (c) Bi10 และ (d) Bi15-300 ..... 36

รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์แนวโน้มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d), ความสูง (h) และ ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (D) ของ QRNs ที่ปลูกอุณหภูมิ 225°C และ 300°C ..... 37

รูปที่ 4.9 แผนภาพแสดงกลไกการเกิด GaAsBi QRNs ของหยด GaBi ซึ่ง (a) แผ่นฐาน GaAs ก่อนการปล่อยหยด GaBi (b) หลังปล่อยหยด GaBi (c) ขั้นตอนการตกผลึก (d) การตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำ ความดันไอ As<sub>4</sub> สูงเกิด QD และ (e) การตกผลึกที่อุณหภูมิสูง ความดันไอ As<sub>4</sub> ต่ำเกิด QR [48] .... 38

รูปที่ 4.10 RAMAN Spectra ของ GaAsBi QRNs ขึ้นงาน Bi5-225, Bi10-225 และ Bi15-300..... 39

รูปที่ 4.11 แสดงกราฟ PL ของ GaAsBi QRs ขึ้นงาน (a) Bi0-225, (b) Bi5-225 และ (c) Bi10-225 ที่ปลูกชั้นกลบทับที่อุณหภูมิ 500°C ..... 40

รูปที่ 4.12 แสดงกราฟ PL ของ GaAsBi QRs ขึ้นงาน Bi0-225 (a) Power Dependence (b) Temperature Dependence ..... 41

รูปที่ 4.13 แสดงกราฟ Varshni ของ GaAsBi QRs ขึ้นงาน Bi15-300 ที่แกน x คือ อุณหภูมิ และ แกน y คือ ค่ายอดพลังงานที่เปล่งแสงออกมา ..... 41

รูปที่ 4.14 แสดงกราฟ PL ของ GaAsBi QRNs ขึ้นงาน Bi15-300-LC ..... 42

รูปที่ 4.15 แสดง Band Diagram, ภาพ AFM 2D และ 3D ของขึ้นงาน Bi15-300-LC ..... 43

# บทที่ 1

## บทนำ

อุปกรณ์จากสารกึ่งตัวนำถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา โดยเฉพาะสาขาอิเล็กทรอนิกส์และออปโตอิเล็กทรอนิกส์ กระบวนการสร้างหรือขั้นตอนการสังเคราะห์ขึ้นมานั้น เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพ ทั้งนี้มีปัจจัยหลายอย่างที่ทำให้คุณภาพของอุปกรณ์จากสารกึ่งตัวนำมีคุณภาพยิ่งขึ้น ได้แก่ วิธีการที่ใช้ในการสังเคราะห์ วัสดุที่ใช้ในการสังเคราะห์ หรือ การปรับปรุงคุณภาพหลังการสังเคราะห์ เป็นต้น อุปกรณ์ที่สังเคราะห์มาจากสารกึ่งตัวนำที่พบเห็นได้ทั่วไปในชีวิตประจำวันนั้น เช่น เซลล์สุริยะ (Solar Cells) [1], ไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode) [2], ตัวตรวจจับแสง (Photodetectors) [3] และ เลเซอร์ (LASER) [4] เป็นต้น

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

การสังเคราะห์อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเพื่อนำไปใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์และออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เอพิแทกซีเป็นรูปแบบของการปลูกผลึกเดี่ยวทับลงบนแผ่นฐานจนเกิดชั้นผลึกใหม่ [5] ซึ่งเอพิแทกซีมีหลายวิธี เช่น การปลูกผลึกแบบสถานะไอ (Vapor Phase Epitaxy: VPE) [6], การปลูกผลึกแบบสถานะของเหลว (Liquid Phase Epitaxy: LPE) [7] และ การปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy: MBE) [8] เป็นต้น ซึ่งดรอปเล็ตเอพิแทกซี (Droplet Epitaxy: DE) นับเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในปัจจุบันนี้สำหรับการสร้างโครงสร้างระดับนาโน [9] เพื่อให้ได้โครงสร้างนาโน (Nanostructures: NSs) ที่มีความจำเพาะเจาะจงอย่างควอนตัมดอท และ ควอนตัมริง [10] สำหรับการนำไปทำอุปกรณ์ต่อไป DE มีขั้นตอนของการสังเคราะห์หรือการปลูกผลึกอยู่ 2 ขั้นตอนคือ 1. การปล่อยหยดโลหะ (Deposition Metal Droplet) ของธาตุหมู่ IIIA ลงไปเกิดที่พื้นผิวของแผ่นฐานในสถานะของเหลวที่อุณหภูมิที่เหมาะสม 2. การตกผลึก (Crystallization) เพื่อเปลี่ยนสถานะของธาตุหมู่ IIIA ที่เป็นของเหลวให้อยู่ในรูปผลึกของแข็งภายใต้ความดันไอของธาตุหมู่ VA เช่น As หรือ P เป็นต้น เป็นตัวทำให้หยดโลหะตกผลึก ความสำคัญของเทคนิค DE นั้นเมื่อพิจารณาว่าหากสามารถหาธาตุหรือสารประกอบตั้งแต่ 2 ธาตุขึ้นไปที่เหมาะสมสำหรับการหยดโลหะให้อยู่ในรูปของเหลวได้ ก็นับเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการใช้แทนธาตุหมู่ IIIA ที่มีงานวิจัยกันแพร่หลายอย่าง Ga [9] หรือ In [11] ได้

แกเลียมอาเซไนด์บิสมิไต์ (GaAsBi) จัดเป็นสารประกอบสารกึ่งตัวนำที่เริ่มได้รับความสนใจมาในช่วงระยะเวลาหนึ่งแล้ว เนื่องจากทำให้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเปล่งแสงในช่วง อินฟราเรดใกล้ (Near-infrared) ถึง อินฟราเรดกลาง (Mid-infrared) [12] ผลของการรวมตัวของ Bi ในสารกึ่งตัวนำมีแนวโน้มที่จะสามารถลดพลังงานช่องว่าง (Bandgap Energy:  $E_g$ ) ได้อย่างมหาศาลแม้รวมตัวเพียงเล็กน้อย [13], [14], [15] รวมทั้งยังส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงแสงที่เปลี่ยนแปลงน้อยลงแม้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป [16] เมื่อ Bi รวมตัวกับ Ga จะเกิดเป็นหยด GaBi และจัดเป็นสารกึ่งโลหะ (Semimetal) [17] จึงมีความน่าสนใจของการนำสารประกอบ GaBi มาปลูกผลึก GaAsBi NSs เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ทางแสง ซึ่งการหาเงื่อนไขการปลูกนับเป็นความท้าทายของงาน นอกจากนี้งานวิจัยมีความน่าสนใจในส่วนของสารประกอบที่มี 3 ธาตุเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ Ga, As และ Bi ทำให้โครงสร้างที่ได้มีแนวโน้มที่จะมีความซับซ้อนในเชิงของสัดส่วนของส่วนประกอบ รวมทั้งลักษณะของโครงสร้างที่ปลูกได้อาจมีลักษณะของ GaAsBi NSs

## 1.2 วัตถุประสงค์

สังเคราะห์วัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างในระดับนาโนของ GaAsBi เพื่อหาเงื่อนไขและปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดของการสังเคราะห์ GaAsBi NSs สำหรับการทำวิจัยสมบัติเชิงแสง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้จำพวกอุปกรณ์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic Devices) ต่อไป เช่น เซลล์สุริยะ (Solar Cells) หรือ อุปกรณ์ตรวจจับทางแสง (Photo Detector) เป็นต้น

## 1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ

สามารถหาเงื่อนไขและปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการปลูก GaAsBi NSs ให้ได้โครงสร้างนาโนควอนตัมริง (QRNs) ของสารประกอบ GaAsBi ซึ่งปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการปลูก ได้แก่ ความหนาของหยดโลหะที่ถูกปล่อยลงบนแผ่นฐาน, อุณหภูมิของแผ่นฐานในขณะที่ปล่อยหยดโลหะและตกผลึก และ ความดันไอของ  $As_4$

เนื้อหาที่จะกล่าวถึงในบทถัดไปคือ บทที่ 2 เนื้อหาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ที่อธิบายทฤษฎีที่เกี่ยวข้องรวมถึงฟิสิกส์ของการเกิด GaAsBi QRNs บทถัดมาคือ บทที่ 3 การทดลอง จะอธิบายการปลูก GaAsBi QRNs ด้วยเทคนิค DE รวมถึงเทคนิคที่ใช้ในการวัดลักษณะคุณสมบัติของ GaAsBi QRNs ซึ่งแสดงผลการทดลองและการวิเคราะห์ในบทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ และสุดท้ายคือการสรุปผลการวิจัยในบทที่ 5 สรุป

## บทที่ 2

### เนื้อหาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

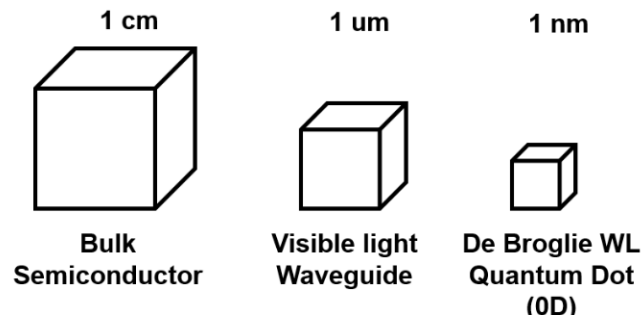
เนื้อหาในบทนี้อธิบายถึงทฤษฎีพื้นฐานทางฟิสิกส์ของวัสดุสารกึ่งตัวนำทั่วไปรวมทั้งวัสดุสารกึ่งตัวนำของโครงสร้างระดับนาโน การสังเคราะห์โครงสร้างในระดับนาโนทั่วไป ความสัมพันธ์ของค่าคงที่ผลึก (a) ในการปลูกโครงสร้างระดับนาโน การปลูกโครงสร้างในระดับ 0 มิติ ควอนตัมดอท (QDs) และ ควอนตัมริง (QRs) รวมทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับบิสมีท (Bi) และความเป็นไปได้ของการนำไปประยุกต์เพื่อหาวิธีการปลูกโครงสร้างในระดับนาโนต่อไป

#### 2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของโครงสร้างระดับนาโน

โครงสร้างนาโน (Nanosturcture) เป็นโครงสร้างที่มีขนาดอยู่ในช่วง nm ถึงระดับ  $\mu\text{m}$  อาจมีการจำกัดขนาดโครงสร้างนาโนตั้งแต่ 1-100 nm ว่าเป็นโครงสร้างระดับนาโน เดิมทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ของวัสดุที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ยังสามารถใช้กลศาสตร์ดั้งเดิม (Classical Mechanic) ในการอธิบายปรากฏการณ์ที่ปรากฏออกมาได้ แต่เมื่อวัสดุมีขนาดที่เล็กลงมาจนถึงระดับหนึ่งแล้วกลศาสตร์ดั้งเดิม จะไม่สามารถอธิบายได้อย่างถูกต้อง จึงเกิดกลศาสตร์ควอนตัม (Quantum Mechanic) ที่เป็นทฤษฎีใหม่ที่มีความแม่นยำกว่า ซึ่งถูกใช้อธิบายแทนที่กลศาสตร์ดั้งเดิม รวมถึงทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ (Electromagnetic Theory) ในวัสดุทั่วไปอย่างวัสดุสารกึ่งตัวนำ มักสนใจคุณสมบัติเชิงแสงเป็นหลัก โดยแสงจัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) สมการ (2.1) อธิบายการแปลงแสงของวัสดุ ซึ่ง E คือ พลังงานแสงที่ปลดปล่อยออกมา, h คือ ค่าคงที่ของพลังค์, c คือ ค่าคงที่ของความเร็วแสง และ  $\lambda$  คือ ค่าความยาวคลื่น

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

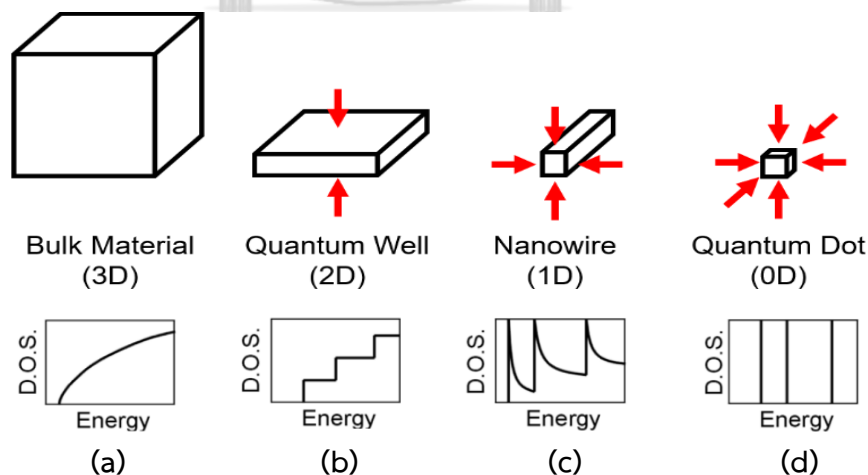
จากสมการ (2.1) จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ของการแปลงแสงของวัสดุจะมีปัจจัยหลักที่ควบคุมพลังงานของแสงที่ปลดปล่อยออกมานั้นก็คือ ค่าความยาวคลื่นซึ่งเป็นค่าผกผันกับพลังงาน ทั้งนี้ค่าความยาวคลื่นสามารถเปลี่ยนแปลงได้จากขนาดของโครงสร้าง ที่เมื่อยังมีขนาดเล็กลงไปจนถึงขนาดระดับ  $\mu\text{m}$  หรือ nm พลังงานของแสงที่ปล่อยออกมาก็จะเปลี่ยนแปลงไปดังแสดงในรูปที่ 2.1 [18]



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างวัสดุสารกึ่งตัวนำที่เมื่อมีขนาดลดลงจะแสดงความสัมพันธ์รูปแบบต่างๆ จากซ้ายไปขวา โครงสร้างสารกึ่งตัวนำแบบบล็อกร้อยในระดั cm โครงสร้างที่ทำหน้าเป็นคลื่นซึ้นนำในระดั um และ โครงสร้างที่สัมพันธ์กับสมการของเดอบรอยในระดั nm ตามลำดับ [18]

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \quad (2.2)$$

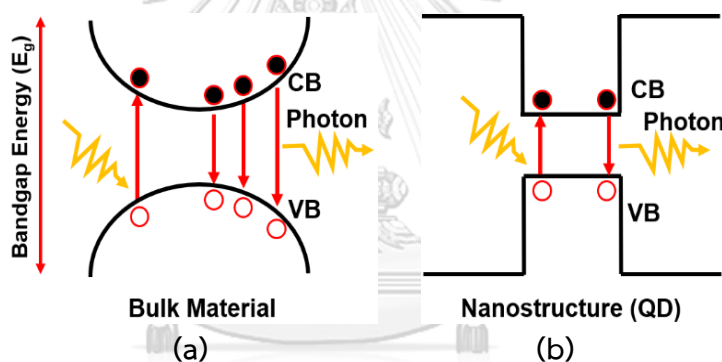
จากรูปที่ 2.1 โครงสร้างวัสดุสารกึ่งตัวนำที่เล็กในระดันาโนเมตรมีโครงสร้างเป็น QDs จะมีรูปแบบสัมพันธ์กับสมการ (2.2) สมการของความยาวคลื่นของเดอบรอย ซึ่ง  $\lambda$  คือ ค่าความยาวคลื่น,  $h$  คือ ค่าคงที่ของพลังค์,  $p$  คือ โมเมนตัมของพาหะ,  $m$  คือ มวลของอิเล็กตรอน และ  $v$  คือ ค่าความเร็วของแสง พอดีขนาดที่เพิ่มขึ้นจากนาโนเมตรเป็นไมโครเมตร โครงสร้างจะมีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นในช่วงไมโครเมตร แต่เมื่อมีขนาดอยู่ในระดับล็อกร้อยหรือระดั 3 มิติ (3D) จะแสดงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่ใช้ทฤษฎีแถบพลังงาน (Band Theory) เพื่ออธิบายคุณสมบัติความหนาแน่นของสถานะ (Density of State: D.O.S.) ของวัสดุที่มีความต่อเนื่องของพลังงาน



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างวัสดุในระดัมิติจาก 3D – 0D กับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสถานะในแกน y และพลังงานในแกน x (D.O.S.-Energy) ซึ่ง (a) วัสดุแบบบล็อกร้อย, (b) ควอนตัมเวลล์, (c) นาโนไวร์ และ (d) ควอนตัมดอท ตามลำดับ [19]



วัสดุสารกึ่งตัวนำแบบบัลก์หรือวัสดุในระดับ 3D มีความต่อเนื่องของพลังงาน เนื่องจากการที่ไม่ถูกจำกัดการเคลื่อนที่ของพาหะทั้ง 3D หรือก็คือมีการถูกจำกัดการเคลื่อนที่ 0 มิติ (0D Confinement) ดังแสดงในรูปที่ 2.2(a) ที่แสดงรูปความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานในแกน x และความหนาแน่นของสถานะในแกน y ของวัสดุในระดับ 3D และถัดมาเป็นวัสดุในระดับ 2 มิติ (2D), 1 มิติ (1D) และ 0 มิติ (0D) ตามลำดับ การถูกจำกัด 1 มิติ (1D Confinement) รูปที่ 2.2(b) จะได้โครงสร้างของวัสดุที่เป็นบ่อควอนตัม หรือ ควอนตัมเวลล์ (Quantum Well: QW) การถูกจำกัด 2 มิติ (2D Confinement) รูปที่ 2.2(c) จะได้โครงสร้างของวัสดุที่เป็นควอนตัมไวร์ หรือ นาโนไวร์ (Nanowire: NW) และ การถูกจำกัด 3 มิติ จะได้โครงสร้างของวัสดุที่เป็นควอนตัมดอท (Quantum Dot: QD) จะเห็นได้ว่าเมื่อวัสดุมีการถูกจำกัดการเคลื่อนที่ในระดับมิติที่เพิ่มมากขึ้น ความสัมพันธ์ของกราฟความหนาแน่นของสถานะและพลังงานจะมีการเปลี่ยนแปลงไปจนเมื่อวัสดุถูกจำกัดทั้ง 3D (3D Confinement) ค่าพลังงานที่มีความต่อเนื่องจะแสดงความเป็นไม่ต่อเนื่องของพลังงานดังแสดงในรูปที่ 2.2(d) [19]



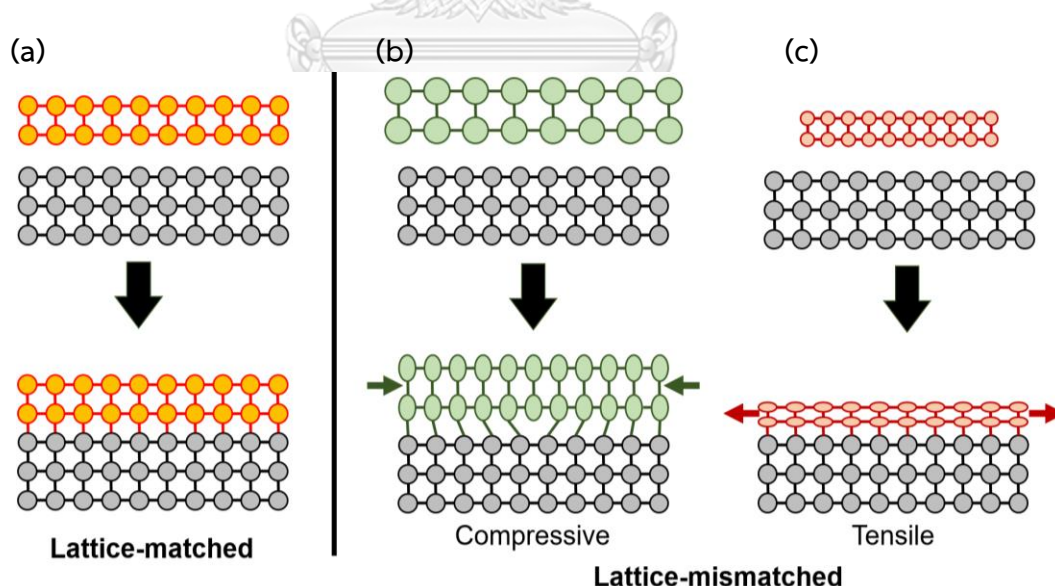
รูปที่ 2.3 แสดงสถานะถูกกระตุ้น (Excited State) และ การรวมตัวกัน (Recombination) ที่สถานะพื้น (Ground State) ของพาหะอิเล็กตรอน (Electron) และโฮล (Hole) แล้วเกิดการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปโฟตอน (Photon) ของ (a) วัสดุแบบบัลก์ และ (b) โครงสร้างนาโน QD [20]

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสถานะและพลังงานในรูปที่ 2.2(a) และ 2.2(d) แสดงให้เห็นว่าเมื่อวัสดุสารกึ่งตัวนำมีขนาดเล็กจนกระทั่งถูกจำกัดจาก 0D ถึง 3D พลังงานที่ปลดปล่อยออกมานั้นจากที่พลังงานมีค่าต่อเนื่องกลายเป็นมีค่าไม่ต่อเนื่องแสดงสถานะควอนไทซ์ (Quantized State) ของ QD ซึ่งสถานะควอนไทซ์นี้มีความสัมพันธ์กับสมการ (2.1) ของพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจะมีค่าเฉพาะ เมื่อวัสดุโครงสร้างนาโน QD ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจันอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบเวเลนซ์ (Valence Band: VB) มีพลังงานที่มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานช่องว่าง (Bandgap Energy:  $E_g$ ) แล้วจะเกิดสถานะถูกกระตุ้น (Excited State) ที่อิเล็กตรอนจะขึ้นไปอยู่บนแถบตัวนำ (Conduction Band: CB) ในขณะเดียวกันจะเกิดพาหะโฮลใน VB เมื่อเวลาผ่านไประยะเวลาหนึ่ง

อิเล็กตรอนจะเกิดการตกกลับลงมาแล้วเกิดการรวมตัวกัน (Recombination) ของอิเล็กตรอนและโฮลที่สถานะพื้น (Ground State) ปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปโฟตอนซึ่ง QD จะแตกต่างกับวัสดุแบบบัลค์ตรงที่มีค่าพลังงานเพียงค่าเดียว แต่วัสดุแบบบัลค์จะมีค่าพลังงานหลายค่าตามที่แสดงในรูปที่ 2.3(a) และ 2.3(b) [20]

## 2.2 การสังเคราะห์โครงสร้างในระดับนาโนและผลของความเครียด

การสังเคราะห์ NSs หรือ การปลูก NSs ด้วยวิธีเอพิแทกซี คือ รูปแบบการปลูกผลึกเดี่ยวทับบนแผ่นฐานที่เป็นผลึกเหมือนกัน ซึ่งผลึกที่ได้ปลูกนี้เรียกว่า “ฟิล์มเอพิแทกซี” หรือบางครั้งจะเรียก “ชั้นเอพิแทกซี” ทั้งนี้วิธีเอพิแทกซีจะแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ เอพิแทกซีแบบเอกพันธ์ (Homogeneous Epitaxy) การปลูกผลึกเดี่ยวที่เป็นชนิดเดียวกันกับแผ่นฐานและ เอพิแทกซีแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Epitaxy) การปลูกผลึกเดี่ยวที่ไม่เป็นชนิดเดียวกันกับแผ่นฐาน รูปแบบของเอพิแทกซีอาศัยค่าคงที่ผลึก (Lattice Constant:  $a$ ) ในการพิจารณาว่าเหมาะสมและควรใช้ในการปลูกหรือไม่ โดยปกติแล้วเอพิแทกซีแบบเอกพันธ์มีความเข้าคู่กันของค่าโครงสร้างผลึก (Lattice-matched) อยู่แล้วเนื่องจากค่า  $a$  ที่พิจารณาจะมีค่าเท่ากันเสมอเนื่องจากผลึกที่ใช้ปลูกเป็นชนิดเดียวกันกับแผ่นฐานดังแสดงในรูปที่ 2.4(a) [21]



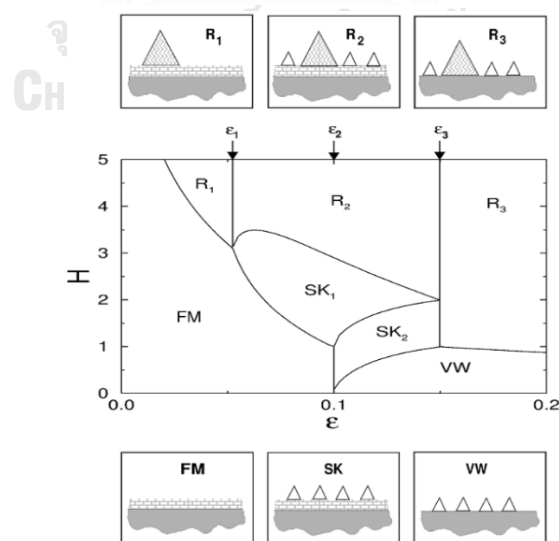
รูปที่ 2.4 แสดงแผนภาพ (a) Lattice-matched ของ Homogeneous Epitaxy (b) และ (c) Lattice-mismatched ของ Heterogeneous Epitaxy ที่เกิด Strain Effect แบบ Compressive และ Tensile Strain ตามลำดับ [21]

เอพิแทกซีแบบวิวิธพันธ์จะมีความแตกต่างของค่า  $a$  เนื่องจากผลึกที่ใช้ปลูกเป็นคนละชนิดกันกับแผ่นฐาน ทำให้ฟิล์มเอพิแทกซีเกิดผลของความเครียด (Strain Effect) เกิดความไม่เข้าคู่กันของค่าโครงสร้างผลึก (Lattice-mismatched) จากการปลูกเอพิแทกซีแบบวิวิธพันธ์เกิดได้ 2 กรณี คือ

1. ความเครียดแบบอัด (Compressive Strain) เกิดจากผลึกที่ปลูกมีค่า  $a$  มากกว่าแผ่นฐาน และ
2. ความเครียดแบบขยายตัว (Tensile Strain) เกิดจากผลึกที่ปลูกมีค่า  $a$  น้อยกว่าแผ่นฐานดังแสดงในรูปที่ 2.4(b) และ 2.4(c) ตามลำดับ ซึ่งผลของความเครียดที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลมาจากการที่ผลึกมีความพยายามในการทำให้เกิดชั้นเอพิแทกซีขึ้น วิธีการปลูกแบบเอพิแทกซีสามารถปลูกได้หลายวิธี เช่น การปลูกผลึกแบบสถานะไอ (Vapor Phase Epitaxy: VPE) [6] การปลูกผลึกแบบสถานะของเหลว (Liquid Phase Epitaxy: LPE) [7], และ การปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy: MBE) [8] เป็นต้น

### 2.3 การปลูกที่อาศัยความสัมพันธ์ของค่าคงที่ผลึก

จากรูปที่ 2.4 แสดงแผนภาพของการเกิดขึ้นเอพิแทกซีโดยอาศัยค่า  $a$  ซึ่งสามารถจำแนกและแบ่งโหมดของการปลูกได้อย่างน้อย 3 รูปแบบสำคัญ ได้แก่ Frank-van de Merwe (FM), Stranski-Krastanov (SK) และ Volmer-Weber (VW) ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีโหมดการปลูกอีก 3 โหมดซึ่งเกิดต่อยอดมาจากการปลูกทั้งแบบโหมด FM, SK และ VW อีกด้วย ทั้งนี้การปลูกในแต่ละโหมดจะมีตัวแปรสำคัญอยู่ 2 ตัว ได้แก่ 1. ค่าความไม่เข้ากันของโครงสร้างผลึก ( $\epsilon$ ) 2. ค่าความหนาของชั้นฟิล์ม (H) ดังรูปที่ 2.5 [22]

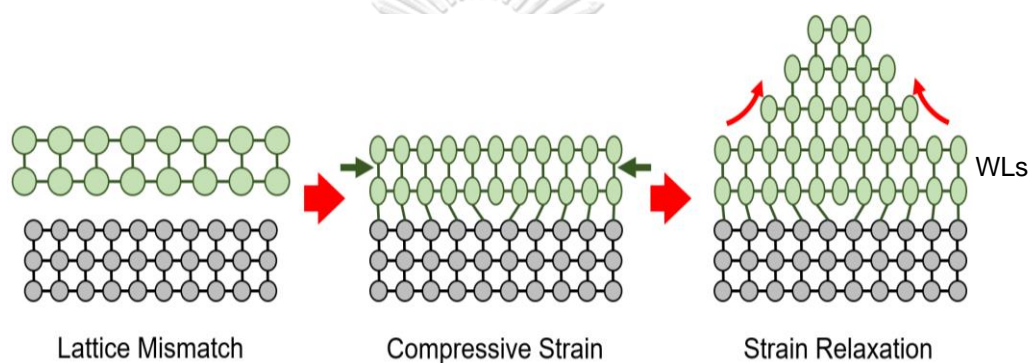


รูปที่ 2.5 กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ของค่าความไม่เข้ากันของโครงสร้างผลึก ( $\epsilon$ ) และ ความหนาของชั้นฟิล์ม (H) รวมทั้งโครงสร้างที่เกิดขึ้นเมื่อปลูกด้วยโหมด FM, SK, VW,  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $R_3$  [22]



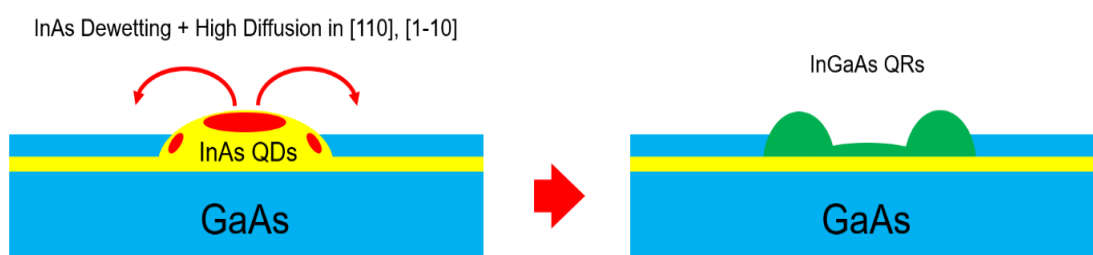
## 2.4 โครงสร้างในระดับ 0 มิติและการปลูก : ควอนตัมริง

ควอนตัมริง (Quantum Rings: QRs) หรือ วงแหวนควอนตัม ต่างเป็นโครงสร้างในระดับ 0 มิติ (0D) และ ที่มีขนาดอยู่ในระดับ nm มีรูปร่างเป็นวงแหวน แตกต่างไปจากควอนตัมดอท (Quantum Dots: QDs) แต่มีคุณสมบัติเชิงแสงที่แตกต่างกัน [23] กลไกการเกิดของ QDs เช่น InAs QDs เกิดจากการปลูกชั้นฟิล์ม InAs ลงบนแผ่นฐาน GaAs ค่าคงที่ผลึก (Lattice constant) ที่ต่างกันของชั้นฟิล์มและแผ่นฐานทำให้เกิดความเครียดแบบอัด (Compressive Strain) เมื่อการจัดเรียงในระดับชั้นโมโน (Monolayers: MLs) มีความหนาในระดับหนึ่ง ความเครียดที่สะสมอยู่จะเกิดการผ่อนคลายความเครียด (Strain Relaxation) ทำให้เกิดโครงสร้าง QDs ออกมา ซึ่งชั้นที่อยู่ระหว่าง QDs และ แผ่นฐานคือชั้นเวตติง (Wetting Layer: WLs) [24] ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงกลไกการเกิดโครงสร้างควอนตัมดอท (QD) [24]

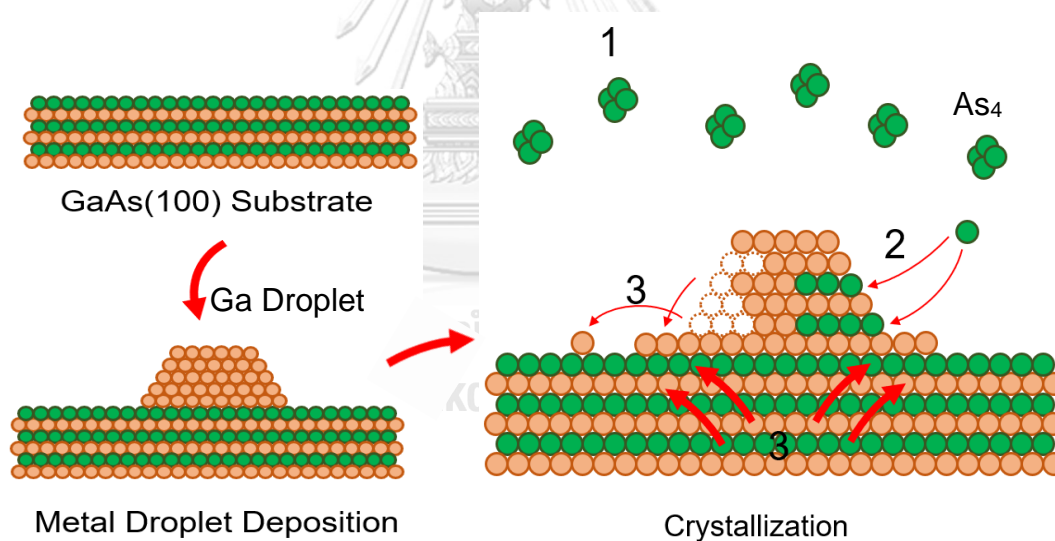
กลไกการเกิด QRs เกิดจากการปลูกชั้นกลบทับที่ไม่สมบูรณ์ของอินเดียมอาร์เซไนด์ (InAs) QDs ด้วยชั้นกลบทับแกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) เนื่องจากความหนาของชั้นกลบทับ GaAs มีความหนาน้อยกว่าความสูงของ QDs ทำให้ InAs QDs เกิดความเครียด เพราะโครงสร้างของชั้นกลบทับ GaAs เกิดการดีเวตติง (Dewetting) ของ InAs QDs รวมถึงเกิดการแพร่ได้ง่ายขึ้นในทิศทาง  $[1-10]$  และ  $[110]$  ส่งผลให้ InAs QDs เสื่อมสภาพไปและเกิดโครงสร้างที่คล้ายวงแหวนที่มีโครงสร้างเป็นอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ (InGaAs) ในที่สุดดังรูปที่ 2.7 [25]



รูปที่ 2.7 แสดงกลไกการเกิดโครงสร้าง InGaAs QRs [25]

การเกิดโครงสร้าง QRs ที่กล่าวมานั้นเป็นรูปแบบของการรวมตัวด้วยตัวเอง (Self-assembly) ของสารประกอบ ซึ่งลักษณะการเกิดรูปแบบนี้ยังสามารถเกิดขึ้นได้กับวัสดุตัวอื่น นอกจาก InAs/GaAs ที่กลบด้วย GaAs อีกด้วย เช่น InAs บนอินเดียมฟอสไฟด์ (InP) ที่กลบด้วย InP [26] เจอมาเนียม (Ge) QDs ที่กลบด้วยซิลิกอน (Si) [27] แกลเลียมแอนติโมนด์ (GaSb) บน GaAs [28] ที่ควบคุมการปลูกโครงสร้าง QRs ด้วยความหนา รวมถึงการปลูกชั้นกลบทับบน InAs หรือ InGaAs QDs ด้วย GaAs บนอลูมิเนียมอาร์เซไนด์ (AlAs) แล้วทำการอบอ่อน (Annealing) เพื่ออาศัยการแพร่ของ Ga และอลูมิเนียม (Al) เพื่อทำให้เกิด QRs [29]

นอกจากกลไกการเกิดโครงสร้าง QRs โดยการรวมตัวด้วยตัวเองของสารประกอบแล้วนั้น ยังสามารถใช้วิธีอื่นอีก ได้แก่เทคนิค Droplet Epitaxy (DE) ด้วย MBE ซึ่งขั้นตอนของเทคนิค DE มี 2 ขั้นตอนคือ 1. การปล่อยหยดโลหะ (Metal Droplet Deposition) ธาตุหมู่ IIIA ลงไปเกาะที่พื้นผิวของแผ่นฐานในสถานะของเหลวที่อุณหภูมิที่เหมาะสม 2. การตกผลึก (Crystallization) เพื่อเปลี่ยนสถานะของธาตุหมู่ IIIA ที่เป็นของเหลวให้อยู่ในรูปผลึกของแข็งภายใต้ความดันไอของธาตุหมู่ VA เช่น As หรือ P เป็นตัวทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะดังรูปที่ 2.8



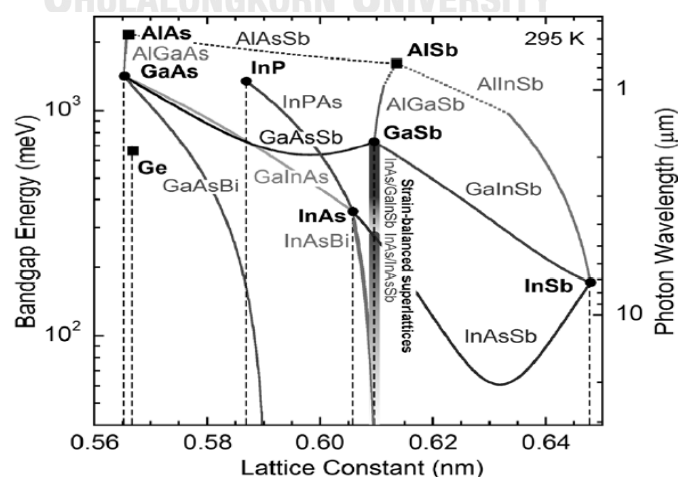
รูปที่ 2.8 กลไกการเกิดโครงสร้าง GaAs QRs ด้วยเทคนิค DE [9]

จากรูปที่ 2.8 แสดงกลไกการเกิดโครงสร้าง GaAs QDs บนแผ่นฐาน GaAs (001) ด้วยวิธี DE [9] โดยที่กล่าวในข้างต้นของขั้นตอนแรก คือการปล่อยหยดโลหะ ซึ่งก็คือหยดของ Ga ที่อยู่ในสถานะของเหลวลงบนแผ่นฐาน GaAs (001) ทั้งนี้ปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนาของหยด Ga คือ เวลาการปล่อยหยดโลหะ หากเวลาการปล่อยหยดโลหะเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาเพิ่มมากขึ้น ส่วนในขั้นสุดท้าย คือ การตกผลึกของหยด Ga จะเริ่มการเปลี่ยนแปลงสถานะของเหลวกลายเป็นผลึกของแข็ง

ภายใต้ความดันไอของ  $As_4$  สามารถดูได้จากรูปที่ 2.8 หมายเลข 1 แสดงการตกผลึก ภายใต้ความดันไอของ  $As_4$  ในขณะที่ยังมีหยด Ga หมายเลข 2 คืออะตอม  $As_4$  ที่เริ่มทำการแทนที่เข้าไปในหยด Ga ซึ่งขณะเดียวกันอะตอม Ga จะเริ่มทำการแพร่ไปบริเวณรอบข้างทั้งนี้ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของ Ga คืออุณหภูมิที่อยู่ในระหว่างการการตกผลึก [30] หากมีอุณหภูมิที่สูงจะทำให้อะตอมของ Ga เคลื่อนที่ไปได้ไกลมากขึ้นดังที่แสดงในหมายเลข 3 ที่อะตอมของ Ga จะเกิดการแพร่ออกมาจากบริเวณที่เป็นหยด Ga รวมถึงอะตอมของ Ga ที่มาจากชั้นฟิล์มที่เป็น GaAs ได้ด้วยเหมือนกัน ทั้งนี้รูปแบบการเกิดโครงสร้างผลึกของหยด Ga สามารถเกิดโครงสร้างได้หลายรูปแบบ เช่น QDs หรือ QRs เป็นต้น โดยมีสาเหตุมาจากปัจจัยอย่างปริมาณความดันของไอธาตุหมู่ V ของ  $As_4$  ที่ทำให้ขณะการตกผลึกหากมีความดันไอที่มากพอ รวมถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมก็จะเกิดโครงสร้าง QDs ได้ ในทำนองเดียวกันหากมีความดันไอที่ต่ำรวมถึงอุณหภูมิกำลังสูงเกินไปก็จะเกิดโครงสร้างคล้ายวงแหวน QRs หรืออาจเป็นหลุมนาโน (Nanohole) [10]

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ Bi

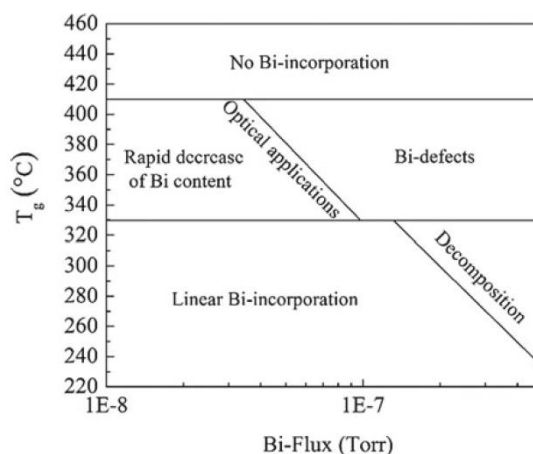
Bismuth (Bi) เป็นธาตุหมู่ VA ตามการเรียกของ IUPAC แบบเก่า ปัจจุบันมีการจัดแบ่งให้อยู่ในกลุ่ม 15 Bi มีเลขอะตอมคือ 83 จัดเป็นโลหะ มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดอยู่ที่ประมาณ  $272^\circ C$  และ  $1,564^\circ C$  ตามลำดับ [31] การนำ Bi มาปลูกผลึกด้วยเทคนิคต่างๆร่วมกับสารกึ่งตัวนำ III-V ซึ่งสารกึ่งตัวนำที่มี Bi เป็นส่วนประกอบ สมบัติทางไฟฟ้าและเชิงแสงมีการเปลี่ยนแปลงไป ค่าคงที่ผลึก (Lattice Constant:  $a$ ) มีผลต่อพลังงานช่องว่าง (Bandgap Energy:  $E_g$ ) ของ III-V-Bi [32] ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ของ  $E_g$  และ  $a$  ของสารกึ่งตัวนำ III-V-Bi ที่  $T=295 K$  [32]

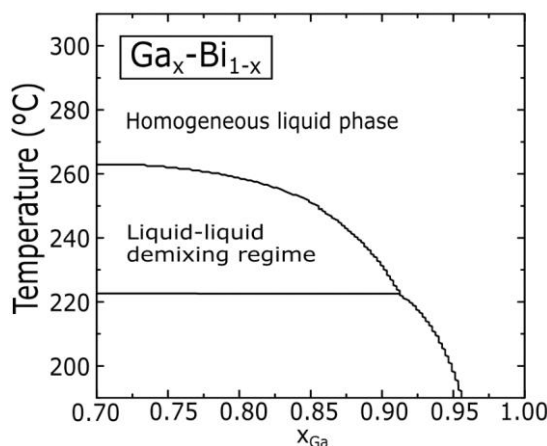


อัตราส่วนความเข้มข้นของ Bi ต่อสารกึ่งตัวนำ III-V-Bi มีผลต่อการลดลงของ  $E_g$  ได้มากถึง 90 meV/%Bi [15] ปัจจัยที่สำคัญของการปลูกผลึกสารกึ่งตัวนำอย่าง GaAsBi ในระดับ 3D และ 2D คือ อุณหภูมิการปลูกที่ต่ำ 280-350°C ซึ่งทำให้สารกึ่งตัวนำมีความเข้มข้นของ Bi ได้มากที่สุด งานวิจัยที่มี Bi สูงสุดอยู่ที่ประมาณ 22% [33], [34], [35] การปลูกผลึกที่มี Bi อุณหภูมิการปลูกเป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมไปกับความดันไอของ Bi ที่ต้องอยู่ในระดับที่เหมาะสม เพราะหากมีความดันไอที่มากเกินไปจะทำให้ผลึกสารกึ่งตัวนำเกิดข้อบกพร่อง (Defect) ได้ดังรูปที่ 2.10 [36]



รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการปลูก - ความดันไอของ Bi [36]

การทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สนใจการปลูกผลึกโครงสร้างนาโน GaAsBi ด้วยเทคนิค DE ทำให้พอประมาณการได้ว่า การปล่อยหยดโลหะของ GaBi ลงบนแผ่นฐาน GaAs ควรทำที่อุณหภูมิต่ำ และมีความดันไอของ Bi ที่ไม่สูงเกินไปเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดข้อบกพร่องในขั้นตอนการปล่อยหยดโลหะ อุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกปล่อยหยดอยู่ที่ประมาณ 225-300°C โดยพิจารณาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของ Ga-Bi Phase Diagram [17] ในรูปที่ 2.11 ซึ่งผู้วิจัยจะเลือกอุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกผลึกรวมทั้งอัตราส่วนความเข้มข้นของ Ga:Bi ในบทที่ 3 ต่อไป



รูปที่ 2.11 Ga-Bi Phase Diagram [17]



## บทที่ 3

### การปลูกโครงสร้างและการวัดลักษณะสมบัติ

เนื้อหาในบทนี้จะอธิบายวิธีการปลูกโครงสร้างและการวัดลักษณะสมบัติของชิ้นงานทั้งหมดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งทำการปลูกผลึกชิ้นงานทั้งหมดด้วยระบบเอพิแทกซีลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy: MBE) ของบริษัท Riber รุ่น 32P ของห้องปฏิบัติการวิจัยอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Device Research Laboratory: SDRL) ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีหัวข้อวิจัยหลักเป็นการปลูกผลึกโครงสร้างนาโนควอนตัมริง (Quantum Rings: QRNs) มีธาตุหลักเป็น Gallium(Ga), Arsenic(As) และ Bismuth (Bi) ด้วยเทคนิคดรอปเล็ตเอพิแทกซี (Droplet Epitaxy: DE) ชิ้นงานถูกศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM), เทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy) และ สมบัติเชิงแสงด้วยโฟโตลูมิเนสเซนส์สเปกโทรสโกปี (PL) ตามลำดับ มีหัวข้อวิจัยรอง คือ การปลูกผลึกแบบรูปลายตารางอินเดียมแกลเลียมอาเซไนด์บนแผ่นฐานแกลเลียมอาเซไนด์ (InGaAs/GaAs) เพื่อหาเงื่อนไขสำหรับการปลูกผลึกอินเดียมแกลเลียมอาเซไนด์บิสไมด์บนแผ่นฐานแกลเลียมอาเซไนด์ (InGaAsBi/GaAs) ชิ้นงานถูกศึกษาด้วย AFM และการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (XRD) ตามลำดับ

ขั้นตอนการปลูกโครงสร้างนั้นมีการเตรียมชิ้นงานตั้งแต่ก่อนเข้า MBE โดยเนื้อหาจะแยกออกเป็น 5 ขั้นตอน ได้แก่ 1. ระบบเอพิแทกซีโมเลกุล ที่อธิบายส่วนประกอบของ MBE 2. การเตรียมชิ้นงานก่อนการปลูกโครงสร้างนาโนด้วย MBE 3. การปลูกผลึกโครงสร้างนาโน InGaAs/GaAs และ InGaAsBi/GaAs ด้วย MBE ของหัวข้อวิจัยรอง, 4. การปลูกผลึกโครงสร้างนาโนควอนตัมริง (QRNs) ของ GaAsBi ของหัวข้อวิจัยหลัก จะอธิบายเทคนิคและเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการปลูก รวมถึงการแก้ปัญหาระหว่างการทำวิจัย และ 5. การตรวจวัดลักษณะสมบัติ จะอธิบายหลักการของเทคนิคที่ใช้วัดสมบัติของโครงสร้างนาโน (NSs) ที่ได้ คือ AFM, XRD, PL และ Raman Spectroscopy ตามลำดับ

#### 3.1 ระบบเอพิแทกซีลำโมเลกุล (MBE)

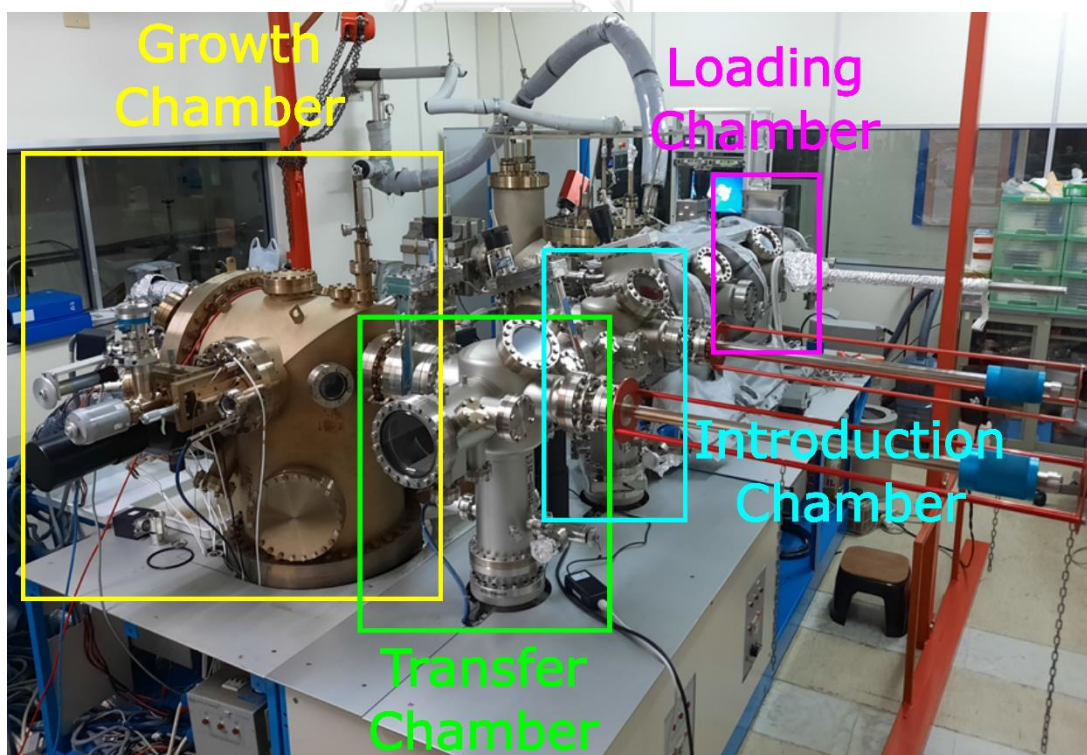
ระบบของเอพิแทกซีลำโมเลกุล เป็นระบบที่ภายในมีภาวะสุญญากาศสูงยิ่ง (Ultra High Vacuum) ที่ประกอบด้วย 4 ห้องหลัก ได้แก่

ห้องโหลดชิ้นงาน (Loading Chamber) เป็นห้องแรกสุดสำหรับการโหลดชิ้นงานเข้าสู่ระบบของ MBE โดยการโหลดชิ้นงาน จะต้องทำให้ความดันบรรยากาศของทั้งภายในห้องโหลดชิ้นงานและภายนอกเท่ากันก่อน ถึงจะสามารถเปิดให้โหลดชิ้นงานได้ โดยปกติจะทำการอัดแก๊สไนโตรเจนเพื่อเพิ่มความดันบรรยากาศของห้องโหลดชิ้นงานให้เท่ากับภายนอก หลังจากทำการโหลดชิ้นงานแล้ว จะทำการดูดอากาศออกด้วยเทอร์โบปั๊มเพื่อทำให้ความดันบรรยากาศมีค่าน้อยกว่า  $10^{-6}$  torr ถึงจะสามารถเปิดเกรตระหว่างห้องโหลดชิ้นงาน และ ห้องอินโทรดักชันได้

ห้องอินโทรดักชัน (Introduction Chamber) เป็นห้องที่มีไว้สำหรับการอบชิ้นงาน เพื่อกำจัดน้ำและออกไซด์ที่บริเวณผิวหน้าของชิ้นงานก่อนนำเข้าห้องปลูก

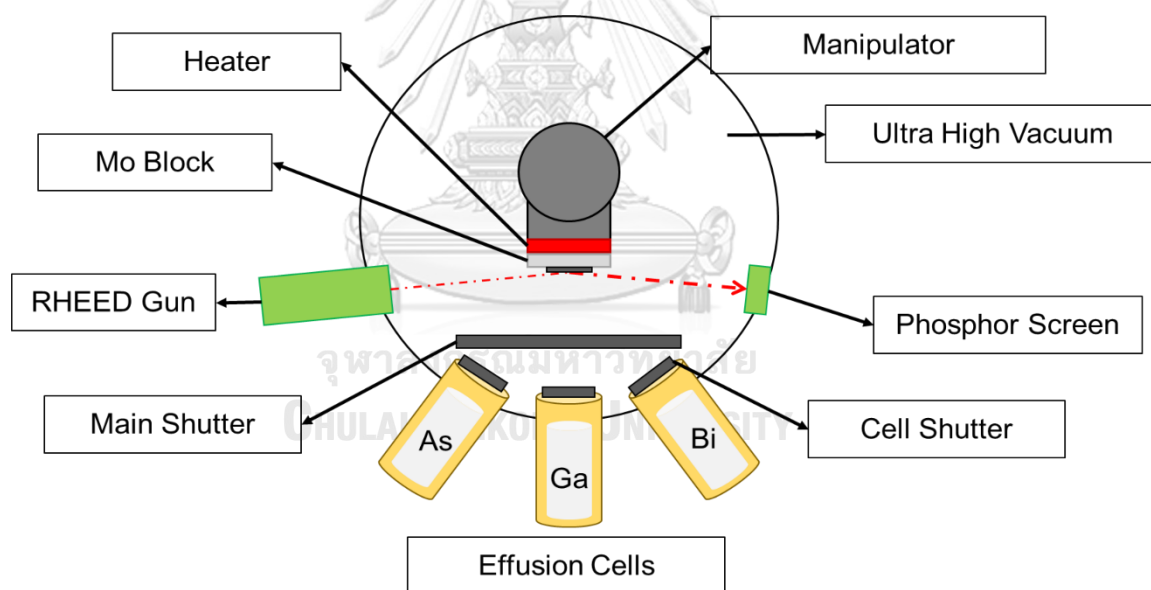
ห้องทรานสเฟอร์ (Transfer Chamber) เป็นห้องที่มีความสะอาดมากที่สุดในระบบของ MBE เพราะเป็นห้องที่เชื่อมต่อระหว่างห้องอินโทรดักชันและห้องปลูก ทำให้ต้องการความสะอาดมากที่สุดหรือมีความดันบรรยากาศในระดับ UHV ที่สูง เพื่อป้องกันไม่ให้ห้องปลูกเกิดความสกปรก

ห้องปลูก (Growth Chamber) เป็นห้องหลักที่ใช้ในการปลูกผลึก ซึ่งปกติจะเป็นห้องที่มีความสกปรกมากที่สุด เพราะหลังจากการปลูกผลึกแล้วนั้น ไอของธาตุที่ล่องลอยอยู่ไม่สามารถกำจัดออกไปได้ทั้งหมดในทันที ต้องใช้เวลาในการกำจัด โดยมีรูปที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบของเครื่อง MBE



รูปที่ 3.1 ภาพถ่าย MBE รุ่น 32P ยี่ห้อ RIBER ของห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

การทดลองนี้ใช้ระบบเอพิแทกซีลำโมเลกุลในรูปที่ 3.1 ทำการปลูกผลึกภายใต้ UHV ที่วัดค่าความดันได้น้อยกว่า  $1 \times 10^{-9}$  torr ด้วยเกจวัดความดันไอ (Ionization Gauge) ในระหว่างทำการปลูกนั้นจะทำการลดอุณหภูมิของ Growth Chamber ด้วยไนโตรเจนเหลว เพื่อทำการดึงสสารที่ล่องลอยอยู่ภายใน Growth Chamber ที่อาจทำให้ชิ้นงานสกปรก (Contamination) รวมถึงการลดความดันไอในระบบให้อยู่ในระดับ UHV ระบบ MBE ที่ใช้นี้เป็นรุ่น 32P มีแหล่งธาตุที่เป็นของแข็ง (Solid Source) ซึ่งบรรจุอยู่ในเซลล์บรรจุสาร (Effusion Cells) ที่มีเตา (Crucibles) เป็นตัวควบคุมอุณหภูมิ ควบคุมการเปิด-ปิดเซลล์ด้วย Main Shutter และ Cell Shutter สามารถวัดปริมาณสารได้ด้วยเครื่องวิเคราะห์มวล QMS ในขณะที่ปลูกชิ้นงาน ปริมาณสารสำหรับการปลูกผลึกจะใช้เกจวัดความดันไอ เพื่อวัดค่าความดันไอของแต่ละธาตุเทียบกับอุณหภูมิของ Crucible ที่ให้แก่ Effusion Cells การวัดค่าความดันไอ จะสามารถหาค่าความดันไอของธาตุที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการปลูกชิ้นงานและเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิสำหรับการปลูกผลึกชิ้นงานครั้งถัดไป และ มีการใช้ระบบ Reflection High Energy Electron Diffraction (RHEED) เพื่อวิเคราะห์ผิวชิ้นงานขณะทำการปลูก ดังรูปที่ 3.2 ที่แสดงส่วนประกอบของ Growth Chamber

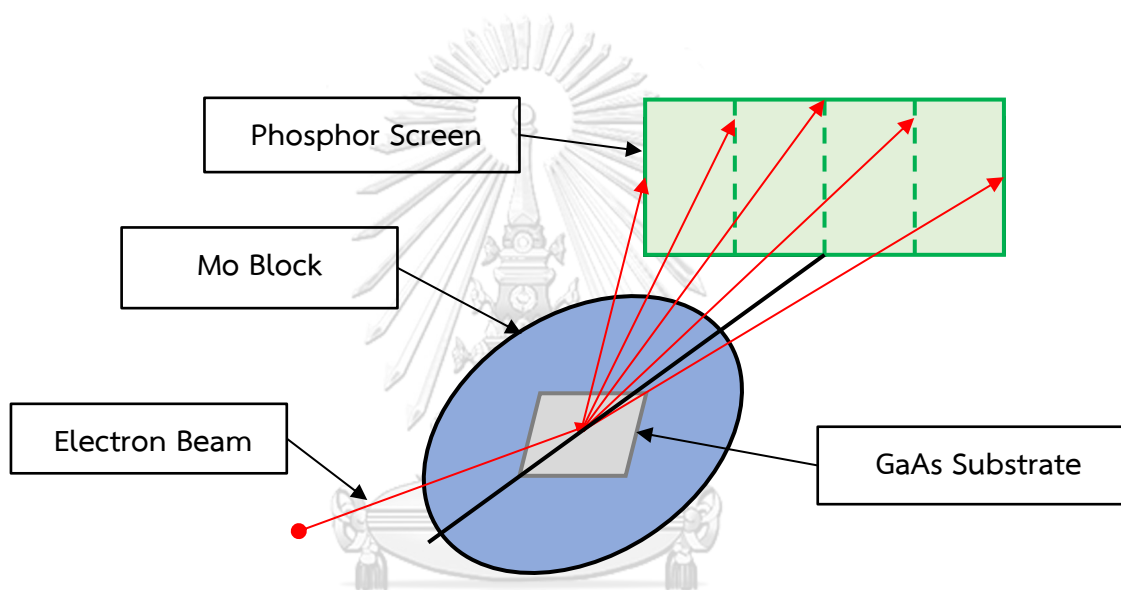


รูปที่ 3.2 ห้องปลูก (Growth Chamber)

ชิ้นงานที่ปลูกในระบบ MBE จะถูกติดด้วย In บน Mo Block โดยโหลดชิ้นงานไปที่ Manipulator ของ Growth Chamber ซึ่งมี Heater อยู่ด้านหลัง Mo Block เพื่อให้อุณหภูมิแก่ชิ้นงาน และ ยังสามารถปรับมุมของ Manipulator เพื่อวัดค่าความดันไอที่มุม  $270^\circ$  และ มุมปลูกที่  $325^\circ$

### 3.2 Reflection High Energy Electron Diffraction (RHEED)

RHEED เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ผิวชิ้นงานขณะทำการปลูกผลึกของ MBE สามารถวิเคราะห์ผลได้ในขณะที่ปลูก ระหว่างการปลูกจะใช้ปืนอิเล็กตรอน (RHEED Gun) ยิงลำอิเล็กตรอน (Electron Beam) ไปที่บริเวณพื้นผิวของแผ่นฐานชิ้นงานที่ติดอยู่บน Mo Block แล้วสะท้อนไปที่ฉากฟอสเฟออร์ (Phosphor Screen) มีการทำงานของระบบด้วยการจ่ายแรงดันและกระแสให้กับปืนอิเล็กตรอน เพื่อควบคุมลำของอิเล็กตรอนจากปืนอิเล็กตรอน ซึ่งลำอิเล็กตรอนจะสะท้อนและแทรกสอดที่ผิวหน้าของชิ้นงานด้วยมุมที่เล็กมาก ( $\sim 1-3^\circ$ ) ตกกระทบที่ Phosphor Screen เกิดเป็นลวดลายรูปแบบต่างๆ โดยสามารถนำลวดลายที่ได้ไปศึกษาเพื่อทำการปลูกชิ้นงานได้ดังรูปที่ 3.3

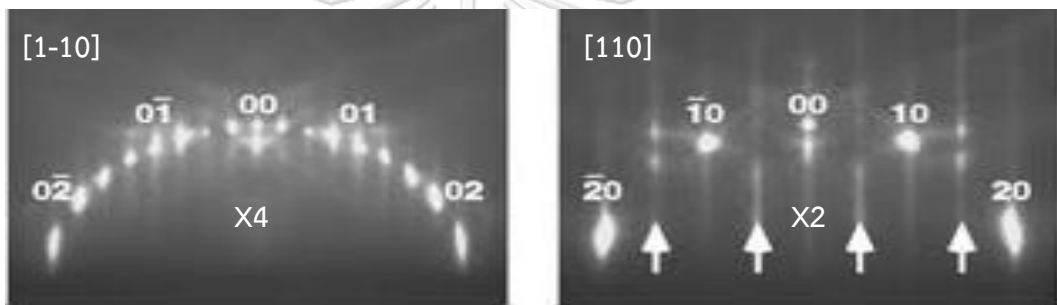


รูปที่ 3.3 แสดงแผนภาพการทำงานของ RHEED

ในการปลูกชิ้นงานด้วยระบบ MBE จะต้องศึกษารูปแบบลวดลายของแผ่นฐานก่อน เพื่อใช้สำหรับขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานสำหรับการปลูกผลึก รวมทั้งการเทียบอัตราการปลูก (Calibration) ที่สัมพันธ์กับปริมาณธาตุที่ระเหิดออกมาต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของเซลล์ธาตุนั้นๆ ซึ่งอาศัยความเข้มของแสง (Specular Beam) ในระหว่างการปลูกของรูปแบบ RHEED (RHEED Pattern) สามารถคำนวณหาความเร็วในการปลูกของธาตุที่ปล่อยออกมาได้ โดยอัตราการปลูกมีหน่วยเป็นชั้นโมนอต่อวินาที (Monolayer per sec: ML/s) ในงานวิจัยนี้ใช้แผ่นฐาน GaAs (001) ทำให้ต้องใช้แผ่นฐาน GaAs สำหรับการเทียบอัตราการปลูกของ Ga เพื่อปลูกชั้นบัพเฟอร์ โดย RHEED Pattern ของ GaAs, การเทียบอัตราการปลูกด้วยแผ่นฐาน GaAs และ การปลูกชั้นบัพเฟอร์ จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

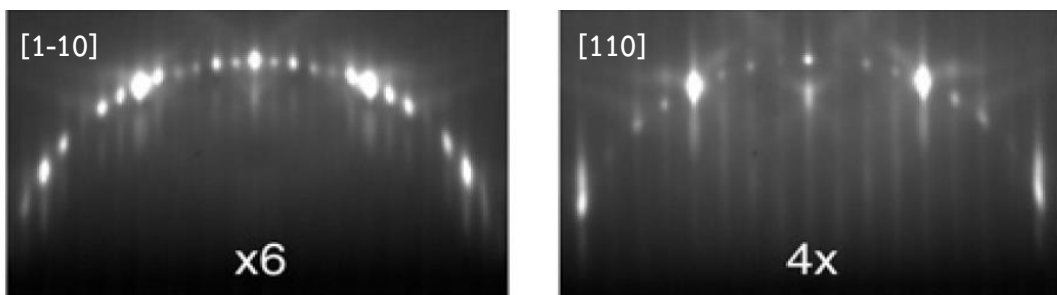
### 3.2.1 RHEED Pattern on GaAs Substrate

แผ่นฐาน GaAs ถูกศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะของโครงสร้างภายใต้ RHEED Pattern ของ MBE แผ่นฐาน GaAs ที่มีลักษณะผิวที่เรียบจะมี RHEED Pattern เป็น (2x4) Streaky Pattern ภายใต้ความดันไอของ  $As_4$  เข้มข้นสูง (As-rich) อุณหภูมิแผ่นฐาน 480-600°C มี Specular Beam เป็น 2 และ 4 ในทิศทาง [1-10] และ [110] ตามลำดับ [37] ดังรูปที่ 3.4 แผ่นฐานตั้งต้นก่อนทำการปลูกนั้นมักไม่เกิด Streaky Pattern เนื่องจาก GaAs ที่ผ่านการให้อุณหภูมิเพื่อกำจัดออกไซด์บริเวณผิวหน้าจะไม่เรียบ จึงต้องมีการปลูกชั้นบัฟเฟอร์ก่อนทุกครั้งและมักเป็นสารประกอบเดียวกันกับแผ่นฐานรองรับเสมอแต่บางครั้งก็สามารถทำการปลูกบัฟเฟอร์บนแผ่นฐานที่ต่างชนิดกันได้ด้วยเหมือนกัน ในระหว่างการปลูกนั้นหากเกิดการเปลี่ยนแปลงใดที่บริเวณพื้นผิวของชิ้นงานจะสามารถศึกษาและวิเคราะห์ RHEED Pattern ได้



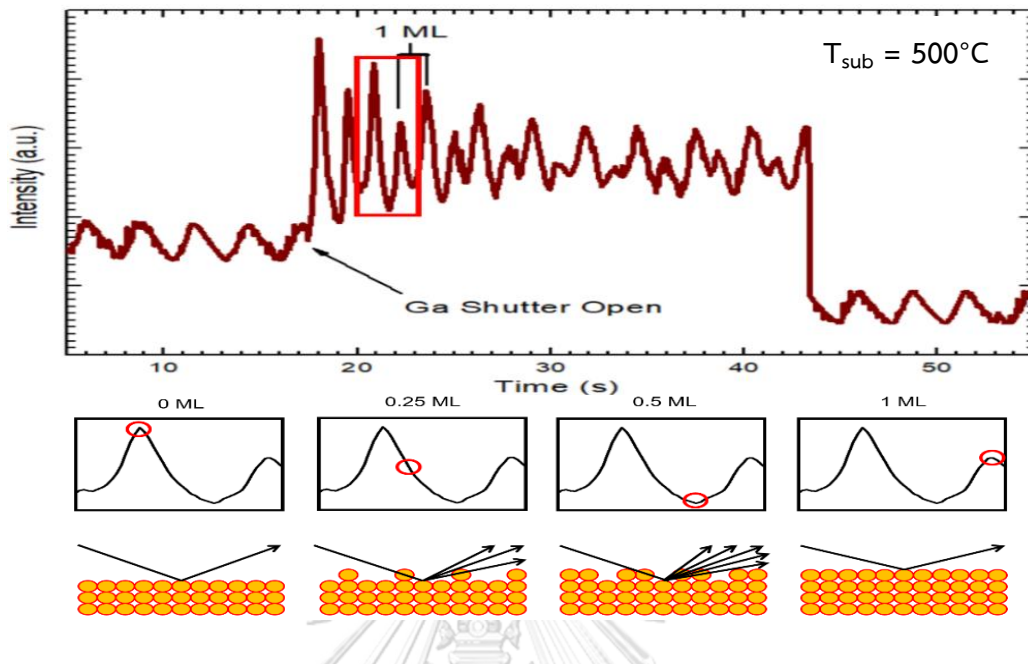
รูปที่ 3.4 2x4 Streaky Pattern ของแผ่นฐาน GaAs ภายใต้ความดันไอของ As-rich [37]

Streaky Pattern จะมีความแตกต่างกันไปหลายแบบ เช่น (4x4) Streaky Pattern ภายใต้ความดันไอของ As-rich อุณหภูมิประมาณ 480-500°C ทำให้เย็นตัวลง RHEED Pattern จาก (2x4) จะเปลี่ยนเป็น (4x4) หรือ หลังการปล่อยหยุดไหล Ga ภายใต้ความดันไอของ  $As_4$  ที่เข้มข้นต่ำและอุณหภูมิแผ่นฐานสูง (500°C) พื้นผิวแผ่นฐานจะเกิด Ga เข้มข้นสูง (Ga-rich) จะเกิด (4x6) Streaky Pattern [37] ดังรูปที่ 3.5 เป็นต้น



รูปที่ 3.5 4x6 Streaky Pattern ของแผ่นฐาน GaAs ภายใต้ความดันไอของ Ga-rich [37]

### 3.2.2 การเทียบอัตราการปลูกสารธาตุที่เป็นของแข็ง (Calibration of Solid Source)



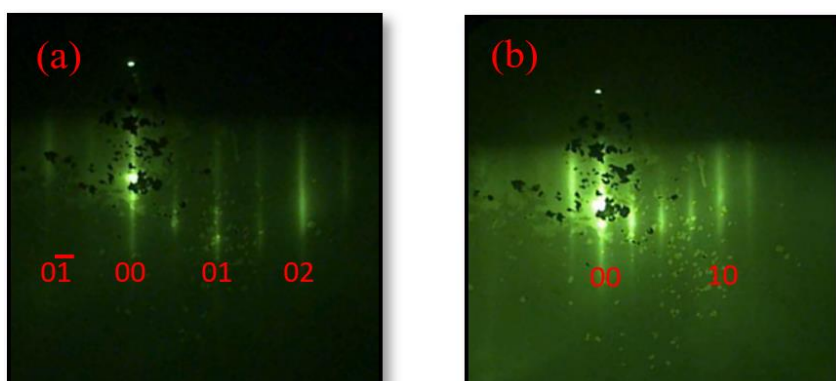
รูปที่ 3.6 กราฟแสดงการเทียบอัตราการปลูกธาตุ Ga ที่อุณหภูมิ 790°C ที่อุณหภูมิแผ่นฐาน 500°C ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

ในการปลูกผลึกชั้นงานสารกึ่งตัวนำด้วย MBE แต่ละครั้งต้องการความแม่นยำของอัตราความเร็วการปลูกที่แน่นอน ซึ่งนับเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างยิ่งในตอนเริ่มต้น หากอัตราความเร็วการปลูกไม่ถูกต้อง โครงสร้างที่สังเคราะห์ออกมาอาจมีความหนาที่มากเกินไปหรือน้อยเกินไปก็ได้ จึงต้องมีการเทียบอัตราการปลูก (Calibrate) ไว้ทุกครั้งก่อนการปลูก เช่น การ calibrate ธาตุ Ga สามารถทำได้ง่ายและแม่นยำด้วยการปลูก GaAs บนแผ่นฐาน GaAs ซึ่งทำการปลูกผลึกภายใต้ความดันไอของ As-rich ที่อุณหภูมิแผ่นฐานเท่ากับ 500 °C ซึ่ง GaAs จะถูกปลูกลงบนแผ่นฐาน GaAs ที่ละชั้น โดยในระหว่างนั้นสามารถดูความเข้มของแสง (Specular Beam) ที่ Phosphor Screen โดยรูปที่ 3.6 แสดงการจัดเรียงตัวของ GaAs บนแผ่นฐาน GaAs หลังเปิด Ga Shutter ซึ่งในตอนเริ่มต้นการปลูกความเข้มของ Specular Beam จะสูงที่สุด (0 ML) เพราะพื้นผิวที่เป็น Ga หลังการจัดเรียงอะตอมของชั้น As ความเข้มของ Specular Beam ที่ได้จาก RHEED จะลดลงจนมืดเนื่องจากเกิดการจัดเรียงตัวของ As (0-0.5 ML) และจะสว่างขึ้นอีกครั้งเพราะ Ga เริ่มจัดเรียงตัวที่ผิว (0.5-1 ML) จะมีความเข้มสูงสุดที่ลดลงหลังการจัดเรียงตัว เราจะทำการนับจำนวนชั้นโมโนที่เกิดขึ้นจากการกระปริบของแสง (ความเข้มของ Specular Beam ที่เปลี่ยนไปจนสว่างขึ้นอีกครั้ง) ต่อเวลาที่ใช้ทั้งหมดในหน่วยวินาที เราจะได้อัตราความเร็วการปลูกของ Ga ออกมาได้หน่วย ML/s

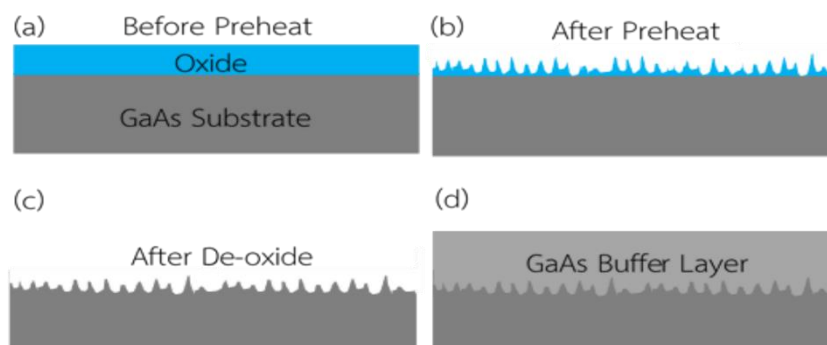


### 3.2 การเตรียมชิ้นงานและการปลูกชั้นบัฟเฟอร์

การปลูกชั้นบัฟเฟอร์ ก่อนอื่นนั้นต้องทำการเตรียมชิ้นงานแผ่นฐาน GaAs (001) ที่ผ่านกระบวนการกำจัดชั้นออกไซด์อย่างหยาบที่เรียกว่า Preheating ในระบบ UHV ที่อุณหภูมิ 450 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่ Introduction Chamber จากนั้นทำการนำชิ้นงานเข้าสู่ Growth Chamber เพื่อทำการกำจัดชั้นออกไซด์อีกครั้ง แต่กระบวนการนี้จะใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าครั้งแรก ภายใต้สภาวะความดันไอ As<sub>4</sub> ที่  $6.0 \times 10^{-6}$  torr เพื่อป้องกันการระเหิดของ As<sub>4</sub> ที่แผ่นฐาน การกำจัดออกไซด์ใช้อุณหภูมิ 580°C หรือมากกว่าเล็กน้อยเพื่อป้องกันการผิดพลาดของตัววัดอุณหภูมิ เป็นเวลา 30 นาที ที่เรียกว่า De-oxide ถัดมาจะเป็นการปลูกชั้นบัฟเฟอร์ GaAs ที่มีความหนา 300 nm ใช้อัตราความเร็วการปลูกที่ 0.60 ML/s ที่ความดันไอของ Ga มีค่าเท่ากับ  $1.1 \times 10^{-7}$  torr ซึ่งใช้เวลา 30 นาที การปลูกจะทำการเปิด Cell Shutter ของ Ga ภายใต้ความดันไอ As-rich ที่อุณหภูมิ 580°C จะมี RHEED Pattern ที่แสดงขึ้นหลังการกำจัดชั้นออกไซด์แต่จะมีลักษณะที่ไม่เป็นเส้นคม แสดงความขรุขระหลังจากออกไซด์หลุด ลักษณะ RHEED Pattern ของแผ่นฐาน GaAs ที่มีผิวเรียบจะเป็นรูปแบบ (2x4) Streaky Pattern ดังรูปที่ 3.7(a) และ 3.7(b) โดย RHEED Pattern ที่มีจะเกิดในทิศทาง [110] และ [1-10] ของแผ่นฐาน GaAs (001) [37] ตามลำดับ บางครั้งการปลูกชั้นบัฟเฟอร์แล้ว Streaky Pattern ไม่คมหรือไม่เกิดขึ้น อาจมีสาเหตุมาจากอุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกชั้นบัฟเฟอร์มีอุณหภูมิที่สูงเกินไปจนทำให้ As<sub>4</sub> ที่จับกับ Ga เกิดการระเหิดออกไปจนหมดเหลือเพียง Ga ที่พื้นผิวของแผ่นฐานก็ได้ กลายเป็นแผ่นฐานที่มีเพียง Ga (Ga-rich) และไม่เรียบ หรือ อาจเกิดจากการที่กำจัดออกไซด์ตั้งแต่กระบวนการในช่วงข้างต้นที่ทำการกำจัดออกไซด์โดยใช้เวลาสั้นเกินไป ซึ่งกระบวนการตั้งแต่ก่อนทำการ Preheating ไปจนถึงการปลูกชั้นบัฟเฟอร์สามารถดูแผนภาพดังรูปที่ 3.8(a)-(d)



รูปที่ 3.7 (2x4) Streaky Pattern ของ GaAs (001) (a) [110] และ (b) [1-10]



รูปที่ 3.8 กระบวนการเตรียมชิ้นงานตั้งแต่ก่อนทำการ Preheating ไปจนถึงการปลูกชั้นบัฟเฟอร์ (a) ก่อนการ Preheat (b) หลังการ Preheat (c) หลังการ De-oxide (d) หลังการปลูกชั้นบัฟเฟอร์

### 3.3 การปลูกผลึกโครงสร้างนาโน แบบรูปลายตาราง (CHP) บนแผ่นฐาน GaAs

การปลูกโครงสร้างบัลก์ที่มีส่วนผสมของ Bi เป็นการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมต่อการปลูกโครงสร้างนาโนและเปรียบเทียบ GaAsBi ต่อไป โดยการต่อยอดงานวิจัยการปลูกควอนตัมดอทบนแบบรูปลายตาราง (Cross-Hatch Pattern: CHP) อินเดียมแกลเลียมอาเซไนด์บนแผ่นฐานแกลเลียมอาเซไนด์ (InGaAs/GaAs) และ อินเดียมแกลเลียมอาเซไนด์บิสไมด์บนแผ่นฐานแกลเลียมอาเซไนด์ (InGaAsBi/GaAs) [38], [39]

#### 3.3.1 การปลูก InGaAs CHP บนแผ่นฐาน GaAs

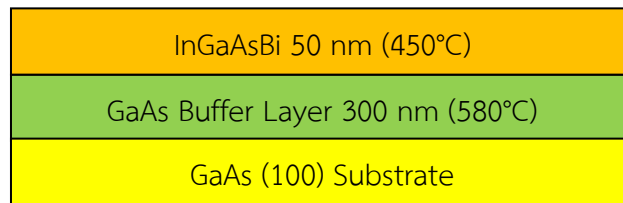
การทดลองนี้ทำการปลูกบนแผ่นฐาน GaAs (001) ที่ทำการกำจัดออกไซด์ที่พื้นผิวออกที่อุณหภูมิ 580°C เป็นเวลา 30 นาที และทำการปลูกชั้นบัฟเฟอร์ GaAs อุณหภูมิ 580°C เพื่อทำการกลบชั้นที่ผ่านการกำจัดออกไซด์ออก ซึ่งมีความหนา 300 nm จากนั้นทำการปลูก InGaAs ที่อุณหภูมิแผ่นฐาน 450°C ซึ่งมีอัตราการปลูกของ In เท่ากับ 0.024 ML/s, Ga เท่ากับ 0.200 ML/s ภายใต้อุณหภูมิของ As-rich เท่ากับ  $2 \times 10^{-6}$  torr มีอัตราส่วนของธาตุหมู่ V/III เท่ากับ 20 เป็นเวลา 13 นาที InGaAs จะมีความหนาเท่ากับ 50 nm และมี In เป็นส่วนประกอบเท่ากับ 10% In ระหว่างปลูกตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงภายใต้ RHEED Pattern ที่เปลี่ยนแปลงไป

#### 3.3.2 การปลูก InGaAsBi CHP บนแผ่นฐาน GaAs

มีการกำจัดออกไซด์ และ การปลูกชั้นบัฟเฟอร์ที่เหมือนกันกับก่อนหน้านี้ ซึ่ง InGaAsBi ทำการปลูกที่อุณหภูมิแผ่นฐาน 450°C มีอัตราการปลูกของ In เท่ากับ 0.024 ML/s, Ga เท่ากับ 0.200 ML/s และ ที่อุณหภูมิของ Bi เท่ากับ 375°C ซึ่งมีความดันไอของ Bi เท่ากับ  $7.6 \times 10^{-9}$  torr ภายใต้อุณหภูมิ



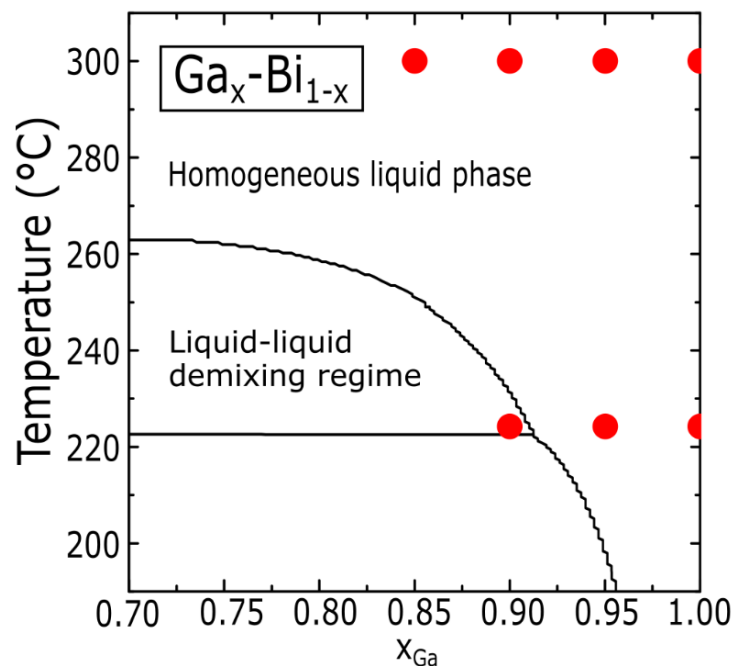
ความดันไอของ  $As_4$  ที่  $2 \times 10^{-6}$  torr ทำการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของการรวมตัวของสารกึ่งตัวนำภายใต้รูปแบบ RHEED Pattern เช่นเดียวกัน ทำการปลูกเป็นระยะเวลา 13 นาทีเพื่อให้ได้ความหนา 50 nm โดยได้แสดงรูปที่ 3.9 ที่เป็นโครงสร้างของ InGaAsBi บนแผ่นฐาน GaAs จากการคำนวณปริมาณธาตุของหมู่ V ต่อหมู่ที่ III ได้อัตราส่วน V/III เท่ากับ 20 โดยคิดคำนวณรวม Bi ด้วย จากค่าของความดันไอของ Bi รวมด้วย แต่เนื่องจากมีปริมาณที่น้อยมากจึงทำให้ที่ออกมาเป็นสัดส่วนที่ใกล้เคียงกับการปลูก InGaAs โดยไม่มี Bi



รูปที่ 3.9 ภาพตัดขวางชิ้นงานของโครงสร้างนาโน InGaAsBi/GaAs

### 3.4 การปลูกผลึก GaAsBi QRNs โดยเทคนิค DE

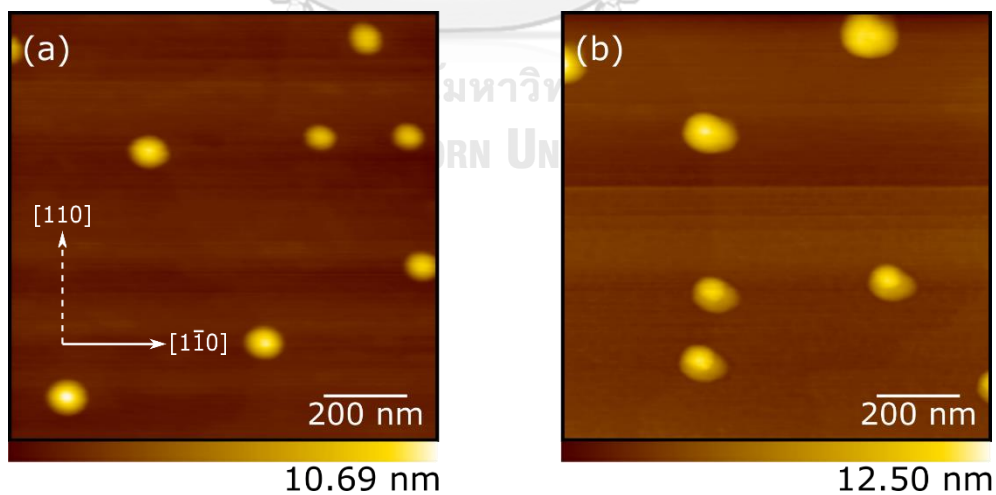
ในงานวิจัยนี้การปลูก GaAsBi QRNs ด้วยเทคนิค DE ซึ่งมีขั้นตอนการปลูกผลึก 2 ขั้นตอน คือ 1. การปล่อยหยดโลหะ GaBi ลงบนแผ่นฐาน GaAs 2. การตกผลึกของหยดโลหะ GaBi ภายใต้ความดันไอของ  $As_4$  โดยมีการเลือกเงื่อนไขดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 Ga-Bi Phase Diagram โดยวงกลมสีแดงแสดงเงื่อนไขที่ทำการวิจัย [17]

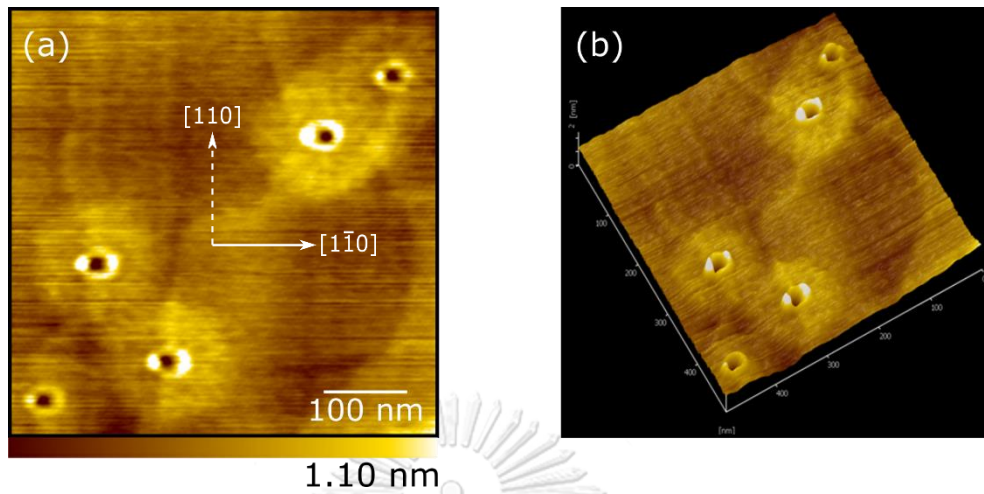
### 3.4.1 การปล่อยหยดโลหะ GaBi

GaAsBi QRNs ปลูกโดยเทคนิค DE ด้วย MBE ชั้นแรกของการปลูกนั้นคือการหาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปล่อยหยด GaBi ลงบนแผ่นฐาน GaAs ภายใต้บรรยากาศ UHV ที่มีค่าความดันไอต่ำกว่า  $1.5 \times 10^{-9}$  torr ซึ่งอาศัยการเลือกช่วงอุณหภูมิจาก Phase Diagram (รูปที่ 3.10) [17] และอุณหภูมิที่คาดเดาว่าเหมาะสม คือ  $225^{\circ}\text{C}$  หรือประมาณ  $498\text{ K}$  โดยพิจารณาจากการรวมตัวของ Ga และ Bi ที่อยู่ในรูปแบบของเหลวที่รวมตัวกันได้เป็นเนื้อเดียวกัน การทดลองทำการหยด GaBi ที่มีความหนา 2 ML โดยทำการเปิด Shutter ของ Ga และ Bi พร้อมกัน มีอัตราการความเร็วการปลูกของ Ga เท่ากับ  $0.20\text{ ML/s}$  และมี Bi เท่ากับ 5% และ 10% โดยพิจารณาควบคู่กับความดันไอของ Bi ไปด้วยและปรากฏกว่าความดันไอที่ใช้โดยเทียบอัตราส่วน  $V/III$  มีค่าเหมาะสม [36] ดังรูปที่ 3.11 (a) และ (b) แสดงภาพ AFM ของหยด GaBi ที่มี Bi 5% และ 10% ตามลำดับ แต่คาดว่าหยด GaBi ในภาพ AFM อาจเป็นโครงสร้างที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิห้อง [40] หยด GaBi ที่มี Bi 5% มีความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยเท่ากับ 10 และ 30 nm ตามลำดับ หยด GaBi ที่มี Bi 10% มีความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยเท่ากับ 12 และ 50 nm ตามลำดับ ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของหยด GaBi ทั้ง 2 อัตราส่วนเท่ากับ  $3 \times 10^9\text{ cm}^{-2}$  จะเห็นได้ว่า ชิ้นงานที่หยด GaBi มี Bi 5% มีความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เหมาะสม รวมทั้งการรวมตัวเกิดได้สมบูรณ์กว่าหยด GaBi ที่มี Bi 10% สามารถพิจารณาจาก Phase Diagram รูปที่ 3.10 ดังนั้นจึงทำการเลือกชิ้นงานที่มี Bi 5% นำไปใช้ในการปลูก GaAsBi NSs ต่อไป



รูปที่ 3.11 ภาพ AFM ของหยด GaBi ที่มี Bi (a) 5% และ (b) 10%

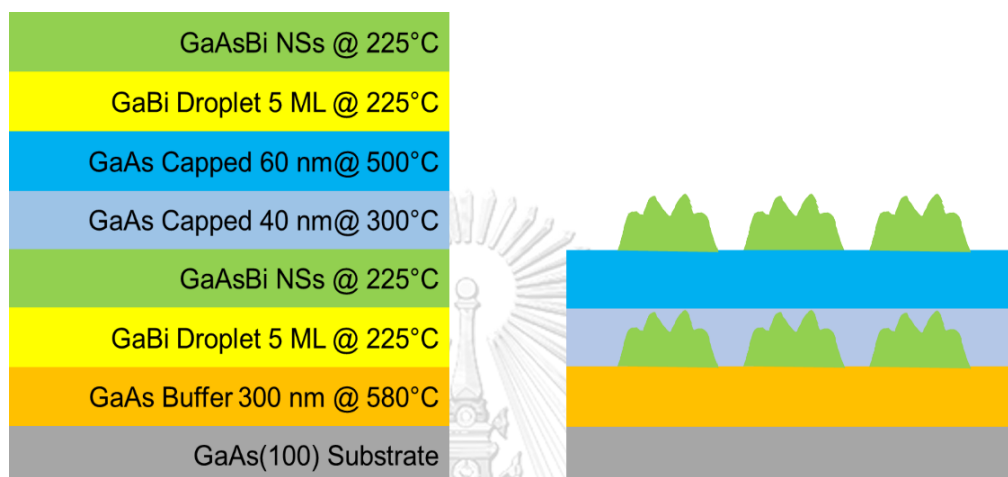
### 3.4.2 การตกผลึกหยาบ GaBi



รูปที่ 3.12 ภาพ AFM ของ GaAsBi NSs ที่หยด GaBi มี Bi 5% ความหนา 2 ML (a) ภาพ 2D และ (b) ภาพ 3D

การตกผลึกหยาบ GaBi ที่อยู่ในรูปของเหลวให้เปลี่ยนเป็น GaAsBi QRNs ภายใต้ความดันไอของธาตุหมู่ V ของ As หยด GaBi ที่อยู่ในรูปของเหลวจะค่อยๆเปลี่ยนจากโครงสร้างที่เป็นของเหลวไปเป็นผลึกของแข็งอย่างช้าๆ โดยขึ้นกับปริมาณความดันไอของ  $As_4$  ซึ่งหากมีปริมาณที่มากเพียงพอ ก็สามารถทำให้หยด GaBi ตกผลึกได้อย่างรวดเร็ว จะเกิดเป็น GaAsBi QDs ในขณะเดียวกันก็อาจทำให้เกิด GaAsBi NSs อย่างอื่นได้ด้วยเหมือนกัน การทดลองนี้ทำการตกผลึกที่อุณหภูมิ  $225^\circ C$  หยด GaBi มี Bi 5% ความหนา 2 ML ภายใต้ความดันไอของ  $As_4$  เท่ากับ  $1 \times 10^{-5}$  torr เป็นเวลานานเกินพอที่ RHEED Pattern ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ผลปรากฏว่าโครงสร้างนาโนที่ได้นั้นมีลักษณะเป็นหลุมมีความคล้ายแผ่นดิสก์ดังรูปที่ 3.12 แสดงภาพ AFM ของ GaAsBi NSs ที่หยด GaBi มี Bi 5% ความหนา 2 ML จากการตกผลึกเป็นผลให้หยด GaBi ที่มีความหนา 2 ML ถูกเปลี่ยนโครงสร้างให้กลายเป็นหลุมจากผลของ As ที่มีต่อ Ga มีมากกว่า Bi ซึ่งในระหว่างการตกผลึก เกิดผลึก GaAsBi NSs จากขอบของหยดโลหะเข้ามาสู่ศูนย์กลางอย่างรวดเร็วเนื่องจากความดันไอของ  $As_4$  ที่สูง ขณะเดียวกันอะตอม Ga เคลื่อนที่ออกจากจุดศูนย์กลาง (รูปที่ 4 ใน [9]) ทำให้ Bi บางส่วนถูกดันออกมาแทนที่จะจับตัวอยู่กับ Ga จึงเกิดโครงสร้างนาโนที่เป็นหลุมคล้ายแผ่นดิสก์ดังรูปข้างต้น ทำให้การตัดสินใจในการทดลองถัดไปเป็นการเพิ่มความหนาของหยด GaBi เพื่อให้สัดส่วนของหยด GaBi มี Ga และ Bi มากยิ่งขึ้นและสามารถเกิด QDs หรือ QRs ได้

การปลูก GaAsBi NSs มีภาพตัดขวางดังรูปที่ 3.13 แสดงการปลูกแบบ 2-step ที่ทำการปลูกชั้น GaAsBi NSs จากนั้นทำการกลบทับด้วยชั้น GaAs 40 nm ที่อุณหภูมิ 300°C และ 60 nm ที่อุณหภูมิ 500 °C เพื่อให้ผลการวัดสมบัติเชิงแสงที่ดี และ ปลูกชั้นโครงสร้างนาโนอีกครั้งเพื่อตรวจวัดลักษณะสัณฐานวิทยา



รูปที่ 3.13 แสดงภาพตัดขวางของชั้นงานและอุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกชั้นงาน GaAsBi QNRs

### 3.5 การตรวจวัดลักษณะสมบัติ

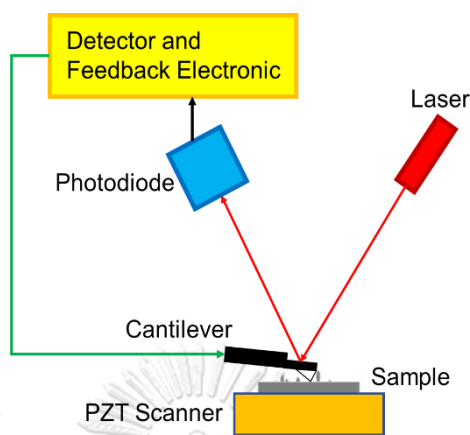
การตรวจวัดลักษณะสมบัติ จะอธิบายหลักการของเทคนิคที่ใช้วัดสมบัติของโครงสร้างนาโน (NSs) ที่ได้ คือ AFM, XRD, PL และ Raman Spectroscopy ตามลำดับ

CHULALONGKORN UNIVERSITY

#### 3.5.1 Atomic Force Microscopy (AFM)

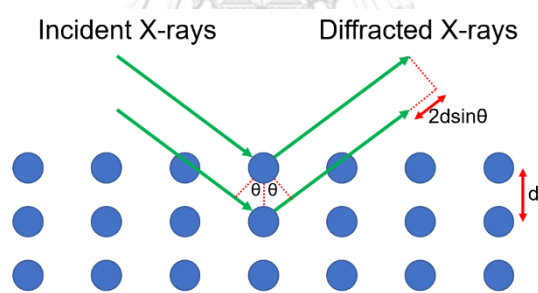
เทคนิคการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM) เป็นเครื่องมือสำหรับการวัดขนาดของโครงสร้างในระดับนาโนเมตร ซึ่งปกติสามารถใช้หาได้ทั้งขนาดความสูง ความกว้าง ความยาว การกระจายตัวหรือความหนาแน่นของโครงสร้างที่อยู่บนตัวอย่างได้ โดยการวัดนั้นจะอาศัยการยิงแสงเลเซอร์ลงไปที่คาน (Cantilever) ที่มีเข็ม (Tip) ติดอยู่แล้วสะท้อนแสงเข้าตัวไดโอดแสง (Photodiode) จากนั้นไดโอดแสงจะส่งสัญญาณไปที่ตัวตรวจจับ (Detector) เพื่อส่งข้อมูลย้อนกลับไปเข็ม ระหว่างที่ทำการตรวจวัดอยู่ตัวอย่างจะเคลื่อนที่ผ่านเข็ม เมื่อเข็มสัมผัสเข้ากับโครงสร้าง คานจะทำการยกขึ้นหรือยกลงตามลักษณะโครงสร้าง ทำให้เลเซอร์ที่สะท้อนเข้าตัว

ตรวจจับขยับขึ้นหรือลงตามไปด้วย จึงเกิดเป็นภาพเสมือนของโครงสร้างที่ได้ผ่านการประมวลผลโดยโปรแกรม Spicel32 ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แผนภาพการทำงานของ AFM

### 3.5.2 X-Ray Diffraction Spectroscopy (XRD)

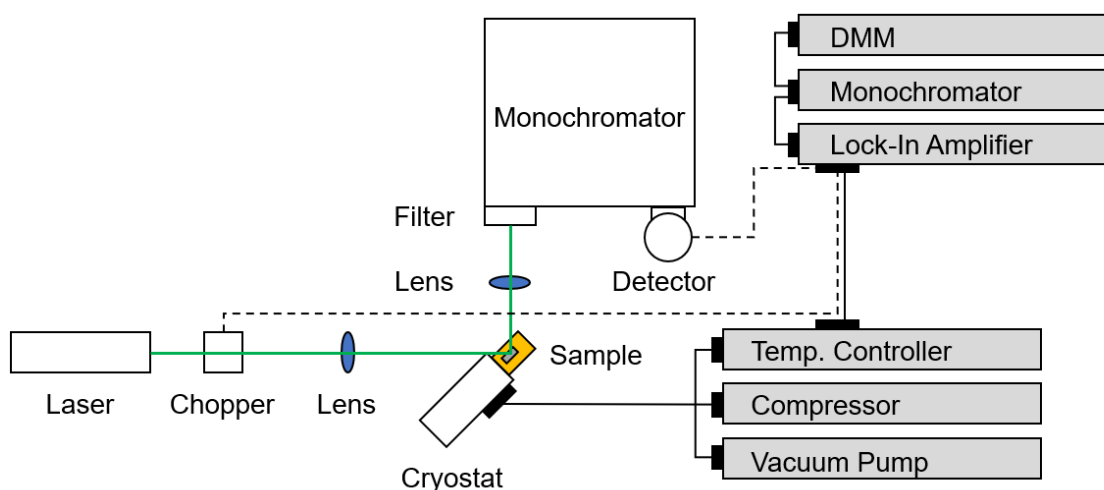


รูปที่ 3.15 หลักการของการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (XRD)

เทคนิคการวัดด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction Spectroscopy: XRD) เป็นเทคนิคที่ใช้ X-Ray Diffractometer ในการวัด ซึ่งใช้หลักการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เมื่อผ่านชั้นต่างๆ ของอะตอมหรือโมเลกุลภายในวัสดุหรือสารตัวอย่างนั้น แล้วทำการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่มุมต่างๆ ข้อมูลที่ตรวจวัดได้เมื่อผ่านการแปรผลแล้ว ทำให้สามารถพิจารณาโครงสร้างผลึกของวัสดุหรือสารตัวอย่างนั้นๆ ได้ดังรูปที่ 3.15 ซึ่งมีสมการที่เกี่ยวข้องคือ กฎของแบรกก์ในสมการที่ (3.1) โดย  $d$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก  $n$  คือ เลขจำนวนเต็ม  $\theta$  คือ มุมที่รังสีตกกระทบของรังสีเอ็กซ์ กระทำกับระนาบของผลึก และ  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นรังสีเอ็กซ์ที่ใช้ ตามลำดับ

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (3.1)$$

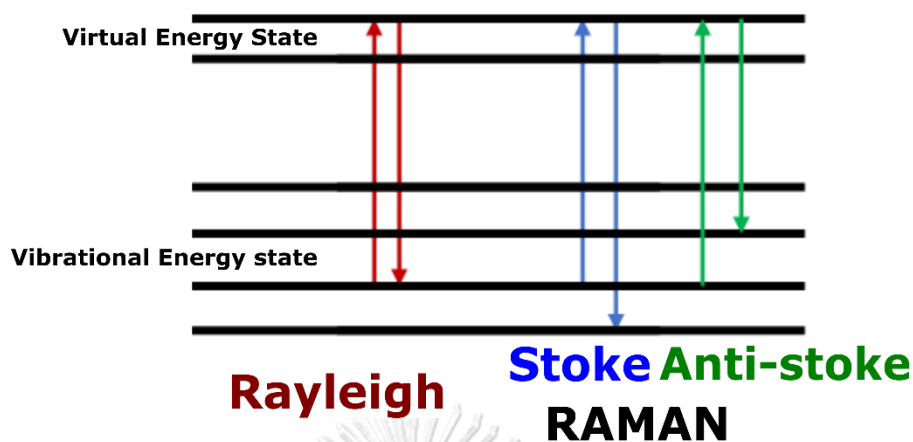
### 3.5.3 Photoluminescence Spectroscopy (PL)



รูปที่ 3.16 ระบบการวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ (PL)

เทคนิคการวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ (Photoluminescence Spectroscopy) อาศัยแหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่นค่าเดียว นั่นก็คือเลเซอร์ (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation: LASER) [41] ระบบที่ใช้ในการทดลองนี้จะใช้เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 532 nm หรือประมาณ 2.33 eV เป็นแหล่งกำเนิด ทำการยิงลำแสงผ่านชอปเปอร์ (Chopper) เพื่อเปลี่ยนสัญญาณของเลเซอร์ที่เป็นสัญญาณ DC ให้กลายเป็น AC ความถี่ 330 Hz เพื่อลดสัญญาณรบกวนของแหล่งจ่ายไฟที่มีค่า 50 Hz แล้วลำแสงเลเซอร์จะผ่านตัวกรองแสงชนิด HA500 เพื่อตัด Second Harmonic ของเลเซอร์ที่มีค่า 1064 nm แล้วทำการรวมแสงด้วยเลนส์นูนให้ลำแสงไปตกกระทบบนชิ้นงานที่บรรจุอยู่ในไครโอสแตท (Cryostat) ซึ่งเมื่อชิ้นงานได้รับพลังงานกระตุ้นจากเลเซอร์ที่มีค่ามากกว่า  $E_g$  แล้วชิ้นงานจะทำการดูดกลืนแล้วคายพลังงานออกมา ในกรณีของชิ้นงานที่เป็นวัสดุ Direct Band Gap พลังงานที่คายออกมาจะอยู่ในรูปแบบของแสง (Photon) และกรณีของชิ้นงานที่เป็นวัสดุ Indirect Band Gap พลังงานที่คายออกมาจะอยู่ในรูปแบบของความร้อน (Phonon) ซึ่ง GaAs, InGaAs, InGaAsBi และ GaAsBi เป็นวัสดุ Direct Band Gap แสงที่เปล่งออกมาจากวัสดุนั้นจะถูกเปล่งแสงผ่านเลนส์นูนเพื่อรวมแสงเช่นเดียวกับเลเซอร์ก่อนผ่านเข้าสู่โมโนโครมาเตอร์ (Monochromator) จะมีฟิลเตอร์ (Filter) เพื่อป้องกันแสงเลเซอร์สะท้อนเข้ารบกวน โดยจะทำการตัดแสงที่มีความยาวคลื่นชนิดเดียวกับเลเซอร์ นั่นก็คือ 532 nm จากนั้นในท้ายที่สุดแสงจะผ่าน Monochromator เข้าสู่ Photodetector โดยทำการแปลงค่าสัญญาณความต่างศักย์ที่ได้ด้วย LIA (Lock-In Amplifier) แล้วแสดงผลออกมาในรูปแบบกราฟบนคอมพิวเตอร์เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป โดยแสดงหลักการดังรูปที่ 3.16

### 3.5.4 RAMAN Spectroscopy



รูปที่ 3.17 แผนภาพหลักการของเทคนิครามานสเปกโทรสโคปี (RAMAN) [42]

เทคนิครามานสเปกโทรสโคปี (Raman Spectroscopy) เป็นเทคนิคการวัดทาลักษณะเฉพาะของธาตุที่อาศัยหลักการกระเจิงของแสงที่สารแต่ละตัวจะมีลักษณะการกระเจิงแสงไม่เหมือนกัน โดยเทคนิครามานสเปกโทรสโคปีจะไม่ทำลายตัวอย่าง เพราะไม่มีการสัมผัสกับสารตัวอย่าง ซึ่งใช้ตัวกระตุ้นเป็นแสงอินฟราเรดหรือก็คือแสงที่มีความยาวคลื่นสูง ให้สามารถวัดสารผ่านภาชนะบรรจุที่มีลักษณะใสได้ ซึ่งเทคนิครามานสเปกโทรสโคปีจะอาศัยการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของแสงอินฟราเรดที่ไปกระตุ้นแล้วปล่อยพลังงานออกมาไม่เท่ากับพลังงานที่ใช้กระตุ้นดังรูปที่ 3.17 ทำให้สามารถบอกความแตกต่างของสารที่อยู่ในวัสดุได้ [42]



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ในบทนี้จะเป็นการอภิปรายผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของ InGaAs CHP/GaAs และ InGaAsBi CHP/GaAs ซึ่งเป็นหัวข้อวิจัยรอง ส่วนในหัวข้อวิจัยหลัก GaAsBi QRNs ถูกศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวและสมบัติเชิงแสง การปลูกผลึก GaAsBi QRNs มีเงื่อนไขที่สำคัญ 3 อย่างคือ ความหนาของหยด GaBi, อุณหภูมิของแผ่นฐานในขณะปล่อยหยดโลหะและตกผลึก และ ความดันไอของ  $As_4$

การทดลองที่มุ่งเน้นเป็นหลักของงานวิจัยนี้ คือ การหาความหนาเริ่มต้นของหยด (GaBi) (2 ML, 5 ML และ 8 ML) เพื่อนำไปใช้เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความเข้มข้นของ Ga:Bi (0.95:0.05, 0.90:0.10 และ 0.85:0.15) รวมทั้งการหาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการปล่อยหยด GaBi และการตกผลึกของหยด GaBi (225°C และ 300°C) ที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาพื้นผิวและสมบัติเชิงแสงของ GaAsBi QRNs ซึ่งจะอธิบายในลำดับถัดไป

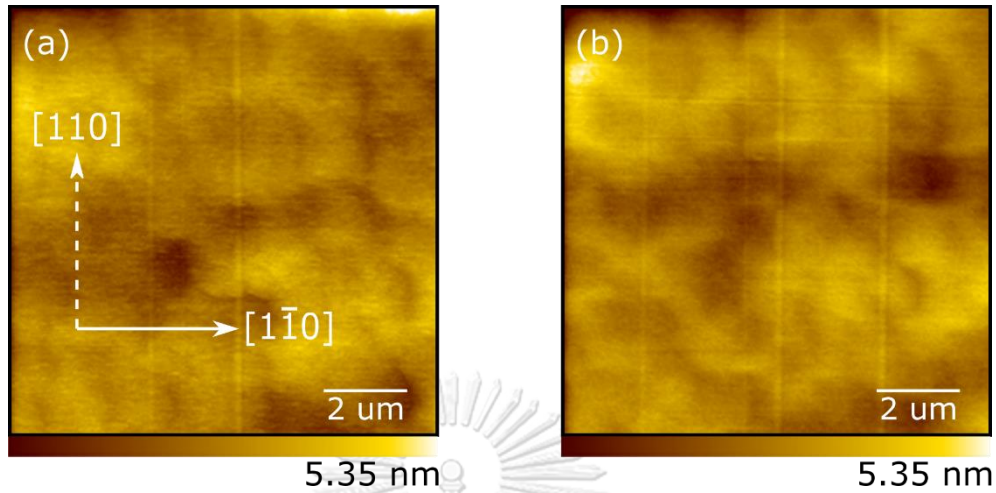
การศึกษสมบัติเชิงแสงจะอธิบายถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการศึกษสมบัติด้วยเทคนิค PL ปัญหาที่เกิดขึ้นนั้นมาจากการเปล่งแสง GaAsBi QRNs ที่ความเข้มข้นของแสงต่ำกว่าของชั้นกลบที่บับ GaAs การปลูกชั้นกลบที่อุณหภูมิสูง (500°C) ส่งผลให้ชั้นกลบที่บับเปล่งแสงได้ดีกว่า จึงแก้ปัญหาโดยการปลูกชั้นกลบที่บับที่อุณหภูมิต่ำ (300°C) ผลปรากฏว่า GaAsBi QRNs สามารถแสดงผลการเปล่งแสงออกมาได้ แต่มีความเข้มแสงต่ำมาก จึงสามารถที่จะต่อยอดการทดลองนี้ออกไปอีก เป็น การปรับปรุงสมบัติทางแสงของ GaAsBi QRNs ด้วยการอบอ่อน

#### 4.1 สัณฐานวิทยาพื้นผิว

ชิ้นงาน NSs ทำการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย AFM ได้ภาพแสดงโครงสร้างนาโน InGaAs และ InGaAsBi บนแผ่นฐาน GaAs ทำให้ผิวหน้าของโครงสร้างที่ได้ออกมามีรูปแบบคล้ายตารางไขว้กันซึ่งเรียกว่า แบบรูปลายตาราง (Cross-hatched Pattern: CHP) และมีการตรวจผลด้วย XRD เพื่อวิเคราะห์และแสดงให้เห็นว่าการเพิ่ม Bi ให้ InGaAs ในการปลูกส่งผลต่อโครงสร้างทางพื้นผิวทำให้ได้ CHP ออกมารวมทั้งส่งผลต่อความหนาแน่นที่เกิดด้วย



#### 4.1.1 InGaAs CHP/GaAs และ InGaAsBi CHP/GaAs

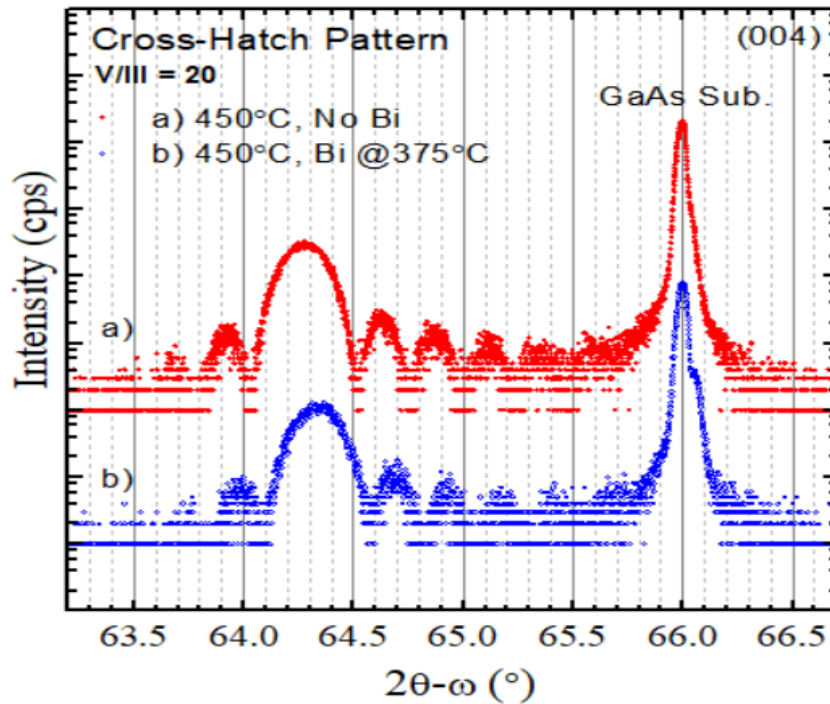


รูปที่ 4.1 ภาพ AFM โครงสร้างของ (a) InGaAs/GaAs และ (b) InGaAsBi/GaAs

จากรูปที่ 4.1(a) ลักษณะพื้นผิวที่ทำการวัด AFM แสดงดิสโลเคชัน (Dislocation) ของ InGaAs/GaAs เนื่องจากการที่ In ซึ่งมีค่าคงที่โครงผลึกไม่เท่ากับ GaAs เข้าไปในระบบทำให้เกิดความเครียดเนื่องจากขนาดของโครงผลึกที่มีความแตกต่างกัน โดยเมื่อมีความแตกต่างจนถึงจุดหนึ่งแล้ว โครงร่างผลึกจะเกิดการคลายความเครียด (Strain relaxation) การคลายความเครียดมีรูปแบบ 2 รูปแบบซึ่งได้แก่ ความเครียดแบบบีบอัด (Compressive strain) ที่เกิดจากการรวมตัวกันของสารประกอบที่มีค่าคงที่โครงร่างผลึกที่น้อยกว่าแผ่นฐาน และ ความเครียดแบบดึง (Tensile strain) เกิดจากการรวมตัวกันของสารประกอบที่มีค่าคงที่โครงร่างผลึกที่มากกว่าแผ่นฐาน ซึ่งเกิดการคลายความเครียดที่เกิดขึ้นส่งผลให้แทนที่จะได้โครงสร้างของสารกึ่งตัวนำ InGaAs ที่มีพื้นผิวเรียบเรียบ เนื่องจากการจัดเรียงของอะตอมที่มีความเป็นระเบียบกันของโครงสร้าง จะเกิดโครงสร้างที่มีลักษณะพื้นผิวไม่สม่ำเสมอเป็นแนวยาวทั้งในทิศทาง  $[110]$  และ  $[1-10]$  แทนซึ่งมีลักษณะเป็นเส้น การเกิดแบบรูปลายตารางจะเกิดขึ้นแบบสุ่มแต่สามารถทำให้เกิดแบบรูปลายตารางที่ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นได้ โดยการเพิ่มปริมาณสัดส่วนโมลของ In ให้มากขึ้น ดังนั้น In เป็นตัวแปรควบคุมหลักตัวแรกในการปลูก InGaAsBi เนื่องจากหากมี In ที่มากเกินไปจะส่งผลให้โครงสร้างพื้นผิวมีแบบรูปลายตาราง เนื่องจากเกิดการผ่อนคลายความเครียดมากเกิดไปของ In และอาจส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติอย่างอื่นทั้งโครงสร้างที่บริเวณพื้นผิว และ รวมถึงคุณสมบัติทางแสงด้วย

เมื่อควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ทั้ง In, Ga และ As ให้มีลักษณะเดียวกันแล้วทำการปลูก InGaAs ด้วยรูปแบบเดิมแต่มีการเพิ่ม Bi ในระหว่างการปลูก พบว่าลายตารางมีความถี่เท่ากันดัง

รูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าการใส่ Bi ที่อุณหภูมิ 375°C เข้าไปเป็นส่วนประกอบไม่ทำให้โครงสร้างแตกต่างจากเดิม หาก Bi มีปริมาณมากพอ ความถี่ของลายตารางควรเปลี่ยนแปลง เนื่องจากความเครียดของระบบถูกรบกวนโดย Bi [43]



รูปที่ 4.2 XRD Diffractogram ของ a) InGaAs/GaAs และ b) InGaAsBi/GaAs

ผลของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์บ่งบอกว่า Bi เกิดการรวมตัวที่พื้นผิวน้อยมาก ซึ่งจากรูปที่ 4.1(b) แสดงผลของ Bi ส่งผลต่อโครงสร้างทางพื้นผิวของ InGaAsBi นั้น เมื่อทำการ XRD ผลลัพธ์ในรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าค่าของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของที่มุม  $66^\circ$  มีลักษณะเป็นยอดที่ชัดเจนมาก บ่งบอกถึงความเป็นผลึกได้เป็นอย่างดีของแผ่นฐานที่เป็น GaAs เนื่องจากการปลูกที่อัตราการปลูกชั้นบัฟเฟอร์ที่ต่ำจึงแสดงผลของความเป็นผลึกดี และ ที่มุมระหว่าง  $64^\circ$  และ  $64.5^\circ$  มีลักษณะที่ค่อนข้างชัดเจน สามารถบ่งบอกได้ว่าพื้นผิวของชิ้นงานนั้นมีส่วนประกอบของ Bi ประกอบอยู่และส่งผลทำให้ค่าการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากเดิมของยอด InGaAs ที่แสดงเกิดการขยับเลื่อนไปทางขวาเล็กน้อยจากเดิม [44] จากการที่ชิ้นงานทำการปลูกเป็นเวลา 13 นาทีแล้วนั้น แสดงผลของความหนาที่คาดหวังว่าหนา 50 nm และ มี Bi เป็นองค์ประกอบ แต่ปรากฏว่ามี Bi อยู่เพียงเล็กน้อย อันเป็นผลเกี่ยวเนื่องมาจากอุณหภูมิของแผ่นฐานในระหว่างทำการปลูกที่อุณหภูมิสูงมากเกินไปถึง  $450^\circ\text{C}$  ทำให้แทนที่ Bi จะรวมตัวลงไปที่บริเวณพื้นผิว ไม่สามารถลงปรวมได้ เพราะปกติแล้วนั้นจุดหลอมเหลวของ Bi มีอุณหภูมิตั้งอยู่ที่ประมาณ  $272^\circ\text{C}$  การปลูก InGaAsBi ที่อุณหภูมิสูงถึง  $450^\circ\text{C}$  จึงให้ผลที่ไม่ดี เพราะในการปลูกฟิล์มที่มี Bi เป็นส่วนประกอบมักทำการปลูกที่อุณหภูมิแผ่นฐานที่ต่ำกว่า  $350^\circ\text{C}$

แต่การปลูกที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้ได้ผลึกที่มีคุณภาพไม่ดีเท่ากับการปลูกที่อุณหภูมิสูง มีการปลูก GaAsBi บนแผ่นฐาน GaAs [45] ให้ได้โครงสร้าง Multi Quantum Wells (MQWs) ที่ใช้การวัดค่าความดันไอของ Bi ค่าที่ใช้อยู่ในระดับความดันไอมากกว่า  $1.5 \times 10^{-7}$  torr ซึ่งจะเห็นได้ว่าความดันไอของ Bi มีค่ามากกว่าที่ใช้ 20 เท่ารวมถึงอุณหภูมิของแผ่นฐานที่ใช้ คือ  $350^{\circ}\text{C}$  ถึงจะทำให้ผลลัพธ์ของ MQWs ออกมามีประสิทธิภาพ ผลของอุณหภูมิแผ่นฐาน และ ค่าความดันไอของ Bi จึงมีผลต่อการรวมตัวกันของ InGaAsBi ที่แผ่นฐานได้

จากการปลูก InGaAs CHP/GaAs และ InGaAsBi CHP/GaAs ทำให้เราสามารถคาดการณ์ความสามารถในการรวมตัวกันของบิสมีทได้ในระดับหนึ่งซึ่งเมื่อพิจารณาประกอบควบคู่กับ Phase Diagram ของ Ga-Bi ในรูปที่ 3.10 ก็พอจะสามารถบอกได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกนั้นไม่ควรสูงมากจนเกินไปรวมทั้งค่าความดันไอของ Bi ต้องไม่น้อยจนเกินไปจึงทำให้สารประกอบ Bi สามารถรวมตัวแล้วเกิดผลึกในระดับ 2D และ 3D ได้

#### 4.1.2 GaAsBi QRNs

การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการปลูก GaAsBi QRNs จาก Ga-Bi Phase Diagram [17] ความหนาของหยด GaBi ในการปลูก GaAsBi NSs 2 ML นับว่าไม่เพียงพอต่อตกผลึก NSs ที่มีประสิทธิภาพ ดังนั้น ผู้วิจัยได้เลือกความหนาของหยด GaBi 3 ความหนา คือ 2, 5 และ 8 ML ตามลำดับ เพื่อทำการเปรียบเทียบ โดยทำการปล่อยหยด GaBi และ การตกผลึกที่อุณหภูมิ  $225^{\circ}\text{C}$  ทั้ง 2 ขั้นตอน มีการเรียกชิ้นงานตามตารางที่ 4.1

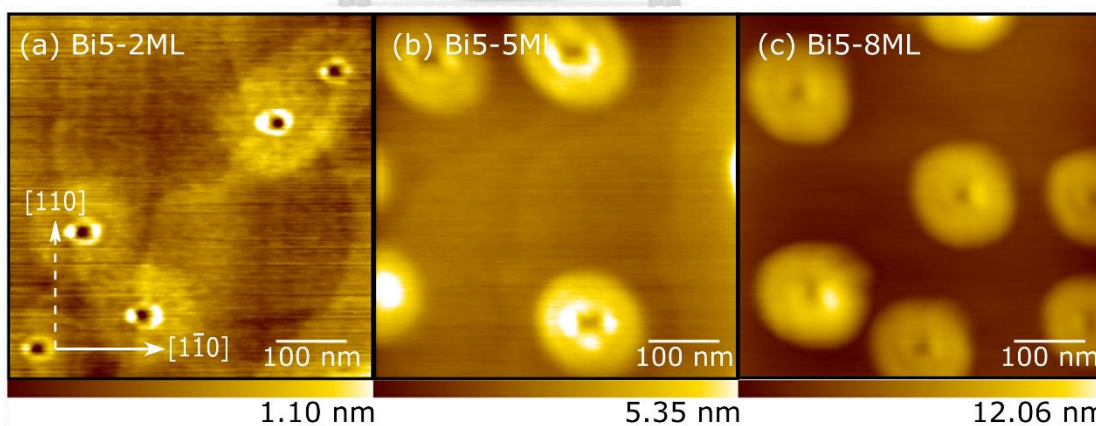
ตารางที่ 4.1 แสดงเงื่อนไขการปลูก GaAsBi QRNs ของแต่ละชิ้นงาน

อุณหภูมิการปลูก	Bi 0%	Bi 5%	Bi 10%	Bi 15%
225 °C 2-capping	Bi0-225	Bi5-2ML Bi5-5ML Bi5-8ML Bi5-225 D-Bi5-5ML	Bi10-225	
300 °C 2-capping	Bi0-300	Bi5-300	Bi10-300	Bi15-300
300 °C 1-capping	Bi0-300-LC	Bi5-300-LC	Bi10-300-LC	Bi15-300-LC

จากตารางที่ 4.1 แสดงเงื่อนไขการปลูก GaAsBi QRNs ซึ่งขึ้นงานที่ปลูกเพื่อหาความหนาที่เหมาะสม คือ Bi5-2ML, Bi5-5ML และ Bi5-8ML ที่หยุด GaBi มี Bi 5% ความหนา 2, 5 และ 8 ML ตามลำดับ ทำการปล่อยหยุดโลหะและตกผลึกที่อุณหภูมิ 225°C ซึ่งได้ความหนา 5 ML เป็นความหนาที่เหมาะสม แล้วทำการปลูกขึ้นงาน D-Bi5-5ML ที่หยุด GaBi มี Bi 5% ความหนา 5 ML เพื่อศึกษาสัณฐานวิทยา ก่อนเกิดการตกผลึก

ปลูกขึ้นงาน Bi0-225, Bi5-225 และ Bi10-225 ที่หยุด GaBi มีความหนา 5 ML มี Bi 0%, 5% และ 10% ตามลำดับ ทำการปล่อยหยุดโลหะและตกผลึกที่อุณหภูมิ 225°C กลบทับด้วย 2-step capping ที่กลบทับด้วยความหนา 40 nm ที่ 300°C และ 60 nm ที่ 500°C ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันปลูกขึ้นงาน Bi0-300, Bi5-300, Bi10-300 และ Bi15-300 ที่หยุด GaBi มีความหนา 5 ML มี Bi 0%, 5%, 10% และ 15% ตามลำดับ แต่เพิ่มอุณหภูมิการปล่อยหยุดโลหะและตกผลึกเป็น 300°C กลบทับขึ้นงานแบบที่กล่าวมาในข้างต้น

ในภายหลังเมื่อทราบที่ 500°C อาจเป็นการกลบทับที่อุณหภูมิสูง (HC) สำหรับการทดลองนี้ จึงกลบทับที่อุณหภูมิต่ำ (LC) แทนโดยเปลี่ยนเงื่อนไขการกลบทับให้เป็น 1-step capping ที่กลบทับด้วยความหนา 100 nm ที่ 300°C เพื่อให้โครงสร้าง GaAsBi QRs สามารถเปล่งแสงออกมาได้ ซึ่งได้แก่ขึ้นงาน Bi0-300, Bi5-300, Bi10-300 และ Bi15-300 ที่หยุด GaBi มีความหนา 5 ML มี Bi 0%, 5%, 10% และ 15% ตามลำดับ

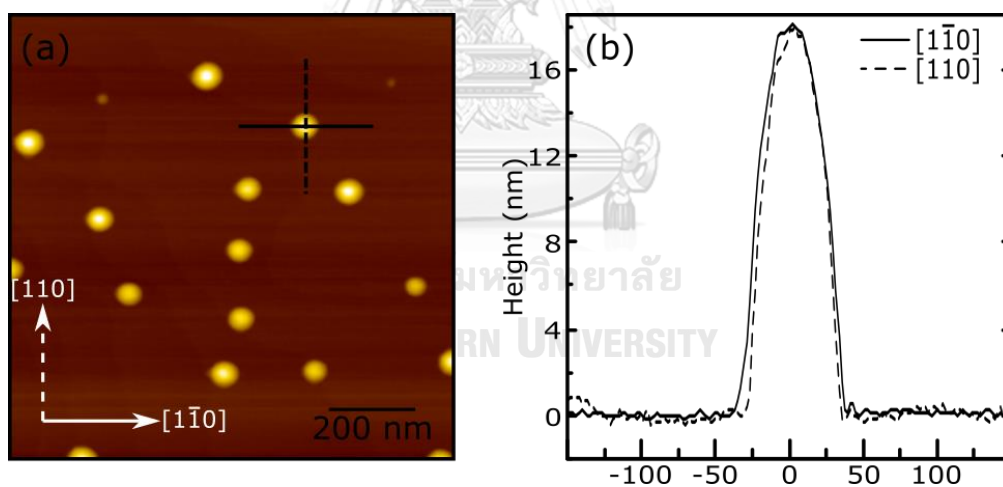


รูปที่ 4.3 ภาพ AFM ของ GaAsBi QRNs ขึ้นงาน (a) Bi5-2ML, (b) Bi5-5ML และ (c) Bi5-8ML

การเพิ่มความหนาของหยุด GaBi ทำให้ GaAsBi NSs มีการเปลี่ยนแปลง จากเดิมที่มีลักษณะเป็นหลุมคล้ายแผ่นดิสก์เปลี่ยนแปลงไปเป็นโครงสร้างนาโนคล้ายวงแหวนควอนตัมแทน (รูปที่ 4.3) ทั้งนี้โครงสร้างที่ได้มีลักษณะของวงแหวนซ้อนทับกันร่วมด้วย เป็นผลอันเนื่องมาจกระหว่างการตกผลึก ค่าความดันไอของ  $As_4$  ไม่คงที่ [9] แต่ลักษณะรูปร่างยังใกล้เคียงกัน ขึ้นงาน

Bi5-5ML มีความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของ GaAsBi QRNs เท่ากับ 5 และ 160 nm ตามลำดับ ส่วนชิ้นงาน Bi5-8ML มีความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของ GaAsBi QRNs เท่ากับ 12 และ 162 nm ตามลำดับ และในขณะที่ชิ้นงาน Bi5-2ML มีรูปร่างของ GaAsBi QRNs ที่แตกต่างกับ 2 อย่างชัดเจน เนื่องจากความหนาของหยด GaBi ที่ไม่เพียงพอต่อการตกผลึก แต่ยังมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ GaAsBi QRNs ที่ใกล้เคียงกับชิ้นงานทั้ง 2 ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 160 nm แต่ความสูงประมาณ 1.5 nm เท่านั้น มีความหนาแน่นเชิงพื้นที่เฉลี่ยของ NSs ทั้ง 3 เท่ากับ  $2.0 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ ,  $1.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$  และ  $2.4 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$  ตามลำดับ ซึ่งได้ว่ามีความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกัน

ความหนาที่เริ่มส่งผลต่อการเกิด GaAsBi QRNs คือ 5 ML ซึ่งนับว่าเพียงพอและเหมาะสมต่อการเกิดเป็น QRNs เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นเชิงพื้นที่ก่อนและหลังการตกผลึก จะเห็นความแตกต่างเพียงเล็กน้อยเท่านั้น หลังการปลูก GaAsBi QRNs ที่หยด GaBi มี Bi 5% ทั้ง 3 ทำการเลือก GaAsBi NSs ความหนา 5 ML สำหรับการทดลองเงื่อนไขถัดไป โดยพิจารณาจากรูปร่างของ NSs ที่มีลักษณะเป็น QRNs สวยงามและมีความใกล้เคียงกับอีกชิ้นงานหนึ่ง ซึ่งคล้ายกับการปลูกควอนตัมดอทที่มีข้อบกพร่องที่อุณหภูมิต่ำของ GaAs บนแผ่นฐาน AlGaAs [9] โดยตั้งสมมติฐานว่าสามารถปลูก GaAsBi NSs บนแผ่นฐาน GaAs ที่อุณหภูมิสูงขึ้นได้ และสามารถสัดส่วนของ Bi ลงไปในโครงสร้างได้

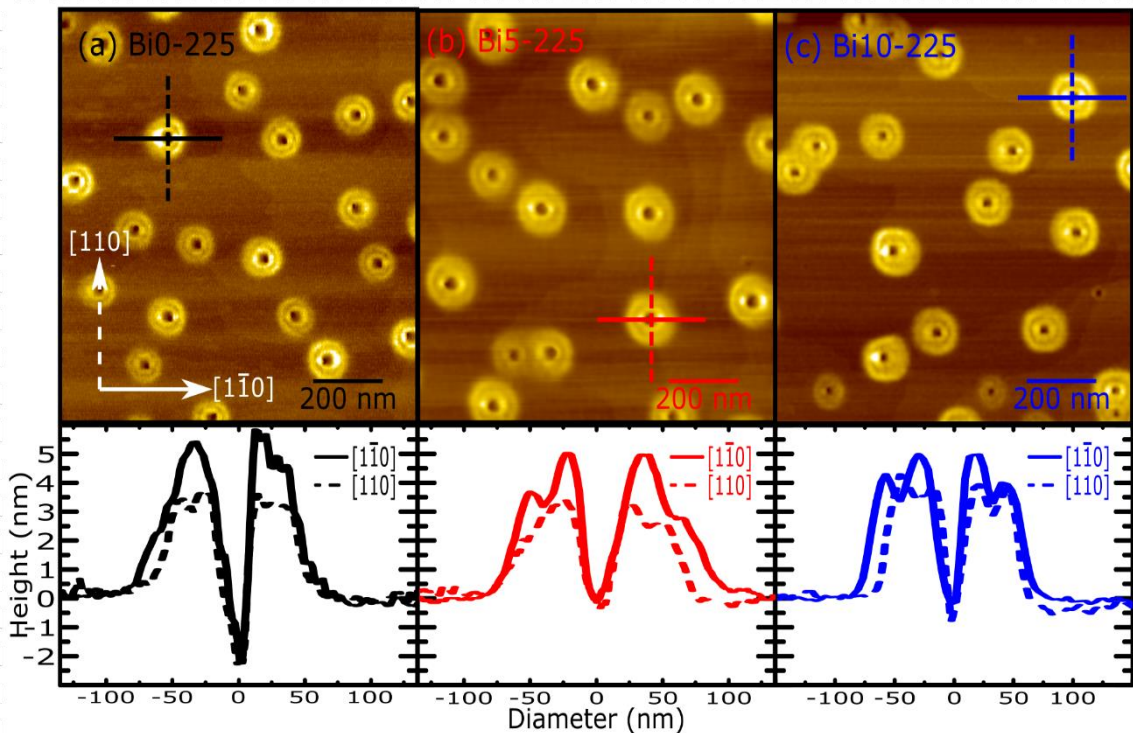


รูปที่ 4.4 หยดโลหะ GaBi ของชิ้นงาน D-Bi5-5ML ที่อุณหภูมิห้อง (a) ภาพ AFM (b) Line scan

จากการปลูก GaAsBi QRNs ก่อนหน้าทำให้ทราบว่าต้องการหยด GaBi ที่มีความหนาเริ่มต้น 5 ML เป็นตัวอ้างอิงของการเปลี่ยนแปลงก่อนและหลังการตกผลึก จึงทำการปลูกชิ้นงาน D-Bi5-5ML ดังรูปที่ 4.4(a) และ 4.4(b) แสดงความหนา, เส้นผ่านศูนย์กลาง และความหนาแน่นของหยด GaBi เท่ากับ 18 nm, 70 nm และ  $2.0 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$  ตามลำดับ



เลือกอัตราส่วนของหยดโลหะธาตุ Ga:Bi เท่ากับ 0%, 5% และ 10% ตามลำดับ หยด GaBi ที่ใช้มีความหนา 5 ML โดยทำการปล่อยหยด GaBi และ ตกผลึกที่อุณหภูมิ 225°C จนเกิดเป็น GaAsBi QRNs ได้แก่ ชั้นงาน Bi0-225, Bi5-225 และ Bi10-225 ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 ภาพ AFM และ Line Scan ของ GaAsBi QRNs ชั้นงาน (a) Bi0-225, (b) Bi5-225 และ (c) Bi10-225

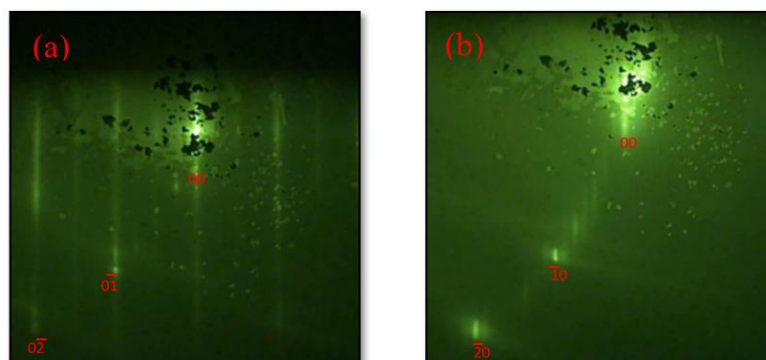
รูปที่ 4.5 ภาพ AFM แสดงการกระจายตัวของ GaAsBi QRNs หลังการเปลี่ยนอัตราส่วนของธาตุ Bi ที่เกิดขึ้นในการปล่อยหยดและตกผลึกของ GaBi ที่มี Bi 0%, 5% และ 10% ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 225°C GaAsBi QRNs มีความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.6 และ 158 nm, 4.2 และ 172 nm และ 4.3 และ 150 nm ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่ทั้ง 3 ชั้นงานมีโครงสร้างที่มีขนาดใกล้เคียงกัน รวมทั้งมีค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่เท่ากับ  $2.1 \times 10^9$ ,  $1.7 \times 10^9$  และ  $1.9 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$  ตามลำดับ

GaAsBi QRNs มีความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกันในระหว่างการปล่อยหยด GaBi ลงบนชั้นบัฟเฟอร์ GaAs และตกผลึกที่อุณหภูมิ 225°C ซึ่งแสดงว่าอัตราส่วนของ Ga:Bi มีผลเพียงเล็กน้อยต่อความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง GaAsBi QRNs ที่อุณหภูมิต่ำ โดยเมื่อดู Phase Diagram ของ Ga-Bi การรวมตัวของธาตุ Ga และ Bi ที่ 225°C มีเฟสของเหลวที่การรวมกันไม่เป็นเนื้อเดียวกันอยู่ด้วย (รูปที่ 3.10) [17] ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของ

ชั้นงาน Bi10-225 นี้มีขนาดเล็กที่สุด ในขณะที่ชั้นงาน Bi0-225 เป็นการปล่อยหยดของธาตุ Ga เพียงอย่างเดียวเท่านั้น จึงไม่เกิดผลของ Bi มีแนวโน้มที่ GaAs QRNs จะมีความสูงมากที่สุด เนื่องจากการปล่อยหยดของธาตุ Bi เพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิมากกว่า  $200^{\circ}\text{C}$  [46] ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของหยด Bi ลดลงอย่างมากตามอุณหภูมิการปล่อยหยดที่เพิ่มขึ้น จึงพออธิบายได้ว่าหยด GaBi ที่ถูกปล่อยลงบนแผ่นฐานมีโอกาที่ Bi จะหลุดออกจากพื้นผิวเนื่องจากอุณหภูมิของแผ่นฐานที่สูง ทำให้การรวมตัวของ GaBi เกิดได้น้อยลงไปอีก เมื่อยิ่งเพิ่มสัดส่วนของ Ga:Bi ให้มากขึ้น

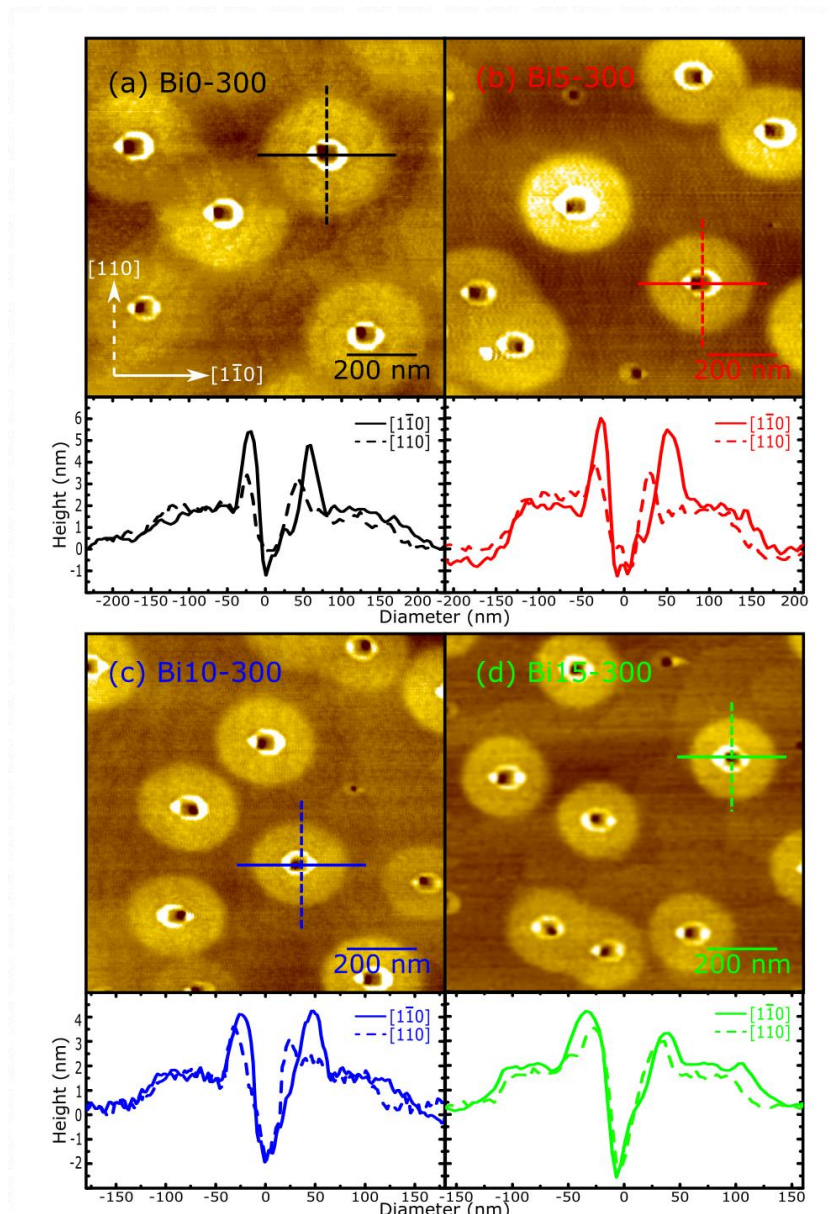
แม้ว่าการปล่อยหยด GaBi ที่อุณหภูมิสูงชันมีแนวโน้มให้ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของหยด GaBi ลดลง แต่การเพิ่มอุณหภูมิการปลูกผลึก ยังมีอุณหภูมิสูง ยิ่งมีความเป็นผลึกมากขึ้น จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาผลของอุณหภูมิการปลูก GaAsBi NSs ที่สูงขึ้น จากงานวิจัยของการปลูก GaAsBi NSs อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการปลูกคือ ไม่ควรมากกว่า  $350^{\circ}\text{C}$  จึงตัดสินใจว่าสามารถปลูก GaAsBi NSs ด้วยเทคนิค DE ที่อุณหภูมิ  $300^{\circ}\text{C}$  เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการปล่อยหยดโลหะและการตกผลึกของ GaAsBi QRNs

การปลูก GaAsBi NSs ที่อุณหภูมิ  $225^{\circ}\text{C}$  ด้วยเทคนิค DE สำหรับการปล่อยหยด GaBi RHEED Pattern แสดงการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ชัดเจน แต่การปล่อยหยด GaBi ที่อุณหภูมิ  $300^{\circ}\text{C}$  นั้นสามารถเห็น (2x4) Streaky Pattern ของชั้นบัพเฟอร์ GaAs ได้ชัดเจนกว่าที่อุณหภูมิ  $225^{\circ}\text{C}$  จึงแสดงภาพ RHEED Pattern ที่อุณหภูมิ  $300^{\circ}\text{C}$  เท่านั้น การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระหว่างการปล่อยหยด GaBi (2x4) Streaky Pattern เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็น (4x6) Streaky Pattern ดังรูปที่ 4.6 ที่แสดงว่าหยดของ Ga ถูกปล่อยลงบนแผ่นฐาน แสดงความเป็น Ga-rich [37] หลังการเปิด Shutter Ga และ Bi ด้วยอัตราเร็วการปลูก Ga = 0.2 ML/s และความดันไอของ Bi เป็นสัดส่วน 15% ความดันไอของ Ga ซึ่ง (4x6) Streaky Pattern นี้ อาจเกิดในการปลูกที่  $225^{\circ}\text{C}$  ด้วย แต่เนื่องจากอุณหภูมิที่ต่ำเกินไปจึงเห็น RHEED Pattern ไม่ชัดเจนเหมือนที่  $300^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 4.6 (4x6) Streaky Pattern ของ GaAsBi QRNs ที่ปลูก  $300^{\circ}\text{C}$  (a) [110] และ (b) [1-10]

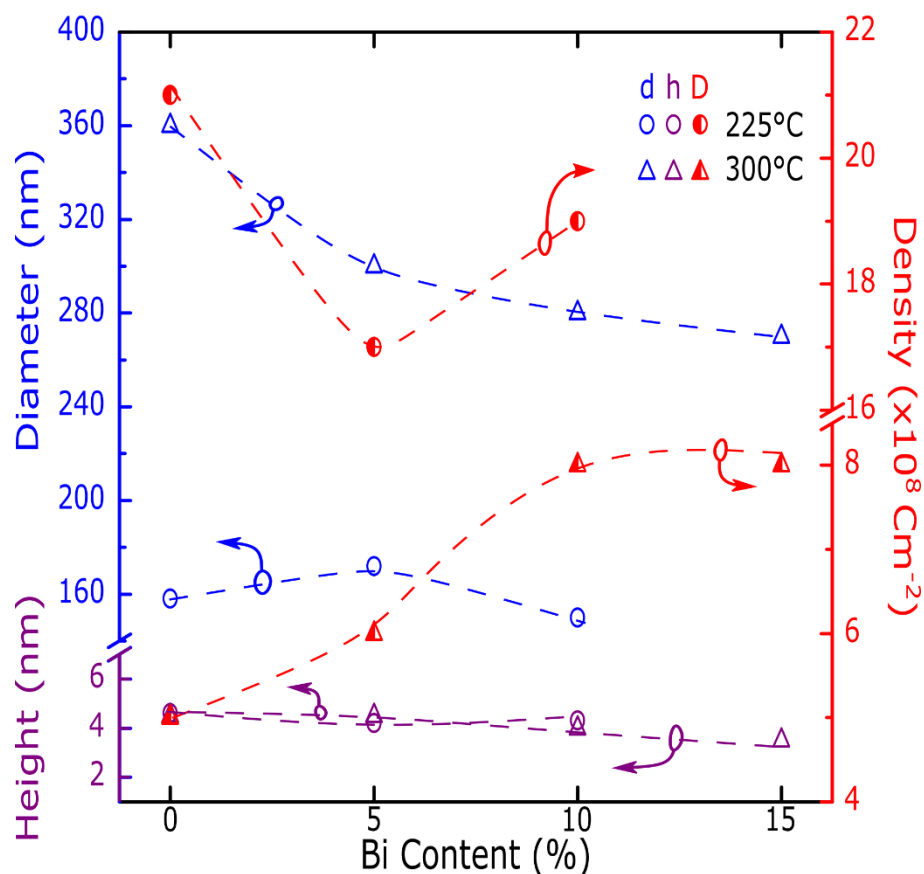
การตกผลึกที่อุณหภูมิ 300°C แสดง (4x6) Streaky Pattern ของหยด GaBi ชั้นงาน Bi0-300, Bi5-300, Bi10-300 และ Bi15-300 ทำให้สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับหยด GaBi เกิดเป็น GaAsBi QRNs ได้โดย RHEED Pattern ที่เป็น (4x6) Streaky Pattern ค่อยๆเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ โดยมีลักษณะของ RHEED Pattern ที่ใกล้เคียงกับ GaAs QRNs บน AlGaAs (รูปที่ 1 ใน [10]) แต่เนื่องจากการที่เป็น GaAsBi QRNs RHEED Pattern ที่ได้จึงมีความแตกต่างกัน เพราะมีโครงสร้างคล้ายหลุมหรือแผ่นดิสก์ [47] ดังรูปที่ 4.7 แสดงภาพ AFM ของ GaAsBi QRNs ที่ชั้นงานมีสัดส่วนของ Bi 0%, 5%, 10% และ 15% ที่ปลูกและ Crystallize 300°C



รูปที่ 4.7 ภาพ AFM และ Line Scan ของ GaAsBi QRs ชั้นงาน (a) Bi0-300, (b) Bi5-300, (c) Bi10 และ (d) Bi15-300

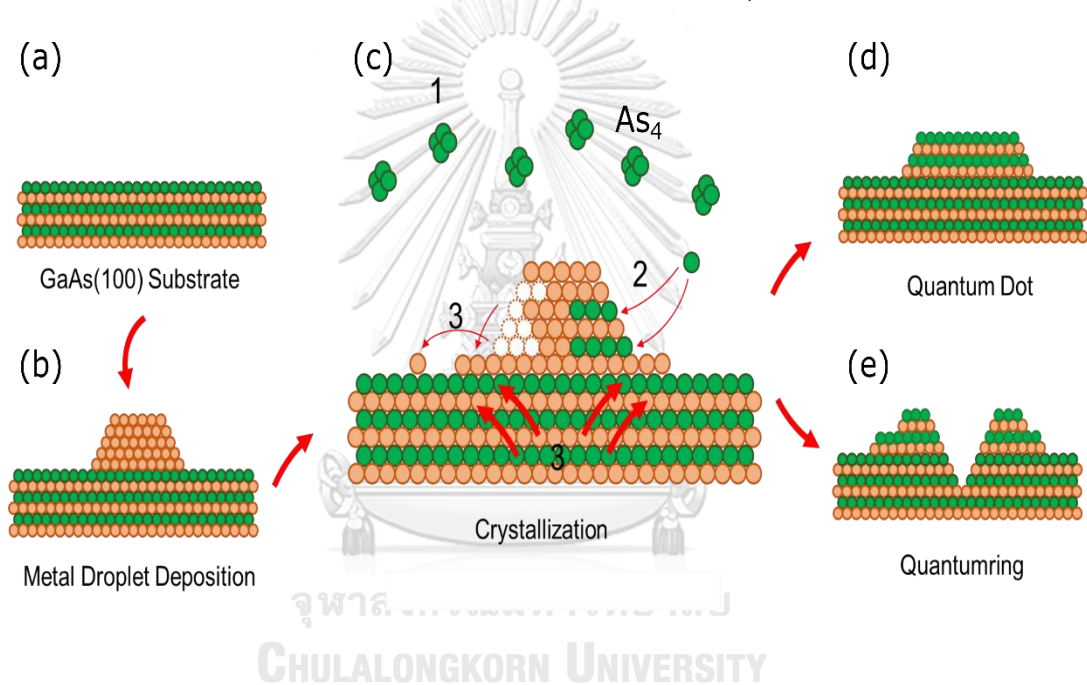


GaAsBi QRNs จากรูปที่ 4.7 ชั้นงาน Bi0-300 มีความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 4.5 nm และ 360 nm ตามลำดับ, ชั้นงาน Bi5-300 มีความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 4.5 nm และ 300 nm ตามลำดับ, ชั้นงาน Bi10-300 มีความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 4.0 nm และ 280 nm ตามลำดับ และ ชั้นงาน Bi15-300 มีความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 3.5 nm และ 270 nm ตามลำดับ จากกราฟรูปที่ 4.8 สรุปได้ว่า ที่อุณหภูมิการปลูก QRNs ที่ 300°C ยิ่งสัดส่วนของ Bi เพิ่มขึ้นมาก จะมีแนวโน้มของการเกิด GaAsBi QRNs ที่มีความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง ส่วนความหนาแน่นเชิงพื้นที่เพิ่มขึ้น โดยมีความหนาแน่นเชิงพื้นที่ เท่ากับ  $5 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ ,  $6 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ ,  $8 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$  และ  $8 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$  ตามลำดับ ซึ่งจะแตกต่างกับการตกผลึกที่อุณหภูมิ 225°C ที่ความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีแนวโน้มไม่แน่นอนอันเนื่องมาจากการรวมตัวของธาตุ Ga และ Bi จากรูป 3.10

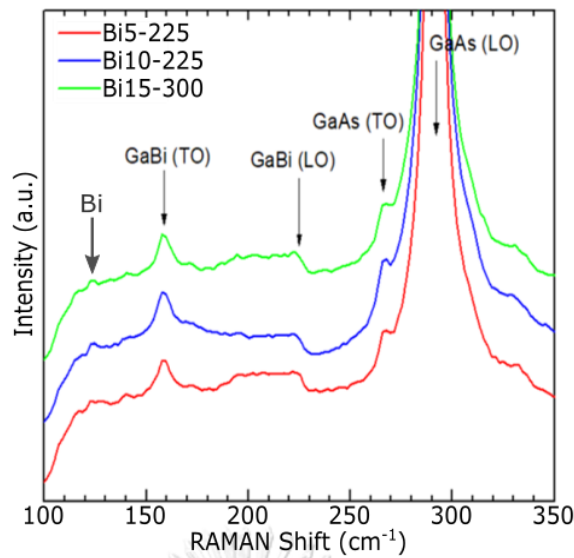


รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์แนวโน้มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d), ความสูง (h) และ ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (D) ของ QRNs ที่ปลูกอุณหภูมิ 225°C และ 300°C

การปลูก GaAsBi QRNs ที่อุณหภูมิ 300°C ด้วยเทคนิค DE จะได้โครงสร้างที่มีลักษณะคล้าย QRs แบบแบน หรือ แผ่นดิสก์ ซึ่งมาจากกลไกการตกผลึกของหยด GaBi บนแผ่นฐาน GaAs ดังรูปที่ 4.9(a)-(c) หยด GaBi มีการแพร่ออกจากจุดศูนย์กลางของหยดในระหว่างการตกผลึกที่อุณหภูมิ 300°C [30] ทำให้ได้โครงสร้างดังรูปที่ 4.9(e) มีสาเหตุมาจากอุณหภูมิการปลูกที่สูง และความดันไอของ  $As_4$  ที่ต่ำ เพราะหากมีความดันไอของ  $As_4$  สูงมากพอจะทำให้ตกผลึกได้อย่างรวดเร็วเกิดเป็น QDs ในรูปที่ 4.9(d) ได้ [10] จากลักษณะพื้นผิวของแผ่นฐาน GaAs ที่อุณหภูมิสูง ส่งผลต่อการเกิดฟิล์ม GaAs บริเวณโดยรอบของหยด GaBi [9], [48] ทำให้ QRNs มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าโครงสร้างที่ปลูก 225°C ที่หยด GaBi การแพร่ออกจากจุดศูนย์กลางของหยดได้ช้าทำให้ตกผลึกได้ก่อนที่จะแพร่ออกไป จึงวัดผลรามานเพื่อตรวจสอบองค์ประกอบธาตุที่เหลือหลังการตกผลึก



รูปที่ 4.9 แผนภาพแสดงกลไกการเกิด GaAsBi QRNs ของหยด GaBi ซึ่ง (a) แผ่นฐาน GaAs ก่อนการปล่อยหยด GaBi (b) หลังปล่อยหยด GaBi (c) ขั้นตอนการตกผลึก (d) การตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำ ความดันไอ  $As_4$  สูงเกิด QD และ (e) การตกผลึกที่อุณหภูมิสูง ความดันไอ  $As_4$  ต่ำเกิด QR [48]



รูปที่ 4.10 RAMAN Spectra ของ GaAsBi QRNs ชั้นงาน Bi5-225, Bi10-225 และ Bi15-300

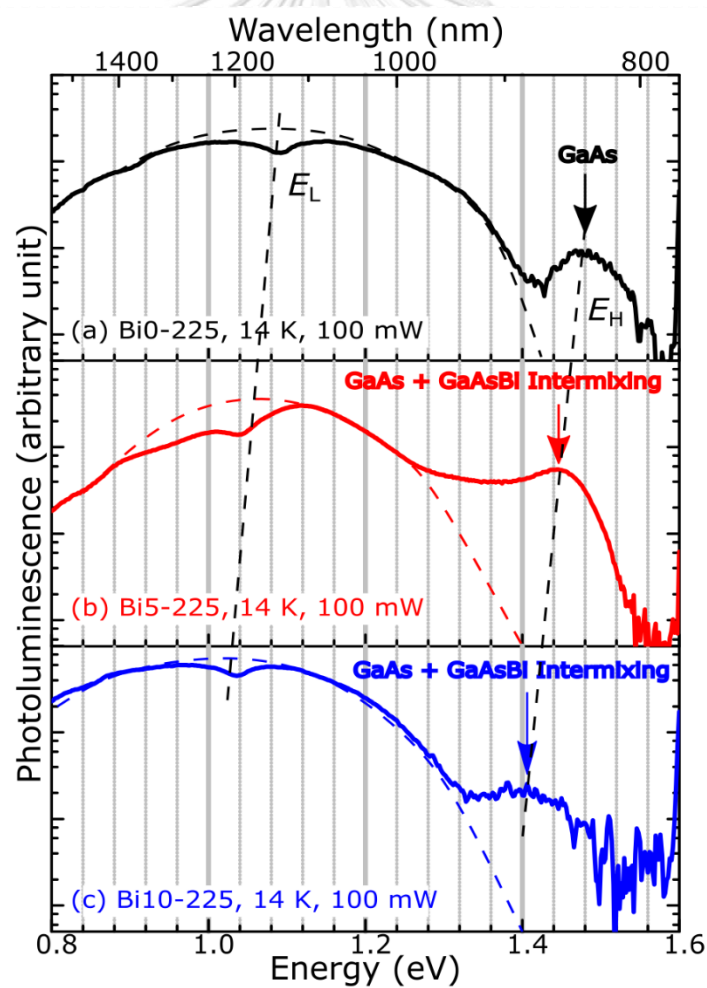
ผลของ RAMAN รูปที่ 4.10 ทำให้ยังทราบว่าคุณภาพชั้นงานยังประกอบด้วย Bi อยู่ ซึ่งชั้นงานที่นำไปวัดผล ได้แก่ Bi5-225, Bi10-225 และ Bi15-300 แสดงพีคของ GaAs ที่เป็น Transverse Optical (TO) และ Longitudinal Optical (LO) ที่  $267\text{ cm}^{-1}$  และ  $290\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ ที่บ่งบอกถึงชั้นกลบทับ GaAs ส่วนพีคที่บอกถึง GaBi ที่เป็น TO และ LO คือ ช่วง  $157\text{ cm}^{-1}$  และ ช่วงระหว่าง  $180\text{--}225\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ การมีช่วงที่กว้างนี้เป็นผลมา Bi ครอบคลุมระบบทำให้ได้ค่าที่กว้าง จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการปลูก GaAsBi QRNs ทั้ง 2 อุณหภูมิแสดงผล RAMAN ที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น [49]

#### 4.2 สมบัติเชิงแสงของ GaAsBi QRNs

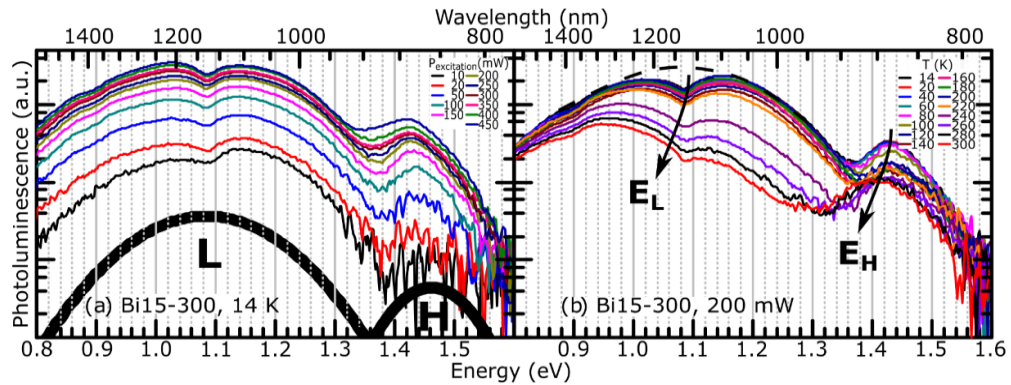
GaAsBi QRNs ถูกตรวจวัดสมบัติเชิงแสงด้วยเทคนิค PL โดยเนื้อหาในหัวข้อย่อยนี้ จะนำเสนอสมบัติเชิงแสงของ GaAsBi QRNs โดยมีปัญหาเกิดขึ้นในระหว่างการตรวจวัดสมบัติเชิงแสงของ GaAsBi QRNs 3 อย่าง คือ 1. ความหนาของชั้นกลบที่น้อยเกินไปจนพื้นผิวไม่เรียบ 2. อุณหภูมิการปลูกชั้นกลบที่สูงจนเกิดการอบอ่อนของชั้นปลูก GaAs จนค่าความเข้มแสงที่เปล่งออกมา มากกว่า GaAsBi QRNs 3. เกิดการสูญหายของความเข้มในระบบการวัด PL ที่ประมาณ  $1.08\text{ eV}$  ดังนั้น จึงทำการแก้ปัญหาทั้งหมด โดยเริ่ม ความหนาของชั้นกลบที่ทำการปลูกชั้นกลบให้มี ความหนาที่เพิ่มมากขึ้นจากเดิม  $100\text{ nm}$  เป็น  $140\text{ nm}$  เพื่อป้องกันของการดักจับพาหะของพื้นผิว [50] การปลูกชั้นกลบที่อุณหภูมิต่ำ  $300^{\circ}\text{C}$  แทนอุณหภูมิสูง  $500^{\circ}\text{C}$  เพื่อลดผลการอบอ่อนของชั้น GaAs สุดท้ายการแก้ความเข้มแสงสูญหายทำโดยการเปลี่ยนเกรตติงของ PL จาก  $300\text{ nm}$  เป็น  $600\text{ nm}$

#### 4.2.1 สมบัติเชิงแสงของ GaAsBi QRNs ที่ปลูกชั้นกลบทับที่อุณหภูมิสูง (500°C)

ผล PL ของ GaAsBi QRNs ที่ปลูกชั้นกลบทับแบบ 2 capping เป็นการปลูก GaAsBi QRNs ที่กลบที่อุณหภูมิสูง แสดงผลออกมาดังรูปที่ 4.11 ซึ่งเป็นผล PL ของชิ้นงาน Bi0-225, Bi5-225 และ Bi10-225 แสดงผลการเปล่งแสงออกมาอยู่ 2 พลังงานหลักที่พลังงานต่ำและสูง ซึ่งชิ้นงาน Bi0-225 เป็นโครงสร้าง GaAs QRs โดยทั่วไปควรเปล่งแสงค่ายอดพลังงานพลังงานช่วง 1.52 eV ที่อุณหภูมิต่ำ [9], [10] แต่การปลูก GaAs QRNs นี้เปล่งแสงค่ายอดพลังงานต่ำ ( $E_L$ ) และสูง ( $E_H$ ) ที่ 1.08 eV และ 1.50 eV ตามลำดับ ส่วนชิ้นงาน Bi5-225 และ Bi10-225 มีการเปล่งแสงค่ายอดที่พลังงานที่ 1.06 eV, 1.47 eV และ 1.03 eV, 1.41 eV ตามลำดับ ผลของการเปล่งแสงค่ายอดพลังงานที่ออกมานั้น เป็นผลมาจากการปลูกชั้นกลบทับที่อุณหภูมิสูง 500°C ซึ่งการเปล่งแสง  $E_L$  ที่ (1.03-1.08 eV) มาจากการปลูก GaAs ที่อุณหภูมิต่ำ (LT-GaAs) [51] ซึ่งผ่านการอบอ่อน ส่วนการเปล่งแสง  $E_H$  มาจากการผสมระหว่างชั้นของ GaAsBi QRNs กับชั้นกลบทับ GaAs

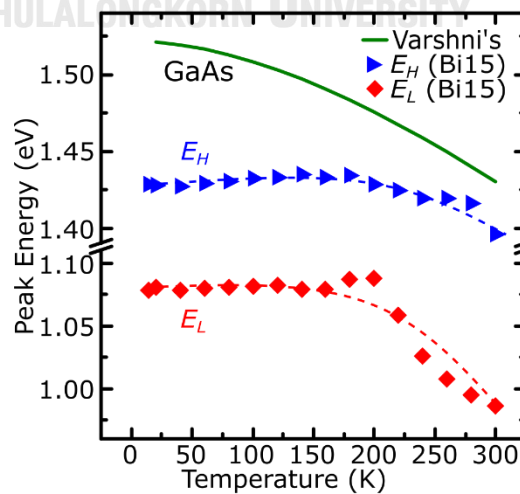


รูปที่ 4.11 แสดงกราฟ PL ของ GaAsBi QRs ชิ้นงาน (a) Bi0-225, (b) Bi5-225 และ (c) Bi10-225 ที่ปลูกชั้นกลบทับที่อุณหภูมิ 500°C



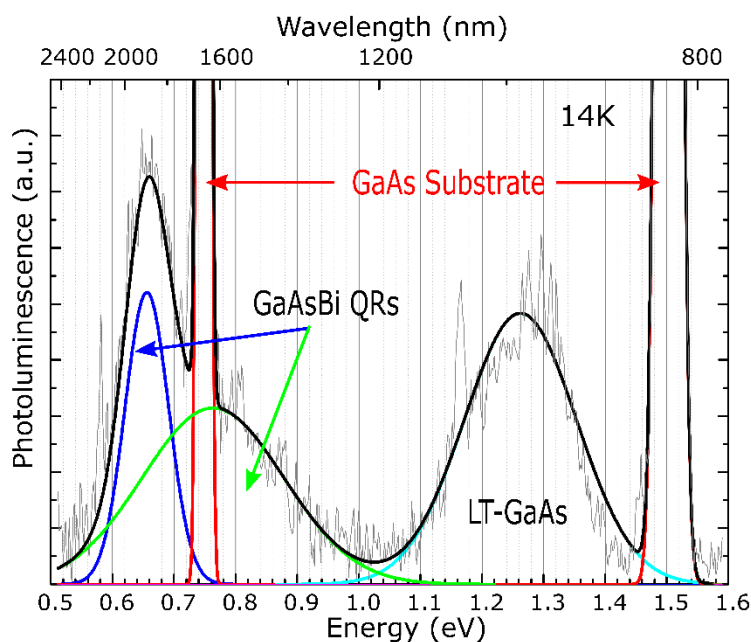
รูปที่ 4.12 แสดงกราฟ PL ของ GaAsBi QRs ชั้นงาน Bi0-225 (a) Power Dependence (b) Temperature Dependence

จากการที่วัด PL ของชั้นงานที่ทำการปลูกชั้นกลบทับที่อุณหภูมิสูง สามารถอธิบายสมบัติเชิงแสงของ GaAsBi QRNs ได้ แม้ว่าจะไม่สามารถหาการเปล่งแสงของ GaAsBi QRNs ได้โดยตรง แต่สามารถศึกษาสมบัติเชิงแสงของ Bi ที่มีต่อ NSs ได้ จากรูปที่ 4.12(a) แสดงความสัมพันธ์การเปล่งแสงโดยเมื่อกระตุ้นชั้นงานด้วยพลังงานที่มากขึ้นของ  $E_L$  และ  $E_H$  ความเข้มของค่ายอดพลังงานเพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับพลังงานที่ใช้กระตุ้น แต่เมื่อกระตุ้นไปถึงจุดหนึ่งความเข้มของค่ายอดพลังงานที่เปล่งออกมาจะเกิดการอิ่มตัวแล้วคงที่ในที่สุด และ รูป 4.12(b) แสดงผล PL ค่ายอดของพลังงานที่เปล่งแสงออกมาเปลี่ยนแปลงตามการเพิ่มอุณหภูมิ จาก 14 K ไป 300 K สามารถวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและค่ายอดพลังงาน ดังรูปที่ 4.13  $E_H$  มีค่าลดลงประมาณ 30 meV แสดงสมบัติค่ายอดของพลังงานเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนไป (Stability Temperature) และยังแสดงรูปร่างคล้ายตัวเอส (S-Shape) [52] ส่วน  $E_L$  มีค่าลดลงประมาณ 100 meV เป็นผลของ LT-GaAs ซึ่งมีค่ายอดพลังงานใกล้เคียงกับ GaAs ทั่วไป [53]



รูปที่ 4.13 แสดงกราฟ Varshni ของ GaAsBi QRs ชั้นงาน Bi15-300 ที่แกน x คือ อุณหภูมิ และ แกน y คือ ค่ายอดพลังงานที่เปล่งแสงออกมา

#### 4.2.2 สมบัติเชิงแสงของ GaAsBi QRNs ที่ปลูกชั้นกลบทับที่อุณหภูมิต่ำ (300°C)



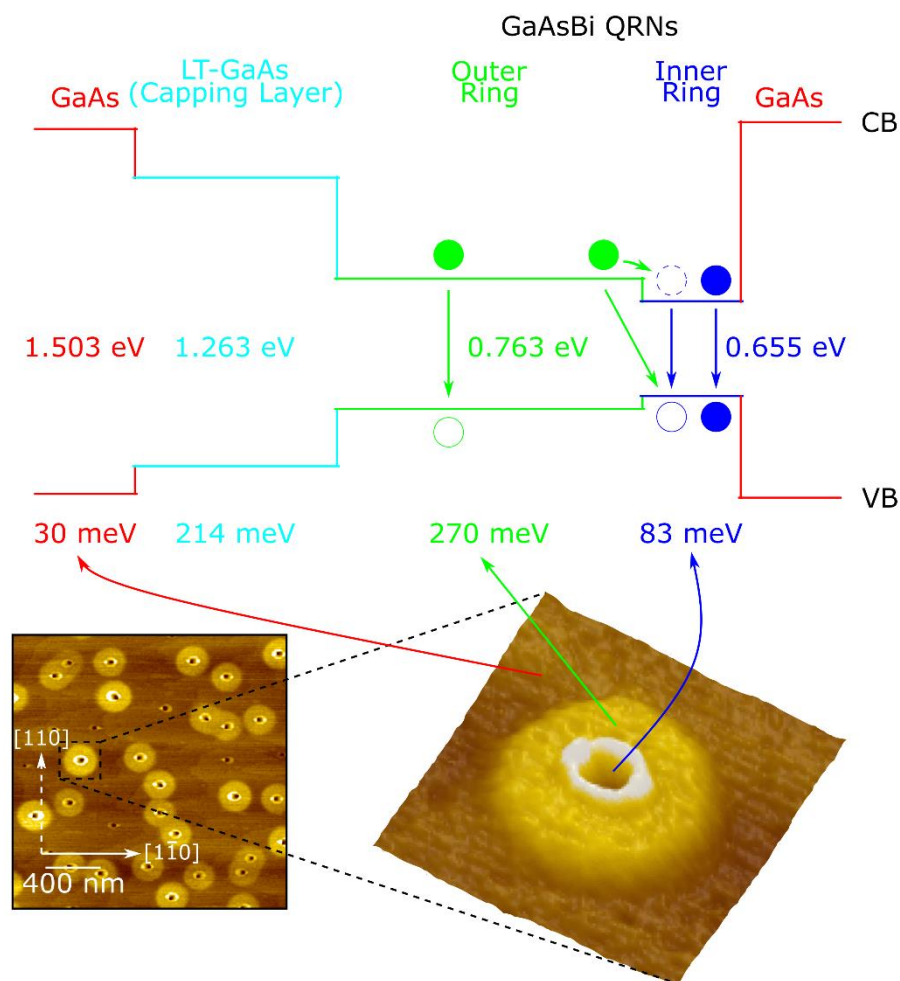
รูปที่ 4.14 แสดงกราฟ PL ของ GaAsBi QRNs ชั้นงาน Bi15-300-LC

ผลการวัด PL รูปที่ 4.14 ของ GaAsBi QRNs ที่ปลูกชั้นกลบทับที่อุณหภูมิต่ำ 300°C ปรากฏว่าการเปล่งแสงคายพลังงานของ GaAsBi QRNs มีคุณภาพที่ต่ำมาก เมื่อเทียบกับ 500°C เพราะความเป็นผลึกของชั้นกลบทับต่ำ จึงเกิดการดักจับพาหะระหว่างชั้นกลบทับและพื้นผิวของชั้นงาน [50] ชั้นงาน Bi0-300, Bi5-300 และ Bi10-300 เปล่งแสงได้ไม่ดี มีเพียงชั้นงาน Bi15-300 ที่สามารถเปล่งแสงได้ แต่ก็มีค่าความเข้มของคายพลังงานน้อยมากอยู่ดี และ สัญญาณหายไปเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ กำลังของเลเซอร์ที่ใช้ในการกระตุ้น คือ 200 mW ทำการวัดที่อุณหภูมิ 14 K ซึ่ง PL ของ GaAsBi QRNs จะสามารถเปล่งแสงได้ที่คายพลังงานเท่ากับ 0.655 eV และ 0.763 eV มีการเปล่งแสงของ LT-GaAs มีค่าคายเท่ากับ 1.263 eV โดยที่แผ่นฐาน GaAs จะมีค่าคายพลังงานอยู่ที่ 0.748 eV และ 1.503 eV

ผล PL ของ GaAsBi QRNs จะมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างนาโน ซึ่งสามารถอธิบายการเปล่งแสงที่คายพลังงานต่างๆ ได้ตามแผนภาพพลังงาน (Band Diagram) ดังรูปที่ 4.15 การเปล่งแสงคายพลังงานของแผ่นฐาน GaAs ให้ค่าความเข้มของคายพลังงานสูงสุดที่ 1.503 eV และมี FWHM เท่ากับ 30 meV ในขณะที่คายพลังงานที่ 0.748 eV เป็นค่าคายพลังงาน 2<sup>nd</sup> Harmonic ของ GaAs ที่ 0.748 eV และมี FWHM เท่ากับ 14 meV โดยใน Band Diagram แสดงเฉพาะคายพลังงานที่ 1.503 eV ค่าการเปล่งแสงถัดมาจะเป็นของ LT-GaAs มีค่าคายพลังงานเท่ากับ 1.263 eV มี FWHM เท่ากับ 214 meV ซึ่งเป็นค่าที่กว้าง แสดงการเปลี่ยนแปลงของ



ค่ายอดพลังงานที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ LT-GaAs จากชั้นงานที่ปลูกอุณหภูมิ 225°C ส่วน GaAsBi QRNs สามารถเปล่งแสงของค่ายอดพลังงาน 2 ค่า ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ GaAsBi QRNs โดยที่ค่ายอดพลังงาน 0.763 eV จะเป็นของวงนอก (Outer Ring) มีรูปร่างคล้ายจาน ค่ายอดพลังงานมีค่ากว้างมากถึง 270 meV โครงสร้างส่วนนี้มีความน่าจะเป็นที่พาหะสามารถถ่ายโอนจากวงนอกไปวงใน (Inner Ring) ได้ ซึ่งรูปร่างคล้ายหลุมขอบสูงที่มีค่ายอดพลังงานเท่ากับ 0.655 eV และมี FWHM เท่ากับ 83 meV พาหะสามารถถ่ายโอนมาที่ VB และ CB ของวงในได้ จึงส่งผลให้ค่ายอดพลังงานมีค่ากว้างแต่ความเข้มต่ำ ในขณะที่วงในมีค่ายอดพลังงานแคบแต่ความเข้มของค่ายอดพลังงานสูง



รูปที่ 4.15 แสดง Band Diagram, ภาพ AFM 2D และ 3D ของชั้นงาน Bi15-300-LC

ประโยชน์ของการปลูกชั้นกลบทับที่อุณหภูมิต่ำ 300°C คือ การที่ทำให้เห็นผลการเปล่งแสงของ GaAsBi QRNs ได้แต่ก็แลกมาด้วยความเป็นผลึกที่ต่ำของ NSs ซึ่งมีผลต่อการเปล่งแสงอย่างมาก ดังนั้นการปลูกชั้นกลบทับควรใช้อุณหภูมิต่ำสูงจึงจะเหมาะสมกว่า แต่เนื่องด้วยเป็นเหตุจำเป็นของการเปล่งแสงชั้นกลบทับที่มากกว่า GaAsBi QRNs งานวิจัยนี้จึงต้องปลูกชั้นทับที่อุณหภูมิต่ำ

## บทที่ 5

### สรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการปลูกผลึกและศึกษาสมบัติของโครงสร้างนาโน GaAsBi ควอนตัมริง (QRNs) บนแผ่นฐาน GaAs ที่ปลูกด้วยเทคนิครอปเล็ทเอพิแทกซี (DE) ซึ่งทำการศึกษา สัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงแสง ภายใต้เงื่อนไขการปลูกผลึกที่แตกต่างกัน

การปลูก GaAsBi QRNs เริ่มต้นด้วยการหาความหนาที่เหมาะสมของการปล่อยหยดโลหะ GaBi หนา 5 ML ลงบนแผ่นฐาน GaAs ที่อุณหภูมิ 225°C มีอัตราส่วน Ga:Bi เป็น 0.95:0.05, 0.90:0.10 และ 0.85:0.15 ตามลำดับ และเปรียบเทียบกับหยด Ga (อัตราส่วน Ga:Bi เท่ากับ 1:0) ทำการตกผลึก (Crystallization) ที่อุณหภูมิ 225°C ทำให้ GaAsBi QRNs ที่ได้มีแนวโน้มของความสูง และเส้นผ่านศูนย์กลางที่ไม่แน่นอน เนื่องจากอัตราส่วนของ Ga:Bi ที่มี Bi 10% ขึ้นไปทำให้เกิดหยด GaBi ที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ผลดังกล่าวได้จากการตกผลึก GaAsBi QRNs ที่อุณหภูมิ 225°C และ การศึกษาสัณฐานวิทยาของ 3 ชั้นงาน คือ Bi0-225, Bi5-225 และ Bi10-225 เมื่อปรับอุณหภูมิตก ผลึกเป็น 300°C GaAsBi QRNs มีแนวโน้มของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้น และความหนาแน่น เชิงพื้นที่ลดลง ที่อุณหภูมิ 300°C หยดโลหะ GaBi มีความเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้มีแนวโน้มของความ สูงและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของ GaAsBi QRNs ลดลง เมื่อมีอัตราส่วนของ Bi เพิ่มมากขึ้น รวมทั้งมีความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของ GaAsBi QRNs จะเพิ่มขึ้นด้วยเหมือนกัน ผลดังกล่าวได้จากการ ตกผลึก GaAsBi QRNs ที่อุณหภูมิ 300°C และการศึกษาสัณฐานวิทยาของ 4 ชั้นงานคือ Bi0-300, Bi5-300, Bi10-300 และ Bi15-300

การศึกษาสมบัติเชิงแสงของ GaAsBi QRNs แบ่งเป็น 2 กรณีขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของชั้นกลบ ทับ กรณีแรกโครงสร้างถูกกลบทับที่อุณหภูมิสูง (500°C) สมบัติเชิงแสงชั้นงาน Bi0-225, Bi5-225 และ Bi10-225 ให้ค่ายอดพลังงานต่ำที่ 1.03 eV, 1.06 eV และ 1.08 eV ตามลำดับ เป็นยอดที่ FWHM ที่กว้าง และให้ค่ายอดพลังงานสูงที่ 1.41 eV, 1.47 eV และ 1.50 eV ตามลำดับ ค่ายอด พลังงานทั้ง 2 เป็นค่ายอดที่มาจาก LT-GaAs มีการวัดชั้นงาน Bi15-300 ดูค่ายอดพลังงานที่เปลี่ยนไป ตามพลังงานที่กระตุ้น ซึ่งอิมิตัวเมื่อกระตุ้นที่พลังงานสูง ค่ายอดพลังงานเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย (~30 meV) ตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ตั้งแต่ 14-300 K กรณีที่ 2 โครงสร้างถูกกลบทับที่อุณหภูมิต่ำ (300°C) มีเพียงชั้นงาน Bi15-300 ที่เปล่งแสงได้ โดยมีค่ายอดของ GaAsBi QRNs ที่ 0.655 eV และ 0.763 eV, ค่ายอด LT-GaAs ที่ 1.263 eV และ ค่ายอดของแผ่นฐาน GaAs ที่ 1.503 eV



ผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อการปลูก GaAsBi QRNs ทางสัณฐานวิทยา มี 3 ประการ ได้แก่ 1. ความหนาตั้งต้นของหยาตโลหะ GaBi หากบางกว่า 5 ML โครงสร้าง GaAsBi QRNs ที่ได้จะแตกต่างกันและไม่สามารถเปรียบเทียบได้ 2. อุณหภูมิของการปล่อยหยาตโลหะและการตกผลึก ยิ่งอุณหภูมิสูงความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ GaAsBi QRNs จะเพิ่มขึ้น แต่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่จะลดลง 3. อัตราส่วน Ga:Bi เมื่อสัดส่วนของ Bi สูงขึ้น ความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ GaAsBi QRNs จะลดลง แต่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่จะเพิ่มขึ้น ปัจจัยที่ส่งผลทางสมบัติเชิงแสง มี 2 ประการ ได้แก่ 1. อุณหภูมิของชั้นกลบทับสูง ( $500^{\circ}\text{C}$ ) จะให้ความเข้มของค่ายอดพลังงานที่ดีกว่าอุณหภูมิต่ำ ( $300^{\circ}\text{C}$ ) เนื่องจากความเป็นผลึกที่ดีกว่า แต่ไม่สามารถแสดงผลค่ายอดพลังงานของ GaAsBi QRNs ได้ ในทางกลับกันการกลบทับที่อุณหภูมิต่ำ สามารถแสดงผลค่ายอดพลังงานของ GaAsBi QRNs ได้แต่ให้ความเข้มของค่ายอดพลังงานที่ต่ำ เนื่องจากความเป็นผลึกที่ไม่ดี 2. อัตราส่วน Ga:Bi ที่เมื่อ Bi เพิ่มมากขึ้น จะให้ค่ายอดพลังงานที่ลดลง และให้ค่ายอดพลังงานที่ใกล้เคียงเดิมแม้จะเป็นที่อุณหภูมิห้อง ( $300\text{K}$ )

ในวิทยานิพนธ์นี้ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะว่า การปลูก GaAsBi QRNs ด้วยเทคนิค DE ควรให้หยาตโลหะของ GaBi มีความหนาที่มากขึ้น เพื่อจะได้ GaAsBi QRNs ที่เหมาะสม รวมทั้งอุณหภูมิการปลูกที่ส่งผลต่อความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ควรใช้ช่วง  $225-300^{\circ}\text{C}$  ไม่ควรใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไป เพราะจะทำให้ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ลดลง ไม่ควรใช้อุณหภูมิที่ต่ำ เพราะจะทำให้ผลึกของ GaAsBi QRNs มีคุณภาพที่ไม่ดี ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติเชิงแสงของ GaAsBi QRNs การกลบทับที่ผู้วิจัยแนะนำ คืออยู่ในช่วง  $300-500^{\circ}\text{C}$  เพราะ GaAsBi QRNs สามารถแสดงผลค่ายอดได้ที่อุณหภูมิกลบบท  $300^{\circ}\text{C}$  แต่คุณภาพของชั้นงานไม่ดี จึงควรเพิ่มให้สูงขึ้นอีกเล็กน้อย แต่ไม่สูงเกินจนความเข้มค่ายอดพลังงานของชั้นกลบสูงกว่า GaAsBi QRNs

## บรรณานุกรม

- [1] W. A. Badawy, A review on solar cells from Si-single crystals to porous materials and quantum dots. J Adv Res, 2015. 6(2): p. 123-132.
- [2] S. Li, S.-C. Tan, C. K. Lee, E. Waffenschmidt, S. Y. Hui, and C. K. Tse, A survey, classification, and critical review of light-emitting diode drivers. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016. 31(2): p. 1503-1516.
- [3] L. Sang, M. Liao, and M. Sumiya, A comprehensive review of semiconductor ultraviolet photodetectors: from thin film to one-dimensional nanostructures. Sensors (Basel), 2013. 13(8): p. 10482-518.
- [4] T. Tachmatzidis and N. Dabarakis, Technology of Lasers and Their Applications in Oral Surgery: Literature Review. Balk J Dent Med, 2016. 20.
- [5] U. W. Pohl, Epitaxy of Semiconductors Introduction to Physical Principles. 2013: Springer.
- [6] W. Li, S. Varlamov, M. Jung, and J. Huang, Vapour-Phase and Solid-Phase Epitaxy of Silicon on Solid-Phase Crystallised Seed Layers for Solar Cells Application. International Journal of Photoenergy, 2014. 2014: p. 1-9.
- [7] E. Kuphal, Liquid Phase Epitaxy. Appl. Phys. A, 1991. 52(6): p. 380-409.
- [8] K. Ploog, MOLECULAR BEAM EPITAXY OF III-V COMPOUNDS: Technology and Growth Process. Annu. Rev. Mater. Sci., 1981. 11(1): p. 171-210.
- [9] C. Somaschini, S. Bietti, N. Koguchi, and S. Sanguinetti, Fabrication of Multiple Concentric Nanoring Structures. Nano Lett, 2009. 9(10): p. 3419-3424.
- [10] K. Watanabe, N. Koguchi, and Y. Gotohi, Fabrication of GaAs Quantum Dots by Modified Droplet Epitaxy. Japanese J. Appl. Physics, 2000. 39(2).

- [11] J. M. García, G. Medeiros-Ribeiro, K. Schmidt, T. Ngo, J. L. Feng, A. Lorke, J. Kotthaus, and P. M. Petroff, Intermixing and shape changes during the formation of InAs self-assembled quantum dots. Applied Physics Letters, 1997. 71(14): p. 2014-2016.
- [12] F. Tafuri, Fundamentals and Frontiers of the Josephson Effect. Vol. 286. 2019: Springer.
- [13] Y. Zhang, A. Mascarenhas, and L. W. Wang, Similar and dissimilar aspects of III-V semiconductors containing Bi versus N. Physical Review B, 2005. 71(15).
- [14] M. Yoshimoto, S. Murata, A. Chayahara, Y. Horino, J. Saraie, and K. Oe, Metastable GaAsBi Alloy Grown by Molecular Beam Epitaxy. Japanese Journal of Applied Physics, 2003. 42(Part 2, No. 10B): p. L1235-L1237.
- [15] K. Alberi, O. D. Dubon, W. Walukiewicz, K. M. Yu, K. Bertulis, and A. Krotkus, Valence band anticrossing in GaBiAs<sub>1-x</sub>. Applied Physics Letters, 2007. 91(5).
- [16] I. P. Marko, et al., Physical properties and optimization of GaBiAs/(Al)GaAs based near-infrared laser diodes grown by MOVPE with up to 4.4% Bi. Journal of Physics D: Applied Physics, 2014. 47(34).
- [17] S. Dogel, W. Freyland, D. Nattland, R. Tsekov, and A. Turchanin, Oscillatory interfacial instabilities in binary metallic fluids. Journal of Physics: Condensed Matter, 2005. 17(45): p. S3289-S3299.
- [18] D. Bimberg, M. Grundmann, and N. N. Ledentsov, Quantum Dot Heterostructures. 1999: Wiley.
- [19] M. Sugawara, Semiconductors and Semimetals vol. 60: Self-assembled InGaAs/GaAs quantum dots. Theoretical based of the optical properties of semiconductor quantum nano-structures . In M. Sugawara (ed.). 1999: Academic Press.
- [20] S. M. Sze, DEVICES Physics and Technology 2nd Edition. Vol. 23. 1986: International Journal of Electrical Engineering Education.

- [21] J. Tsao, Materials Fundamentals of Molecular Beam Epitaxy 1st Edition. 1993: Academic Press.
- [22] I. Daruka and A.-L. Barabási, Dislocation-Free Island Formation in Heteroepitaxial Growth: A Study at Equilibrium. PHYSICAL REVIEW LETTERS, 1997. 79(19).
- [23] P. Chhantyal, S. Naskar, T. Birr, T. Fischer, F. Lubkemann, B. N. Chichkov, D. Dorfs, N. C. Bigall, and C. Reinhardt, Low Threshold Room Temperature Amplified Spontaneous Emission in 0D, 1D and 2D Quantum Confined Systems. Sci Rep, 2018. 8(1): p. 3962.
- [24] D. Leonard, M. Krishnamurthy, C. M. Reaves, S. P. Denbaars, and P. M. Petroff, Direct formation of quantum-sized dots from uniform coherent islands of InGaAs on GaAs surfaces. Applied Physics Letters, 1993. 63(23): p. 3203-3205.
- [25] A. Lorke, R. J. LUYKEN, J. M. GARCIA, and P. M. PETROFF, Growth and Electronic Properties of Self-Organized Quantum Rings. Japanese J. Appl. Physics, Part 2 Lett., 2001. 40(3 B): p. 1857-1859.
- [26] T. Raz, D. Ritter, and G. Bahir, Formation of InAs self-assembled quantum rings on InP. Applied Physics Letters, 2003. 82(11): p. 1706-1708.
- [27] J. Cui, Q. He, X. M. Jiang, Y. L. Fan, X. J. Yang, F. Xue, and Z. M. Jiang, Self-assembled SiGe quantum rings grown on Si(001) by molecular beam epitaxy. Applied Physics Letters, 2003. 83(14): p. 2907-2909.
- [28] R. Timm, H. Eisele, A. Lenz, L. Ivanova, G. Balakrishnan, D. L. Huffaker, and M. Dahne, Self-organized formation of GaSb/GaAs quantum rings. Phys Rev Lett, 2008. 101(25): p. 256101.
- [29] B. C. Lee and C. P. Lee, Formation of semiconductor quantum rings using GaAs/AlAs partially capped layers. Nanotechnology, 2004. 15(7): p. 848-850.
- [30] N. Inoue, MBE monolayer growth control by in-situ electron microscopy. J. Cryst. Growth, 1991. 111(1-4): p. 75-82.
- [31] J. Meija, et al., Atomic weights of the elements 2013 (IUPAC Technical Report). Pure and Applied Chemistry, 2016. 88(3): p. 265-291.

- [32] P. T. Webster, A. J. Shalindar, N. A. Riordan, C. Gogineni, H. Liang, A. R. Sharma, and S. R. Johnson, Optical properties of InAsBi and optimal designs of lattice-matched and strain-balanced III-V semiconductor superlattices. Journal of Applied Physics, 2016. 119(22).
- [33] R. B. Lewis, M. Masnadi-Shirazi, and T. Tiedje, Growth of high Bi concentration GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> by molecular beam epitaxy. Applied Physics Letters, 2012. 101(8).
- [34] X. Lu, D. A. Beaton, R. B. Lewis, T. Tiedje, and M. B. Whitwick, Effect of molecular beam epitaxy growth conditions on the Bi content of GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub>. Applied Physics Letters, 2008. 92(19).
- [35] S. Tixier, M. Adamcyk, T. Tiedje, S. Francoeur, A. Mascarenhas, P. Wei, and F. Schiettekatte, Molecular beam epitaxy growth of GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub>. Applied Physics Letters, 2003. 82(14): p. 2245-2247.
- [36] W. Bennarndt, G. Boehm, and M.-C. Amann, Domains of molecular beam epitaxial growth of Ga(In)AsBi on GaAs and InP substrates. Journal of Crystal Growth, 2016. 436: p. 56-61.
- [37] A. Ohtake, Surface reconstructions on GaAs(001). Surface Science Reports, 2008. 63(7): p. 295-327.
- [38] T. Limwongse, S. Panyakeow, and S. Kanjanachuchai, Evolution of InAs quantum dots grown on cross-hatch substrates. physica status solidi (c), 2009. 6(4): p. 806-809.
- [39] C. Himwas, S. Thainoi, S. Panyakeow, and S. Kanjanachuchai, Luminescence Properties of As-Grown and Annealed InGaAs Quantum Dots on Cross-Hatch Patterns. Proc. - Int. Nanoelectron. Conf. INEC., 2011. 102(001): p. 1-2.
- [40] G. Vardar, S. W. Paleg, M. V. Warren, M. Kang, S. Jeon, and R. S. Goldman, Mechanisms of droplet formation and Bi incorporation during molecular beam epitaxy of GaAsBi. Applied Physics Letters, 2013. 102(4).

- [41] N. T. Taylor, Laser : the inventor, the Nobel laureate, and the thirty-year patent war. 2000.
- [42] P. Vandenabeele, Practical Raman Spectroscopy. 2013: Wiley.
- [43] C. Gogineni, N. A. Riordan, S. R. Johnson, X. Lu, and T. Tiedje, Disorder and the Urbach edge in dilute bismide GaAsBi. Applied Physics Letters, 2013. 103(4).
- [44] Y. Gu, Y.-G. Zhang, Y.-X. Song, H. Ye, Y.-Y. Cao, A.-Z. Li, and S.-M. Wang, Optical properties of InGaAsBi/GaAs strained quantum wells studied by temperature-dependent photoluminescence. Chinese Physics B, 2013. 22(3).
- [45] P. K. Patil, F. Ishikawa, and S. Shimomura, GaAsBi/GaAs MQWs grown by MBE using a two-substrate-temperature technique. Journal of Alloys and Compounds, 2017. 725: p. 694-699.
- [46] C. Li, et al., Bismuth nano-droplets for group-V based molecular-beam droplet epitaxy. Applied Physics Letters, 2011. 99(24).
- [47] S. Bietti, C. Somaschini, E. Sarti, N. Koguchi, S. Sanguinetti, G. Isella, D. Chrastina, and A. Fedorov, Photoluminescence Study of Low Thermal Budget III-V Nanostructures on Silicon by Droplet Epitaxy. Nanoscale Res Lett, 2010. 5(10): p. 1650-3.
- [48] M. Gurioli, Z. Wang, A. Rastelli, T. Kuroda, and S. Sanguinetti, Droplet epitaxy of semiconductor nanostructures for quantum photonic devices. Nat Mater, 2019. 18(8): p. 799-810.
- [49] R. Butkute, G. Niaura, E. Pozingyte, B. Cechavicius, A. Selskis, M. Skapas, V. Karpus, and A. Krotkus, Bismuth Quantum Dots in Annealed GaAsBi/AlAs Quantum Wells. Nanoscale Res Lett, 2017. 12(1): p. 436.
- [50] G. Jin and B. K. Jones, The effect of traps at the free surface of GaAs field effect transistors. Journal of Applied Physics, 1996. 80(11): p. 6340-6348.
- [51] R. E. Viturro, M. R. Melloch, and J. M. Woodall, Optical emission properties of semi-insulating GaAs grown at low temperatures by molecular beam epitaxy. Applied Physics Letters, 1992. 60(24): p. 3007-3009.

- [52] A. R. Mohmad, F. Bastiman, C. J. Hunter, R. D. Richards, S. J. Sweeney, J. S. Ng, J. P. R. David, and B. Y. Majlis, Localization effects and band gap of GaAsBi alloys. physica status solidi (b), 2014. 251(6): p. 1276-1281.
- [53] Y. P. Varshni, Temperature Dependence of The Energy Gap in Semiconductors. Physica, 1967. 34: p. 149-154.



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	อภิรักษ์ สร้อยสน
วัน เดือน ปี เกิด	19 มีนาคม 2538
สถานที่เกิด	สุราษฎร์ธานี
วุฒิการศึกษา	ระดับมัธยม โรงเรียนสุราษฎร์ธานี ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมวัสดุฯ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี พระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ที่อยู่ปัจจุบัน	139 หมู่ 3 ถ.พูนพิน-หนองขรี ต.หนองไทร อ.พูนพิน จ.สุราษฎร์ธานี 84130



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY