

การประดิษฐ์โครงสร้างวงแหวนนาโนของเกลเลียมฟอสไฟด์บนเกลเลียมอาร์เซไนด์ (100)  
ที่ปลูกด้วยวิธีดรอปปี้เทอพิแทกซีจากลำโมเลกุล

นางสาวพัชรีวรรณ โปร่งจิต

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2554  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

FABRICATION OF GaP NANORINGS ON GaAs (100) GROWN BY DROPLET  
MOLECULAR BEAM EPITAXY

Miss Patchareewan Prongjit

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประดิษฐ์โครงสร้างวงแหวนนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บน  
แกเลียมอาร์เซไนด์ (100) ที่ปลูกด้วยวิธีครอปลีทอพีเทกซ์จาก  
ลำโม่เลกุล

โดย

นางสาวพัชรวิพรรณ โปร่งจิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. สมชัย รัตนธรรมพันธ์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมชัย รัตนธรรมพันธ์)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บรรยง โตประเสริฐวงศ์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. นพดล นันทวงศ์)

พัชรวิวรรณ โปร่งจิต : การประดิษฐ์โครงสร้างวงแหวนนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บนแกเลียมอาร์เซไนด์ (100) ที่ปลูกด้วยวิธีครอปเล็ทอพิแทกซีจากลำโมเลกุล. (FABRICATION OF GaP NANORINGS ON GaAs (100) GROWN BY DROPLET MOLECULAR BEAM EPITAXY) อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์, 58 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการประดิษฐ์โครงสร้างวงแหวนนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บนแกเลียมอาร์เซไนด์ (100) ด้วยวิธีครอปเล็ทอพิแทกซีจากลำโมเลกุล โดยมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการประดิษฐ์ ได้แก่ อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะแกเลียม (250-350°C) และปริมาณแกเลียมในการขึ้นรูปหยดโลหะ (2.4-5.6 ML) ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะแกเลียมสูงขึ้น จะทำให้โครงสร้างวงแหวนนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ความหนาแน่นของโครงสร้างวงแหวนนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ลดลง เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิแผ่นผลึกฐานสูงขึ้น โลหะแกเลียมมีคุณสมบัติเป็นโลหะหลอมเหลวอยู่ทำให้สามารถเคลื่อนที่และรวมตัวกับหยดโลหะที่อยู่ใกล้เคียงเป็นหยดโลหะที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนการเพิ่มปริมาณแกเลียมในการขึ้นรูปหยดโลหะทำให้โครงสร้างวงแหวนนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์มีขนาดใหญ่ขึ้น ความหนาแน่นของโครงสร้างวงแหวนนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ที่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐาน 250°C นั้น เมื่อเพิ่มปริมาณแกเลียมในช่วง 2.4-3.2 ML และ 4.0-4.8 ML ความหนาแน่นของโครงสร้างวงแหวนนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์จะลดลง ส่วนเมื่อเพิ่มปริมาณแกเลียมในช่วง 3.2-4.0 ML และ 4.8-5.6 ML ความหนาแน่นของโครงสร้างวงแหวนนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์จะเพิ่มขึ้น การที่ความหนาแน่นลดลงนี้เนื่องจากหยดขนาดเล็กของแกเลียมเกิดการปกคลุมเต็มพื้นที่ผิวหน้า ซึ่งทำให้เกิดเป็นชั้นเรียบของแกเลียมขึ้น

สำหรับการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของโครงสร้างวงแหวนนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ที่ถูกประดิษฐ์ขึ้นในบางเงื่อนไขและปลูกกลับด้วยชั้นของแกเลียมอาร์เซไนด์หนา 100 nm อันประกอบด้วยชั้นแกเลียมอาร์เซไนด์ที่ปลูกด้วยวิธีไมเกรชัน-เอนฮานซ์อพิแทกซีและวิธีปกติผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ยืนยันให้เห็นว่าโครงสร้างวงแหวนนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ที่ได้มีคุณสมบัติที่ดีและได้แสดงให้เห็นปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงของแถบพลังงานจากความเครียดแบบดึงที่มีต่อโครงสร้างวงแหวนนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ในเมตริกซ์แกเลียมอาร์เซไนด์

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิติศ.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา.....2554.....

## 5370306221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : GaP / GaAs / NANORING / DROPLET EPITAXY / MOLECULAR BEAM  
EPITAXY

PATCHAREEWAN PRONGJIT : FABRICATION OF GaP NANORINGS ON GaAs  
(100) GROWN BY DROPLET MOLECULAR BEAM EPITAXY. ADVISOR : ASSOC.  
PROF. SOMCHAI RATANATHAMMAPHAN, D. Eng., 58 pp.

GaP nanorings have been fabricated by droplet epitaxy technique using solid source molecular beam epitaxy (MBE). Ga droplet forming conditions have been varied in order to investigate the effect of substrate temperature during Ga deposition (250-350°C) and Ga amount (2.4-5.6 ML) on GaP nanorings. Increasing substrate temperature during Ga deposition results in the GaP nanorings size enhancement but decrease the density due to greater migration of metallic Ga atoms and coalescence of neighbouring droplets. Increasing Ga amount also result in the nanorings size enhancement. The nanoring density is also increased when increasing Ga amount. However when increasing Ga amount in the range of 2.4-3.2 ML and 4.0-4.8 ML, the nanoring density becomes to decrease. The nanoring density is increased while Ga amount in the range of 3.2-4.0 ML and 4.8-5.6 ML. The decreasing of nanoring density was caused from formation of Ga full-layer instead of droplets when greater amount of Ga was deposited.

For photoluminescence (PL) measurement, the GaP nanorings were repeatedly grown under several conditions with additional 100-nm GaAs capping layers including GaAs layers grown by migration-enhanced epitaxy and conventional GaAs layers. The photoluminescence results confirm the high-quality of GaP nanocrystal and show the tensile strain-modified bandgap effect of GaP nanoring in GaAs matrix.

Department : ..... Electrical Engineering ..... Student's Signature .....

Field of Study : ... Electrical Engineering ..... Advisor's Signature .....

Academic Year : ..... 2011 .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ดำเนินการวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้  
คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ ที่มีค่าอย่างยิ่งตั้งแต่เริ่มต้นการทำวิทยานิพนธ์ จนวิทยานิพนธ์เสร็จ  
สมบูรณ์

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน อันประกอบไปด้วย  
ศ.ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว รศ.ดร.บรรยง โตประเสริฐพงศ์ รศ.ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์ และ  
ดร.นพดล นันทวงศ์

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณศุภโชค ไทยน้อย คุณพรชัย ช่างม่วง คุณพัฒนา พันธุ์วงศ์  
คุณขวัญเรือน ไทยน้อย และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร.ปณชสิทธิ์ บุญเป็ง ดร.นราพร บั้นเกล้า ดร.องอาจ ตั้งเมตตาจิตตกุล  
รวมทั้งนิสิตปริญญาเอก โท ตรี ทุกท่านในห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ให้ความ  
ช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆ เป็นอย่างดี

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติพี่น้องที่ให้ความห่วงใยและเป็นกำลังใจใน  
การทำวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ โครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนามหาวิทยาลัย  
วิจัยแห่งชาติของสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (EN264A) สำนักกองทุนสนับสนุนการวิจัย  
(DPG5380002) ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (NanoTec) ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนสำหรับงานวิจัยนี้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	๗

### บทที่

1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์นี้.....	3
2 ความรู้พื้นฐาน.....	5
2.1 โครงสร้าง Low dimension.....	5
2.1.1 วัสดุที่มีขนาดเป็นก้อนมวลสาร (Bulk) .....	7
2.1.2 ควอนตัมเวลล์ (Quantum well).....	8
2.1.3 ควอนตัมไวร์ (Quantum wire).....	8
2.1.4 ควอนตัมดอต (Quantum dot).....	9
2.1.5 โครงสร้างนาโนรูปวงแหวน (Quantum ring).....	11
2.2 วิธีการปลูกผลึกอีพิแทกซี (growth modes).....	12
2.2.1 Frank van-der-Merwe.....	12
2.2.2 Stranski-Krastanow.....	13
2.2.3 Volmer-Weber.....	14
2.2.4 การปลูกผลึกโครงสร้างนาโนด้วยวิธีครอปลีทอีพิแทกซี.....	14

บทที่	หน้า
2.3 การปลูกผลึกอีพิแทกซ์จากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy: MBE).....	16
2.4 Reflection High Energy Electron Diffraction (RHEED).....	19
2.4.1 การหาอัตราการปลูกผลึกด้วย RHEED oscillation.....	20
2.5 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM).....	21
2.6 การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence: PL).....	23
3 การทดลอง.....	25
3.1 การเตรียมแผ่นผลึกฐาน (sample preparation) .....	25
3.2 การเตรียมการในห้องปลูกผลึกก่อนการปลูกผลึก.....	26
3.3 การปลูกโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บนแกเลียมอาร์เซไนด์ (100) ด้วย วิธีทรอปเล็ทอีพิแทกซ์จากลำโมเลกุลเพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพของผิวหน้า.....	27
3.4 การปลูกโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บนแกเลียมอาร์เซไนด์ (100) ด้วยวิธีทรอปเล็ทอีพิแทกซ์จากลำโมเลกุลเพื่อการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์.....	29
4 ผลการทดลอง.....	30
4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพผิวหน้าของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ บนแผ่นผลึกฐานแกเลียมอาร์เซไนด์ (100).....	30
4.1.1 อิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะที่มีผลต่อ โครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บนแผ่นผลึกฐานแกเลียม อาร์เซไนด์ (100).....	36
4.1.2 อิทธิพลของปริมาณแกเลียมในการขึ้นรูปหยดโลหะที่มีผลต่อ โครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บนแผ่นผลึกฐานแกเลียม อาร์เซไนด์ (100).....	39
4.2 การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บน แผ่นผลึกฐานแกเลียมอาร์เซไนด์ (100).....	41
4.2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะที่มีผลต่อ คุณสมบัติทางแสงของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บน แผ่นผลึกฐานแกเลียมอาร์เซไนด์ (100).....	44



บทที่	หน้า
4.2.2 อิทธิพลของปริมาณแกลเลียมในการขึ้นรูปหยดโลหะที่มีผลต่อ คุณสมบัติทางแสงของโครงสร้างนาโนของแกลเลียมฟอสไฟด์ บนแผ่นผลึกฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์ (100) .....	48
5 สรุป.....	52
รายการอ้างอิง.....	54
ผลงานตีพิมพ์.....	56
ผลงานนำเสนอ.....	57
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	58

## สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบวัสดุที่มีขนาดเป็นก้อนมวลสาร ท่อนำคลื่น ควอนตัมดอตและอะตอม.....	6
2.2 โครงสร้างและความหนาแน่นสถานะ (D.O.S.) ได้แก่ (ก) วัสดุที่มีขนาดเป็นก้อนมวลสาร (ข) ควอนตัมเวลล์ (ค) ควอนตัมไวร์ และ (ง) ควอนตัมดอต โดยที่ $L$ มีค่าอยู่ในระดับ $\mu\text{m}$ ในขณะที่ $L_x, L_y$ และ $L_z$ อยู่ในระดับ $\text{nm}$ .....	7
2.3 วิวัฒนาการของค่ากระแสขีดเริ่มต้นของการเปล่งแสงเลเซอร์ของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ.....	10
2.4 แบบจำลองการจัดเรียงอะตอมของการปลูกผลึกอพิแทกซี (ก) lattice-matched และ lattice-mismatched ที่มีความเครียดในลักษณะ (ข) ความเครียดแบบบีบอัด และ (ค) ความเครียดแบบดึง.....	11
2.5 วิธีการปลูกผลึกอพิแทกซีแบบ (ก) Frank van-der-Merwe (ข) Stranski-Krastanow และ (ค) Volmer Weber.....	12
2.6 ลักษณะการปลูกผลึกอพิแทกซีแบบ Stranski-Krastanow.....	13
2.7 ความหนาแน่นพลังงาน ณ ตำแหน่งต่างๆ ในโครงสร้างควอนตัมดอต.....	13
2.8 กระบวนการเกิดควอนตัมดอตตามทฤษฎี mean-field.....	14
2.9 กระบวนการปลูกผลึกโครงสร้างนาโนด้วยวิธีครอปเล็ทอพิแทกซีจากลำโมเลกุล.....	15
2.10 ความสัมพันธ์ของค่าคงตัวโครงสร้างผลึก (lattice constant) กับค่าช่องว่างพลังงาน (energy gap) และค่าความยาวคลื่น (wavelength) ที่สัมพันธ์กับค่าช่องว่างพลังงาน ที่อุณหภูมิห้องของสารกึ่งตัวนำ.....	16
2.11 โครงสร้างของชุดระบบการปลูกผลึกจากลำโมเลกุล RIBER รุ่น 32P.....	17
2.12 ส่วนประกอบในห้องปลูกผลึกจากลำโมเลกุล.....	18
2.13 แผนภาพจากการเกิดรูปแบบการแทรกสอดของ RHEED ที่สะท้อนจากผิวหน้าของผลึก.....	19
2.14 แผนภาพอธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลงความเข้มของอิเล็กตรอนในขณะที่ทำการปลูกผลึก.....	20
2.15 หลักการทำงานของ AFM.....	22
2.16 โหมดการทำงานของ AFM (ก) Contact mode (ข) Non-contact mode และ (ค) Tapping mode.....	23
2.17 แผนภาพจำลองการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงที่เกิดจากการรวมตัว.....	23
2.18 แผนภาพการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์.....	24

ภาพที่	หน้า
3.1 รูปแบบของ RHEED ของผิวหน้าแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นภายใต้บรรยากาศ $As_4$ ที่อุณหภูมิประมาณ $580^\circ C$ ในการจัดออกไซด์ที่ผิวหน้า.....	26
3.2 รูปแบบของ RHEED ของผิวหน้าแผ่นผลึกฐานเมื่อปลูกชั้นบัพเฟอร์แกเลียมอาร์เซไนด์หนา 300 nm ซึ่งแสดงถึงลักษณะแผ่นผลึกฐานแกเลียมอาร์เซไนด์ที่มีความเรียบ.....	27
3.3 รูปแบบของ RHEED ของผิวหน้าแผ่นฐานเมื่อเกิดโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บนแกเลียมอาร์เซไนด์ (100).....	28
3.4 กระบวนการปลูกผลึกโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บนแกเลียมอาร์เซไนด์ (100) ด้วยวิธีดรอปลีทอพีเทกซีจากลำโมเลกุล.....	29
4.1 ภาพ AFM ขนาด $1000\text{ nm} \times 1000\text{ nm}$ โครงสร้างวงแหวนนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณแกเลียมในการขึ้นรูปหยดโลหะตั้งแต่ 2.4-5.6 ML และเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่ $250-350^\circ C$ .....	31
4.2 กระบวนการเกิดโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ด้วยวิธีดรอปลีทอพีเทกซีจากลำโมเลกุล.....	32
4.3 กราฟการกระจายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณแกเลียมในการขึ้นรูปหยดโลหะตั้งแต่ 2.4-5.6 ML และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่ $250-350^\circ C$ .....	33
4.4 กราฟการกระจายขนาดความสูงของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณแกเลียมในการขึ้นรูปหยดโลหะตั้งแต่ 2.4-5.6 ML และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่ $250-350^\circ C$ .....	34
4.5 กราฟการกระจายขนาดความถี่ของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณแกเลียมในการขึ้นรูปหยดโลหะตั้งแต่ 2.4-5.6 ML และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่ $250-350^\circ C$ .....	35
4.6 รูปภาพ AFM (ก) 3 มิติ (ข) 2 มิติ ขนาด $200\text{ nm} \times 200\text{ nm}$ และ (ค) ภาพตัดขวาง (cross section profile) จากชิ้นงานตัวอย่างปริมาณแกเลียม 4 ML ที่อุณหภูมิ $350^\circ C$ .....	36
4.7 กราฟความสัมพันธ์ความหนาแน่นของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์โดยมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะ $250-350^\circ C$ .....	37
4.8 กราฟความสัมพันธ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์โดยมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะ $250-350^\circ C$ .....	37

ภาพที่	หน้า
4.9 กราฟความสัมพันธ์ความสูงของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์โดยมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหกด โลหะ 250-350°C.....	38
4.10 กราฟความสัมพันธ์ความลึกของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์โดยมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหกด โลหะ 250-350°C.....	38
4.11 กราฟความสัมพันธ์ความหนาแน่นของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณหกด โลหะแกเลียมขณะขึ้นรูปหกด โลหะตั้งแต่ 2.4-5.6 ML.....	39
4.12 กราฟความสัมพันธ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ โครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแกเลียมในการขึ้นรูปหกด โลหะตั้งแต่ 2.4-5.6 ML.....	40
4.13 กราฟความสัมพันธ์ของความสูงของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแกเลียมในการขึ้นรูปหกด โลหะตั้งแต่ 2.4-5.6 ML.....	40
4.14 กราฟความสัมพันธ์ความลึกของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแกเลียมในการขึ้นรูปหกด โลหะตั้งแต่ 2.4-5.6 ML.....	41
4.15 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 16 K ของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ จากตัวอย่างที่ใช้ปริมาณแกเลียม 4 ML และอุณหภูมิขณะขึ้นรูปหกด โลหะ 350°C.....	42
4.16 แผนภาพแถบพลังงานที่อุณหภูมิ 0 K ของ GaP ในเมตริกซ์ GaAs ที่ได้จากการคำนวณ (ก) unstrained (ข) strained-modified.....	43
4.17 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 16 K ของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิขณะขึ้นรูปหกด โลหะแกเลียมและปริมาณแกเลียม ในการขึ้นรูปหกด โลหะคงที่ 4 ML.....	45
4.18 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 16 K โดยการเปลี่ยนแปลงกำลังงานแสงในการกระตุ้น โครงสร้างนาโนของ GaP จากตัวอย่างที่ใช้ Ga 4 ML โดยอุณหภูมิแผ่นผลึกฐาน ขณะขึ้นรูปหกด โลหะ (ก) 250°C (ข) 300°C และ (ค) 350°C.....	46
4.19 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่ใช้กำลังงานแสงในการกระตุ้น 90 mW โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในขณะที่วัด โครงสร้างนาโนของ GaP จากตัวอย่างที่ใช้ Ga 4 ML โดย อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหกด โลหะ (ก) 250°C (ข) 300°C และ (ค) 350°C.....	47
4.20 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 16 K ของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณแกเลียมขณะขึ้นรูปหกด โลหะและอุณหภูมิของแผ่นผลึก ฐานขณะขึ้นรูปหกด โลหะมีค่า 350°C.....	49

ภาพที่

หน้า

- 4.21 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 16 K โดยการเปลี่ยนแปลงกำลังงานแสงในการกระตุ้นโครงสร้างนาโนของ GaP จากตัวอย่างที่ใช้อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะ 350°C และปริมาณแก๊สเฉื่อยขณะขึ้นรูปหยดโลหะ (ก) 2.4 ML (ข) 3.2 ML และ (ค) 4.0 ML..... 50
- 4.22 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่ใช้กำลังงานแสงในการกระตุ้น 90 mW โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในขณะที่วัดโครงสร้างนาโนของ GaP จากตัวอย่างที่ใช้อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะ 350°C และปริมาณแก๊สเฉื่อย (ก) 2.4 ML (ข) 3.2 ML และ (ค) 4.0 ML..... 51

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	surface area
AFM	atomic force microscopy
Al	aluminium
AlAs	aluminium arsenide
AlP	aluminium phosphide
As	arsenic
BEP	beam equivalent pressure
CB	conduction band
$\delta$	delta function
$D_{bulk}(E)$	bulk density of state
$D_{QW}(E)$	quantum well density of state
$D_{QWR}(E)$	quantum wire density of state
$D_{QD}(E)$	quantum dot density of state
D.O.S.	density of state
$E$	carrier energy
$E_g$	band gap energy
$E_{n,x}$	quantized energy in $x$ -direction
$E_{n,y}$	quantized energy in $y$ -direction
$E_{n,z}$	quantized energy in $z$ -direction
$F$	free energy
$F(\mathbf{r})$	envelope wave function
FM	rank van der Merwe
FWHM	full width at half maximum
Ga	gallium
GaAs	gallium arsenide
GaP	gallium phosphide
GaSb	gallium antimonide
$h$	Planck's constant

$\hbar$	reduced Planck's constant
H <sub>2</sub> O	water
In	indium
InAs	indium arsenide
InGaAs	indium gallium arsenide
InP	indium phosphide
$k$	amplitude of wave vector
$k_B$	Boltzmann's constant
$k_{//}$	amplitude of in-plane ( $y$ - $z$ ) wave vector
$k_{\perp}$	amplitude of wave vector in $x$ -direction
$\mathbf{k} = (k_x, k_y, k_z)$	carrier wave vector
$\lambda_{\text{de Broglie}}$	de Broglie wavelength
$L$	macroscopic length scale
$L_{\text{QW}}$	sum of the well and barrier regime thickness
$L_x$	nanometer length scale in $x$ direction
$L_y$	nanometer length scale in $y$ direction
$L_z$	nanometer length scale in $z$ direction
$m^*$	effective mass
$m_{\text{eff}}$	carrier effective mass
MBE	molecular beam epitaxial or molecular beam epitaxy
ML	monolayer
Mo	molybdenum
$n$	quantum number in $z$ -direction (integer)
N <sub>2</sub>	nitrogen
$N_D$	volume density of quantum dot
$N_e$	number of state per unit surface
$N_{wi}$	area density of quantum wire
$P$	carrier momentum
PL	photoluminescence
QW	quantum well

QWR	quantum wire
QD	quantum dot
RHEED	reflection high-electron energy diffraction
Si	silicon
SiGe	silicon germanium
SK	Stranski Krastanow
$\Theta$	Heaviside's unit step function
$T$	temperature
$t_c$	critical thickness
UHV	ultra high vacuum
VM	Volmer Weber
WL	wetting layer
$\theta$	angle



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาของวิทยานิพนธ์

โครงสร้างนาโนหรือโครงสร้างขนาดระดับนาโนเมตร เช่น ควอนตัมดอต (Quantum dot) ควอนตัมริงก์ (Quantum ring) และควอนตัมดอตโมเลกุล (Quantum dot molecule) ซึ่งเป็นโครงสร้างขนาดเล็กที่ประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในสิ่งประดิษฐ์ทางแสงได้ [1] ด้วยคุณสมบัติการเก็บกักพาหะไฟฟ้าอันได้แก่ อิเล็กตรอนและโฮลไว้ที่ระดับพลังงานต่างๆ ที่มีลักษณะเป็นระดับพลังงานที่ไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นจึงทำให้โครงสร้างนาโนมีคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงหรือเปล่งแสงที่ความยาวคลื่นหนึ่งๆเฉพาะได้ไม่เปลี่ยน ตัวอย่างเช่น เลเซอร์ (laser) โฟโตดีเทคเตอร์ (photodetector) สำหรับควอนตัมริงก์เป็นโครงสร้างนาโนอีกชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติการเก็บกักพาหะเช่นเดียวกับควอนตัมดอต แต่เนื่องจากมีรูปร่างแบบวงแหวนจึงทำให้มีคุณสมบัติพิเศษเพิ่มเติม เช่น Aharonov-Bohm effect [2] และอาจจะให้คุณสมบัติทางแม่เหล็กหากนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุแม่เหล็ก

เทคนิคที่นิยมใช้ในการประดิษฐ์โครงสร้างนาโนสารกึ่งตัวนำ คือ กลไกการก่อตัวขึ้นเอง (self-assembled) ที่ได้จากปลูกผลึกในแบบ Stranski-Krastanow (SK) ซึ่งกลไกดังกล่าวส่วนใหญ่ นั้นใช้ได้กับการปลูกผลึกของวัสดุที่มีค่าคงตัวโครงสร้าง (lattice constant) ขนาดใหญ่กว่าค่าคงตัวโครงสร้างของแผ่นผลึกฐาน ตัวอย่างของสารประกอบกึ่งตัวนำที่นิยมใช้การขึ้นรูปด้วยวิธีดังกล่าว ได้แก่ อินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ (InGaAs) ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) ในที่นี้แกลเลียมอาร์เซไนด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีบทบาทสำคัญทางด้านสิ่งประดิษฐ์ทางแสงเนื่องจากมีแถบพลังงานแบบตรง (direct bandgap) ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญสำหรับใช้ในเลเซอร์หรือสิ่งประดิษฐ์ทางแสงอื่นๆ และมักจะถูกนำมาใช้เป็นแผ่นผลึกฐานของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำต่างๆ นอกจากนี้แกลเลียมฟอสไฟด์ (GaP) เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำอีกชนิดหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญในงานด้านวิศวกรรมไฟฟ้า นอกเหนือไปจากซิลิกอน (Si) แกลเลียมอาร์เซไนด์และอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ โดยแกลเลียมฟอสไฟด์เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำที่สำคัญสำหรับการประดิษฐ์

สิ่งประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสง (light emitting diode : LED) [3] ที่เปล่งแสงสีเขียวในยุคแรกแต่เนื่องจากแถบเลียมฟอสไฟด์มีแถบพลังงานเป็นแถบพลังงานไม่ตรง (indirect bandgap) ทำให้ประสิทธิภาพในการเปล่งแสงต่ำ ดังนั้นในการทำให้แถบเลียมฟอสไฟด์มีประสิทธิภาพในการเปล่งแสงดีขึ้นนั้นต้องใช้วิธีการเจือในโตรเจน เพื่อให้เกิดกลไกเปล่งแสงเป็นแบบ isoelectric recombination นอกจากนี้ยังมีอีกแนวทางหนึ่ง คือ การประยุกต์ใช้โครงสร้างนาโนเพื่อเพิ่มสมรรถนะของสิ่งประดิษฐ์ อย่างไรก็ตามแถบเลียมฟอสไฟด์มีค่าคงตัวโครงสร้างผลึกเล็กที่สุดในกลุ่มสารประกอบ III-V ที่มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (zincblende) ทำให้ไม่สามารถประดิษฐ์โครงสร้างนาโนของแถบเลียมฟอสไฟด์บนแผ่นผลึกฐานแถบเลียมอาร์เซไนด์ได้ด้วยวิธี Stranski-Krastanow ดังนั้นวิธีการที่เหมาะสมในการประดิษฐ์โครงสร้างนาโนของแถบเลียมฟอสไฟด์บนแถบเลียมอาร์เซไนด์ คือ วิธีดรอปลีทอพิแทกซี (Droplet Epitaxy) โดยการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy) ซึ่งกลไกการก่อตัวของโครงสร้างนาโนมิได้อาศัยความเครียด หากแต่เกิดจากการก่อตัวของหยดโลหะ (droplet) ของธาตุหมู่ III ซึ่งไม่มีความเครียดและทำการขึ้นรูปผลึก (crystallization) ด้วยการพ่นลำโมเลกุลของธาตุหมู่ V ลงบนหยดโลหะธาตุหมู่ III เพื่อเปลี่ยนรูปหยดโลหะให้เป็นผลึกสารประกอบทำให้เกิดโครงสร้างนาโนสารกึ่งตัวนำขึ้น เนื่องจากกระบวนการที่ไม่ซับซ้อนการควบคุมรูปแบบโครงสร้างนาโนจึงสามารถทำได้ง่าย นอกจากนี้ผลึกของโครงสร้างนาโนมีคุณภาพสูงและไม่มีขีดจำกัดสำหรับกรณีการประดิษฐ์หัวต่อเฮเทอโรที่เป็นสารประกอบที่มีกลุ่ม V แตกต่างกัน ตัวอย่างของโครงสร้างนาโนที่ใช้วิธีดรอปลีทอพิแทกซี เช่น ควอนตัมริงก์แถบเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) ในอะลูมิเนียมแถบเลียมอาร์เซไนด์ (AlGaAs) [4] ควอนตัมริงก์อินเดียมอาร์เซไนด์ (InAs) ในแถบเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) [5] และควอนตัมริงก์แถบเลียมแอนติโมนไนด์ (GaSb) ในแถบเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) [6] เป็นต้น

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาการประดิษฐ์โครงสร้างนาโนของแถบเลียมฟอสไฟด์บนแถบเลียมอาร์เซไนด์ (100) ที่ปลูกผลึกด้วยวิธีดรอปลีทอพิแทกซีจากลำโมเลกุล ซึ่งได้ศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขในการประดิษฐ์ผลึกที่มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางแสงของโครงสร้างนาโนของแถบเลียมฟอสไฟด์ โดยทำการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างนาโนของแถบเลียมฟอสไฟด์บนแถบเลียมอาร์เซไนด์ (100) ที่ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM) และทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงของโครงสร้างนาโนของแถบเลียมฟอสไฟด์บนแถบเลียมอาร์เซไนด์ (100) ด้วยการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence: PL)

โดยเนื้อหาวิทยานิพนธ์ประกอบด้วยสารบัญที่ 2 ทบทวนความรู้พื้นฐานของโครงสร้าง Low-dimension วิธีการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล (MBE) วิธีการวัดลักษณะผิวหน้าด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) รวมทั้งการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (PL) ในบทที่ 3 กล่าวถึงกระบวนการทดลอง ส่วนในบทที่ 4 เป็นผลการทดลองที่ได้และการวิเคราะห์ผลและในบทที่ 5 เป็นสรุปสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

## 1.2 วัตถุประสงค์

วิทยานิพนธ์นี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการประดิษฐ์โครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บนแกเลียมอาร์เซไนต์ (100) ที่ปลูกด้วยวิธีครอปลีทอพิแทกซีจากลำโมเลกุล เพื่อศึกษาอิทธิพลค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการประดิษฐ์ ได้แก่ อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหอยดโลหะแกเลียมและปริมาณของแกเลียมในการขึ้นรูปหอยดโลหะที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางแสงของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บนแกเลียมอาร์เซไนต์ (100)

## 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ศึกษาการประดิษฐ์โครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บนแกเลียมอาร์เซไนต์ (100) ที่ปลูกด้วยวิธีครอปลีทอพิแทกซีจากลำโมเลกุล โดยศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่ใช้ในการประดิษฐ์ ได้แก่ อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหอยดโลหะแกเลียมและปริมาณของแกเลียมในการขึ้นรูปหอยดโลหะซึ่งทำการศึกษาคูณสมบัติทางกายภาพผิวหน้าของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ที่ปลูกด้วยวิธีครอปลีทอพิแทกซีจากลำโมเลกุล เพื่อวิเคราะห์ผลของตัวแปรในขณะประดิษฐ์ที่มีต่อลักษณะของโครงสร้างและความหนาแน่นของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ และทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงของโครงสร้างนาโนแกเลียมฟอสไฟด์ในบางเงื่อนไขของการประดิษฐ์ด้วยการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์นี้

ข้อมูลทางวิชาการเกี่ยวกับการประดิษฐ์โครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บนแกเลียมอาร์เซไนต์ (100) ที่ปลูกด้วยวิธีครอปลีทอพิแทกซีจากลำโมเลกุล ได้แก่ อิทธิพลของอุณหภูมิแผ่น

ผลึกฐานขณะขึ้นรูปหอค โลหะแกเลียมและปริมาณของแกเลียมในการขึ้นรูปหอค โลหะที่มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางแสงของ โครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์

ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพผิวหน้าของ โครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บนแกเลียมอาร์เซไนด์ที่ปลูกด้วยวิธีครอปเล็ทอพิแทกซ์จากลำโมเลกุล และคุณสมบัติการเปล่งแสงจากวิโฟโตลูมิเนสเซนส์ของ โครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บนแกเลียมอาร์เซไนด์ที่ประดิษฐ์ในบางเงื่อนไข

## บทที่ 2

### ความรู้พื้นฐาน

บทนี้กล่าวถึงความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยเนื้อหาประกอบด้วยโครงสร้าง Low-dimension ได้แก่ ควอนตัมดอต ควอนตัมริงค์ ควอนตัมเวลด์ ควอนตัมไวร์ รวมทั้งการปลูกผลึกแบบกลไกการก่อตัวขึ้นเอง (self-assembled growth) ได้แก่ การปลูกผลึกด้วยวิธี Stranski-Krastanow การปลูกผลึกด้วยวิธีครอปเล็ทอพิแพกซี รวมถึงความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการปลูกผลึกอพิแพกซีจากตำโมเลกุล วิธีการวัดลักษณะทางกายภาพผิวหน้าด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM) และวิธีการวัดคุณสมบัติทางแสงด้วยวิธีโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence: PL)

#### 2.1 โครงสร้าง Low-dimension

โดยทั่วไปแล้วพาหะนำไฟฟ้า (charge carriers) ภายในอะตอมเดี่ยว อันได้แก่ อิเล็กตรอน และโฮลมีระดับพลังงานที่แน่นอนเพียงบางค่าเท่านั้น แต่เมื่ออะตอมมากกว่า 2 อะตอมอยู่ใกล้กัน จะก่อให้เกิดการแยกระดับชั้นพลังงานของพาหะเกิดเป็นระดับพลังงานใหม่เพิ่มเติม หากอะตอมมีจำนวนเพิ่มขึ้นระดับพลังงานที่เกิดขึ้นจะมีจำนวนมากจนกลายเป็นแถบพลังงาน (energy band) ที่มีความต่อเนื่องและมีจำนวนมากกว่าหนึ่งระดับพลังงาน สำหรับในสารกึ่งตัวนำแถบพลังงานมีแถบพลังงานต้องห้าม (energy gap) คั่นกลางระหว่างแถบนำไฟฟ้า (conduction band) และแถบวาเลนซ์ (valence band) ซึ่งที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน (K) นั้นแถบนำไฟฟ้าปราศจากอิเล็กตรอน ในขณะที่แถบวาเลนซ์มีอิเล็กตรอนอยู่เต็ม เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 0 K แถบพลังงานทั้งสองจะมีอิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้าและมีโฮลในแถบวาเลนซ์ โดยที่พาหะทั้งสองชนิดนั้นทำหน้าที่เป็นพาหะนำไฟฟ้า และมีความสัมพันธ์กับอนุภาคแสงหรือโฟตอน (photon) ในระดับพลังงานเท่ากัน ดังนั้นการควบคุมการเคลื่อนที่ของพาหะนำไฟฟ้าในแถบพลังงานทั้งสอง จึงเป็นพื้นฐานสำคัญของการสร้างสรรค์สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเนื่องจาก wave-like properties of carriers ซึ่งนิยามความสัมพันธ์ของพลังงานพาหะกับพลังงานในรูปคลื่นได้ โดยในโครงสร้าง Low-dimension นั้นพาหะถูกเก็บกักบริเวณในทิศทางใดทิศทางหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งทิศทาง โดยที่ช่วงความยาวของการเก็บกักพาหะเป็นอัตราส่วนของความยาวคลื่นเดอบรออย์ (de Broglie wavelength) โดย

แปรผกผันกับค่ามวลประสิทธิผลของพาหะ (carrier effective mass,  $m^*$ ) และค่าอุณหภูมิ ( $T$ ) ดังสมการ 2.1 [7]

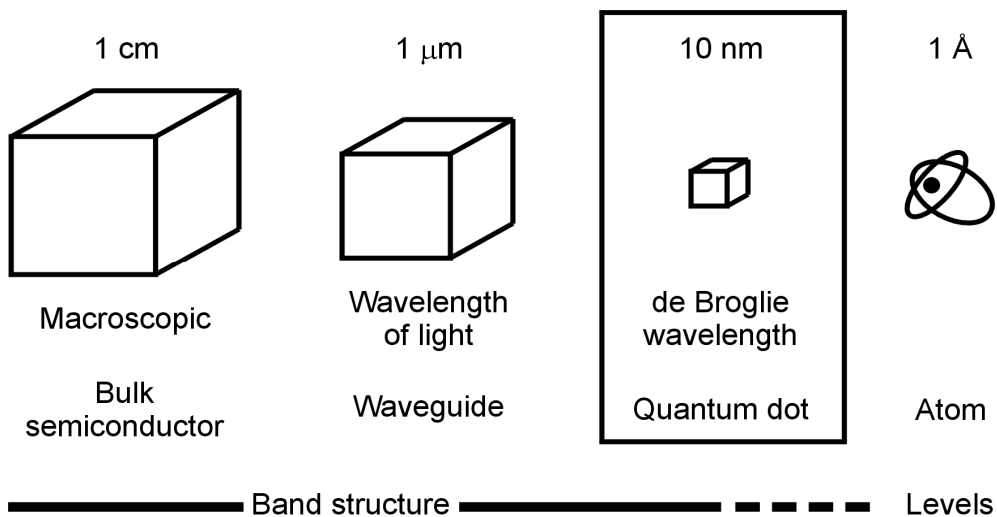
$$\lambda_{\text{de Broglie}} = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{3m^* k_B T}} \quad (2.1)$$

โดยที่  $h$  คือ ค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant)

$p$  คือ โมเมนตัมของพาหะ (carrier momentum)

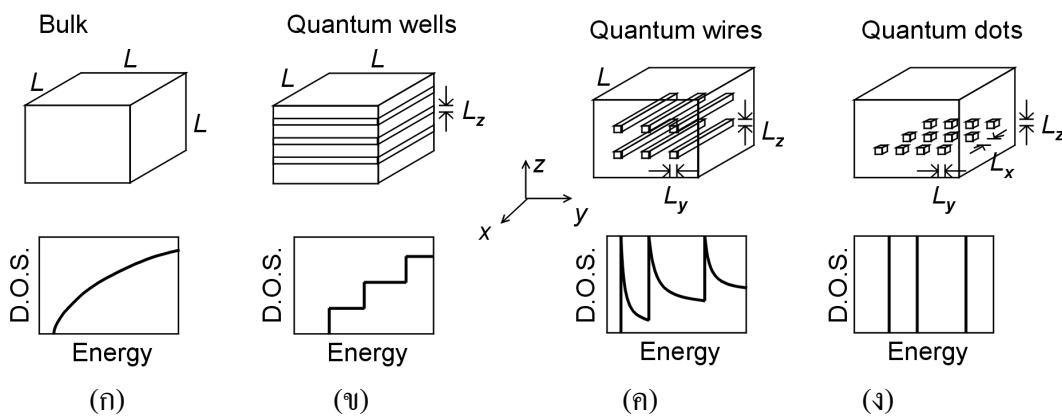
$k_B$  คือ ค่าคงตัวของโบลท์ซแมน (Boltzmann's constant)

เมื่อเราเปรียบเทียบวัสดุที่มีขนาดเป็นก้อนมวลสาร (Bulk) ท่อนำคลื่น (waveguide) ควอนตัมดอตและอะตอมดังในรูปที่ 2.1 โดยที่ขนาดของโครงสร้างควอนตัมดอตมีค่าอยู่ในระดับของความยาวคลื่นเดอบรอยล์ ส่วนท่อนำคลื่นอยู่ในระดับไมโครเมตร โดยโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของวัสดุที่มีขนาดเป็นก้อนมวลสารกับอะตอมนั้นแตกต่างกัน ซึ่งเราสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีแถบพลังงาน ส่วนอะตอมนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองของระดับพลังงานแบบไม่ต่อเนื่อง



รูปที่ 2.1 การเปรียบเทียบวัสดุที่มีขนาดเป็นก้อนมวลสาร ท่อนำคลื่น ควอนตัมดอตและอะตอม [8]

ความหนาแน่นของสถานะ (density of states: D.O.S.) ของวัสดุที่มีขนาดเป็นก้อนมวลสาร และโครงสร้าง Low-dimension ดังในรูปที่ 2.2 [9] โดยลักษณะแถบพลังงานที่แตกต่างกันระหว่าง โครงสร้าง Low-dimension และวัสดุห่อหุ้มรอบข้างทำให้เกิดการเก็บกักพาหะขึ้น ในกรณีที่ อิเล็กตรอนและโฮลถูกเก็บกักอยู่ในวัสดุชนิดเดียวกัน กำแพงศักย์สูงสุดนั้นถูกกำหนดจาก แถบพลังงานที่ยกขึ้นในแถบนำไฟฟ้าหรือแถบวาเลนซ์ [10] สำหรับในควอนตัมเวลล์อิเล็กตรอน และโฮลสามารถเคลื่อนที่ได้อิสระในระนาบ x-y ในควอนตัมไวร์อิเล็กตรอนและโฮลสามารถ เคลื่อนที่ได้ในทิศทาง x และในควอนตัมดอตอิเล็กตรอนและโฮลถูกเก็บกักอยู่กับที่ดังในรูปที่ 2.2 ความหนาแน่นของสถานะต่อหน่วยปริมาตรเป็นค่าจำนวนของสถานะ (number of states) ระหว่าง พลังงาน E และ E+dE ของแต่ละ โครงสร้างหาได้จากอ้างอิงหมายเลข [9]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างและความหนาแน่นสถานะ (D.O.S.) ได้แก่ (ก) วัสดุที่มีขนาดเป็นก้อนมวลสาร (ข) ควอนตัมเวลล์ (ค) ควอนตัมไวร์ และ (ง) ควอนตัมดอต โดยที่ L มีค่าอยู่ในระดับ  $\mu\text{m}$  ในขณะที่  $L_x$ ,  $L_y$  และ  $L_z$  อยู่ในระดับ nm [9]

### 2.1.1 วัสดุที่มีขนาดเป็นก้อนมวลสาร (Bulk)

วัสดุที่มีขนาดเป็นก้อนมวลสาร โดยโครงสร้างและความหนาแน่นสถานะมีลักษณะดังใน รูปที่ 2.2 (ก) พาหะสามารถเคลื่อนที่ได้อิสระทุกทิศทาง ซึ่งมีพลังงาน  $E_{\text{bulk}}$  ดังสมการ (2.2) ความ หนาแน่นของสถานะดังสมการ (2.3)

$$E_{\text{bulk}} = E(\mathbf{k}) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} \quad (2.2)$$

$$D_{\text{bulk}}(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left( \frac{2m^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} E^{1/2} \quad (2.3)$$

โดยที่  $\mathbf{k} = (k_x, k_y, k_z)$  นั่นคือ เวกเตอร์คลื่น (wave vector) ของพาหะ

$$k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$$

### 2.1.2 ควอนตัมเวลล์ (Quantum well)

โครงสร้างควอนตัมเวลล์ โดยโครงสร้างและความหนาแน่นสถานะมีลักษณะดังในรูปที่ 2.2 (ข) พาหะสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระ 2 มิติในระนาบ x-y นั่นคือ พาหะจำกัดทิศทางการเคลื่อนที่เพียง 1 มิติ ซึ่งมีพลังงาน  $E_{QW}$  ดังสมการ (2.4) ความหนาแน่นของสถานะดังสมการ (2.5)

$$E_{QW} = E(\mathbf{k}) = \frac{\hbar^2 k_{\parallel}^2}{2m^*} + E_{n_z} = \frac{\hbar^2}{2m^*} \left[ k_{\parallel}^2 + \left( \frac{n_z \pi}{L_z} \right)^2 \right] \quad (2.4)$$

$$D_{QW}(E) = \frac{m^*}{\pi \hbar^2 L_{QW}} \sum_{n_z} \Theta(E - E_{n_z}) \quad (2.5)$$

$$\text{โดยที่ } k_{\parallel}^2 = k_x^2 + k_y^2$$

$\Theta$  คือ Heaviside's unit step function

$$n_z = 1, 2, 3, \dots$$

$L_{QW}$  คือ ผลรวมความหนาของเวลล์และ barrier regime

### 2.1.3 ควอนตัมไวร์ (Quantum wire)

โครงสร้างควอนตัมไวร์ โดยโครงสร้างและความหนาแน่นสถานะมีลักษณะดังในรูปที่ 2.2 (ค) พาหะในโครงสร้างนี้สามารถเคลื่อนที่ได้อิสระเพียง 1 มิติในทิศ x เท่านั้น นั่นคือ พาหะจำกัดทิศทางการเคลื่อนที่ 2 มิติ ซึ่งมีพลังงาน  $E_{QWR}$  ดังสมการ (2.6) ความหนาแน่นของสถานะดังสมการ (2.7)

$$E_{QWR} = E(\mathbf{k}) = \frac{\hbar^2 k_{\perp}^2}{2m^*} + E_{n_y} + E_{n_z} = \frac{\hbar^2}{2m^*} \left[ k_{\perp}^2 + \left( \frac{n_y \pi}{L_y} \right)^2 + \left( \frac{n_z \pi}{L_z} \right)^2 \right] \quad (2.6)$$



$$D_{\text{QWR}}(E) = \frac{N_{wi}}{\pi} \frac{\sqrt{2m^*}}{\hbar} \sum_{n_y, n_z} \frac{1}{\sqrt{E - E_{n_y} - E_{n_z}}} \quad (2.7)$$

โดยที่  $k_{\perp}^2 = k_x^2$

$$n_y, n_z = 1, 2, 3, \dots$$

$N_{wi}$  คือ ความหนาแน่นพื้นที่ของควอนตัมไวร์

#### 2.1.4 ควอนตัมดอต (Quantum dot)

โครงสร้างควอนตัมดอตและความหนาแน่นสถานะมีลักษณะดังในรูปที่ 2.2 (ง) ในโครงสร้างนี้ถูกกักขังใน 3 มิติ พาหะจึงไม่มีมิติหรือพิกัดของการเคลื่อนที่เลย และพลังงานที่พาหะนำไฟฟ้ามีเพียงบางค่าเท่านั้น เนื่องจากระดับพลังงานที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นระดับพลังงานที่ไม่ต่อเนื่องเหมือนกับคุณสมบัติของพาหะนำไฟฟ้าในระดับอะตอม (artificial atom) โดยมีพลังงาน  $E_{\text{QD}}$  ดังสมการ (2.8) ความหนาแน่นของสถานะดังสมการ (2.9)

$$E_{\text{QD}} = E_{n_x} + E_{n_y} + E_{n_z} = \frac{\hbar^2}{2m^*} \left[ \left( \frac{n_x \pi}{L_x} \right)^2 + \left( \frac{n_y \pi}{L_y} \right)^2 + \left( \frac{n_z \pi}{L_z} \right)^2 \right] \quad (2.8)$$

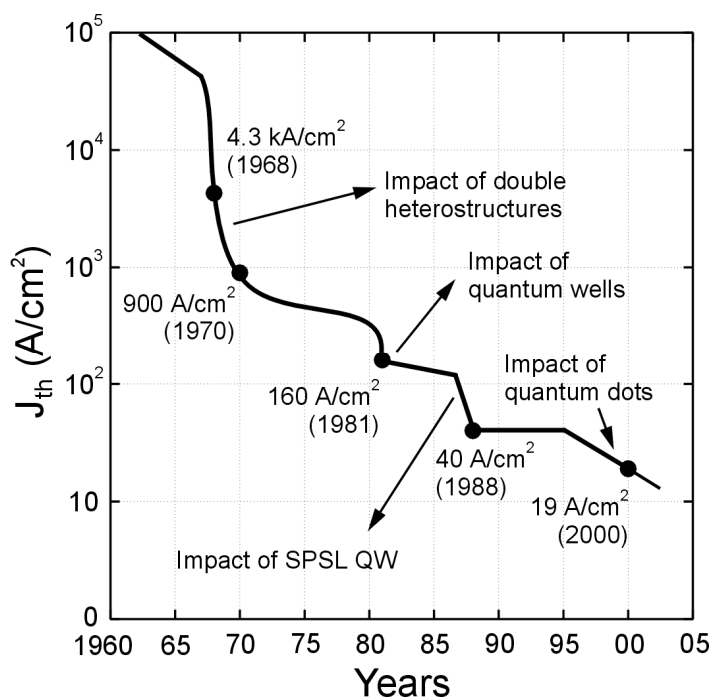
$$D_{\text{QD}}(E) = 2N_D \sum_{n_x, n_y, n_z} \delta(E - E_{n_x} - E_{n_y} - E_{n_z}) \quad (2.9)$$

โดยที่  $\delta$  คือ เดลต้าฟังก์ชัน (delta function)

$N_D$  คือ ปริมาตรความหนาแน่นของควอนตัมดอต

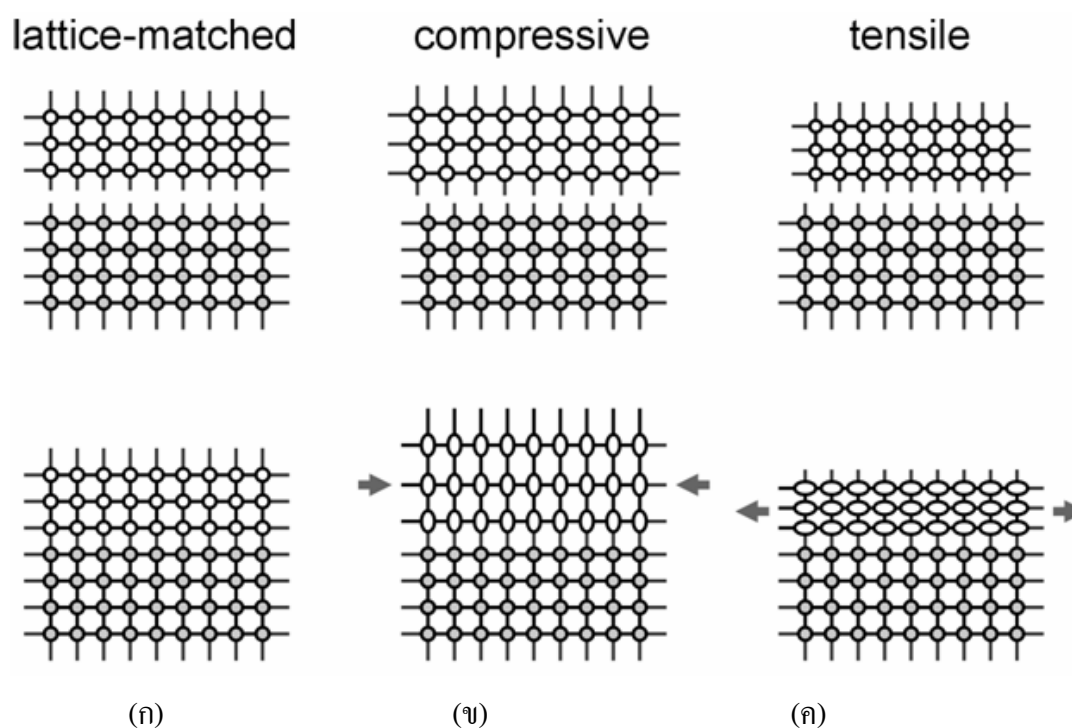
$E_{n_x}$ ,  $E_{n_y}$  และ  $E_{n_z}$  คือ พลังงานที่เป็นฟังก์ชันของตัวเลขควอนตัม

เมื่อโครงสร้างนาโนลดขนาดจาก Bulk เป็นโครงสร้าง Low-dimension ดังในรูปที่ 2.2 การเปลี่ยนค่าความหนาแน่นของสถานะมีผลต่อคุณสมบัติพื้นฐานของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่นำโครงสร้างนาโนมาประยุกต์ใช้ เช่น เลเซอร์สารกึ่งตัวนำที่นำควอนตัมดอตมาประยุกต์ใช้ทำให้ค่ากระแสขีดเริ่มต้นของการเปล่งแสงเลเซอร์ (threshold current) ต่ำลง เนื่องจากการมีความหนาแน่นของสถานะเป็นเดลต้าฟังก์ชัน ในรูปที่ 2.3 แสดงวิวัฒนาการของค่ากระแสขีดเริ่มต้นของการเปล่งแสงเลเซอร์ของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำที่มีค่าลดลงเมื่อนำโครงสร้าง Low-dimension มาประยุกต์ใช้



รูปที่ 2.3 วิวัฒนาการของค่ากระแสขีดเริ่มต้นของการเปล่งแสงเลเซอร์ของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ [11]

ควอนตัมคอตจากกลไกการก่อตัวขึ้นเองเกิดขึ้นจากการปลูกผลึกที่มีค่าคงตัวโครงผลึก (lattice constant) แตกต่างจากค่าคงตัวโครงผลึกของแผ่นผลึกฐาน ซึ่งทำให้เกิดการไม่เข้ากันของค่าคงตัวโครงผลึก (lattice mismatched) ดังนั้นความเข้าใจเกี่ยวกับอิทธิพลของความเครียดแบบต่างๆ ที่มีต่อคุณสมบัติของวัสดุจึงเป็นสิ่งสำคัญ จากรูปที่ 2.4 แบบจำลองของการจัดเรียงอะตอมของแผ่นผลึกฐาน (อะตอมทึบ) และอะตอมของชั้นที่ต้องการปลูก (อะตอมโปร่ง) ในส่วนบนของแต่ละภาพก่อนการปลูกผลึกอีพิแทกซ์และภาพส่วนล่างหลังการปลูกผลึกอีพิแทกซ์ ในกรณีของการปลูกผลึกอีพิแทกซ์แบบ lattice-matched ในรูปที่ 2.4 (ก) โดยวัสดุที่ปลูกมีค่าคงตัวโครงผลึกเท่ากับหรือใกล้เคียงกับค่าคงตัวโครงผลึกของแผ่นผลึกฐาน สำหรับในการปลูกผลึกที่ต้องการให้เกิดความเครียดขึ้น เราสามารถทำได้ด้วยการปลูกผลึกที่มีค่าคงตัวโครงผลึกแตกต่างไปจากค่าคงตัวโครงผลึกของแผ่นผลึกฐาน ความเครียดแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ แบบบีบอัด (compressive) และแบบดึง (tensile) ในระหว่างการปลูกผลึกโมเลกุลของผลึกที่ปลูกจะมีค่าคงตัวโครงผลึกเท่ากับแผ่นผลึกฐานดังใน รูปที่ 2.4 (ข) และ (ค) เงื่อนไขนี้ทำให้เกิดแรงเครียดในระนาบ (in-plane strain)



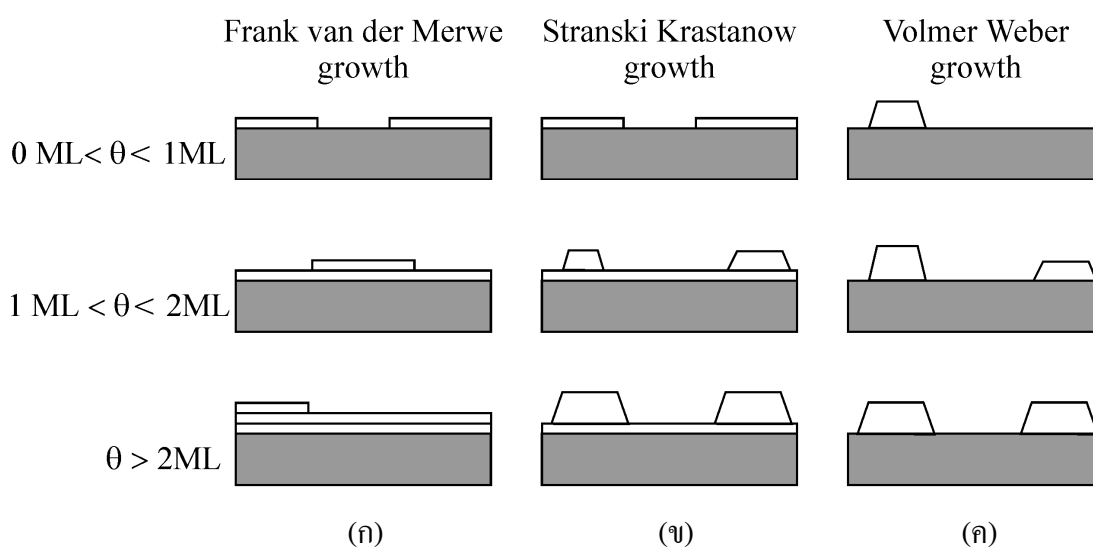
รูปที่ 2.4 แบบจำลองการจัดเรียงอะตอมของการปลูกผลึกอพิแทกซี (ก) lattice-matched และ lattice-mismatched ที่มีความเครียดในลักษณะ (ข) ความเครียดแบบบีบอัด และ (ค) ความเครียดแบบดึง

### 2.1.5 โครงสร้างนาโนรูปวงแหวน (Quantum ring)

โครงสร้างนาโนรูปวงแหวนเป็นโครงสร้างขนาดเล็กระดับนาโนเมตรชนิดพิเศษที่มีคุณสมบัติคล้ายกับควอนตัมดอต โดยในโครงสร้างนั้นประกอบขึ้นด้วยสารประกอบที่ห่อหุ้มล้อมรอบด้วยสารกึ่งตัวนำต่างชนิดที่มีแถบพลังงานใหญ่กว่า ทำให้แถบพลังงานของโครงสร้างนาโนมีคุณสมบัติเป็น potential well ซึ่งสามารถเก็บกักพาหะนำไฟฟ้าให้อยู่ภายในบริเวณโครงสร้างที่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตรได้ พาหะที่ถูกเก็บกักจึงถูกจำกัดให้มีระดับพลังงานได้เพียงบางค่าเท่านั้น (quantization) ดังนั้นระดับพลังงานที่เกิดขึ้นเป็นระดับชั้นพลังงานแบบไม่ต่อเนื่อง [12] ทำให้คุณสมบัติการเปล่งแสงของโครงสร้างนี้มีที่ความยาวคลื่นหนึ่งๆ เฉพาะได้ดีเมื่อถูกกระตุ้น นอกจากนี้โครงสร้างนาโนรูปวงแหวนมีคุณสมบัติทางแม่เหล็กที่เรียกว่า Aharonov-Bohm effect [13] ถ้านำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุแม่เหล็ก

## 2.2 วิธีการปลูกผลึกอพิแทกซี (growth modes)

กลไกการเกิดผลึกของการปลูกผลึกอพิแทกซีนั้นมีหลายลักษณะ ได้แก่ Frank van-der-Merwe (layer-by-layer) Stranski-Krastanow (layer plus island) และ Volmer-Weber (island) ดังในรูปที่ 2.5 ลักษณะรูปแบบของการเกิดผลึกที่แตกต่างกันอันเนื่องมาจากคุณสมบัติของการตกผลึกที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้และเงื่อนไขต่างๆ ในการปลูกผลึกอพิแทกซี ความแตกต่างของลักษณะการเกิดผลึกนั้นมีความสำคัญต่อการควบคุมการปลูกผลึกอพิแทกซี เพื่อจะได้นำความรู้ที่ได้ไปวิเคราะห์หาเงื่อนไขการปลูกผลึกที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลึกที่มีคุณสมบัติตามต้องการ



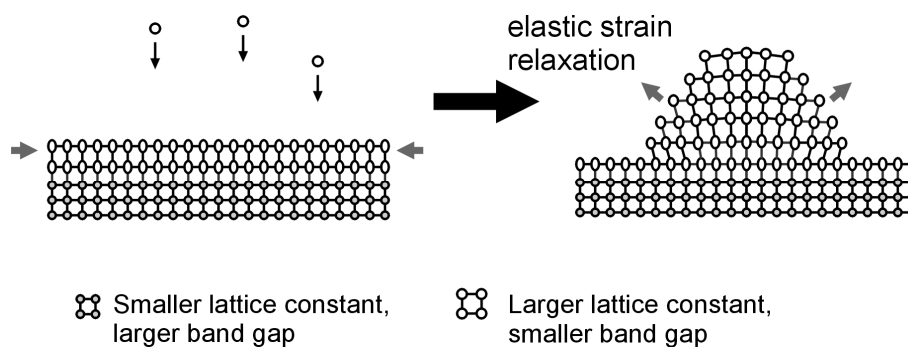
รูปที่ 2.5 วิธีการปลูกผลึกอพิแทกซีแบบ (ก) Frank van-der-Merwe (ข) Stranski-Krastanow และ (ค) Volmer-Weber [14]

### 2.2.1 Frank van-der-Merwe

ในการปลูกผลึกอพิแทกซีแบบ Frank van-der-Merwe การเกิดผลึกจะเกิดขึ้นทีละชั้นใน 2 มิติ (2D layers) ความเครียดที่เกิดขึ้นจากการไม่เข้ากันของค่าคงตัวโครงผลึกจะเกิดขึ้นเพียงไม่กี่ชั้นของการปลูกผลึก ผลึกชั้นแรกจะมีการยึดแน่นโดยค่าคงตัวโครงผลึกจะถูกบังคับให้เท่ากับค่าคงตัวโครงผลึกแผ่นผลึกฐาน อย่างไรก็ตามสำหรับชั้นต่อมาแรงบีบอัดหรือแรงดึงระหว่างอะตอมทำให้ค่าคงตัวโครงผลึกมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจนกระทั่งวัสดุที่ทำการปลูกมีค่าคงตัวโครงผลึกเท่ากับวัสดุนั้นเองโดยปราศจากความเครียด การปลูกผลึกในลักษณะนี้จะเกิดในเงื่อนไขที่ค่าคงตัวโครงผลึกมีความแตกต่างกันน้อยมาก

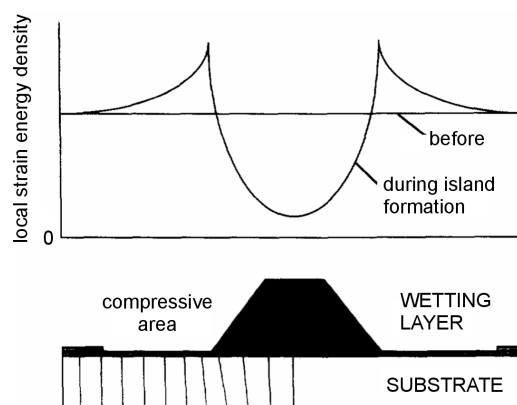
### 2.2.2 Stranski-Krastanow (SK)

ในการปลูกผลึกอพิแทกซีแบบ Stranski-Krastanow [15] การเกิดผลึกจะมีลักษณะเป็นเกาะ 3 มิติ (3D island) ดังในรูปที่ 2.6 โดยการเกิดผลึกนั้นเกิดจากค่าคงตัวโครงผลึกมีความแตกต่างกันมาก เช่น การปลูกอินเดียมอาร์เซไนด์บนแผ่นผลึกฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์ ซึ่งค่าคงตัวโครงผลึกทั้งสองแตกต่างกันมาก เมื่อทำการปลูกผลึกอพิแทกซีบนแผ่นผลึกฐานที่มีค่าคงตัวโครงผลึกต่ำกว่าวัสดุที่ปลูกผลึกนั้นจะเกิดความเครียดขึ้นจนถึงค่าความหนาวิกฤต (critical thickness:  $t_c$ ) และที่ความหนามากกว่าความหนาวิกฤตค่าความเครียดจะมีค่ามากเกินกว่าจะรักษาความเป็นชั้นผลึกใน 2 มิติต่อไปได้ ดังนั้นชั้นสารที่ทำการปลูกผลึกจึงเกิดการโค้งงอขึ้น (buckles) เพื่อลดค่าความเครียดลง ค่าความเครียดถูกทำให้ลดลงที่ขอบของเกาะ (island) และกลายเป็นเกาะ 3 มิติ



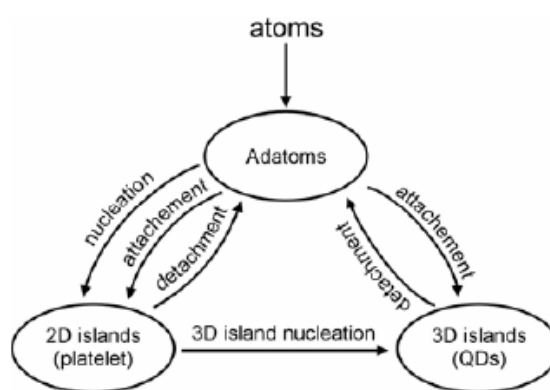
รูปที่ 2.6 ลักษณะการปลูกผลึกอพิแทกซีแบบ Stranski-Krastanow

ขีดจำกัด (limitation) ของขนาดของควอนตัมดอทสามารถอธิบายด้วย self-limiting growth โดยการศึกษาค่า strain energy รอบๆ เกาะ 3 มิติระหว่างการก่อตัวของเกาะดังในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ความหนาแน่นพลังงาน ณ ตำแหน่งต่างๆ ในโครงสร้างควอนตัมดอท [16]

ความหนาแน่นพลังงานที่เกิดขึ้นจากการก่อตัวของควอนตัมดอตส่งผลต่อ surface chemical potential โดยค่าพลังงานต่ำสุดอยู่ที่ยอดของเกาะหรือดอต เนื่องจากมีความเครียดน้อยที่สุด และมีค่ามากที่สุดที่ขอบของเกาะหรือดอตเพราะมีความเครียดแบบบีบอัดสูง แรงบีบอัดถูกส่งต่อไปยังแผ่นผลึกฐานก่อให้เกิดการ misfit ระหว่างแผ่นผลึกฐานและชั้น wetting รอบๆ เกาะหรือดอต จึงเกิดเป็นกำแพงศักย์รอบควอนตัมดอตและเกิดเป็นอาณาบริเวณที่ไม่เหมาะสมสำหรับการก่อตัวของ adatoms



รูปที่ 2.8 กระบวนการเกิดควอนตัมดอตตามทฤษฎี mean-field [16]

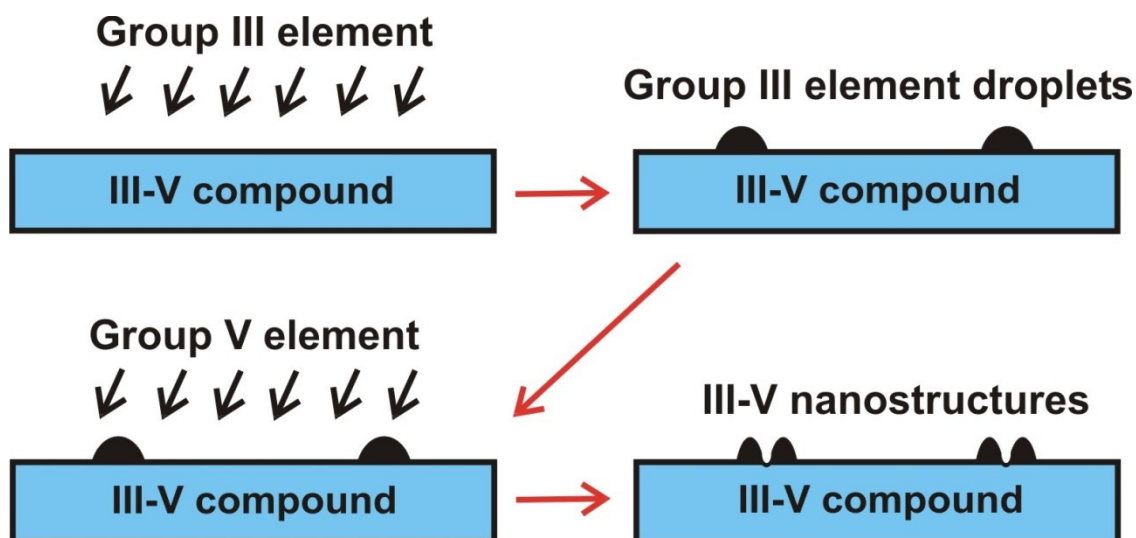
### 2.2.3 Volmer -Weber

ในการปลูกผลึกอพิแทกซีแบบ Volmer-Weber นั้นการเกิดผลึกจะไม่เป็นชั้น 2 มิติ (2D layers) แต่จะกลายเป็นเกาะ 3 มิติ (3D island) เพียงอย่างเดียวเท่านั้น โดยเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากอะตอมที่ตกผลึกต่างยึดกันแน่นมากกว่าแผ่นผลึกฐาน การเกิดผลึกในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นในกรณีที่ทำกรปลูกเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติแตกต่างกับแผ่นผลึกฐานเป็นอย่างมาก เช่น การปลูกโลหะบนออกไซด์

### 2.2.4 การปลูกผลึกโครงสร้างนาโนด้วยวิธีทรอปเล็ทอพิแทกซี

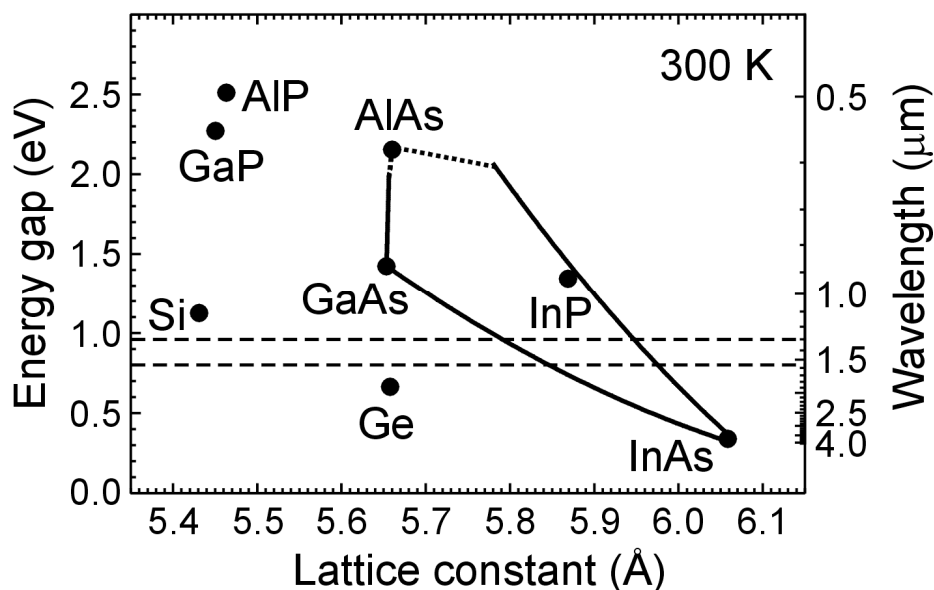
การปลูกผลึกโครงสร้างนาโนด้วยวิธีทรอปเล็ทอพิแทกซีมีขั้นตอนกระบวนการประดิษฐ์ ดังนี้ เริ่มต้นจากการพ่นลำไมเลกุลของธาตุหมู่ III ไปบนผิวหน้าแผ่นผลึกฐานทำให้เกิดเป็นหยดโลหะของธาตุหมู่ III (group-III metallic droplets) ที่มีสถานะเป็นโลหะหลอมเหลว โดยลักษณะของหยดโลหะของธาตุหมู่ III ที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะและค่าอัตราการพ่นในขณะขึ้นรูปหยดโลหะ จากนั้นทำการขึ้นรูปผลึก (crystallization) เพื่อเปลี่ยนหยด

โลหะของธาตุหมู่ III ให้เป็นโครงผลึกนาโนสารกึ่งตัวนำหมู่ III-V ด้วยการพ่นด้วยลำโมเลกุลของธาตุหมู่ V จากนั้นเกิดเป็นโครงสร้างผลึกนาโนสารกึ่งตัวนำหมู่ III-V [17] ดังในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กระบวนการปลูกผลึกโครงสร้างนาโนด้วยวิธีครอปเล็ทอพิแทกซีจากลำโมเลกุล

จากความสัมพันธ์ของค่าคงตัวโครงผลึก (lattice constant) ของสารกึ่งตัวนำต่างๆ ดังในรูปที่ 2.10 พบว่าแกเลียมฟอสไฟด์มีค่าคงตัวโครงผลึกเล็กกว่าแผ่นผลึกฐานแกเลียมอาร์เซไนด์ ดังนั้นวิธีการที่เหมาะสมในการประดิษฐ์โครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บนแผ่นผลึกฐานแกเลียมอาร์เซไนด์ คือ วิธีครอปเล็ทอพิแทกซีจากลำโมเลกุล ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อนและกลไกการก่อตัวมิได้เกิดจากความเครียด หากแต่เกิดจากการก่อตัวของหยดโลหะของแกเลียมและทำการ crystallization ด้วยลำโมเลกุลของฟอสไฟด์ ( $P_2$ ) เพื่อให้เกิดเป็น โครงผลึกนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการประดิษฐ์โครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บนแกเลียมอาร์เซไนด์ (100) ที่ปลูกด้วยวิธีครอปเล็ทอพิแทกซีจากลำโมเลกุล



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ของค่าคงตัวโครงผลึก (lattice constant) กับค่าช่องว่างพลังงาน (energy gap) และค่าความยาวคลื่น (wavelength) ที่สัมพันธ์กับค่าช่องว่างพลังงานที่อุณหภูมิห้องของสารกึ่งตัวนำ

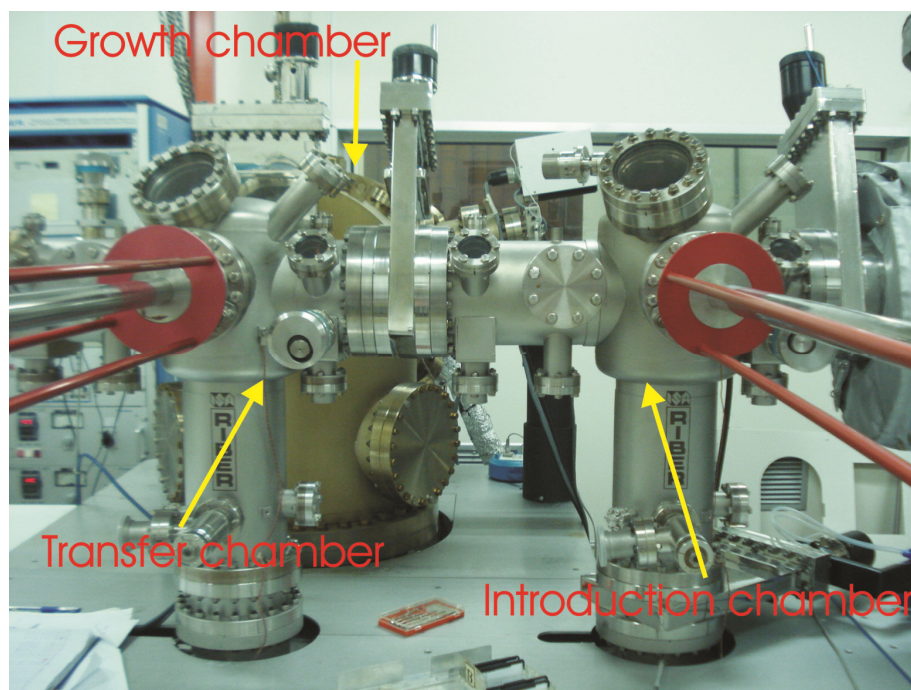
### 2.3 การปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy: MBE)

การปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุลเป็นเทคนิคการปลูกชั้นผลึกบางของสารประกอบกึ่งตัวนำบนแผ่นผลึกฐาน (substrate) ที่เป็นผลึกเดี่ยว (single crystal) โดยการพ่นลำโมเลกุลของอะตอมของธาตุที่เป็นวัตถุดิบลงบนผิวหน้าแผ่นผลึกฐาน ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลหรืออะตอมที่เป็นองค์ประกอบของสารประกอบสารกึ่งตัวนำ ภายใต้สภาวะสุญญากาศระดับสูงพิเศษ (ultra-high vacuum: UHV) ปฏิกิริยาของการเกิดเป็นสารประกอบนี้เกิดขึ้นที่บนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน โดยอัตราส่วนของธาตุต่างๆ ในสารประกอบและคุณสมบัติของชั้นผลึกอพิแทกซ์ที่ปลูกได้นั้นขึ้นกับเงื่อนไขตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการปลูกผลึก เช่น ค่าอัตราส่วนค่าความดันไอของลำโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบ ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูก นอกจากนี้อัตราการปลูกนี้ขึ้นกับคุณสมบัติการเกาะติด (impinging) ผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานของธาตุองค์ประกอบนั้นๆ ด้วย

สำหรับข้อดีของการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุล ได้แก่ การเตรียมผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานสามารถทำได้ง่าย โดยวิธีการทำความสะอาดด้วยความร้อน (thermal cleaning) ภายใต้สภาวะสุญญากาศระดับสูงพิเศษ ความสามารถในการตรวจสอบโครงสร้างผิว (surface structure) ที่สามารถกระทำได้ตลอดเวลาตั้งแต่ก่อนการเริ่มต้นการปลูกผลึกจนถึงสิ้นสุดกระบวนการปลูกผลึก



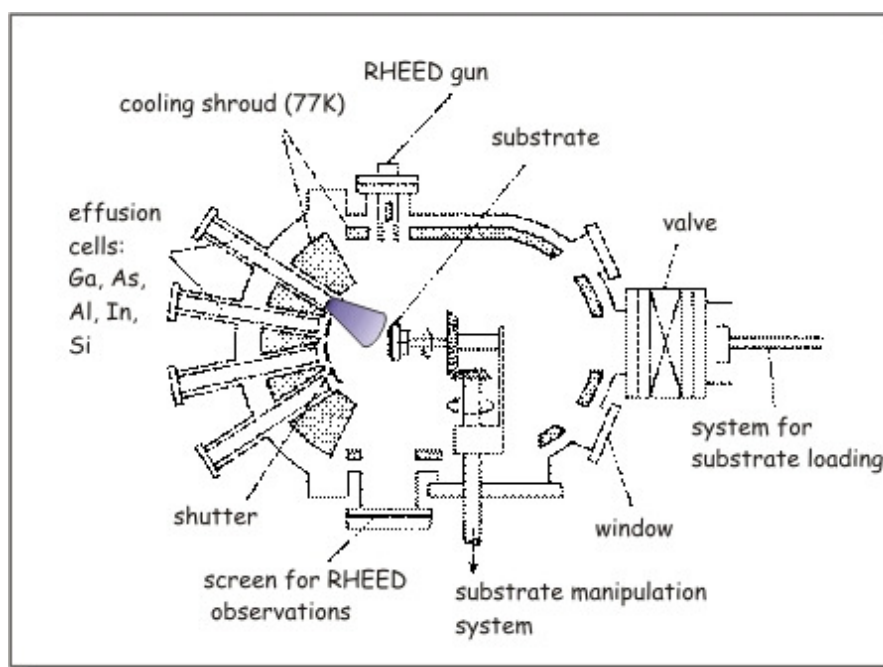
นอกจากนี้การปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุลที่ดำเนินการในระบบสุญญากาศระดับสูงพิเศษทำให้ผลึกที่ได้มีความบริสุทธิ์สูงกว่าวิธีการอื่นๆ เนื่องจากก๊าซต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อคุณภาพผลึก เช่น  $H_2O$ ,  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  ฯลฯ มีปริมาณที่ต่ำมาก จึงทำให้สามารถควบคุมคุณภาพของผลึกที่ปลูกได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของชุดระบบการปลูกผลึกจากลำโมเลกุล RIBER รุ่น 32P

ระบบการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุลที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นระบบ RIBER รุ่น 32P ซึ่งมีลักษณะเป็นโมดูล (module) โดยประกอบด้วย ห้องเตรียมแผ่นผลึกฐาน (Introduction chamber) ห้องเปลี่ยนถ่าย (Transfer chamber) และห้องปลูกผลึก (Growth chamber) ดังในรูปที่ 2.11 โดยในห้องเตรียมแผ่นผลึกฐาน ห้องเปลี่ยนถ่ายและห้องปลูกผลึกมีปั๊มสุญญากาศระดับสูงอยู่จำนวน 2 ชุด คือ ปั๊มไอออน (ion pump) และปั๊มไททานเนียมซับลิเมชัน (Ti sublimation pump) แต่ละโมดูลจะถูกรักษาสุญญากาศด้วยระบบปั๊มสุญญากาศ โดยแต่ละโมดูลที่ต่อกันนี้มีประตู (gate valve) กันระหว่างโมดูล เพื่อรักษาภาวะสุญญากาศในแต่ละส่วนให้เป็นอิสระจากกัน และสามารถให้ตัวลำเลียงแผ่นผลึกฐาน (cassette) ที่มีตัวยึดแผ่นผลึกฐาน (molybdenum block) ผ่านเข้า ออกจากโมดูลส่วนหนึ่งไปยังโมดูลอีกส่วนหนึ่งได้ โดยไม่รบกวนโมดูลอื่นๆ ห้องเตรียมแผ่นผลึกฐานเป็นส่วนที่ใช้ในการเตรียมผิวหน้าแผ่นผลึกฐานก่อนการปลูกผลึก เพื่อไล่ความชื้นและขจัดออกไซด์ที่ผิวหน้า

ของแผ่นผลึกฐานด้วยความร้อนก่อนการนำแผ่นผลึกฐานเข้าสู่ห้องปลูกผลึก สำหรับห้องเปลี่ยนถ่ายเป็นส่วนที่ใช้ในการลำเลียงตัวยึดแผ่นผลึกฐานเข้าหรือออกจากห้องปลูกผลึก และห้องปลูกผลึกเป็นส่วนที่ดำเนินกระบวนการปลูกผลึกอพิแทกซี ซึ่งในขณะดำเนินการปลูกผลึกมีไนโตรเจนเหลวไหลผ่านผนังห้องเป็นจำนวนมาก เพื่อช่วยสร้างสภาวะสุญญากาศสูงพิเศษ (ultra-high vacuum: UHV) ในห้องปลูกผลึก ด้วยความเย็นของไนโตรเจนเหลวส่งผลให้อุณหภูมิภายในห้องปลูกผลึกมีพลังงานจลน์ลดลง จนความดันบรรยากาศภายในห้องปลูกผลึกลดต่ำลงจนถึงระดับสุญญากาศ สำหรับวัสดุที่ใช้ในระบบการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล ได้แก่ แกลเลียม (gallium: Ga) อะลูมิเนียม (aluminium: Al) อินเดียม (indium: In) อาร์เซนิก (arsenic: As) ซิลิคอน (silicon: Si) และฟอสฟอรัส (phosphorus: P) ซึ่งได้จากการสลายตัวของแกลเลียมฟอสไฟด์ (gallium phosphide : GaP) ใน Knudsen cell ที่มี Ga-trapping cap



รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบในห้องปลูกผลึกจากลำโมเลกุล

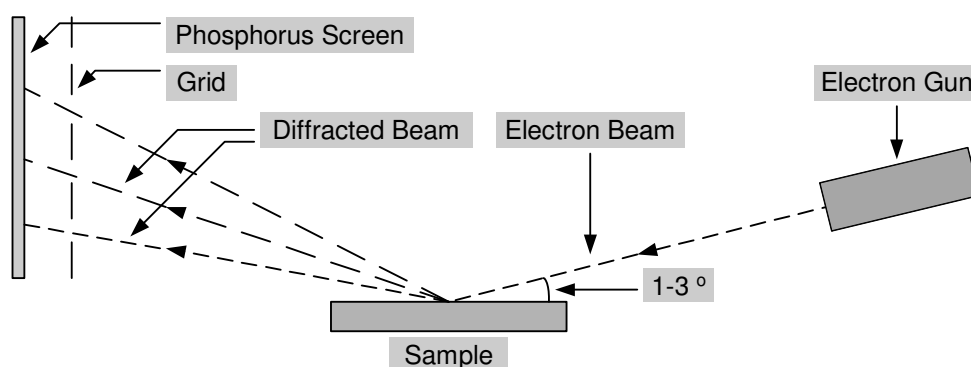
ระบบการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุลมีข้อดีที่เหนือกว่าวิธีการปลูกผลึกอพิแทกซีวิธีอื่นๆ ในเชิงเทคนิค คือ สามารถติดตั้งอุปกรณ์วิเคราะห์ต่างๆ เข้ากับระบบได้ ทำให้สะดวกในการตรวจสอบและวิเคราะห์ผลได้อย่างต่อเนื่องในขณะดำเนินการปลูกผลึก โดยอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกับระบบปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล (MBE) ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ เครื่องวิเคราะห์มวล (Quadrupole mass spectrometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของอนุภาคที่

ปรากฏในรูปของลำโมเลกุลหรือก๊าซภายในส่วนห้องปลูกผลึก ซึ่งทำให้เราสามารถรู้สภาพบรรยากาศภายในส่วนห้องปลูกผลึก นอกจากนี้เรายังสามารถใช้วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ (composition) ของสารประกอบได้ในขณะที่ทำการปลูกผลึกได้ นอกจากนี้ยังมีระบบสร้างรูปแบบการแทรกสอดที่ได้จากการสะท้อนผิวหน้าชั้นงานของลำอิเล็กตรอนพลังงานสูง (Reflection High Energy Electron Diffraction: RHEED) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และตรวจสอบโครงสร้างผิวในขณะปลูกผลึกได้

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

ระบบสร้างรูปแบบการแทรกสอดที่ได้จากการสะท้อนของลำอิเล็กตรอนพลังงานสูง (Reflection High Energy Electron Diffraction : RHEED) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และตรวจสอบโครงสร้างผิว โดยรูปแบบการแทรกสอดที่ได้จาก RHEED บ่งบอกรูปแบบของลักษณะโครงสร้างระดับไมโคร (microstructure) และความเรียบของผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ ซึ่งรูปแบบการแทรกสอดที่ได้จาก RHEED นี้ขึ้นกับลักษณะการเรียงตัวของอะตอมผิวหน้าในทั้ง 3 มิติ ซึ่งการเรียงตัวของอะตอมที่ต่างกันหรือความสมบูรณ์ของผิวหน้าที่ต่างกันส่งผลให้รูปแบบ RHEED ที่ปรากฏขึ้นแตกต่างกันไป

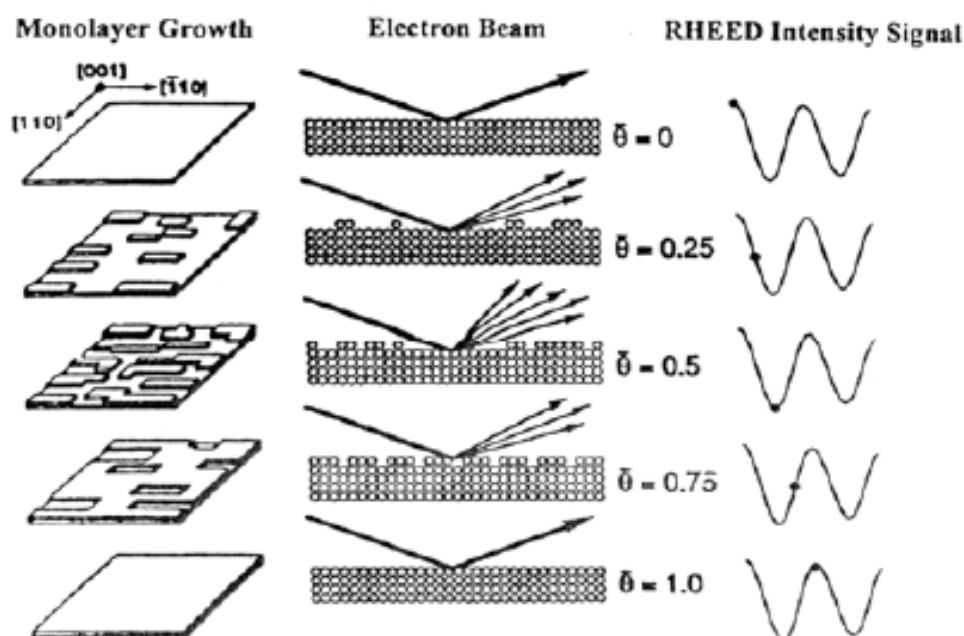
การทำงานของ RHEED เริ่มต้นจากการยิงลำอิเล็กตรอนจากแหล่งจ่ายมีทิศทางไปยังผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานทำมุม 1-3 องศากับระนาบแผ่นผลึกฐานและมีค่าพลังงาน 15-30 KeV ลำอิเล็กตรอนดังกล่าวจะสะท้อนจากผิวหน้าชั้นงานและแทรกสอดกัน เกิดเป็นรูปแบบการแทรกสอดปรากฏบนจอภาพฟอสฟอรัสดังในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แผนภาพจากการเกิดรูปแบบการแทรกสอดของ RHEED ที่สะท้อนจากผิวหน้าของผลึก

### 2.4.1 การหาอัตราการปลูกผลึกด้วย RHEED oscillation

RHEED สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการหาอัตราการปลูกผลึก (growth rate calibration) ได้เนื่องจาก RHEED มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสงในขณะที่ทำการปลูกผลึก โดยเราสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงของ RHEED ได้ ซึ่งมีลักษณะดังในรูปที่ 2.14 ตามปกติแล้วผิวหน้าของผลึกก่อนดำเนินการปลูกผลึกจะมีความเรียบทำให้อิเล็กตรอนที่สะท้อนจากผิวหน้าผลึกมีระเบียบและอยู่ในทิศทางเดียวกันเนื่องจากอะตอมเรียงตัวเป็นระเบียบ ดังนั้นความเข้มของลำอิเล็กตรอนที่สะท้อนผ่านไปในการนี้จะมีค่าความเข้มสูงสุด แต่เมื่อเริ่มต้นการปลูกผลึก ความเข้มแสง RHEED จะมีค่าลดลงจากการกระเจิง (scattering) ของลำอิเล็กตรอน อันเนื่องมาจากผลึกที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานเกิดการเรียงตัวของก้อนผลึกขนาดเล็ก (cluster) มีลักษณะกระจัดกระจายไม่เป็นระเบียบ จึงทำให้ความเข้มของลำอิเล็กตรอนที่สะท้อนออกมาเกิดการแทรกสอดในทางหักล้างกัน จนกระทั่งก้อนผลึกขนาดเล็กเหล่านั้นคลุมผิวหน้าของผลึกมากกว่าครึ่งหนึ่ง ความเข้มแสงของ RHEED จะกลับมามีความเข้มเพิ่มขึ้นอีกและมีค่าสูงสุดเมื่อผลึกเรียงเต็มผิวหน้า แผ่นผลึกฐานเกิดเป็นชั้นเรียบอีกชั้นหนึ่ง การเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงนี้มีความสัมพันธ์กับความหนาของผลึกที่เกิดขึ้น โดยหนึ่งรอบของการเปลี่ยนแปลงความเข้มสูงสุดถึงความเข้มสูงสุดอีกครั้งมีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงสำหรับผลึกที่มีความหนาหนึ่งชั้น โมเลกุล (monolayer)



รูปที่ 2.14 แผนภาพอธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลงความเข้มของอิเล็กตรอนในขณะที่ทำการปลูกผลึก [14]

นอกจากนี้รูปแบบ (pattern) ของ RHEED ที่ได้จากผลึกแต่ละชนิดสามารถบ่งบอกถึงช่วงค่าอุณหภูมิของผิวหน้าผลึกได้ ซึ่งปัจจุบันยังนิยมใช้วิธีนี้ในการตรวจสอบอุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานในการปลูกผลึกอพิแทกซีจากล่ำโมเลกุล และสามารถใช้ได้กับสารประกอบเกือบทุกชนิด โดยเฉพาะสารประกอบกึ่งตัวนำที่ค่าแถบพลังงานมีค่าน้อยมาก แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้มีความคลาดเคลื่อนมากกว่า  $10^{\circ}\text{C}$  และมีความยุ่งยากในการอ่านรูปแบบ RHEED ในการเทียบอุณหภูมิ โดยขึ้นกับความชำนาญรวมทั้งประสบการณ์ของผู้อ่านเป็นอย่างมาก

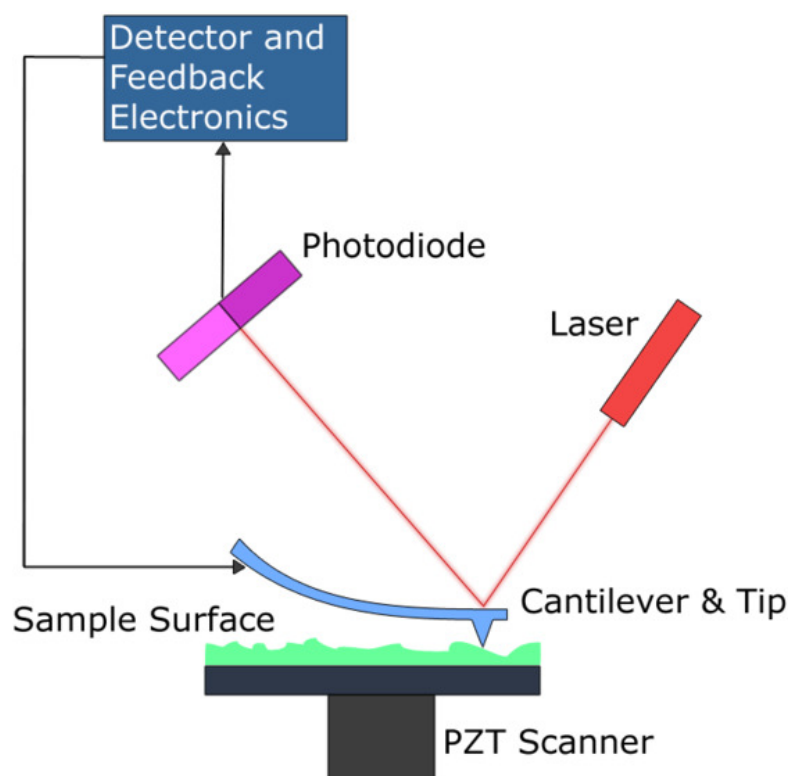
การวัดค่าอัตราการความเร็วในการปลูกผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์บนแผ่นผลึกฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์สามารถสังเกตได้จาก specular beam ของรูปแบบ RHEED บน phosphorus screen ดังในรูปที่ 2.14 ซึ่งความเข้มของ specular beam มีการเปลี่ยนแปลงในขณะที่ทำการปลูกผลึก การเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มนี้สามารถอธิบายได้จากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะผิวหน้า ถ้าผิวหน้ามีความสมบูรณ์ราบเรียบ ค่าความเข้มของ specular beam จะสว่างที่สุด แต่สำหรับผิวหน้าที่ยังไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดการกระเจิงและทำให้ความเข้มของ specular beam สว่างน้อยลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มในหนึ่งรอบนั้นสอดคล้องกับค่าความหนาที่เปลี่ยนแปลงไป 1 ชั้น โมเลกุล (ML) นั่นคือ เราสามารถตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราการความเร็วในการปลูกผลึกได้จากการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของ specular beam ที่เปลี่ยนแปลงไป เพื่อให้การวัดค่าอัตราการปลูกผลึกมีค่าแม่นยำ เราสามารถคำนวณหาจาก RHEED oscillation โดยคำนวณจากจำนวนคาบของการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของ specular beam ดังนั้น ค่าอัตราการปลูกผลึกสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.10)

$$\text{Growth Rate (ML/s)} = \frac{\text{Number of monolayer (ML)}}{\text{Time (sec)}} \quad (2.10)$$

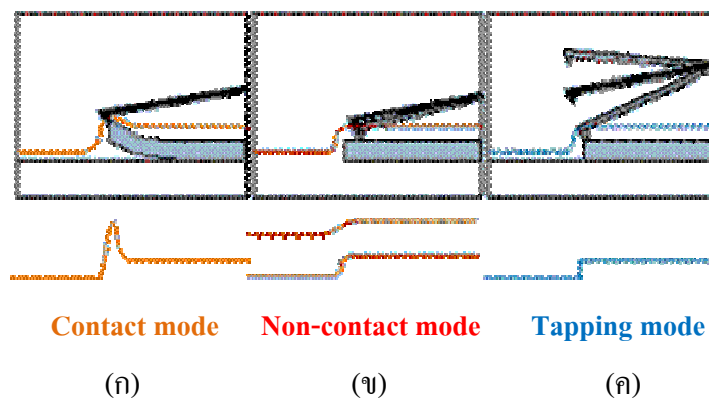
## 2.5 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM)

กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะผิวหน้าของชิ้นงานตัวอย่างที่เป็นของแข็งและมีกำลังขยายในระดับสูง โดยอาศัยหลักการของอันตรกิริยาของแรงระหว่างอะตอม (atomic force) ระหว่างหัวเข็ม (tip) ที่ทำจากซิลิคอน (silicon) หรือซิลิคอนไนไตรด์ ( $\text{SiN}_2$ ) เพื่อตรวจสอบพื้นผิวของสารในระดับนาโนเมตรจากสัญญาณที่ได้จากอันตรกิริยาระหว่างหัวเข็มและผิวหน้าของตัวอย่างและสัญญาณที่ได้นำมาทำการประมวลผลออกในลักษณะของภาพพื้นผิว

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม คือ การส่องแสงเลเซอร์ไปที่หัวเข็มซึ่งยึดติดอยู่กับคานยื่น (cantilever) แล้วสะท้อนมายัง photodiode โดยหัวเข็มจะไปสัมผัสกับพื้นผิวของวัตถุและเมื่อหัวเข็มลากผ่านโครงสร้างระดับนาโน แรงปฏิกิริยาที่กระทำในแนวตั้งฉากที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของพื้นผิวกับหัวเข็มจะดึงคานยื่นและเกิดการโก่งงอตัว ทำให้สามารถตรวจวัดขนาดของแรงเชิงปฏิสัมพันธ์ ส่วนแสงเลเซอร์ที่สะท้อนหัวเข็มจะถูกนำมาประมวลผลร่วมกันด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อสร้างเป็นภาพพื้นผิวที่เป็นลักษณะเชิงโครงสร้างระดับอะตอมที่มีกำลังการขยายสูง สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ ชิ้นงานตัวอย่างต่างๆ ถูกนำมาวิเคราะห์ลักษณะผิวหน้าด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมยี่ห้อ SEIKO SPA 400-AFM ที่มีโหมดการทำงานแบบ Tapping mode ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (ค)



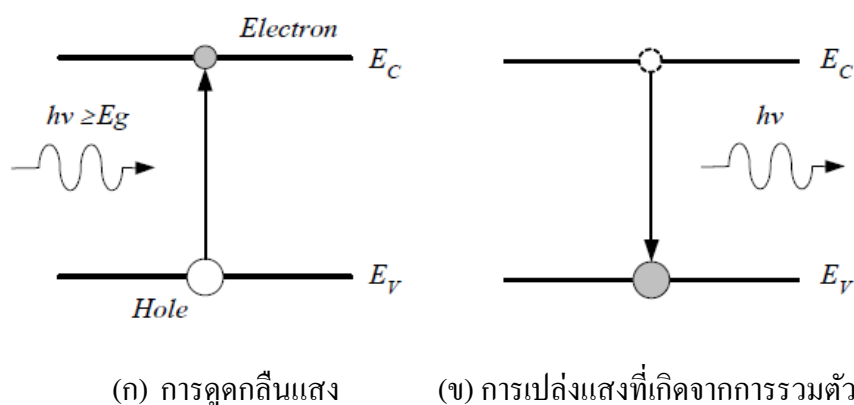
รูปที่ 2.15 หลักการทำงานของ AFM



รูปที่ 2.16 โหมดการทำงานของ AFM (ก) Contact mode (ข) Non-contact mode และ (ค) Tapping mode

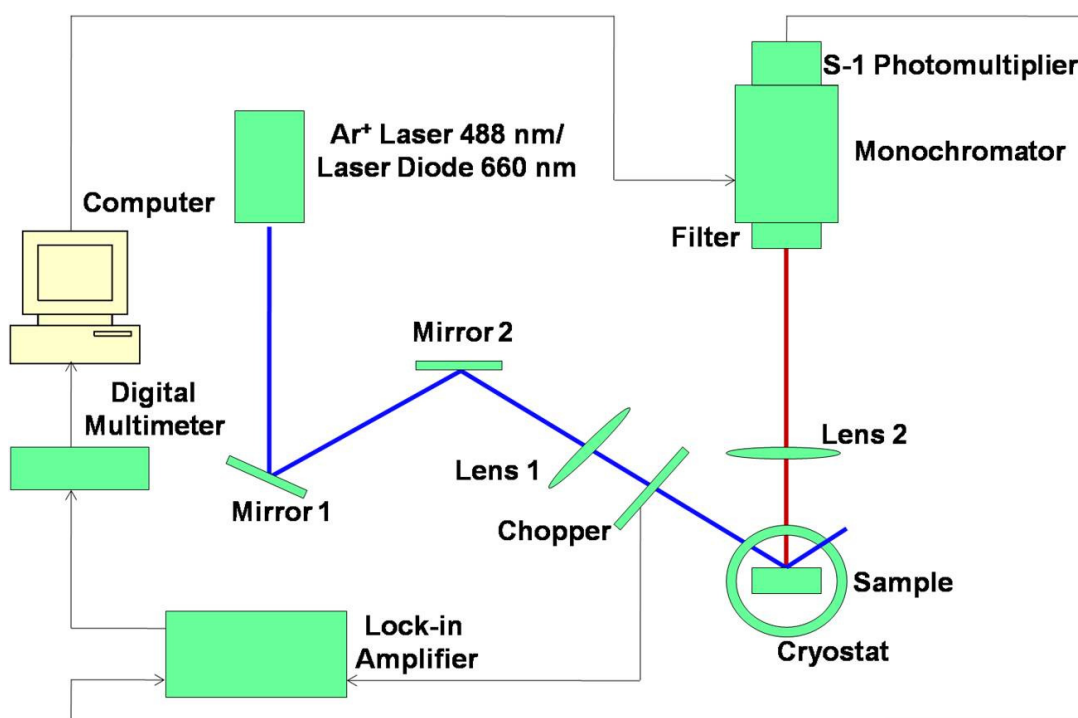
## 2.6 การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence: PL)

การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์เป็นวิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติการเปล่งแสงของสารกึ่งตัวนำโดยการกระตุ้นด้วยแสงที่มีค่าพลังงานโฟตอนมากกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งทำให้อิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำนั้นถูกกระตุ้น (excitation) สู่ระดับพลังงานสูงขึ้นเกิดเป็นคู่อิเล็กตรอนและโฮลขึ้นในสารกึ่งตัวนำ จากนั้นอิเล็กตรอนและโฮลหรือพาหะส่วนเกิน (excess carriers) ที่เกิดขึ้นมาจะรวมตัวกัน (recombination) ซึ่งการรวมตัวนี้อิเล็กตรอนจะคายพลังงานออกมาในรูปของอนุภาคแสงหรือโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับค่าช่องว่างแถบพลังงาน (bandgap energy) แผนภาพจำลองการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงที่เกิดจากการรวมตัวดังในรูปที่ 2.17 เมื่อวัดสเปกตรัมของแสงที่ได้จากการเปล่งแสงนี้จะทำให้ทราบค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำได้ ค่าพลังงานของความแตกต่างระดับพลังงานของโครงสร้างนาโน รวมทั้งค่าสัดส่วนของสารกึ่งในสารประกอบเทอร์นารี (Ternary) เป็นต้น



รูปที่ 2.17 แผนภาพจำลองการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงที่เกิดจากการรวมตัว

ระบบการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่ใช้ในการทดลองนี้มีการจัดอุปกรณ์ตามแผนภาพในรูปที่ 2.18 โดยใช้เลเซอร์จากอาร์กอน ( $\text{Ar}^+$ ) ที่มีค่าความยาวคลื่น 488 nm ซึ่งเทียบเท่ากับโฟตอนที่มีค่าพลังงาน 2.54 eV เป็นแสงกระตุ้น หรือในบางตัวอย่างจะใช้เลเซอร์ไดโอดที่มีค่าความยาวคลื่น 660 nm ซึ่งเทียบเท่ากับโฟตอนที่มีค่าพลังงาน 1.88 eV ชิ้นงานตัวอย่างจะถูกทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำตั้งแต่ 16 K ไปจนถึงประมาณ 210 K แสงที่ได้จากชิ้นงานตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นถูกรวบรวมด้วยเลนส์เพื่อให้แสงที่ได้มีค่าความเข้มสูงขึ้นและผ่านเข้าไปยังโมโนโครมาเตอร์ (monochromator) ซึ่งทำหน้าที่ในการแยกสเปกตรัมของแสงที่ได้จากชิ้นงานตัวอย่าง ซึ่งแสงที่ได้จะมีเฉพาะแสงที่มีค่าความยาวคลื่นตามที่โมโนโครมาเตอร์กำหนดค่าไว้ในขณะนั้น จากนั้นแสงจะผ่านไปยังโฟโตมัลติพลีเออร์ (S-1 photomultiplier) เพื่อขยายสัญญาณและเปลี่ยนแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า สุดท้ายสัญญาณไฟฟ้าจากโฟโตมัลติพลีเออร์ผ่านไปยังเครื่องขยายสัญญาณชนิดล็อกอินแอมพลิฟายเออร์ (lock-in amplifier) ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ได้จากโฟโตมัลติพลีเออร์อีกครั้งหนึ่ง และแปลงสัญญาณที่ได้ให้เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะถูกส่งไปยังมัลติมิเตอร์แบบดิจิทัล (digital multimeter) เพื่อส่งต่อข้อมูลในรูปแบบดิจิทัลไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อทำการสร้างกราฟสเปกตรัมความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณแสงที่ได้และค่าความยาวคลื่นหรือค่าพลังงานโฟตอนของชิ้นงานตัวอย่าง



รูปที่ 2.18 แผนภาพการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์



## บทที่ 3

### การทดลอง

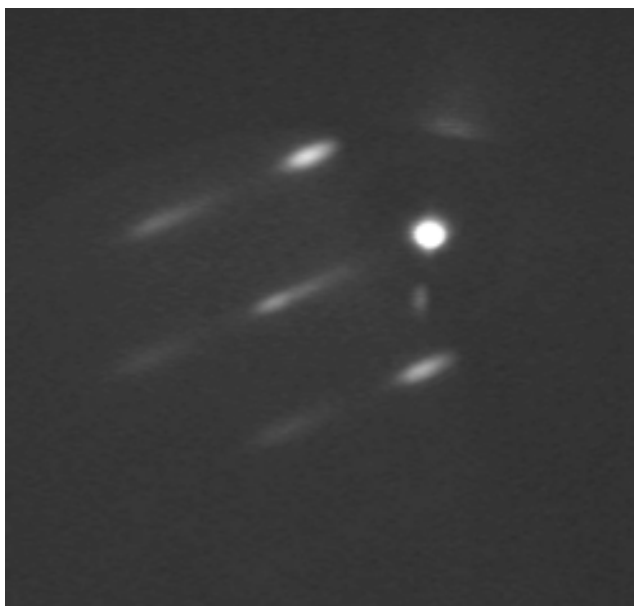
บทนี้กล่าวถึงรายละเอียดของการทดลองของวิทยานิพนธ์ ได้แก่ การเตรียมแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น การเตรียมการในห้องปลูกผลึกก่อนการปลูกผลึก รวมทั้งขั้นตอนกระบวนการประดิษฐ์โครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บนแผ่นผลึกฐานแกเลียมอาร์เซไนด์ (100) จากกลไกการก่อตัวขึ้นเองแบบครอปเล็ทอพิแทกซีจากล้าโมเลกุลภายใต้เงื่อนไขการประดิษฐ์ต่างๆ เพื่อศึกษาอิทธิพลตัวแปรที่ใช้ในการประดิษฐ์ ได้แก่ อุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหอคอยโลหะแกเลียมและปริมาณแกเลียมในการขึ้นรูปหอคอยโลหะ ซึ่งมีผลต่อค่าความหนาแน่นและลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ที่ปลูกขึ้นบนแกเลียมอาร์เซไนด์ (100) ท้ายที่สุดกล่าวถึงการปลูกกลบโครงสร้างนาโนแกเลียมฟอสไฟด์ด้วยชั้นแกเลียมอาร์เซไนด์สำหรับการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์

#### 3.1 การเตรียมแผ่นผลึกฐาน (sample preparation)

แผ่นผลึกฐาน (substrate) ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นแผ่นผลึกเดี่ยว (single crystal wafer) แกเลียมอาร์เซไนด์ที่มีผิวหน้าผลึก (orientation) อยู่ในระนาบ (100) ที่มีคุณสมบัติแบบกึ่งฉนวน (semi-insulating) และมีผิวหน้าแผ่นผลึกฐานที่พร้อมใช้งาน (epi-ready) แผ่นผลึกฐานดังกล่าวมีรูปร่างเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ซึ่งก่อนการปลูกผลึกตัดแบ่งแผ่นผลึกเดี่ยวแกเลียมอาร์เซไนด์ดังกล่าวออกเป็นชิ้นๆ ขนาดประมาณ  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  เพื่อใช้ในการปลูกผลึก จากนั้นนำแผ่นผลึกฐานที่ตัดแบ่งแล้วไปติดตั้งบนตัวยึดแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น (molybdenum block) โดยใช้อินเดียมที่หลอมเหลวด้วยความร้อนเป็นตัวยึด จากนั้นทิ้งไว้รอให้ตัวยึดแผ่นผลึกฐานที่มีแผ่นผลึกฐานแกเลียมอาร์เซไนด์ติดอยู่เย็นลง หลังจากนั้นนำตัวยึดแผ่นผลึกฐานที่มีแผ่นผลึกฐานแกเลียมอาร์เซไนด์ติดอยู่ทำการบรรจุใส่ในตัวถ้ำเลี้ยงแผ่นผลึกฐาน (cassette) เพื่อใช้เป็นตัวเคลื่อนย้ายตัวยึดแผ่นผลึกฐานเข้าสู่ระบบโดยผ่านห้องบรรจุแผ่นผลึกฐาน (Load lock chamber) และนำเข้าสู่ส่วนห้องเตรียมผิวหน้าแผ่นผลึกฐานด้วยความร้อน (Introduction chamber) จากนั้นทำการไล่ความชื้นขจัดไอน้ำ และสิ่งสกปรกที่ผิวหน้าออกด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ  $450^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำการเคลื่อนย้ายตัวยึดแผ่นผลึกฐานที่มีแผ่นผลึกฐานแกเลียมอาร์เซไนด์ติดอยู่ผ่านห้องเปลี่ยนถ่าย (Transfer chamber) เข้าสู่ห้องปลูกผลึก (Growth chamber) ต่อไป

### 3.2 การเตรียมการในห้องปลูกผลึกก่อนการปลูกผลึก

หลังจากการเตรียมแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นแล้ว ก่อนการปลูกผลึกทุกครั้งต้องทำความสะอาดเซลล์ของธาตุดังต่อไปนี้ประกอบต่างๆ (degas cell) โดยการเพิ่มอุณหภูมิของ effusion cell ที่บรรจุแคลเซียมให้มีค่าอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่จะใช้งานประมาณ  $30-50^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลานานประมาณ 15 นาที เพื่อกำจัดออกไซด์และสิ่งปนเปื้อน หลังจากนั้นลดอุณหภูมิของแหล่งจ่ายโมเลกุลแคลเซียมไปยังอุณหภูมิที่จะใช้งาน จากนั้นทำการขจัดออกไซด์ออก (oxide desorption) จากผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น โดยเริ่มต้นจากการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น เมื่ออุณหภูมิแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นมีค่า  $300^{\circ}\text{C}$  ขึ้นไป  $\text{As}_4$  จะถูกพ่นลงบนผิวหน้าแผ่นผลึกฐานเพื่อเป็นการชดเชยการสูญเสียอาร์เซนิกของแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น โดยในขณะนั้นสามารถตรวจสอบผิวหน้าแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นได้ด้วย RHEED เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า  $580^{\circ}\text{C}$  รูปแบบของ RHEED ที่ปรากฏมีความสว่างและชัดเจนขึ้นเนื่องจากแผ่นฐานเริ่มต้นเกิดการ de-oxidation มีการปลดปล่อยออกซิเจน จากนั้นตั้งค่าอุณหภูมิให้คงที่ประมาณ  $630^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลานาน 15-20 นาที เพื่อกำจัดออกไซด์ออกจากผิวหน้าแผ่นผลึกฐานซึ่งรูปแบบของ RHEED ที่ได้ขณะเกิดการ de-oxidation ของแผ่นผลึกฐานแคลเซียมอาร์เซไนด์ดังในรูปที่ 3.1 รูปแบบของ RHEED ที่อุณหภูมิดังกล่าวเป็นแบบ  $2 \times 4$  ซึ่งในขั้นตอนนี้ถือว่าการเตรียมการในห้องปลูกก่อนการปลูกผลึกทั้งหมด



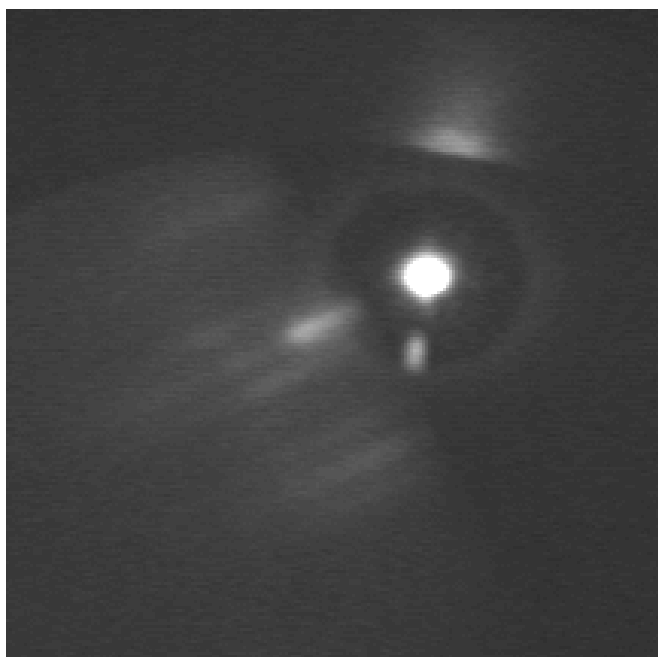
รูปที่ 3.1 รูปแบบของ RHEED ของผิวหน้าแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นภายใต้บรรยากาศ  $\text{As}_4$  ที่อุณหภูมิประมาณ  $580^{\circ}\text{C}$  ในการขจัดออกไซด์ที่ผิวหน้า

### 3.3 การปลูกโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บนแกเลียมอาร์เซไนด์ (100) ด้วยวิธี

#### ดรอปเล็ทอพิเทกซ์จากลำโมเลกุลเพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพของผิวหน้า

หลังจากการทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นผลึกฐานแกเลียมอาร์เซไนด์เรียบร้อยแล้ว ทำการประดิษฐ์โครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ตามกระบวนการดังในรูปที่ 3.4 โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.3.1 ทำการปลูกชั้นบัฟเฟอร์แกเลียมอาร์เซไนด์หนา 300 nm อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะปลูกผลึกประมาณ  $600^{\circ}\text{C}$  ด้วยค่าอัตราการปลูกผลึก 0.5 ML/s และค่าอัตรา  $\text{As}_4/\text{Ga}$  BEP ประมาณ 25 เท่า เมื่อปลูกชั้นบัฟเฟอร์แกเลียมอาร์เซไนด์แล้วรูปแบบของ RHEED จะมีลักษณะเป็นเส้นบาง (streaky pattern ) ดังในรูปที่ 3.2



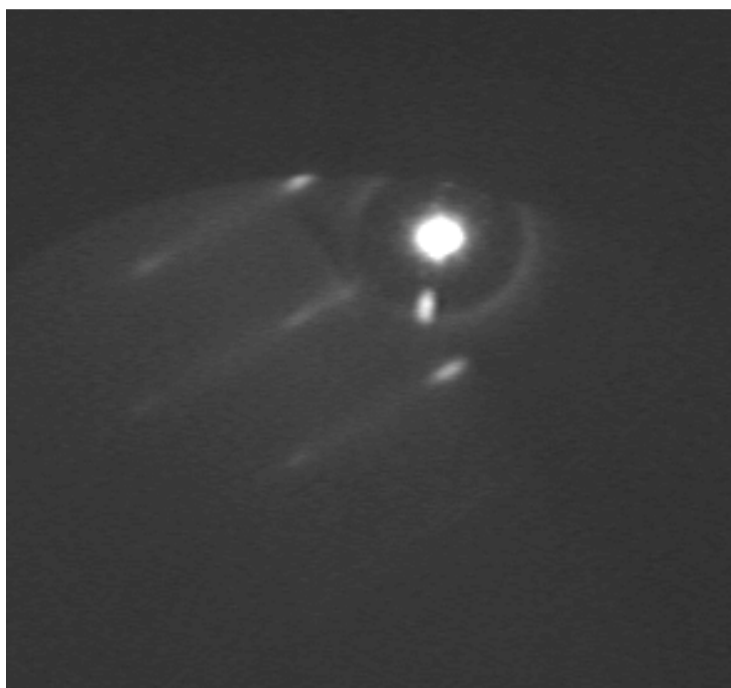
รูปที่ 3.2 รูปแบบของ RHEED ของผิวหน้าแผ่นผลึกฐานเมื่อปลูกชั้นบัฟเฟอร์แกเลียมอาร์เซไนด์หนา 300 nm ซึ่งแสดงถึงลักษณะแผ่นผลึกฐานแกเลียมอาร์เซไนด์ที่มีความเรียบ

3.3.2 ทำการขึ้นรูปหอคดโลหะแกเลียมด้วยค่าอัตราการพ่นแกเลียม 0.8 ML/s (สมมูลกับอัตราการพ่นแกเลียมที่ใช้ในการปลูกแกเลียมอาร์เซไนด์ 0.8 ML/s) โดยค่าความดันบรรยากาศในขณะขึ้นรูปหอคดโลหะแกเลียมมีค่าต่ำกว่า  $10^{-9}$  Torr โดยมีค่าตัวแปรของเงื่อนไขในการขึ้นรูปหอคดโลหะแกเลียม ได้แก่

- ปริมาณของแกเลียมในการขึ้นรูปหกดโลหะมีค่า 1.6 ML 2.4 ML 3.2 ML  
4.0 ML 4.8 ML และ 5.6 ML

- อุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปมีค่า 250°C 300°C 350°C

3.3.3 หลังจากการขึ้นรูปหกดโลหะแล้วทำการขึ้นรูปผลึก (crystallization) เพื่อเปลี่ยนหกดโลหะแกเลียมให้เป็นผลึกแกเลียมฟอสไฟด์ด้วยการพ่นลำโมเลกุล  $P_2$  ที่มีค่า BEP ประมาณ  $3 \times 10^{-6}$  Torr เป็นเวลานาน 5 นาที หกดโลหะแกเลียมเปลี่ยนรูปเป็นโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บนแกเลียมอาร์เซไนด์ โดยรูปแบบ RHEED ของผิวหน้าแผ่นผลึกฐานหลังจากเกิดโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ปรากฏดังในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 รูปแบบของ RHEED ของผิวหน้าแผ่นผลึกฐานเมื่อเกิดโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บนแกเลียมอาร์เซไนด์ (100)

### 3.4 การปลูกโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บนแกเลียมอาร์เซไนด์ (100) ด้วยวิธี

#### ดรอปเล็ทอีพิแทกซีจากลำโมเลกุลเพื่อการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์

การปลูกโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์เพื่อการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์มีขั้นตอนดังนี้

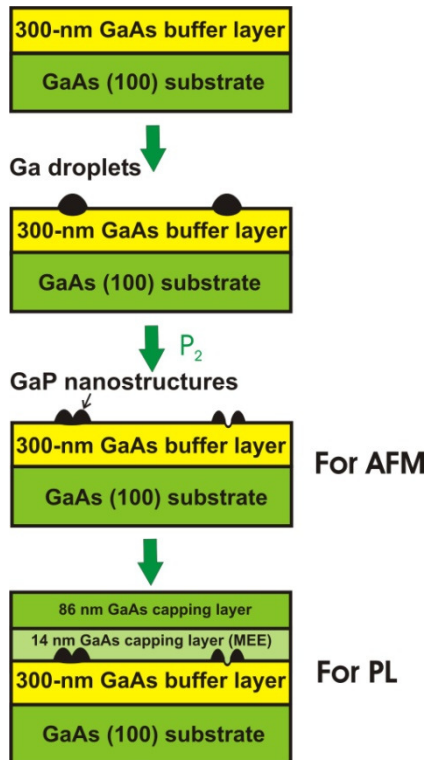
3.4.1 ทำการประดิษฐ์ตัวอย่างซ้ำอีกครั้งตามขั้นตอนในข้อ 3.3 โดยเงื่อนไขที่ทำซ้ำได้แก่

- ปริมาณของแกเลียมในการขึ้นรูปหยดโลหะ 4.0 ML ที่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะแกเลียม 250°C 300°C และ 350°C

- ปริมาณของแกเลียมในการขึ้นรูปหยดโลหะ 2.4 ML 3.2 ML 4.0 ML ที่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะแกเลียม 350°C

3.4.2 ทำการปลูกกลับโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ด้วยแกเลียมอาร์เซไนด์หนา 14 nm ด้วยวิธีไมเกรชัน-เอนฮานซ์อีพิแทกซี (Migration enhance epitaxy) [18] ที่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐาน 350°C ด้วยค่าอัตราการปลูก 0.5 ML/รอบ และคาบเวลา 2 วินาที/รอบ

3.4.3 ทำการปลูกชั้นแกเลียมอาร์เซไนด์หนา 86 nm ด้วยวิธีปกติ (conventional) ที่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐาน 450°C และค่าอัตราการปลูก 0.5 ML/s



รูปที่ 3.4 กระบวนการปลูกผลึกโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บนแกเลียมอาร์เซไนด์ (100) ด้วยวิธีดรอปเล็ทอีพิแทกซีจากลำโมเลกุล

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

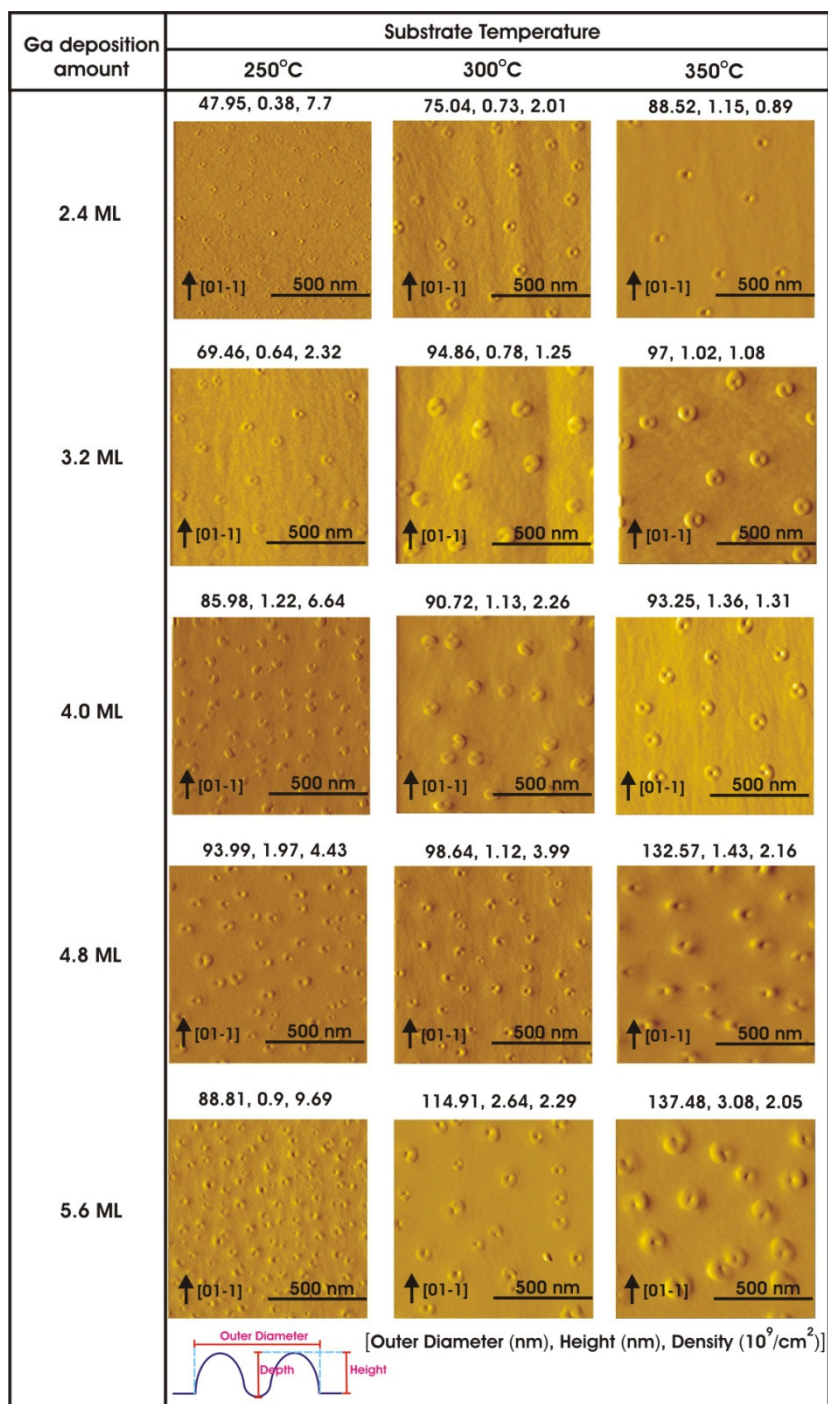
เนื้อหาในบทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดลองตามการทดลองที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 รวมทั้งการอภิปรายและวิเคราะห์ผลการทดลองจากการประดิษฐ์โครงสร้างนาโนของแกลเลียมฟอสไฟด์บนแผ่นผลึกฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์ (100) ที่ได้จากกลไกการก่อตัวขึ้นเองด้วยวิธีการปลูกผลึกแบบครอปเล็ทอพิเทกซ์จากลำโมเลกุล โดยการศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหอคโลหะแกลเลียมและปริมาณของแกลเลียมในการขึ้นรูปหอคโลหะที่มีต่อลักษณะทางกายภาพผิวหน้าของโครงสร้างนาโนของแกลเลียมฟอสไฟด์บนแกลเลียมอาร์เซไนด์ (100) รวมทั้งผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ด้วย

#### 4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพผิวหน้าของโครงสร้างนาโนของแกลเลียมฟอสไฟด์บนแผ่นผลึกฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์ (100)

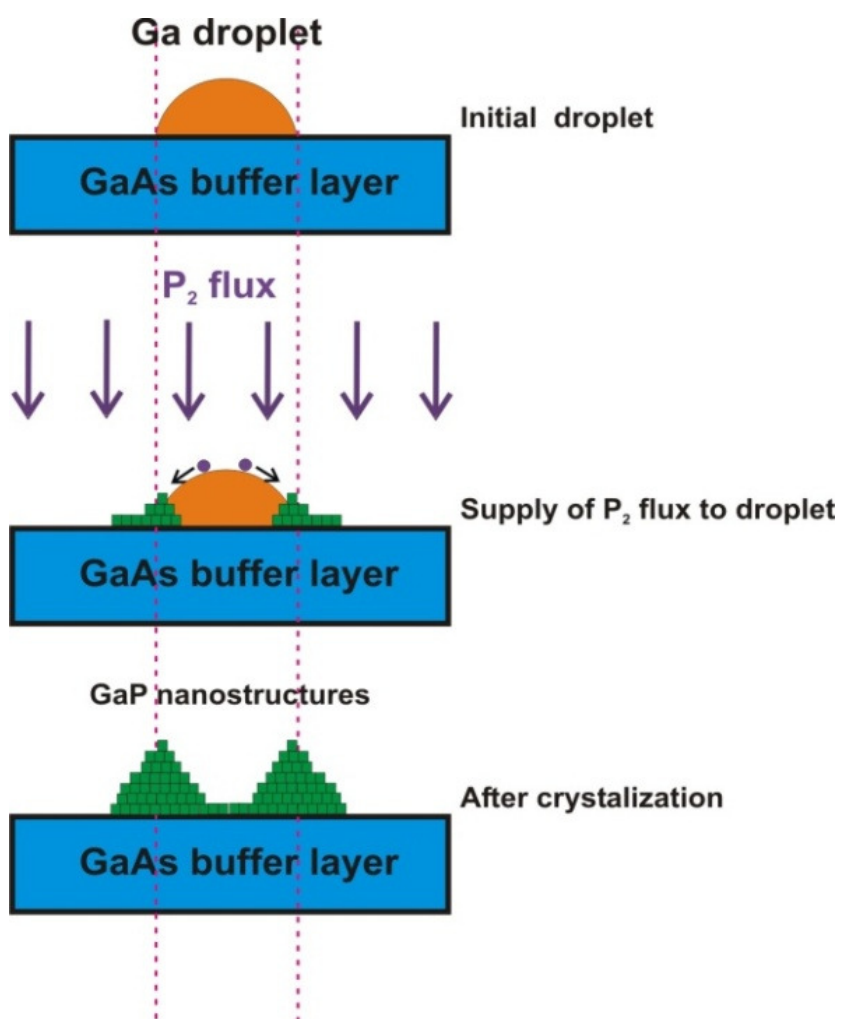
เมื่อดำเนินการปลูกโครงสร้างนาโนของแกลเลียมฟอสไฟด์บนแผ่นผลึกฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์ (100) จากกลไกการก่อตัวขึ้นเองด้วยวิธีการปลูกผลึกแบบครอปเล็ทอพิเทกซ์จากลำโมเลกุล โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหอคโลหะแกลเลียม  $250^{\circ}\text{C}$ - $350^{\circ}\text{C}$  และปริมาณของแกลเลียมในการขึ้นรูปหอคโลหะในช่วง 2.4 ML-5.6 ML ซึ่งมีค่าความหนาแน่นและลักษณะทางกายภาพดังในรูปที่ 4.1 โดยโครงสร้างนาโนที่ได้มีลักษณะคล้ายรูปวงแหวน โดยมีค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 47.95-137.48 nm ค่าความสูงเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.38-3.08 nm ค่าความลึกเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.29-2.02 nm และค่าความหนาแน่นเฉลี่ยอยู่ระหว่าง  $0.89 \times 10^9$ - $9.69 \times 10^9/\text{cm}^2$  ส่วนการกระจายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความสูงและความลึกที่ได้จากการวัดโครงสร้างนาโนของแกลเลียมฟอสไฟด์ดังในรูปที่ 4.3 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

โดยกระบวนการเกิดโครงสร้างนาโนของแกลเลียมฟอสไฟด์นั้นเกิดขึ้น เมื่อพ่นลำโมเลกุลของแกลเลียมบนชั้นบัฟเฟอร์แกลเลียมอาร์เซไนด์ ทำให้เกิดเป็นหอคโลหะของแกลเลียม (โดยขนาดของหอคโลหะจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหอคโลหะและอัตราการพ่นแกลเลียม) จากนั้นทำการพ่นลำโมเลกุลของ  $\text{P}_2$  ลงบนหอคโลหะของแกลเลียมเพื่อทำการขึ้นรูปผลึก (crystallization) โดยเฉพาะที่บริเวณขอบรอบนอกของหอคโลหะกลายเป็นผลึกเร็วกว่าส่วนอื่นจึงทำให้กลายเป็นโครงสร้างนาโนของแกลเลียมฟอสไฟด์ที่มีลักษณะคล้ายวงแหวนอันเนื่องมาจากค่า

ความดัน ไคของ  $P_2$  ที่ใช้มีค่าต่ำ โดยกระบวนการเกิดผลึกดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยรูปที่ 4.2 [19]

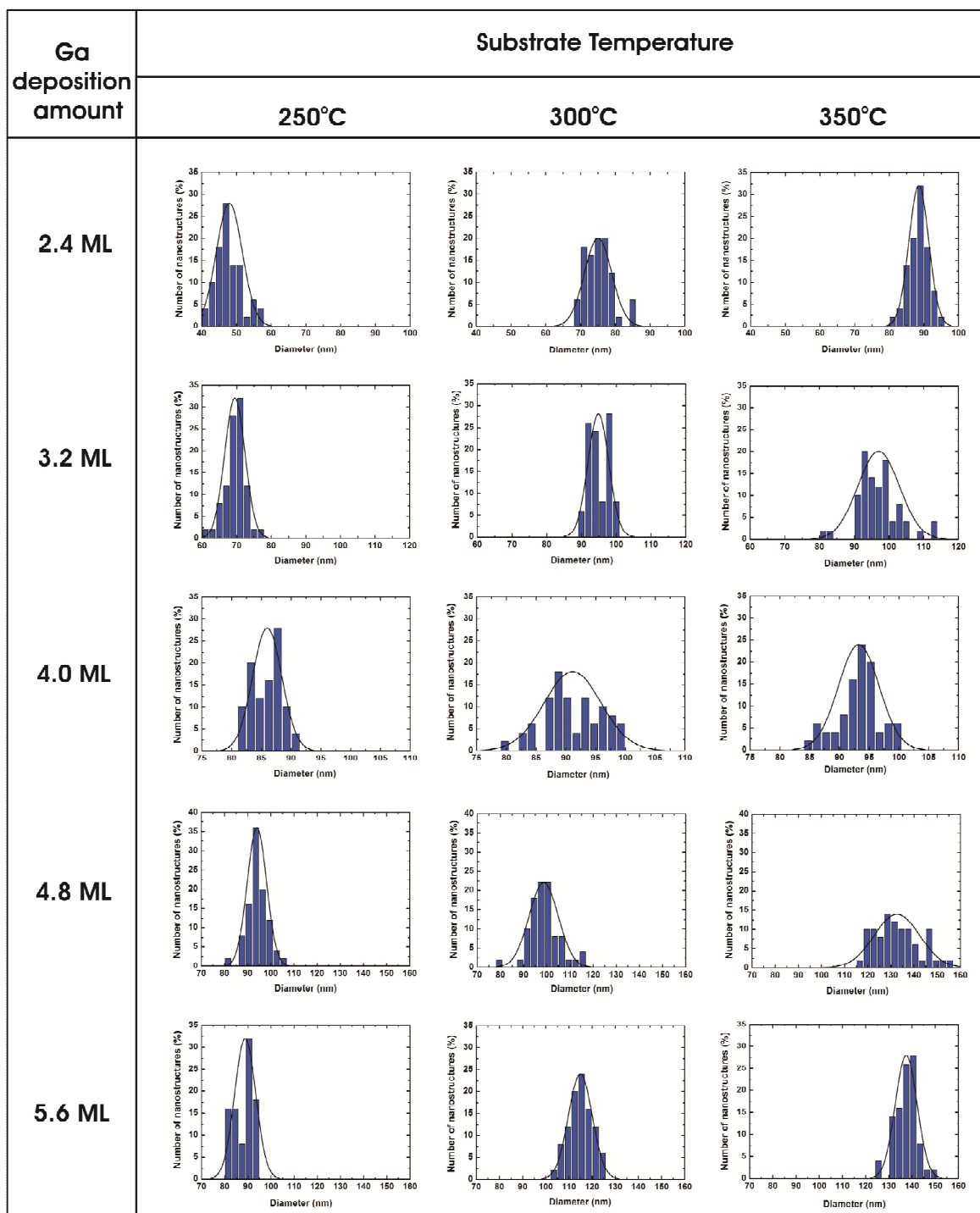


รูปที่ 4.1 ภาพ AFM ขนาด 1000 nm × 1000 nm โครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณแกเลียมในการขึ้นรูปหอดโลหะตั้งแต่ 2.4-5.6 ML และเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่ 250-350°C

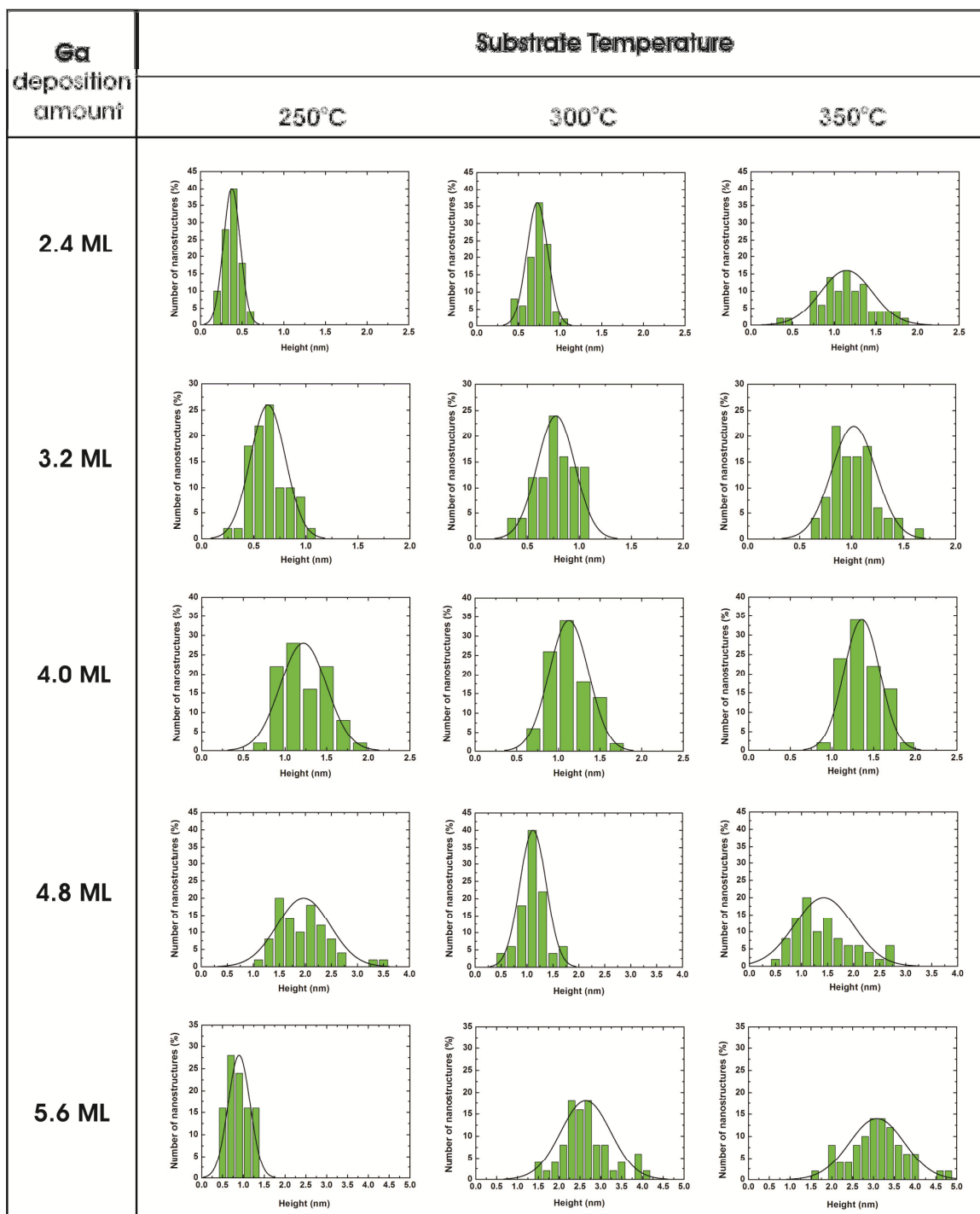


รูปที่ 4.2 กระบวนการเกิดโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ด้วยวิธีดรอปเล็ทอีพิแทกซี จากลำโมเลกุล [19]

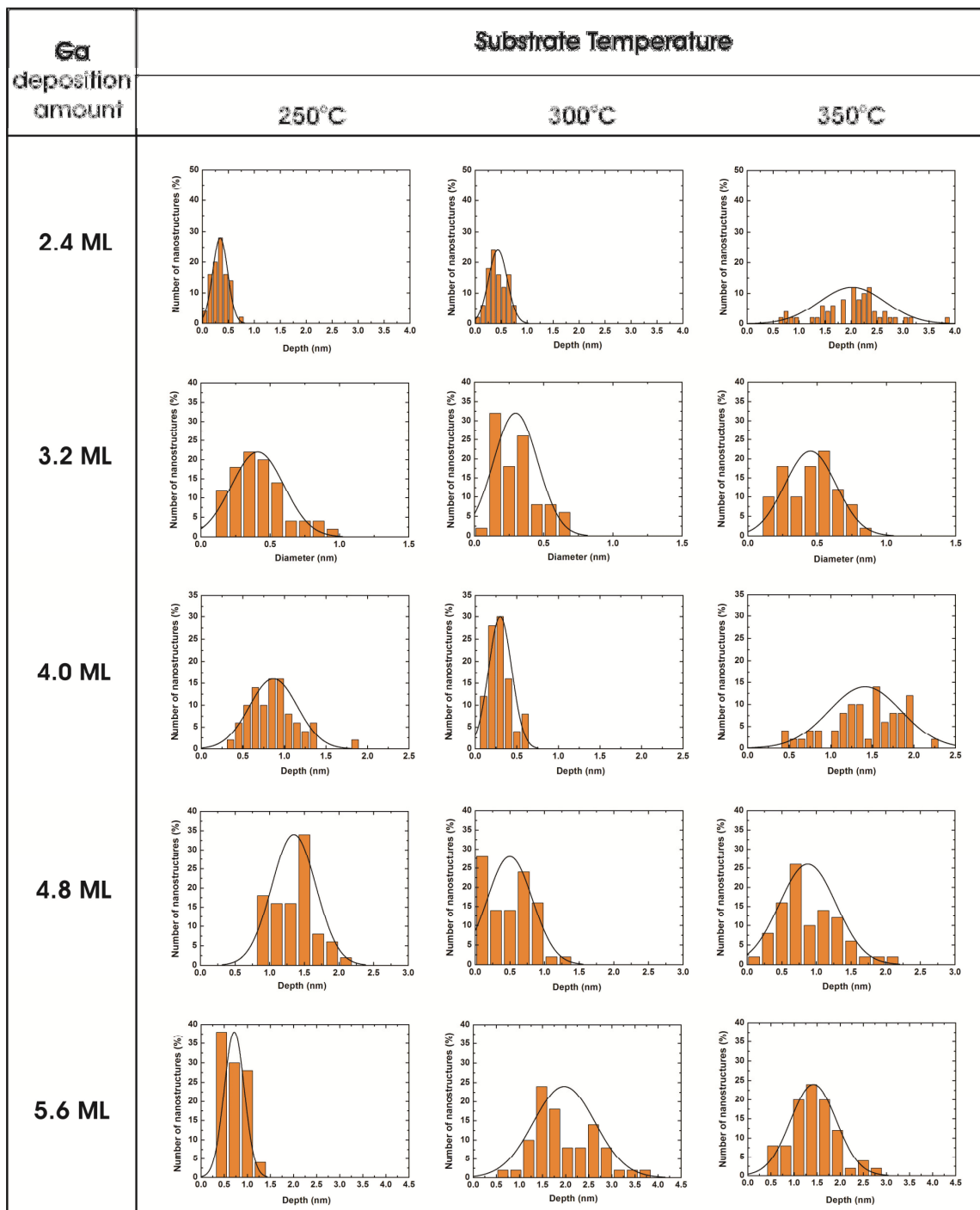




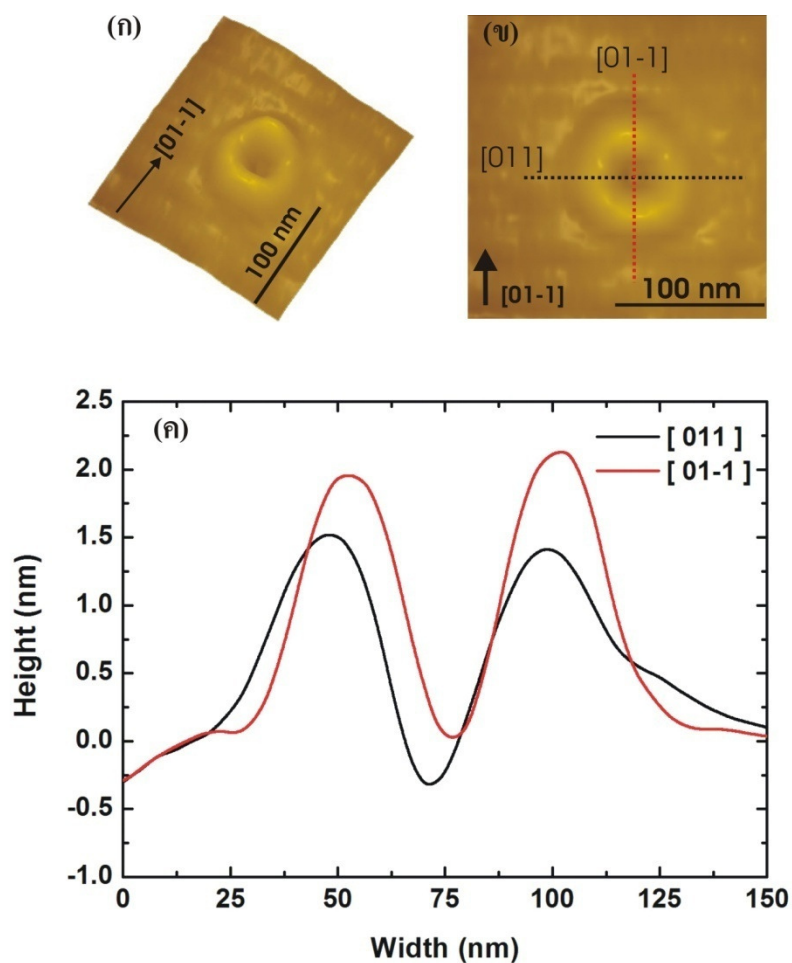
รูปที่ 4.3 กราฟการกระจายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณแกเลียมในการขึ้นรูปหกดโลหะตั้งแต่ 2.4-5.6 ML และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่ 250-350°C



รูปที่ 4.4 กราฟการกระจายขนาดความสูงของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณแกเลียมในการขึ้นรูปหกด โลหะตั้งแต่ 2.4-5.6 ML และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่ 250-350°C



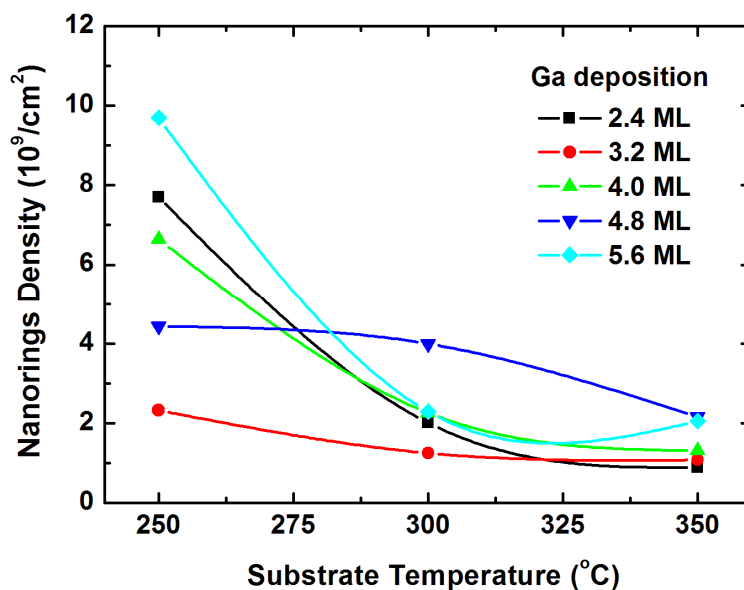
รูปที่ 4.5 กราฟการกระจายขนาดความลึกของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณแกเลียมในการขึ้นรูปหยดโลหะตั้งแต่ 2.4-5.6 ML และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่ 250-350°C



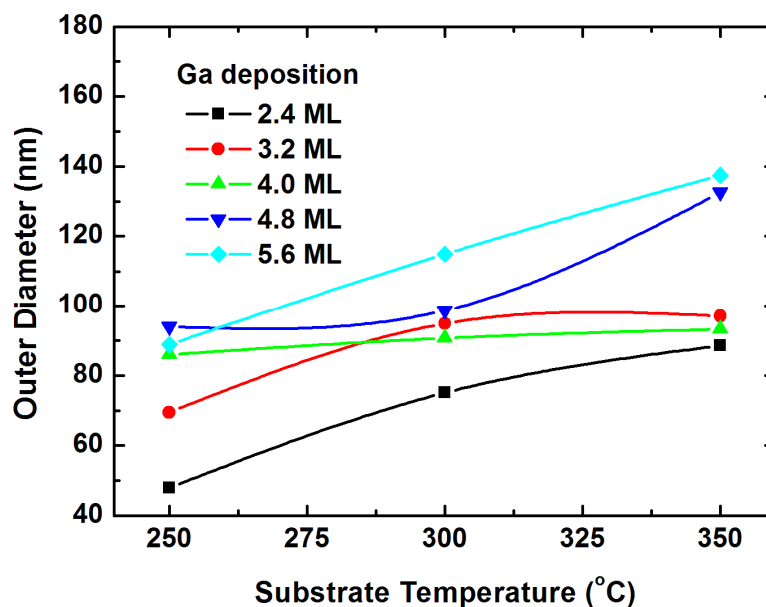
รูปที่ 4.6 รูปภาพ AFM (ก) 3 มิติ (ข) 2 มิติ ขนาด  $200 \text{ nm} \times 200 \text{ nm}$  และ (ค) ภาพตัดขวาง (cross section profile) จากชิ้นงานตัวอย่างปริมาณแกลเลียม 4 ML ที่อุณหภูมิ  $350^\circ\text{C}$

#### 4.1.1 อิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะที่มีผลต่อโครงสร้างนาโนของแกลเลียมฟอสไฟด์บนแผ่นผลึกฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์ (100)

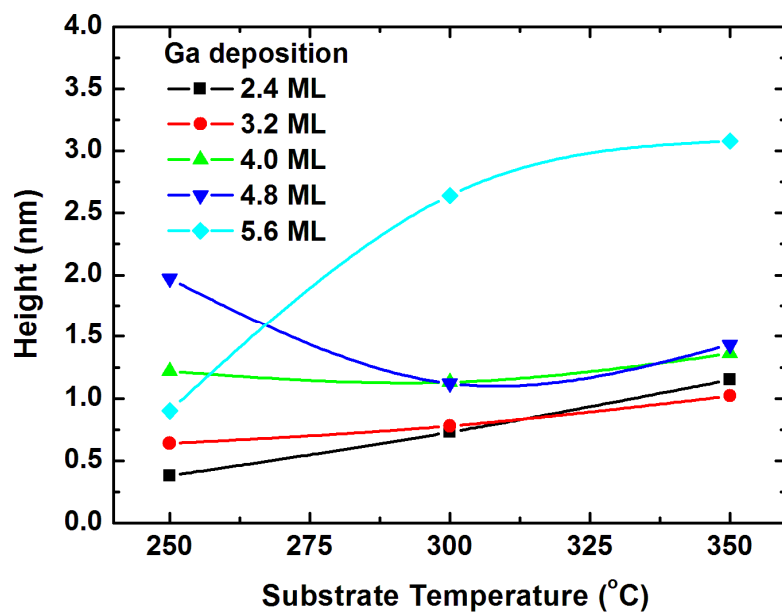
เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะแกลเลียมตั้งแต่  $250^\circ\text{C}$ - $350^\circ\text{C}$  พบว่า เมื่ออุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะแกลเลียมสูงขึ้นจะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความสูงและความลึกของโครงสร้างนาโนของแกลเลียมฟอสไฟด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.8 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ แต่ค่าความหนาแน่นที่ได้มีค่าลดลงดังรูปที่ 4.7 อันเป็นผลมาจากเมื่ออุณหภูมิแผ่นผลึกฐานสูงขึ้น หยดโลหะแกลเลียมยังมีคุณสมบัติเป็นโลหะหลอมเหลว (metallic) อยู่ทำให้สามารถเคลื่อนที่ได้และรวมตัวกันเป็นหยดโลหะที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นโครงสร้างนาโนของแกลเลียมฟอสไฟด์จึงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ขนาดของความสูง ขนาดความลึกที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และความหนาแน่นของโครงสร้างนาโนของแกลเลียมฟอสไฟด์ลดลง



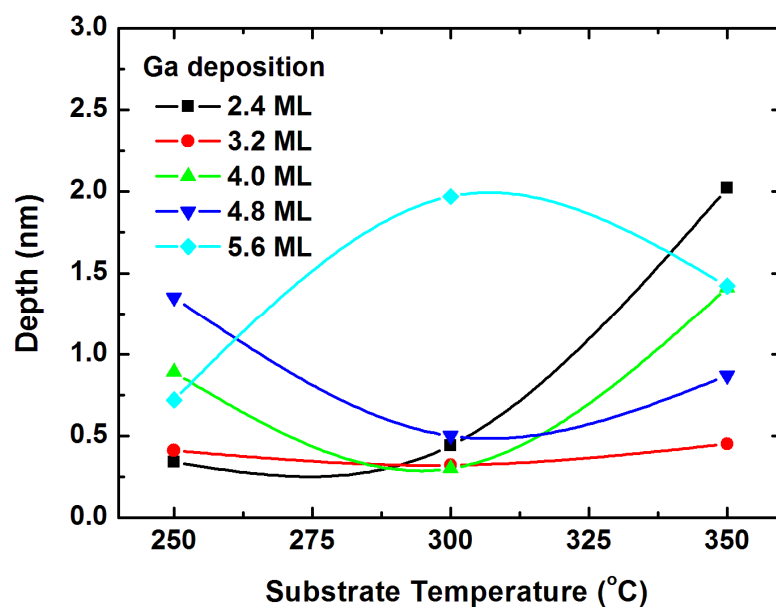
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ความหนาแน่นของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ โดยมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหอคดโลหะ 250-350°C



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ โดยมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหอคดโลหะ 250-350°C



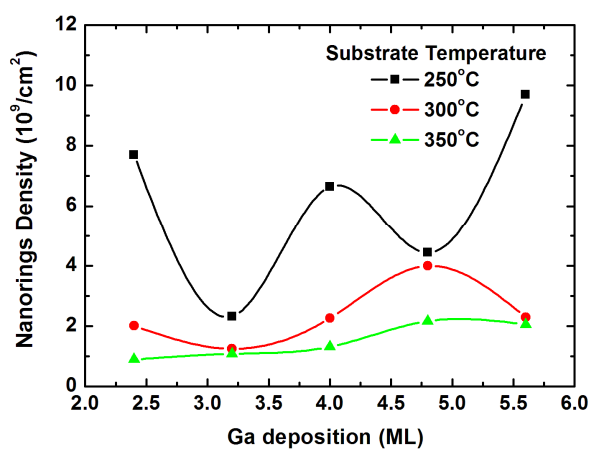
รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ความสูงของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์โดยมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหาคโลหะ 250-350°C



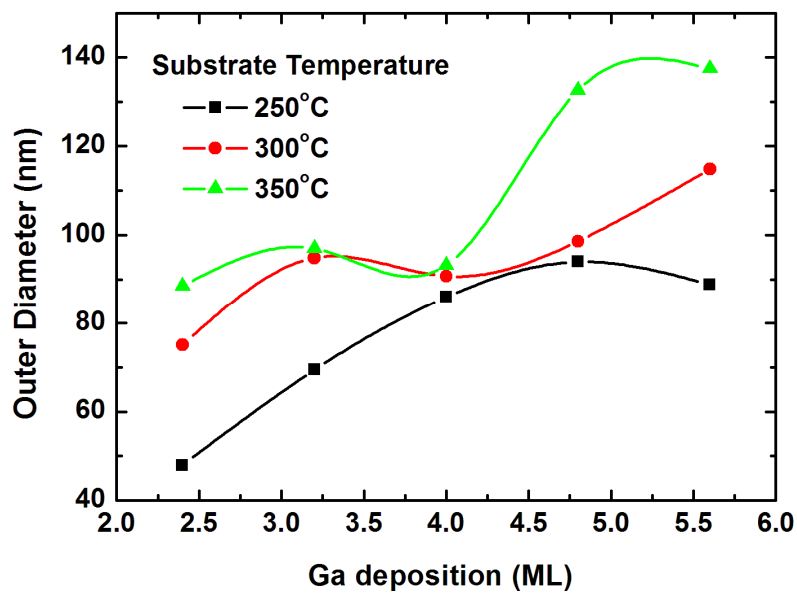
รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ความลึกของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์โดยมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหาคโลหะ 250-350°C

#### 4.1.2 อิทธิพลของปริมาณแกเลียมในการขึ้นรูปหอคโลหะที่มีผลต่อโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บนแผ่นผลึกฐานแกเลียมอาร์เซไนด์ (100)

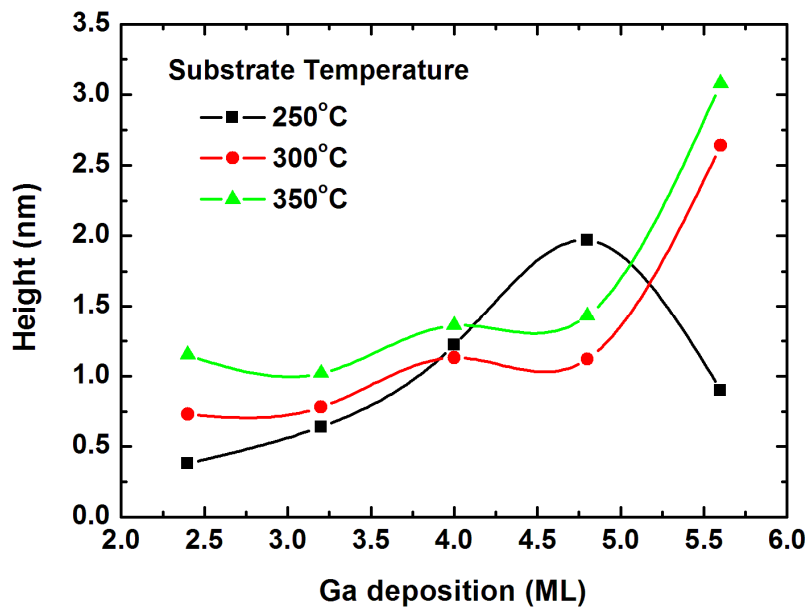
เมื่อปริมาณแกเลียมในการขึ้นรูปหอคโลหะ (เทียบเท่าความหนาเป็น ML) เพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ที่ได้เพิ่มขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความสูงและความลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นดังในรูปที่ 4.11 4.12 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ อันเป็นผลมาจากมีปริมาณแกเลียมที่ผิวมากขึ้นจึงเกิดเป็นโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ได้มากขึ้น แต่เมื่อใช้ปริมาณหอคโลหะแกเลียมเพิ่มขึ้นถึงค่าหนึ่งทำให้มีจำนวนแกเลียมมากพอจนเกิดการปกคลุมจนเต็มพื้นที่ผิวหน้าเกิดเป็นชั้น (layer) ของแกเลียมขึ้น โดยแกเลียมที่เหลือจะเกิดเป็นหอคโลหะขึ้นเหนือชั้นดังกล่าวอีกทีหนึ่ง จึงทำให้ความหนาแน่นที่เกิดขึ้นลดลง [20] โดยพบว่าที่อุณหภูมิ 300-350°C เมื่อเพิ่มปริมาณหอคโลหะแกเลียมจาก 2.4-4.8 ML ความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและเข้าสู่ค่าสูงสุดและมีค่าลดลงเมื่อปริมาณแกเลียมมากกว่า 4.8 ML แต่ที่อุณหภูมิ 250°C นั้นเมื่อเพิ่มปริมาณหอคโลหะแกเลียมจาก 2.4-3.2 ML ค่าความหนาแน่นจะลดลงเนื่องจากหอคเล็กๆ ของแกเลียมปกคลุมเต็มพื้นที่ผิวหน้าซึ่งทำให้เกิดเป็นชั้นเรียบขึ้น ดังนั้นความหนาแน่นจึงลดลง แต่เมื่อปริมาณหอคโลหะแกเลียมเพิ่มจาก 3.2-4.0 ML ความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณหอคโลหะแกเลียมก่อตัวบนชั้นแกเลียมส่วนที่กลายเป็นชั้นปกคลุมที่มากขึ้น จึงทำให้ค่าความหนาแน่นหอคโลหะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณหอคโลหะแกเลียมเพิ่มจาก 4.0-4.8 ML ความหนาแน่นจะลดลงอีกเกิดขึ้นเช่นเดียวกับกรณี 2.4-3.2 ML และเมื่อปริมาณหอคโลหะแกเลียมเพิ่มจาก 4.8-5.6 ML ความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเกิดขึ้นเช่นเดียวกับกรณี 3.2-4.0 ML หลังจากการขึ้นรูปผลึกจึงทำให้ความหนาแน่นของโครงสร้างนาโนมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าของหอคโลหะ ส่วนค่าความลึกของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ จะมีการเปลี่ยนแปลงดังในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ความหนาแน่นของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณหอคโลหะแกเลียมขณะขึ้นรูปหอคโลหะตั้งแต่ 2.4-5.6 ML

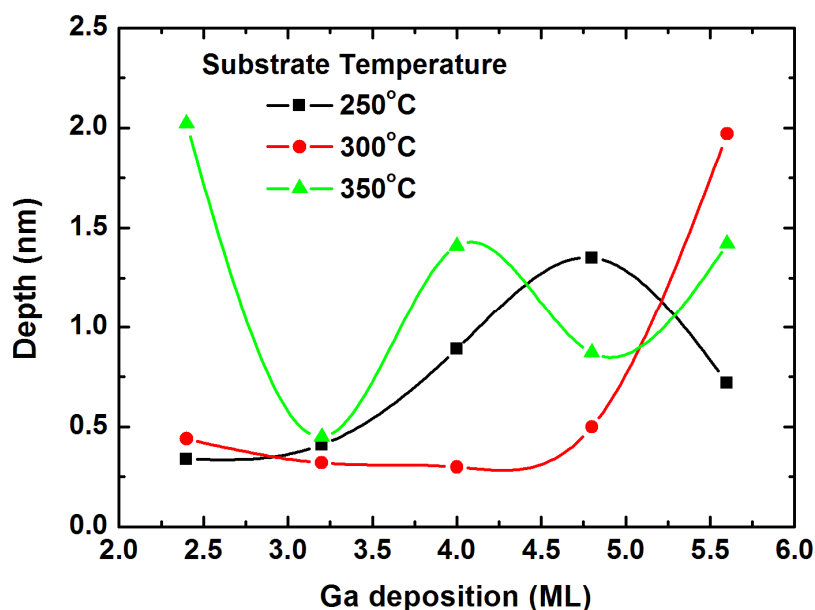


รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแกเลียมในการขึ้นรูปหยดโลหะตั้งแต่ 2.4-5.6 ML



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ความสูงของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแกเลียมในการขึ้นรูปหยดโลหะตั้งแต่ 2.4-5.6 ML

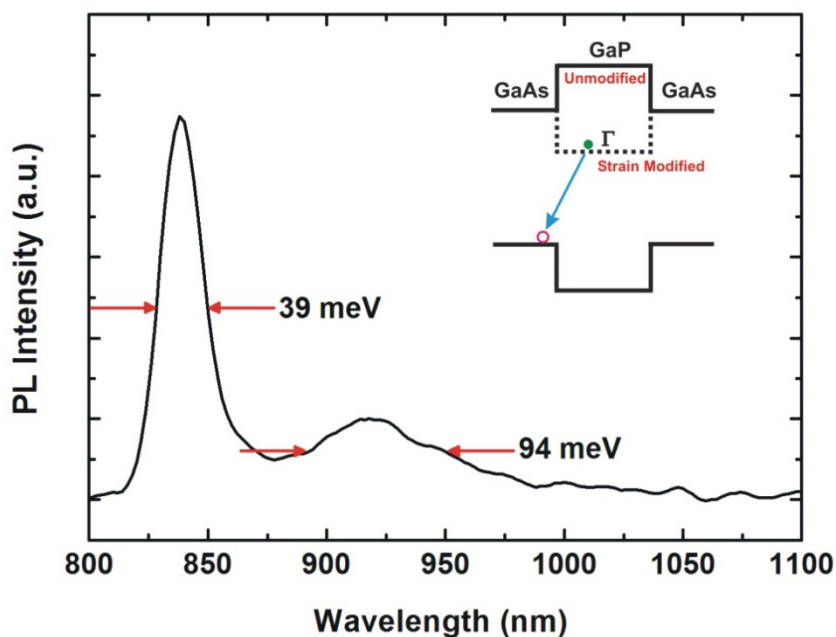




รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ความลึกของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแกเลียมในการขึ้นรูปหยดโลหะตั้งแต่ 2.4-5.6 ML

#### 4.2 การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บนแผ่นผลึกฐานแกเลียมอาร์เซไนด์ (100)

ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่ได้จากชิ้นงานตัวอย่างโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ที่ใช้ปริมาณแกเลียมในการขึ้นรูปหยดโลหะ 4 ML ที่อุณหภูมิ 350°C โดยทำการวัดที่อุณหภูมิ 16 K ดังแสดงในรูปที่ 4.15 โดยสเปกตรัมของตัวอย่างมีค่ายอด (peak) 2 ค่า คือ ที่ประมาณ 1.48 eV (840 nm) และที่ประมาณ 1.35 eV (919 nm) ซึ่งยอดที่มีค่าพลังงานสูง (1.48 eV) เกิดจากการปลดปล่อยพลังงานของแกเลียมอาร์เซไนด์ ในขณะที่ยอดที่มีค่าพลังงานต่ำ (1.34 eV) เกิดจากการปลดปล่อยพลังงานของการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ ซึ่งค่ายอดพลังงานจากโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์มีค่าต่ำกว่าค่าแถบพลังงานของแกเลียมอาร์เซไนด์ เนื่องจากการเรียงตัวของแถบพลังงานระหว่างแกเลียมฟอสไฟด์และแกเลียมอาร์เซไนด์มีลักษณะเป็นแบบ Type II ดังในรูปแทรกบนขวาในรูปที่ 4.15 [21] ค่าความกว้าง FWHM (Full-Width at Half Maximum) มีค่า 39 meV สำหรับแกเลียมอาร์เซไนด์ และ 94 meV สำหรับโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์

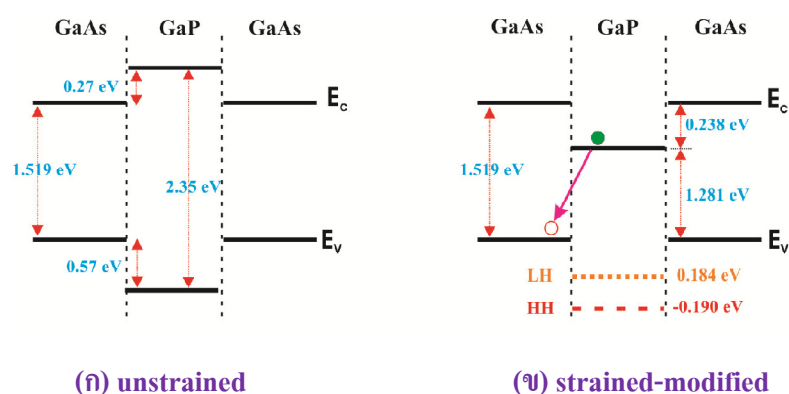


รูปที่ 4.15 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 16 K ของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ จากตัวอย่างที่ใช้ปริมาณแกเลียม 4 ML และอุณหภูมิขณะขึ้นรูปหยดโลหะ  $350^{\circ}\text{C}$

สำหรับการปลดปล่อยพลังงานของการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานในกรณีนี้สามารถอธิบายได้จากการที่มีอิเล็กตรอนในแถบพลังงานแบบตรง ( $\Gamma$  valley) ของแกเลียมฟอสไฟด์รวมตัวกับโฮล (hole) ในแถบพลังงานวาเลนซ์สูงสุดของแกเลียมอาร์เซไนด์ ซึ่งเป็นการเรียงตัวของแถบพลังงาน GaP/GaAs ในสถานะที่ไม่มีความเครียดมีลักษณะเป็นแบบ Type I โดยขอบต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าในแกเลียมฟอสไฟด์อยู่ในระดับสูงกว่าของแกเลียมอาร์เซไนด์และขอบสูงสุดของแถบวาเลนซ์สูงสุดในแกเลียมฟอสไฟด์อยู่ในระดับต่ำกว่าของแกเลียมอาร์เซไนด์ ขอบต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าในแกเลียมฟอสไฟด์ ในกรณีนี้คือ X valley ซึ่งเป็นแถบพลังงานแบบไม่ตรง (indirect band valley) โดยอยู่ระดับต่ำกว่า  $\Gamma$  valley แต่ในสถานะความเครียดแบบดึง (tensile strain) ระดับพลังงานของแถบนำไฟฟ้าและแถบวาเลนซ์แกเลียมฟอสไฟด์ปรับเปลี่ยนให้เข้าสู่สถานะสมดุลใหม่ โดยการปรับเรียงตำแหน่งของแถบพลังงานด้วยการแยกระดับพลังงานของ light hole ออกและมีระดับสูงกว่าของ heavy hole ในขอบสูงสุดของแถบวาเลนซ์ แต่อย่างไรก็ตามขอบสูงสุดของแถบวาเลนซ์ในแกเลียมฟอสไฟด์ยังอยู่ในระดับพลังงานที่ต่ำกว่าขอบสูงสุดของแถบวาเลนซ์ในแกเลียมอาร์เซไนด์ สำหรับแถบนำไฟฟ้าของแถบพลังงานแบบตรง ( $\Gamma$  valley) มีการหดตัวรวดเร็วกว่าแถบพลังงาน

แบบไม่ตรง (X valley) เนื่องจากความเครียดแบบดึง ดังนั้นขอบต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าในแกเลียมฟอสไฟด์จึงกลายเป็นแถบพลังงานแบบตรง ( $\Gamma$  valley) และมีระดับพลังงานต่ำกว่าของแกเลียมอาร์เซไนด์ ดังนั้นการเรียงแถบพลังงานในกรณีนี้จึงกลายเป็นแบบ Type II อันเป็นผลให้การปลดปล่อยพลังงานจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานอิเล็กตรอนในกรณีนี้มีค่าต่ำกว่าค่าแถบพลังงานของแกเลียมฟอสไฟด์และแกเลียมอาร์เซไนด์

การปลดปล่อยพลังงานของการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานเนื่องจากผลของความเครียดแบบดึงของแกเลียมฟอสไฟด์บนแกเลียมอาร์เซไนด์ สามารถคำนวณหาค่าแถบพลังงานต่างๆได้ดังในรูปที่ 4.16 [22-26] ในสถานะที่ไม่มีมีความเครียดนั้นขอบต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าในแกเลียมฟอสไฟด์อยู่ในระดับสูงกว่าของแกเลียมอาร์เซไนด์และขอบสูงสุดของแถบวาเลนซ์สูงสุดในแกเลียมฟอสไฟด์อยู่ในระดับต่ำกว่าของแกเลียมอาร์เซไนด์ดังในรูปที่ 4.16 (ก) ในสถานะความเครียดแบบดึง (tensile strain) ระดับพลังงานของแถบนำไฟฟ้าและแถบวาเลนซ์แกเลียมฟอสไฟด์ปรับเปลี่ยนให้เข้าสู่สถานะสมดุลใหม่ โดยการปรับเรียงตำแหน่งของแถบพลังงานที่มีลักษณะเป็นแบบ Type II ดังในรูป 4.17 (ข) ค่าพลังงานโฟตอนจากผลการทดลอง 1.34 eV ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าของ GaP และค่าสูงสุดของแถบวาเลนซ์ เนื่องจากอิเล็กตรอนในกรณีนี้อยู่ในระดับวงโคจรที่มีระดับสูงกว่าระดับต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าของ GaP เนื่องจากความสูงของโครงสร้างนาโนที่มีค่าน้อย ทำให้เกิดระดับพลังงานวงโคจรขึ้น



รูปที่ 4.16 แผนภาพแถบพลังงานที่อุณหภูมิ 0 K ของ GaP ในเมตริกซ์ GaAs ที่ได้จากการคำนวณ

(ก) unstrained (ข) strained-modified [22-26]

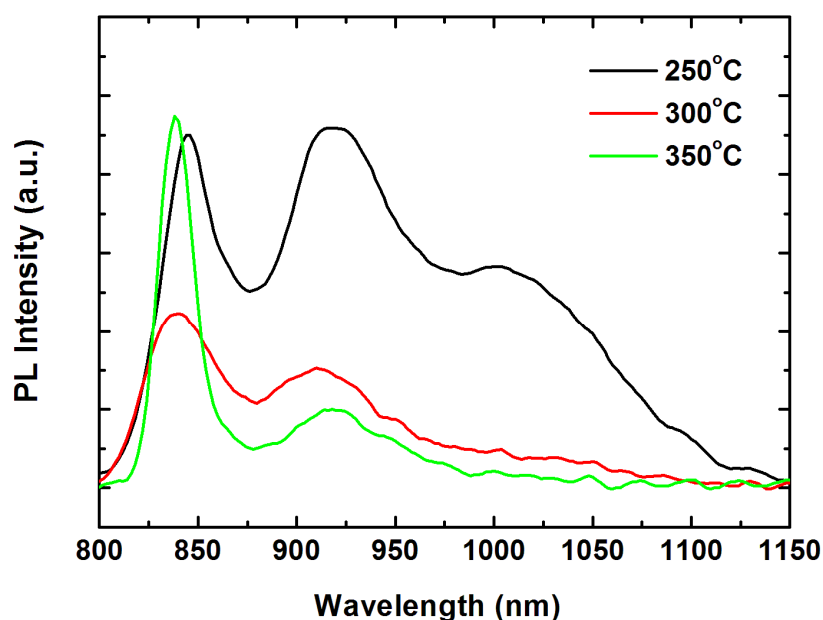
#### 4.2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะที่มีผลต่อคุณสมบัติทางแสง ของ โครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บนแผ่นผลึกฐานแกเลียมอาร์เซไนด์ (100)

เมื่อทำการประดิษฐ์โครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บนแผ่นผลึกฐานแกเลียมอาร์เซไนด์ (100) ด้วยวิธีครอปเล็ทอพิแทกซีจากล้าโมเลกุล แล้วปลูกกลบด้วยชั้นแกเลียมอาร์เซไนด์ที่มีความหนา 100 nm โดยการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะแกเลียมตั้งแต่ 250-350°C และใช้ปริมาณแกเลียมในการขึ้นรูปหยดโลหะคงที่คือ 4.0 ML เพื่อนำมาวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ พบว่า ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 16 K ของชิ้นงานดังกล่าวแสดงดังในรูปที่ 4.17 โดยที่ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บนแกเลียมอาร์เซไนด์จากชิ้นงานตัวอย่างทั้งหมดมีค่ายอดอยู่ที่ความยาวคลื่น 840 nm (~1.48 eV) ซึ่งมาจากแกเลียมอาร์เซไนด์และในแต่ละชิ้นงานตัวอย่างนั้นมีค่ายอดที่มาจากโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ที่ตำแหน่งแตกต่างกันเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะ โดยพบว่า เมื่ออุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะมีค่า 250°C ค่ายอดซึ่งมาจากโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์มีค่ายอด 2 ค่า คือที่ความยาวคลื่น 918 nm (~1.35 eV) และที่ความยาวคลื่น 1002 nm (~1.24 eV) เนื่องจากโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ที่ได้เป็นรูปร่างแหวนที่ไม่สมบูรณ์หรือความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์อันเกิดจากการปลูกผลึกที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้สเปกตรัมที่มาจากโครงสร้างนาโนมีค่ายอด 2 ค่า [27-28] แต่เมื่ออุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะมีค่า 300°C นั้นค่ายอดซึ่งมาจากโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์อยู่ที่ความยาวคลื่น 910 nm (~1.36 eV) ค่า FWHM มีค่า 104 meV และเมื่ออุณหภูมิ 350°C นั้นค่ายอดซึ่งมาจากโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์อยู่ที่ความยาวคลื่น 918 nm (~1.35 eV) ค่า FWHM มีค่า 92 meV

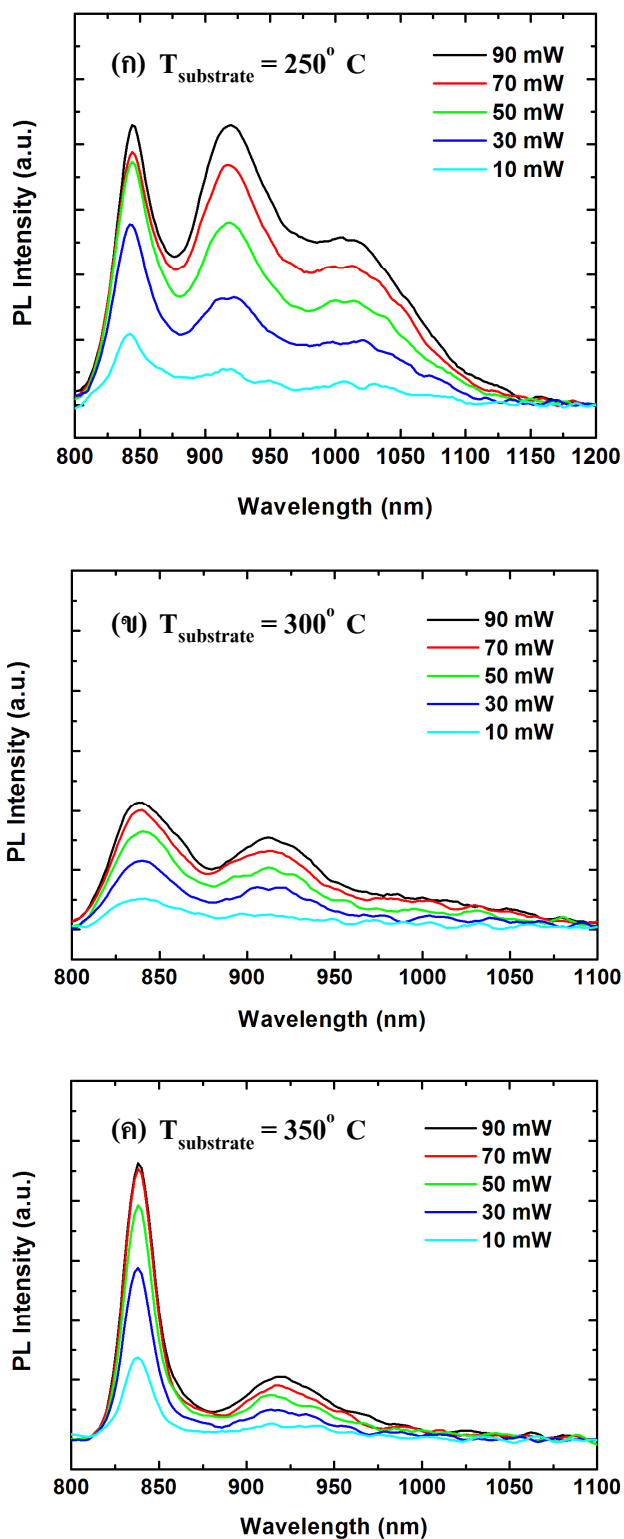
เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะแกเลียมจาก 300°C เป็น 350°C พบว่าค่ายอดของสเปกตรัมนี้เลื่อนไปทางค่าความยาวคลื่นที่ยาวขึ้น (พลังงานที่ต่ำลง) โดยเลื่อนจากความยาวคลื่น 910 nm ไปเป็น 918 nm เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นขนาดของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ใหญ่ขึ้น จึงทำให้ความยาวคลื่นยาวมากขึ้น ดังนั้นค่ายอดของสเปกตรัมจึงเลื่อนไปทางค่าความยาวคลื่นที่ยาวมากขึ้น (พลังงานต่ำลง) [29]

ในการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของชิ้นงานตัวอย่างทั้งหมดนั้น เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังงานแสงที่กระตุ้นโดยการปรับกำลังของเลเซอร์ระหว่าง 10-90 mW ผลที่ได้มีลักษณะดังในรูปที่ 4.18 โดยพบว่า ค่ายอดของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ (ความยาวคลื่น ~920 nm) เมื่อ

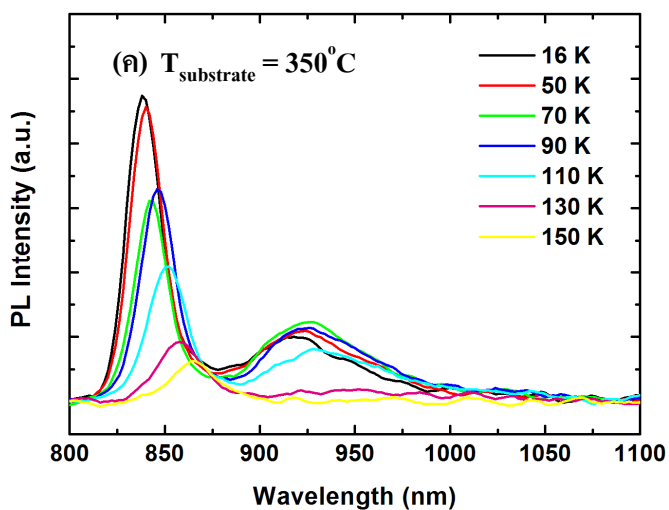
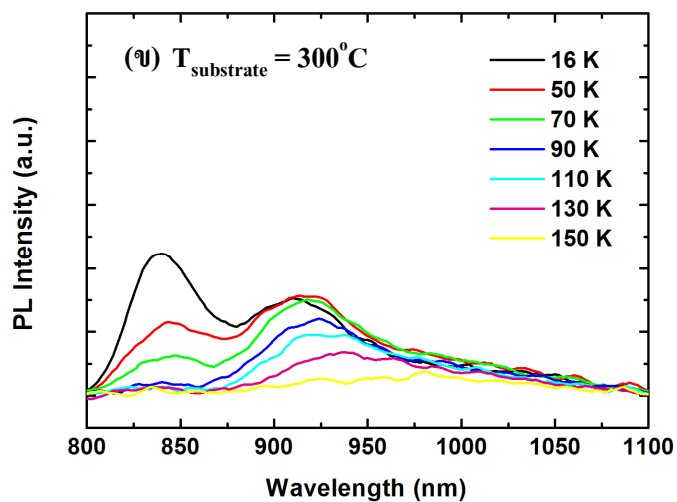
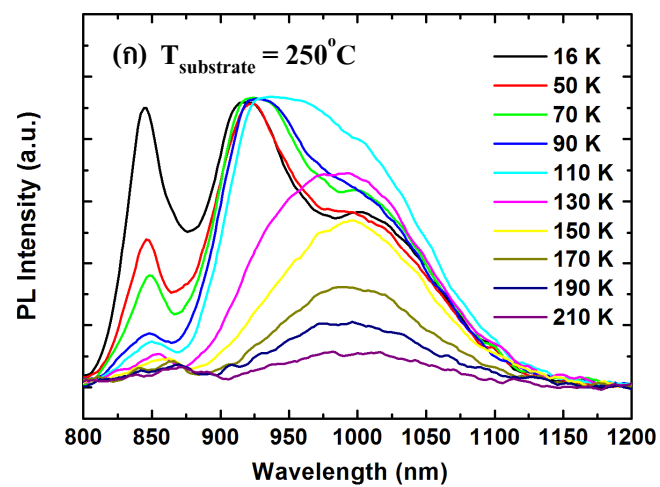
เพิ่มกำลังงานแสงในการกระตุ้นนั้นทำให้ค่าความเข้มของโฟโตลูมิเนสเซนซ์เพิ่มขึ้น แต่ค่ายอดของสเปกตรัมนั้นมีการเลื่อนเพียงเล็กน้อยและเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวอย่างในขณะวัดระหว่าง 16-210 K ผลที่ได้มีลักษณะดังในรูปที่ 4.19 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในขณะวัดทำให้ค่าความเข้มของโฟโตลูมิเนสเซนซ์ลดลง ค่ายอดของสเปกตรัมเลื่อนไปทางความยาวคลื่นยาว (พลังงานต่ำลง) เนื่องจาก thermal excitation effect [29-30] แต่พบว่าการเลื่อนของค่ายอดความยาวคลื่นนั้นเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยรวมทั้งความเข้มของโฟโตลูมิเนสเซนซ์จะไม่เปลี่ยนแปลงจนกว่าจะเพิ่มอุณหภูมิจนถึงประมาณ 90°C เนื่องจากเป็นการเรียงตัวแบบ Type II [31] เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในขณะวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ในกรณีแผ่นผลึกฐานในขณะขึ้นรูปหกดโลหะมีค่า 250°C นั้นพบว่า เมื่ออุณหภูมิในขณะวัดมีค่า 16-110 K ค่ายอดของโครงสร้างนาโนของแกลเลียมฟอสไฟด์จะมี 2 ค่ายอด แต่เมื่ออุณหภูมิมากกว่า 110 K ค่ายอดของโครงสร้างนาโนของแกลเลียมฟอสไฟด์จะมีค่ายอดเดียวเนื่องจากโครงสร้างนาโนของแกลเลียมฟอสไฟด์ที่ได้เป็นวงแหวนที่ไม่สมบูรณ์หรือความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างนาโนซึ่งที่อุณหภูมิต่ำจะสามารถเห็นค่ายอด 2 ค่าได้ชัดเจน [27-28]



รูปที่ 4.17 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 16 K ของโครงสร้างนาโนของแกลเลียมฟอสไฟด์ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิขณะขึ้นรูปหกดโลหะแกลเลียมและปริมาณแกลเลียมในการขึ้นรูปหกดโลหะครั้งที่ 4 ML



รูปที่ 4.18 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 16 K โดยการเปลี่ยนแปลงกำลังงานแสงในการกระตุ้นโครงสร้างนาโนของ GaP จากตัวอย่างที่ใช้ Ga 4 ML โดยอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะ (ก)  $250^{\circ}\text{C}$  (ข)  $300^{\circ}\text{C}$  และ (ค)  $350^{\circ}\text{C}$



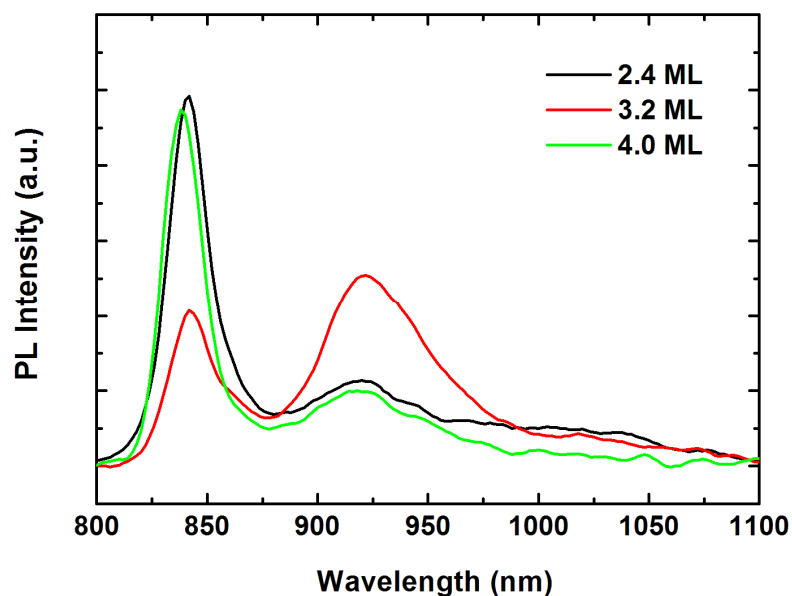
รูปที่ 4.19 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่ใช้กำลังงานแสงในการกระตุ้น 90 mW โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในขณะวัดโครงสร้างนาโนของ GaP จากตัวอย่างที่ใช้ Ga 4 ML โดยอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหอคโลหะ (ก)  $250^{\circ}\text{C}$  (ข)  $300^{\circ}\text{C}$  และ (ค)  $350^{\circ}\text{C}$

#### 4.2.2 อิทธิพลของปริมาณแกเลียมในการขึ้นรูปหยดโลหะที่มีผลต่อคุณสมบัติทางแสง ของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บนแผ่นผลึกฐานแกเลียมอาร์เซไนด์ (100)

เมื่อทำการประดิษฐ์โครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บนแผ่นผลึกฐานแกเลียมอาร์เซไนด์ (100) ด้วยวิธีครอปเล็ทอพิแทกซีจากลำโมเลกุล แล้วปลูกกลบด้วยชั้นแกเลียมอาร์เซไนด์ที่มีความหนา 100 nm โดยการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขปริมาณแกเลียมในการขึ้นรูปหยดโลหะระหว่าง 2.4-4.0 ML และใช้อุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะแกเลียมคงที่ คือ อุณหภูมิ  $350^{\circ}\text{C}$  เพื่อนำมาวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ พบว่า ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 16 K ของชิ้นงานดังกล่าวดังในรูปที่ 4.20 โดยที่ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์จากชิ้นงานตัวอย่างทั้งหมดมีค่ายอดอยู่ที่ความยาวคลื่น  $\sim 840$  nm ( $\sim 1.48$  eV) ซึ่งมาจากแกเลียมอาร์เซไนด์และในแต่ละชิ้นงานตัวอย่างนั้นมียอดที่มาจากโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ที่ตำแหน่งใกล้เคียงกัน เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณแกเลียมในการขึ้นรูปหยดโลหะ โดยพบว่า เมื่อปริมาณแกเลียมขณะขึ้นรูปหยดโลหะมีค่า 2.4 ML ค่ายอดซึ่งมาจากโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์มีค่ายอดอยู่ที่ความยาวคลื่น 920 nm ( $\sim 1.35$  eV) ค่า FWHM มีค่า 102 meV เมื่อปริมาณแกเลียมขณะขึ้นรูปหยดโลหะมีค่า 3.2 ML นั้นค่ายอดซึ่งมาจากโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์อยู่ที่ความยาวคลื่น 922 nm ( $\sim 1.34$  eV) ค่า FWHM มีค่า 83 meV และเมื่อปริมาณแกเลียมขณะขึ้นรูปหยดโลหะมีค่า 4.0 ML นั้นค่ายอดซึ่งมาจากโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์อยู่ที่ความยาวคลื่น 918 nm ( $\sim 1.35$  eV) ค่า FWHM มีค่า 101 meV

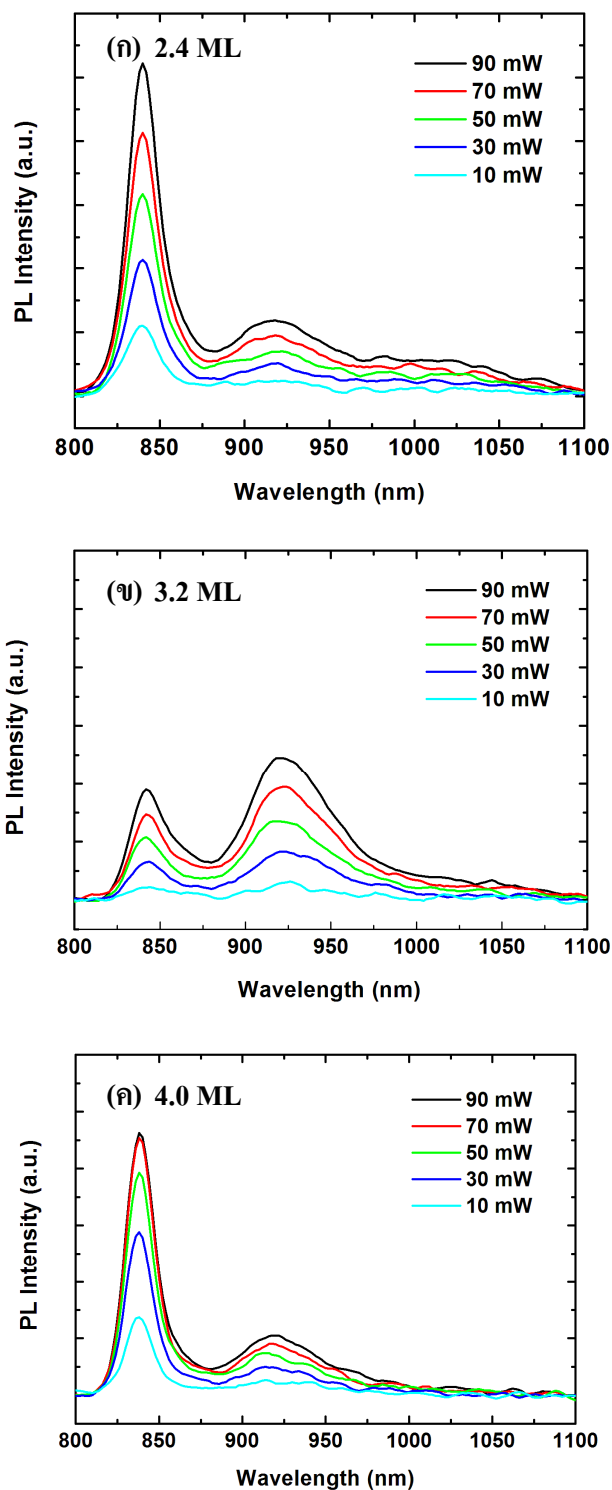
เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณแกเลียมในการขึ้นรูปหยดโลหะระหว่าง 2.4-4.0 ML พบว่าค่ายอดของสเปกตรัมนี้เลื่อนเพียงเล็กน้อย โดยเมื่อปริมาณหยดแกเลียมเป็น 2.4 ML ค่ายอดอยู่ที่ความยาวคลื่น 920 nm แต่เมื่อปริมาณแกเลียมขณะขึ้นรูปหยดโลหะมีค่า 3.2 ML นั้นค่ายอดอยู่ที่ความยาวคลื่น 922 nm และเมื่อปริมาณแกเลียมขณะขึ้นรูปหยดโลหะมีค่า 4.0 ML นั้นค่ายอดอยู่ที่ความยาวคลื่น 918 nm โดยพบว่าค่ายอดดังกล่าวเลื่อนเพียงเล็กน้อย เนื่องจากความสูงของโครงสร้างนาโนใกล้เคียงกัน จึงทำให้การเกิดเป็นโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ที่มีขนาดใกล้เคียงกัน ดังนั้นผลของการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ระหว่าง 2.4-4.0 ML จึงมีตำแหน่งของค่ายอดใกล้เคียงกัน



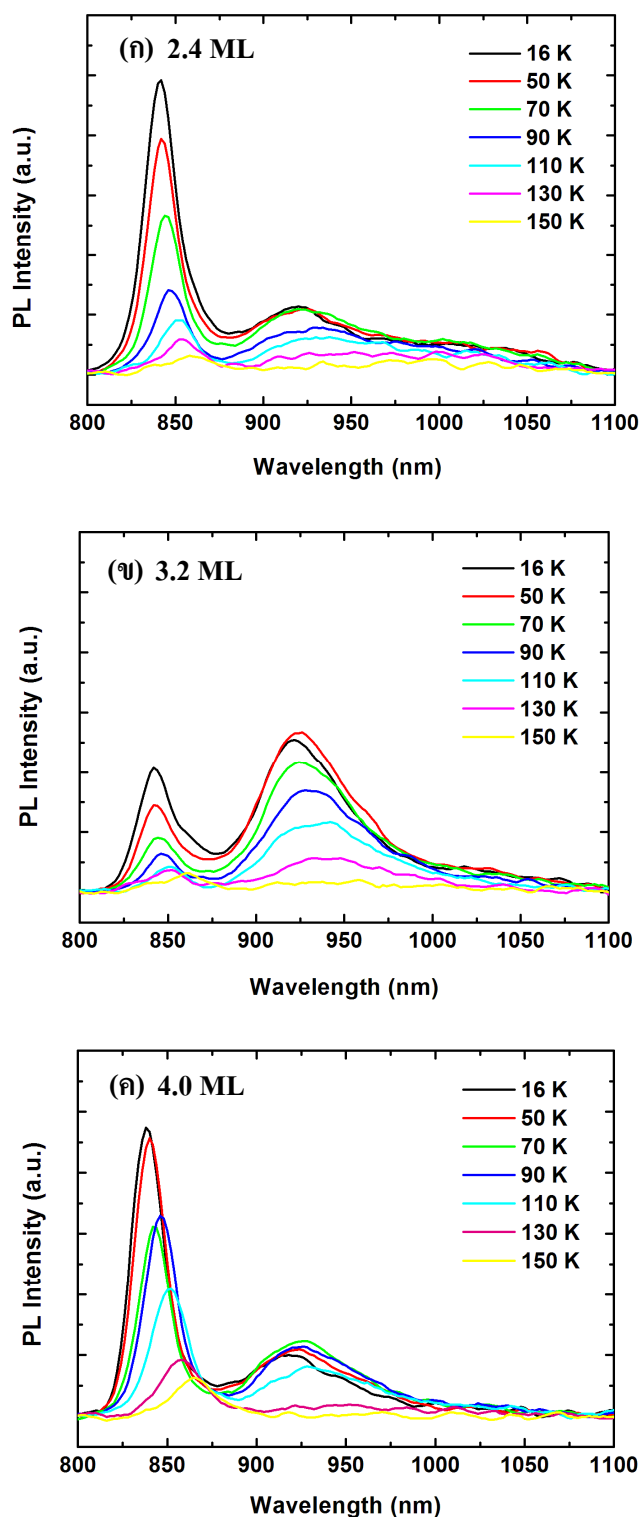


รูปที่ 4.20 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 16 K ของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณแกเลียมขณะขึ้นรูปหกดโลหะและอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหกดโลหะมีค่า  $350^{\circ}\text{C}$

ในการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของชิ้นงานตัวอย่างทั้งหมดนั้น ได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังงานแสงที่กระตุ้น โดยการปรับกำลังของเลเซอร์ระหว่าง 10-90 mW ซึ่งพบว่าผลที่ได้มีลักษณะดังในรูปที่ 4.21 พบว่า ค่ายอดของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ (ความยาวคลื่น  $\sim 920$  nm) เมื่อเพิ่มกำลังงานแสงในการกระตุ้นนั้นทำให้ค่าความเข้มของโฟโตลูมิเนสเซนซ์เพิ่มขึ้นแต่ค่ายอดของสเปกตรัมนั้นจะมีการเลื่อนเพียงเล็กน้อยและเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวอย่าง ในขณะวัดระหว่าง 16-210 K ผลที่ได้มีลักษณะดังในรูปที่ 4.22 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในขณะวัดทำให้ค่าความเข้มของโฟโตลูมิเนสเซนซ์ลดลง ค่ายอดของสเปกตรัมเลื่อนไปทางความยาวคลื่นยาว (พลังงานต่ำลง) เนื่องจาก thermal excitation effect [29-30] แต่พบว่าการเลื่อนของค่ายอดความยาวคลื่นนั้นเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยรวมทั้งความเข้มของโฟโตลูมิเนสเซนซ์จะไม่ค่อยลดจนกว่าจะเพิ่มอุณหภูมิจนถึงประมาณ  $90^{\circ}\text{C}$  เนื่องจากเป็นการเรียงตัวแบบ Type II [31]



รูปที่ 4.21 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 16 K โดยการเปลี่ยนแปลงกำลังงานแสงในการกระตุ้นโครงสร้างนาโนของ GaP จากตัวอย่างที่ใช้อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะ 350°C และปริมาณแก๊สเฉื่อยขณะขึ้นรูปหยดโลหะ (ก) 2.4 ML (ข) 3.2 ML และ (ค) 4.0 ML



รูปที่ 4.22 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ที่ใช้กำลังงานแสงในการกระตุ้น 90 mW โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในขณะวัดโครงสร้างนาโนของ GaP จากตัวอย่างที่ใช้อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะ 350°C และปริมาณแกเลียม (ก) 2.4 ML (ข) 3.2 ML และ (ค) 4.0 ML

## บทที่ 5

### สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการประดิษฐ์โครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บนแผ่นผลึกฐานแกเลียมอาร์เซไนด์ (100) จากกลไกการก่อตัวขึ้นเองด้วยวิธีการปลูกผลึกแบบครอบเล็ทอพิแทกซ์จากลำโมเลกุล รวมไปถึงผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพผิวหน้าของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ดังกล่าวซึ่งขึ้นรูปภายใต้เงื่อนไขในการประดิษฐ์ที่แตกต่างกันและผลการวัดคุณสมบัติทางแสงด้วยวิธีโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บนแผ่นผลึกฐานแกเลียมอาร์เซไนด์ (100)

การประดิษฐ์โครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บนแกเลียมอาร์เซไนด์ (100) เริ่มจากการปลูกชั้นบัฟเฟอร์แกเลียมอาร์เซไนด์แล้วทำการขึ้นรูปหอคโลหะแกเลียม จากนั้นทำการขึ้นรูปผลึก (crystallization) เป็นโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ด้วยลำโมเลกุลของ  $P_2$  และทำการปลูกกลับด้วยชั้นแกเลียมอาร์เซไนด์ (สำหรับการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์) โดยมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการขึ้นรูปโครงสร้างนาโน โดยการแปรค่าตัวแปรในการขึ้นรูปหอคโลหะแกเลียม ได้แก่ อุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหอคโลหะแกเลียมและปริมาณแกเลียมในการขึ้นรูปหอคโลหะ

เมื่อทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหอคโลหะแกเลียมที่มีผลต่อโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์บนแผ่นผลึกฐานแกเลียมอาร์เซไนด์ (100) โดยผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพผิวหน้าของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์ พบว่า เมื่ออุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหอคโลหะแกเลียมสูงขึ้นส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความสูงและความลึกของโครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ความหนาแน่นที่ได้จะลดลง เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โลหะแกเลียมยังมีคุณสมบัติเป็นโลหะหลอมเหลว (metallic) สามารถเคลื่อนที่และรวมตัวเป็นหอคโลหะที่มีขนาดใหญ่ขึ้น โครงสร้างนาโนของแกเลียมฟอสไฟด์จึงมีแนวโน้มของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความสูงและความลึกเพิ่มขึ้นแต่ความหนาแน่นลดลง สำหรับผลการวัดทางโฟโตลูมิเนสเซนซ์ พบว่า เมื่ออุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหอคโลหะแกเลียมเพิ่มขึ้นจาก  $300^\circ\text{C}$  เป็น  $350^\circ\text{C}$  จะทำให้ค่ายอดของสเปกตรัมเลื่อนไปทางความยาวคลื่นยาวมากขึ้น ในการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของชิ้นงานตัวอย่างนั้นได้เปลี่ยนแปลงค่ากำลังงานแสงในการกระตุ้น โดยการปรับกำลังงานของเลเซอร์ระหว่าง 10-90 mW พบว่า เมื่อเพิ่มค่า

กำลังงานแสงในการกระตุ้นชิ้นงานจะทำให้ค่าความเข้มของโฟโตลูมิเนสเซนซ์เพิ่มขึ้นและค่ายอดของสเปกตรัมนั้นจะมีการเลื่อนเพียงเล็กน้อย และเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ตั้งแต่ 16-210 K พบว่า เมื่ออุณหภูมิในขณะวัดเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ายอดของสเปกตรัมเลื่อนไปทางความยาวคลื่นยาวมากขึ้น โดยที่การเลื่อนของค่ายอดนั้นเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยรวมทั้งความเข้มของโฟโตลูมิเนสเซนซ์จะลดลงเพียงเล็กน้อยจนกว่าอุณหภูมิจะสูงกว่า 90 K เนื่องจากการเรียงตัวแบบ Type II

เมื่อทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณแคลเซียมในการขึ้นรูปหอคโลหะที่มีผลต่อ โครงสร้างนาโนของแคลเซียมฟอสไฟด์บนแผ่นผลึกฐานแคลเซียมอาร์เซไนด์ (100) โดยศึกษาลักษณะทางกายภาพผิวหน้าของโครงสร้างนาโนแคลเซียมฟอสไฟด์ พบว่า เมื่อใช้ปริมาณแคลเซียมในการขึ้นรูปหอคโลหะเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นของโครงสร้างนาโนที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่เมื่อใช้ปริมาณหอคโลหะแคลเซียมเพิ่มขึ้นถึงค่าหนึ่งจะทำให้มีจำนวนแคลเซียมมากพอจนเกิดการปกคลุมจนเต็มพื้นที่ผิวหน้าเกิดเป็นชั้น (layer) ของแคลเซียมขึ้นแทนที่จะเป็นหอคแคลเซียมเพียงอย่างเดียว โดยแคลเซียมที่เหลือจะเกิดเป็นหอคโลหะขึ้นเหนือชั้นดังกล่าวอีกทีหนึ่งจึงทำให้ความหนาแน่นที่เกิดขึ้นลดลง ดังในกรณีที่อุณหภูมิขณะขึ้นรูปหอคโลหะแคลเซียมมีค่า  $250^{\circ}\text{C}$  ความหนาแน่นจะลดลงเมื่อปริมาณแคลเซียมมีค่า 2.4-3.2 ML แล้วเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแคลเซียมมีค่า 3.2-4.0 ML จากนั้นจะลดลงอีกครั้งเมื่อปริมาณแคลเซียมมีค่า 4.0-4.8 ML แล้วเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อปริมาณแคลเซียมมีค่า 4.8-5.6 ML สำหรับผลการวัดทางโฟโตลูมิเนสเซนซ์ พบว่า เมื่อปริมาณแคลเซียมในการขึ้นรูปหอคโลหะเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ายอดของสเปกตรัมดังกล่าวเลื่อนเพียงเล็กน้อย เนื่องจากความสูงของโครงสร้างนาโนใกล้เคียงกัน จึงทำให้เกิดเป็นโครงสร้างนาโนของแคลเซียมฟอสไฟด์ที่มีขนาดใกล้เคียงกัน ดังนั้นผลของการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของโครงสร้างนาโนของแคลเซียมฟอสไฟด์จึงมีค่ายอดใกล้เคียงกัน ในการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของชิ้นงานตัวอย่างนั้นได้เปลี่ยนแปลงค่ากำลังงานแสงในการกระตุ้น โดยการปรับกำลังงานของเลเซอร์ระหว่าง 10-90 mW พบว่า เมื่อเพิ่มค่ากำลังงานแสงในการกระตุ้นชิ้นงานจะทำให้ค่าความเข้มของโฟโตลูมิเนสเซนซ์เพิ่มขึ้น แต่ค่ายอดของสเปกตรัมนั้นจะมีการเลื่อนเพียงเล็กน้อยและเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ตั้งแต่ 16-150 K พบว่า เมื่ออุณหภูมิในขณะวัดเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ายอดของสเปกตรัมเลื่อนไปทางความยาวคลื่นยาว โดยที่การเลื่อนของค่ายอดนั้นเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยรวมทั้งความเข้มของโฟโตลูมิเนสเซนซ์จะลดลงเพียงเล็กน้อยจนกว่าอุณหภูมิจะสูงกว่า  $90^{\circ}\text{C}$  เนื่องจากการเรียงตัวแบบ Type II

## รายการอ้างอิง

- [1] Y. Arakawa, and H. Sakaki. Appl. Phys. Lett. 40 (1982): 939-942.
- [2] Y. Aharonov, and D. Bohm. Phys. Rev. 115 (1959): 485-491.
- [3] [http://en.wikipedia.org/wiki/Gallium\\_phosphide](http://en.wikipedia.org/wiki/Gallium_phosphide)
- [4] T. Mano, and N. Koguchi. J. Cryst. Growth. 278 (2005): 108-112.
- [5] D. Granados, and J. M. Garcia. Appl. Phys. Lett. 82 (2003): 2401-2403.
- [6] S. Kobayashi, C. Jiang, T. Kawazu, and H. Sakaki. Jpn. J. Appl. Phys. 43 (2004): L662-664.
- [7] Cheng, K.-Y. 1997. Proceeding of IEEE. 85: 1694-1714.
- [8] D. Bimberg, M. Grundmann, and N. N. Ledentsov. Quantum dot heterostructures. Chichester: Wiley, 1999.
- [9] M. Sugawara. Semiconductors and Semimetals : Self-assembled InGaAs/GaAs quantum dots, 60 (1999): 1-116, San Diego: Academic Press.
- [10] C. M. Wolfe, N. Holonyak, Jr., and G. E. Stillman. Physical properties of semiconductors. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall. 1989.
- [11] Z. I. Alferov. Reviews of Modern Physics. 73 (2001): 767-782.
- [12] Pallab Bhattacharya. Semiconductor optoelectronic devices. New Jessy: Prentice-Hall. Inc, 1994.
- [13] K. A. Cheng, and C. H. Yang. J. Appl. Phys. 88 (2000): 5272-5276.
- [14] M. A. Herman, and H. Sitter. Molecular beam epitaxy fundamentals and current status. Berlin: Springer-Verlag, 1989.
- [15] A. G. Cullis, D. J. Norris, T. Walther, M. A. Migliorato, and M. Hopkinson. Phys. Rev. 66 (2002): 081305 (R).
- [16] H. T. Dobbs, A. Zangwill, and D. D. Vvedensky. Phys. Rev. Lett. 79 (1997): 897-900.
- [17] N. Koguchi, K. Ishige, Jpn. J. Appl. Phys. 32 (1993): 2052-2058.
- [18] Y. Horikoshi, M. Kawashima, and H. Yamaguchi. Jpn. J. Appl. Phys. 27 (1988): 169-179
- [19] T. Mano, and N. Koguchi. J. Crystal Growth 278 (2005): 108-112.

- [20] Naraporn Pankaow, The fabrication of InGaAs ring-like nanostructures by droplet molecular beam epitaxy. Doctoral dissertation. Department of Electrical Engineering. Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2010.
- [21] Robert G. Dandrea, and Alex Zunger. Appl. Phys. Lett. 57 (1990): 1031-1033.
- [22] P. R. C. Kent, Gus L. W. Hart and Alex Zunger. Appl. Phys. Letter. 81 (2002): 4377-4379.
- [23] Kwiseon Kim, Gus L. W. Hart and Alex Zunger. Applied Physics Letter 80 (2002): 3105-3107.
- [24] T. C. Lin, Y. H. Wu, L. C. Li, Y.T. Sung, S. D. Lin, L. Chang, Y.W. Suen, and C. P. Lee, J. Appl. Phys. 108 (2010): 123503.
- [25] Chris G. Van de Walle. Phys. Rev. B. 39 (1988): 1871-1883.
- [26] I. Vurgaftman, J.R. Meyer, and L.R. Ram-Mohan. J. Appl. Phys. 89 (2001): 5815-5874.
- [27] Bhavtosh Bansal. J. Appl. Phys. 100 (2006): 093107.
- [28] Masafumi Jo, Guotao Duan, Takaaki Mano, and Kazuaki Sakoda. Jo et al. Nanoscale Research Letters. 6 (2011): 76
- [29] A. B. Veloso, M. K. K. Nakaema, M. P. F. de Godoy, J. M. J. Lopes, F. Iikawa, M. J. S. P. Brasil, J. R. R. Bortoleto, M. A. Cotta, P. F. P. Fichtner, M. Morschbacher, and J. R. Madureira, Appl. Phys. Lett. 91 (2007): 121917.
- [30] L. Brusafemi, S. Sanguinetti, E. Grill, M. Guzzi, A. Bignazzi, F. Bogani, L. Carraresi, M. Colocci, A. Bosacchi, P. Frigeri, and S. Franchi. Appl. Phys. Lett. 69 (1996): 3354-3356
- [31] T.T Chen, C.H. Chen, W.Z. Cheng, W.S. Su, M.H. Ya, Y.F. Chen, P.W. Liu, and H.H. Lin. J. Appl. Phys. 93 (2003): 9655-9658.

## ผลงานตีพิมพ์

1. GaP nanostructures on GaAs (100) grown by Droplet Molecular Beam Epitaxy, **P. Prongjit**, N. Pankaow, S. Thainoi, P. Changmaung, S. Panyakeow, and S. Ratanathamphan, The 34<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference, Siam University, Pataya, Chonburi, Thailand, 30 November - 2 December, 2011. Vol. 2, 861-864.
2. Formation of GaP Nanostructures on GaAs (100) by Droplet Molecular Beam Epitaxy, **P. Prongjit**, N. Pankaow, S. Thainoi, S. Panyakeow, and S. Ratanathamphan, The 16<sup>th</sup> International Semiconducting and Insulating Materials Conference (SIMC-XVI), Stockholm, Sweden, 19-23 June, 2011, Physica Status Solidi (c), (in press).



## ผลงานนำเสนอ

### การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

- *Poster Presentation*

1. Formation of GaP Nanostructures on GaAs (100) by Droplet Molecular Beam Epitaxy, **P. Prongjit**, N. Pankaow, S. Thainoi, S. Panyakeow, and S. Ratanathamphan, The 16<sup>th</sup> International Semiconducting and Insulating Materials Conference (SIMC-XVI), Stockholm, Sweden, 19-23 June, 2011.
2. Fabrication of GaP Nanostructures on GaAs (100) by Droplet Molecular Beam Epitaxy, **P. Prongjit**, O. Tangmettjittakul, S. Thainoi, N. Pankaow, S. Panyakeow, and S. Ratanathamphan, The 28<sup>th</sup> North American Molecular Beam Epitaxy Conference (NAMBE), University of California San Diego, La Jolla, CA, U.S.A., 14-17 August, 2011.

- *Oral Presentation*

1. Tensile Strained, Type II, GaP/GaAs Nanostructures, **P. Prongjit**, N. Pankaow, P. Poonpeng, S. Thainoi, S. Panyakeow, and S. Ratanathamphan, The NanoThailand 2012 Conference, Khon Kaen, Thailand, 9-11 April, 2012.

### การประชุมวิชาการระดับชาติ

- *Oral Presentation*

1. GaP nanostructures on GaAs (100) grown by Droplet Molecular Beam Epitaxy, **P. Prongjit**, N. Pankaow, S. Thainoi, P. Changmaung, S. Panyakeow, and S. Ratanathamphan, The 34<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference, Siam University, Pataya, Chonburi, Thailand 30 November - 2 December, 2011.

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพัชรวิพรรณ โปรงจิต เกิดเมื่อวันที่ 10 ธันวาคม พ.ศ. 2530 ที่อำเภอเดชอุดม จังหวัดอุบลราชธานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยขอนแก่นในปีการศึกษา 2552 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตที่ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2553 โดยในระหว่างการศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ได้รับทุนโครงการศิษย์ก้นกุฏิ จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย