

อิทธิพลของสัดส่วนอินเดียมและค่าความหนาของชั้นแทรกอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ ที่มีต่อ  
โครงสร้างขนาดนาโนของแกเลียมแอนติโมนีไนด์



นางสาวกมลชนก ขอกกลาง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF THE INDIUM COMPOSITION AND THICKNESS OF InGaAs INSERTION LAYER  
ON GaSb NANOSTRUCTURES

Miss Kamonchanok Khoklang



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 2014

Copyright of Chulalongkorn University



กมลชนก ขอกกลาง : อิทธิพลของสัดส่วนอินเดียมและค่าความหนาของชั้นแทรกอินเดียม  
 แกลเลียมอาร์เซไนด์ ที่มีต่อโครงสร้างขนาดนาโนของแกลเลียมแอนติโมนด์ (EFFECT OF  
 THE INDIUM COMPOSITION AND THICKNESS OF InGaAs INSERTION LAYER ON  
 GaSb NANOSTRUCTURES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์,  
 57 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาการประดิษฐ์โครงสร้างขนาดนาโน GaSb แบบที่ก่อ  
 ตัวขึ้นเองที่มีชั้นแทรกอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ (InGaAs) บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นแกลเลียมอาร์เซ  
 ไนด์ (GaAs) (100) โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของชั้นแทรก  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  เท่ากับ 0, 1, 2, 3  
 และ 4 ML และค่าสัดส่วนของอินเดียมในชั้นแทรก  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  มีค่าเท่ากับ 7%, 15%, 20% และ  
 25% ซึ่งประดิษฐ์ขึ้นด้วยวิธีการปลูกผลึกอิมแพกต์จากลำโมเลกุลที่ใช้แหล่งจ่าย Sb แบบ Cracker  
 valve เพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าความหนาและค่าสัดส่วนอินเดียมของชั้นแทรก InGaAs ที่มีผลต่อ  
 คุณสมบัติเชิงโครงสร้างและคุณสมบัติเชิงแสงของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb โดยผลการทดลองที่ได้  
 แสดงให้เห็นว่าชั้นแทรกมีผลต่อค่าความหนาแน่นของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb อันเป็นผลทำให้ค่า  
 ลดลงอยู่ในช่วง  $10^9 \text{ cm}^{-2}$  ที่ซึ่งน้อยกว่าค่าความหนาแน่นของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb/GaAs ที่ไม่  
 มีชั้นแทรกที่ประดิษฐ์ขึ้นด้วยเงื่อนไขเดียวกัน สำหรับรูปร่างของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb/GaAs มี  
 ลักษณะคล้ายโดมที่มีฐานเป็นวงรี เมื่อทำการเพิ่มค่าความหนาชั้นแทรก InGaAs พบว่ารูปร่าง  
 โครงสร้างขนาดนาโน GaSb มีการยืดขยายออกไปจากทิศทาง [110] และในทิศทาง [1-10] ความ  
 สม่าเสมอโครงสร้างนาโน GaSb ดีขึ้นเมื่อเพิ่มค่าความหนาและค่าสัดส่วนอินเดียมของชั้นแทรก  
 InGaAs สำหรับผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่ได้จากชิ้นงานบางเงื่อนไขของโครงสร้างขนาดนาโน  
 GaSb ที่ถูกปลูกกลับด้วย GaAs หนา 150 นาโนเมตร พบว่าความเข้มโฟโตลูมิเนสเซนซ์เพิ่มขึ้นเมื่อค่า  
 ความหนาของชั้นแทรกและค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นแทรก InGaAs เพิ่มขึ้น โดยผลนี้แสดงให้เห็นว่า  
 ชั้นแทรกมีผลทำให้คุณภาพผลึกของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb ดีขึ้นจากค่าความเข้มความเข้มโฟ  
 โตลูมิเนสเซนซ์สูงขึ้นในตัวอย่างที่มีชั้นแทรก

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2557

# # 5570104021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: GALLIUM ANTIMONIDE QUANTUM DOTS / INDIUM GALLIUM ARSENIDE  
INSERTION LAYERS / MOLECULAR BEAM EPITAXY

KAMONCHANOK KHOKLANG: EFFECT OF THE INDIUM COMPOSITION AND  
THICKNESS OF InGaAs INSERTION LAYER ON GaSb NANOSTRUCTURES.  
ADVISOR: ASSOC. PROF. SOMCHAI RATANATHAMMAPHAN, D.Eng., 57 pp.

In this thesis, we report on the growth, structural and optical properties of GaSb nanostructures with InGaAs insertion layers. In this work, type-II GaSb nanostructures are epitaxially grown on (100) GaAs substrates by self-assembled growth using an MBE equipped with Sb cracker cell. Prior to the growth of GaSb layers, 0, 1, 2, 3 and 4 monolayers (MLs) of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  are inserted with various indium compositions (7%, 15%, 20% and 25%). With InGaAs insertion layers, the dot density decreases about one order of magnitude (to  $10^9 \text{ cm}^{-2}$ ) less than that of GaSb/GaAs sample without insertion layer at the same growth condition. The shape and size of nanostructures change substantially. The GaSb/GaAs structures have dome-shaped with elliptical base. The elongation direction of the base changes from [110] to [1-10] when  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  insertion layers are introduced. The uniformity of GaSb QDs improves when the indium content and thickness of InGaAs insertion layers increase. The change in their morphology is due to modified strain energy at different values of indium compositions and thickness in InGaAs insertion layers. Photoluminescence (PL) of the capped samples shows that PL intensity increases with the increasing indium content. This indicates that the crystalline quality of GaSb nanostructure is improved by insertion of InGaAs layer.

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

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

Academic Year: 2014

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ดำเนินการวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยได้รับการสนับสนุนจาก

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ  
ผศ.ดร. สุวิทย์ กิระวิทยา ที่ให้ความกรุณาให้คำแนะนำต่างๆ ที่มีค่าอย่างยิ่งต่อเนื่องทุกขั้นตอน  
ตั้งแต่เริ่มต้นการทำวิทยานิพนธ์ จนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

ผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน อัน  
ประกอบด้วย ศ.ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว รศ.ดร.บรรยง โตประเสริฐพงศ์ และ รศ.ดร.สมชัย รัตน  
ธรรมพันธ์

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณศุภโชค ไทยน้อย คุณพัฒนา พันธุ์วงศ์ คุณขวัญเรือน ไทยน้อย  
คุณพรชัย ช่างม่วง และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านเทคนิคและงานทางด้าน  
ธุรการต่างๆ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร.เมธี คุณรักษา นางสาวพัชรีวรรณ โปร่งจิต นายสมัชชา วรธำรง  
นางสาวณัฐภาส ประภาสวัสดี และนิสิตปริญญาเอก โท ตรี ทุกท่านในห้องปฏิบัติการวิจัย  
สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ได้ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆ ด้วยความเต็มใจ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ กองทุนรัชดาภิเษกสมโภชจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
(RES560530079-EN) ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลรอบข้างทุกท่านที่ให้ความ  
ห่วงใย และเป็นกำลังใจ ในการทำวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปได้  
ด้วยดีคุณประโยชน์อันจะเกิดจากผลงานวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นเครื่องบูชาพระคุณ  
บูรพาจารย์ตลอดจนคุณบิดามารดาที่ได้มีส่วนช่วยวางรากฐานการศึกษาแก่ผู้วิจัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ .....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์นี้.....	3
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐาน .....	4
2.1 โครงสร้าง Low-dimension.....	4
2.1.1 วัสดุที่มีขนาดเป็นก้อนมวลสาร (Bulk).....	6
2.1.2 ควอนตัมเวลล์ (Quantum well).....	7
2.1.3 ควอนตัมไวร์ (Quantum wire).....	7
2.1.4 ควอนตัมดอต (Quantum dot) .....	8
2.2 ความไม่เข้ากันของค่าคงตัวโครงสร้างผลึก (Lattice-mismatched).....	10
2.3 อิทธิพลของความเครียดและการผ่อนคลายความเครียดที่มีต่อโครงสร้าง Low-Dimension .....	12
2.4 การประดิษฐ์โครงสร้างขนาดนาโนด้วยวิธีปลูกผลึกแบบกลไกการก่อตัวขึ้นเอง.....	13
2.5 การปลูกผลึกอีพิแทกซีจากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy: MBE).....	16
2.6 การวัดหาค่าอัตราการปลูกผลึกจาก RHEED Oscillation .....	19
2.7 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM).....	20

2.8 การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence: PL) .....	21
บทที่ 3 การทดลอง .....	24
3.1 การเตรียมแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น .....	24
3.2 การเตรียมการในห้องปลูกผลึกก่อนการปลูกผลึก .....	25
3.3 การศึกษาอิทธิพลของชั้นแทรกอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ .....	25
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล .....	28
4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพผิวหน้าของโครงสร้างขนาดนาโนแกลเลียมแอนติโมนด์ที่มีชั้นแทรกอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นแกลเลียมอาร์เซไนด์ (100) .....	28
4.2 การศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของโครงสร้างขนาดนาโนแกลเลียมแอนติโมนด์ที่มีชั้นแทรกอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นแกลเลียมอาร์เซไนด์ (100) .....	40
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง .....	46
5.1 การศึกษาลักษณะเชิงกายภาพผิวหน้าของโครงสร้างขนาดนาโนแกลเลียมแอนติโมนด์ที่มีชั้นแทรกอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นแกลเลียมอาร์เซไนด์ (100) .....	46
5.2 การศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของโครงสร้างขนาดนาโนแกลเลียมแอนติโมนด์ที่มีชั้นแทรกอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นแกลเลียมอาร์เซไนด์ (100) .....	47
ผลงานตีพิมพ์ .....	48
รายการอ้างอิง .....	50
ภาคผนวก .....	53
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	57



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาของวิทยานิพนธ์

โครงสร้างขนาดนาโนชนิดสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Nanostructures) มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (Optoelectronic Devices) [1, 2] ตัวอย่างเช่น เลเซอร์ (Laser) เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) และโฟโตดีเทคเตอร์ (Photodetector) ฯลฯ เป็นต้น ตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำโครงสร้างขนาดนาโน ได้แก่ InAs/GaAs, InP/InGaP เป็นต้น ซึ่งลักษณะการเรียงตัวของแถบพลังงาน (Band alignment) ของโครงสร้างขนาดนาโนดังกล่าวมีลักษณะเป็นแบบ Type I โดยการกักกักพาหะ (Carrier Confinement) เกิดขึ้นเฉพาะภายในชั้นสารกึ่งตัวนำที่มีค่าแถบพลังงานขนาดเล็กกว่าเท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามสำหรับสิ่งประดิษฐ์บางชนิดที่ต้องการการกักกักพาหะเพียงชนิดใดชนิดหนึ่งเพียงชนิดเดียว เพื่อให้ได้กลไกการทำงานสอดคล้องกับความต้องการของสิ่งประดิษฐ์ที่ทำงานเฉพาะงาน ซึ่งปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเฉพาะในหัวต่อคู่ของสารกึ่งตัวนำที่มีการเรียงแถบพลังงานเป็นแบบ Type II ชนิด Staggered ตัวอย่างของกลุ่มสารกึ่งตัวนำที่มีการเรียงตัวลักษณะนี้ได้แก่ GaP/GaAs, InP/GaAs, GaSb/GaAs [3-5] เป็นต้น โดยแผ่นผลึกฐานที่นิยมใช้เป็นแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นนั้นในกระบวนการประดิษฐ์ ได้แก่ แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) เนื่องจากมีราคาถูกและขนาดของแผ่นผลึกฐานมีขนาดใหญ่เหมาะสมสำหรับใช้ในอุตสาหกรรม สำหรับแกลเลียมแอนติโมนด์ (GaSb) นั้นเป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติทางแสงในย่าน 1.3 -1.6 ไมครอน ซึ่งเป็นย่านค่าความยาวคลื่นแสงที่นิยมใช้ในการสื่อสารทางแสงระยะไกล ดังนั้นโครงสร้างขนาดนาโน GaSb บนแผ่นผลึกฐาน GaAs จึงสำคัญสำหรับสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้งานในย่านดังกล่าว โดยเทคนิคที่นิยมใช้ในการประดิษฐ์โครงสร้างขนาดนาโน ได้แก่ กลไกการก่อตัวขึ้นเอง (Self-assemble) โดยกลไกนี้การเกิดโครงสร้างขนาดนาโนเกิดจากชั้นรูปผลึกในแบบ Stranski-Krastanow (SK) growth mode [6] ซึ่งเราได้ผลึกที่มีความสมบูรณ์และมีจุดบกพร่องต่ำ เนื่องจากไม่มีกระบวนการกัดขึ้นรูปทางเคมีและการปนเปื้อนจากสารเคมี สำหรับเทคนิคการปลูกผลึกอิมพิแทกซ์ที่นิยมใช้ ได้แก่ การปลูกผลึกอิมพิแทกซ์จากลำโมเลกุล เนื่องจากเป็นวิธีการปลูกผลึกที่สะอาดและสามารถเลือกใช้วัสดุที่ไม่น่าใช้ก๊าซอันตรายหรือก๊าซพิษได้

ในการประดิษฐ์โครงสร้างขนาดนาโนนั้น ตัวแปรที่ใช้ในการประดิษฐ์นั้นมีผลต่อคุณสมบัติเชิงโครงสร้าง อันมีผลต่อเนื่องต่อคุณสมบัติเชิงแสงอีกด้วย แต่อีกวิธีการหนึ่งในการกำหนดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงโครงสร้างและคุณสมบัติเชิงแสง ได้แก่ การใช้ชั้นแทรก (Insertion layer) เพื่อให้ค่าความหนาแน่น ขนาดมิติและรูปร่างของโครงสร้างขนาดนาโนสามารถเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดและค่าความหนาของชั้นแทรก ซึ่งก่อนหน้านี้กรรมวิธีของ InAs/GaAs และชั้นแทรกของอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ (InGaAs) ได้มีการศึกษาอย่างแพร่หลายจนมีการนำมาประยุกต์ใช้ในการประดิษฐ์เลเซอร์สารกึ่งตัวนำ [7] แต่สำหรับกรณี GaSb/GaAs นั้นยังมีการศึกษาอยู่น้อยมาก เพื่อเป็นการทำความเข้าใจในอิทธิพลของชั้นแทรก InGaAs ที่มีผลต่อโครงสร้างขนาดนาโนและคุณสมบัติเชิงแสงของ GaSb/GaAs ดังนั้นวิทยานิพนธ์จึงได้มุ่งเป้าหมายในการศึกษาผลของชั้นแทรก InGaAs ที่มีผลต่อโครงสร้างขนาดนาโนและคุณสมบัติเชิงแสงของ GaSb/GaAs ที่ประดิษฐ์ขึ้นด้วยวิธีการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของชั้นแทรก InGaAs ที่มีต่อค่าความหนาแน่น ขนาดมิติและการกระจายเชิงขนาดของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐาน GaAs (100) ด้วยวิธีการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล โดยทำการวิเคราะห์ลักษณะเชิงกายภาพของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb บนแผ่นผลึกฐาน GaAs (100) ที่ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM) รวมถึงการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงแสงที่ได้จากการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence: PL) ของตัวอย่างโครงสร้างขนาดนาโน GaSb ที่ปลูกกลบด้วย GaAs

สำหรับเนื้อหาสาระของวิทยานิพนธ์ประกอบด้วยบทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้พื้นฐานของโครงสร้าง Low-dimension กลไกการเกิดผลึกในวิธีการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล (MBE) วิธีการวัดลักษณะผิวหน้าด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) รวมทั้งการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (PL) บทที่ 3 เป็นรายละเอียดของกระบวนการทดลอง บทที่ 4 เป็นการผลการทดลองที่ได้และการวิเคราะห์ผลการทดลอง และในบทที่ 5 เป็นสรุปผลของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อสาธิตการประดิษฐ์โครงสร้างขนาดนาโน GaSb ที่มีชั้นแทรก InGaAs บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs (100) ด้วยวิธีการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy : MBE)
- 1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าสัดส่วนของชั้นแทรก InGaAs ที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงโครงสร้าง (รูปร่าง ขนาดมิติ ค่าความหนาแน่นและการกระจายเชิงขนาด) และคุณสมบัติเชิงแสงของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb ที่ก่อตัวขึ้นเอง

- 1.2.3 เพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าความหนาของชั้นแทรก InGaAs ที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงโครงสร้าง (รูปร่าง ขนาดมิติ ค่าความหนาแน่นและการกระจายเชิงขนาด) และคุณสมบัติเชิงแสงของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb ที่ก่อตัวขึ้นเอง

### 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ศึกษาการประดิษฐ์โครงสร้างขนาดนาโน GaSb ที่มีชั้นแทรก InGaAs บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs (100) ในการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของโครงสร้างขนาดนาโนและผลการกระจายเชิงขนาดโครงสร้างขนาดนาโน GaSb ที่ก่อตัวขึ้นเองบนแผ่นผลึกฐาน GaAs (100) ด้วยการปลูกอิมพิแทกซีผลึกด้วยลำโมเลกุล จากผลในกรณีที่มีชั้นแทรก InGaAs ใต้ชั้นโครงสร้างขนาดนาโน GaSb โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของชั้นแทรก InGaAs ได้แก่ ค่าสัดส่วนของ In ในชั้นแทรก InGaAs และค่าความหนาของชั้นแทรก InGaAs

### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์นี้

องค์ความรู้เกี่ยวกับการประดิษฐ์และคุณสมบัติเชิงโครงสร้างขนาดนาโน GaSb ที่มีชั้นแทรก InGaAs บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs (100) ด้วยวิธีการปลูกผลึกอิมพิแทกซีจากลำโมเลกุลและอิทธิพลการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของชั้นแทรก InGaAs ได้แก่ ค่าสัดส่วนของ In ในชั้นแทรก InGaAs และค่าความหนาของชั้นแทรก InGaAs ที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงแสงของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb

ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกายภาพผิวหน้าของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb ที่มีชั้นแทรกของ InGaAs บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs (100) ด้วยวิธีการปลูกผลึกอิมพิแทกซีจากลำโมเลกุลและคุณสมบัติการเปล่งแสงจากวิโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของโครงสร้างขนาดนาโนของ GaSb ที่ประดิษฐ์ในบางเงื่อนไข

## บทที่ 2

### ความรู้พื้นฐาน

เนื้อหาในบทนี้ขอทบทวนถึงทฤษฎีและความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้โดยสังเขป อันประกอบไปด้วย โครงสร้าง Low-dimension และคุณสมบัติต่างๆ ของโครงสร้าง เทคนิคประดิษฐ์โครงสร้างควอนตัมดอตด้วยวิธีปลูกผลึกแบบกลไกการก่อตัวขึ้นเอง (Self-assembled growth) ความรู้พื้นฐานของการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy: MBE) รวมถึงวิธีการวัดผิวหน้าด้วยเทคนิค Atomic Force Microscopy: AFM) และวิธีการวัดคุณสมบัติเชิงแสงด้วยวิธีโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence: PL)

#### 2.1 โครงสร้าง Low-dimension

เมื่อกล่าวถึงอะตอมจำนวนมากกว่า 2 อะตอมที่เข้าอยู่มาใกล้กันด้วยพันธะยึดเหนี่ยวที่มีต่อกันจนรวมกลุ่มกลายเป็นก้อนวัสดุ และทำให้ระดับพลังงานของอะตอมเดี่ยวของแต่ละอะตอมจากเดิมที่มีลักษณะเป็นระดับพลังงานไม่ต่อเนื่องเกิดการแยกระดับพลังงานออกจากระดับเดิมจนกลายเป็นระดับพลังงานหลายระดับที่อยู่ใกล้เคียงกัน ด้วยจำนวนระดับพลังงานของแต่ละอะตอมที่มีค่าใกล้เคียงกันทำให้เกิดเป็นแถบพลังงาน (Energy band) ที่มีค่าต่อเนื่อง ซึ่งจำนวนแถบพลังงานเกิดขึ้นนั้นมีหลายแถบพลังงานสำหรับในสารกึ่งตัวนำแถบพลังงานที่สำคัญ ได้แก่ แถบวาเลนซ์ (Valence band) และแถบนำไฟฟ้า (Conduction band) ซึ่งแยกออกจากกันโดยช่องว่างของพลังงานหรือแถบพลังงานต้องห้าม (Energy gap) กั้นกลางระหว่างแถบพลังงานทั้งสอง สำหรับสารกึ่งตัวนำอุนหภูมิต่ำ อิเล็กตรอนทั้งหมดอยู่ในแถบวาเลนซ์ ในขณะที่แถบนำไฟฟ้าปราศจากอิเล็กตรอน เมื่อสารกึ่งตัวนำถูกกระตุ้นจากพลังงานภายนอก เช่น ความร้อน อิเล็กตรอนบางส่วนในแถบวาเลนซ์ถูกกระตุ้นให้ขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้า และเกิดสถานะว่างที่เรียกว่า โฮล ขึ้นในแถบวาเลนซ์ในตำแหน่งที่อิเล็กตรอนหาย โดยที่พาหะทั้งสองชนิดนั้นทำหน้าที่เป็นพาหะนำไฟฟ้า และความแตกต่างของระดับพลังงานระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นนี้มีความสัมพันธ์กับอนุภาคแสงหรือโฟตอน (Photon) ในระดับพลังงานเท่ากันหรือมากกว่า ดังนั้นการควบคุมการเคลื่อนที่และการวางตัวของคู่อิเล็กตรอน-โฮลทั้งสองรวมทั้งโครงสร้างของแถบพลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานต่อคุณสมบัติต่างๆ เช่น สมบัติเชิงแสงและเชิงไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ปัจจัยเหล่านี้จะแตกต่างกันไปตามชนิดของสารกึ่งตัวนำและด้วยข้อจำกัดของวัสดุ นั้น เนื่องจาก Wave-like properties of carriers ซึ่งนิยามความสัมพันธ์ของพลังงานพาหะเป็น

พลังงานในรูปคลื่นได้ โดยในโครงสร้าง Low-dimension พาหะถูกกัก (Confinement) ในทิศทางใดทิศทางหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งทิศทางก็ได้ และช่วงความยาวของการกักพาหะเป็นอัตราส่วนของความยาวคลื่นเดอบรอกลี (De Broglie wavelength) แปรผกผันกับค่ามวลประสิทธิผลของพาหะ (Carrier effective mass,  $m^*$ ) และค่าอุณหภูมิ (T) ดังสมการ (2.1) [8]

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

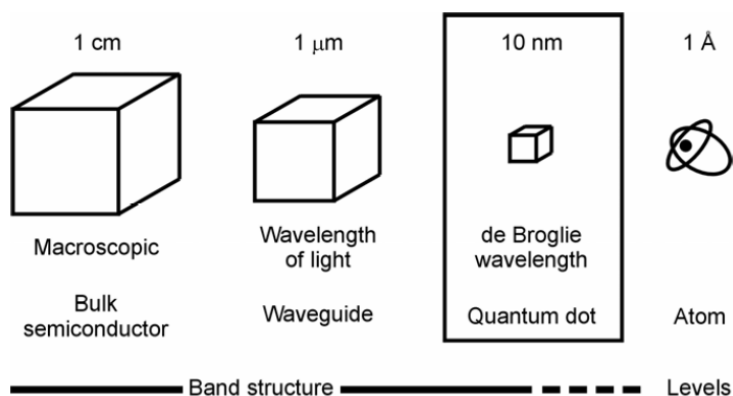
โดยที่  $h$  คือ ค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant)

$P$  คือ โมเมนตัมของพาหะ (Carrier momentum)

$K_B$  คือ ค่าคงตัวของโบลท์ซแมน (Boltzman's constant)

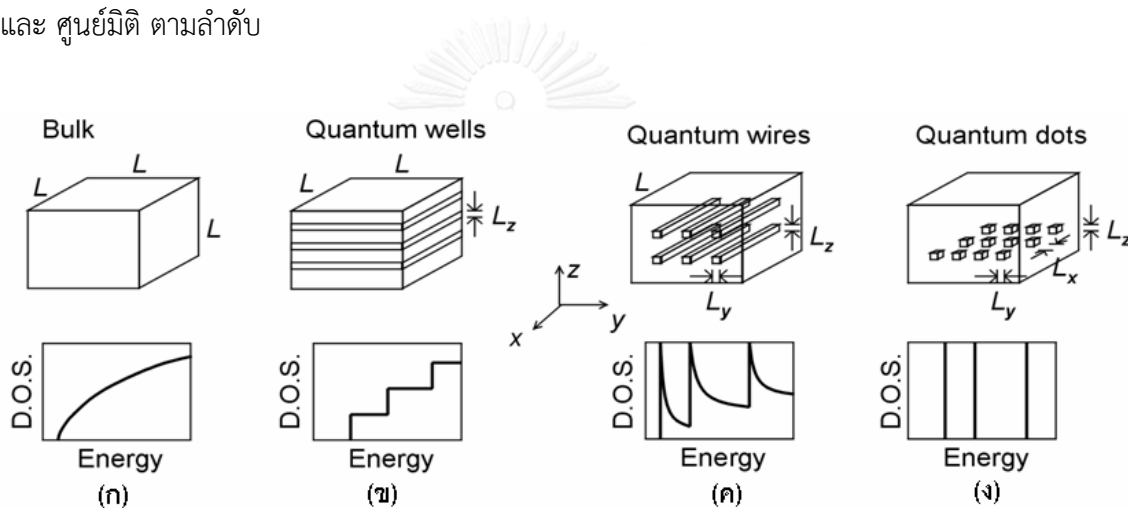
สำหรับค่าความยาวคลื่นเดอบรอกลีของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V มีค่าประมาณ 20 nm ที่อุณหภูมิ 300 K ผลจากการกักขังพาหะที่คาดว่าจะมีประโยชน์ต่อสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำนั้นมียุหลายประการ เช่นการเปลี่ยนสถานะระหว่างแถบพลังงานย่อย (Intersubband transition) ภายในโครงสร้างซึ่งเป็นกลไกหลักสำคัญสำหรับโฟโตนิกเทคโนโลยีในย่าน Far-infrared ที่ความยาวคลื่นมากกว่า 9  $\mu\text{m}$  เป็นต้น

เมื่อเปรียบเทียบวัสดุที่มีขนาดเป็นก้อนมวลสาร (Bulk) ท่อนำคลื่น (Waveguide) กล่องควอนตัม (Quantum box) หรือ ควอนตัมดอต (Quantum dot) และ อะตอม ดังในรูปที่ 2.1 ขนาดของโครงสร้างควอนตัมดอตมีค่าอยู่ในระดับของความยาวคลื่นเดอบรอกลี ท่อนำคลื่นอยู่ในระดับไมโครเมตร ส่วนโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของวัสดุที่มีเป็นก้อนมวลสารกับอะตอมนั้นอยู่ในระดับขนาดที่แตกต่างกัน โดยสามารถอธิบายได้จากทฤษฎีแถบพลังงาน และในส่วนของอะตอมสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองของระดับพลังงานแบบไม่ต่อเนื่อง



รูปที่ 2.1 การเปรียบเทียบวัสดุที่มีขนาดเป็นก้อนมวลสาร ท่อนำคลื่น ควอนตัมดอตและอะตอม [9]

จากรูปที่ 2.2 ค่าความหนาแน่นของสถานะ (density of states: D.O.S) ของวัสดุที่มีขนาดเป็นก้อนมวลสาร (Bulk) และโครงสร้าง Low-dimension [10] โดยลักษณะแถบพลังงานที่ต่างกันระหว่างโครงสร้าง Low-dimension และวัสดุห่อหุ้มรอบข้างทำให้เกิดการเก็บกักพาหะขึ้น ในกรณีที่มีอิเล็กตรอนและโฮลถูกเก็บกักอยู่ในวัสดุชนิดเดียวกัน กำแพงศักย์ (Potential barrier) สูงสุดนั้นถูกกำหนดจากแถบพลังงานที่ยกขึ้นในแถบนำไฟฟ้าหรือแถบวาเลนซ์ [11] วัสดุที่มีขนาดเป็นก้อนมวลสารมีโครงสร้างขนาดเล็กหลายรูปแบบซึ่งถูกจำแนกตามมิติอิสระ (Degree of freedom) พาหะภายในโครงสร้างที่มีขนาดเป็นก้อนมวลสารมีอิสระในการเคลื่อนที่ทั้งสามมิติ สำหรับโครงสร้างขนาดเล็กได้แก่ ควอนตัมเวลล์ (Quantum well) ควอนตัมไวร์ (Quantum wire) และ ควอนตัมดอต (Quantum dot) พาหะจะถูกกัก (Confine) และอิสระภาพในการเคลื่อนที่เพียง สองมิติ หนึ่งมิติ และ ศูนย์มิติ ตามลำดับ



รูปที่ 2.2 โครงสร้างและความหนาแน่นสถานะ (D.O.S) ของ (ก) วัสดุที่มีขนาดเป็นก้อนมวลสาร (ข) ควอนตัมเวลล์ (ค) ควอนตัมไวร์ และ (ง) ควอนตัมดอต [3]

### 2.1.1 วัสดุที่มีขนาดเป็นก้อนมวลสาร (Bulk)

วัสดุที่มีขนาดเป็นก้อนมวลสาร โครงสร้างและความหนาแน่นสถานะดังในรูปที่ 2.2 (ก) พาหะสามารถเคลื่อนที่ได้อิสระทุกทิศทาง โดยมีพลังงาน  $E_{bulk}$  ดังสมการ (2.2) และ ความหนาแน่นสถานะดังสมการ (2.3)

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

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

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

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

### 2.1.2 ควอนตัมเวลล์ (Quantum well)

ควอนตัมเวลล์ โครงสร้างและความหนาแน่นสถานะดังในรูปที่ 2.2 (ข) โดยพาหะสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ 2 มิติในระนาบ x-y นั่นคือ พาหะถูกจำกัดทิศทางการเคลื่อนที่เพียง 1 มิติ โดยมีพลังงาน  $E_{QW}$  ดังสมการ (2.4) และความหนาแน่นสถานะดังสมการ (2.5)

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

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

โดยที่  $k_{//}^2 = k_x^2 + k_y^2$

$\Theta$  คือ Heaviside's unit step function

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

$L_{QW}$  คือ ผลรวมความหนาแน่นของเวลล์และ Barrier regime

### 2.1.3 ควอนตัมไวร์ (Quantum wire)

ควอนตัมไวร์ โครงสร้างและความหนาแน่นสถานะดังในรูปที่ 2.2 (ค) พาหะสามารถเคลื่อนที่ได้อิสระเพียง 1 มิติในทิศ X เท่านั้น นั่นคือ พาหะถูกจำกัดทิศทางการเคลื่อนที่ 2 มิติ โดยมีพลังงาน  $E_{QWR}$  ดังสมการ (2.6) และความหนาแน่นสถานะดังสมการ (2.7)

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

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

$$\text{โดยที่ } k_{\perp}^2 = k_x^2$$

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

$N_{wi}$  คือ ความหนาแน่นพื้นที่ของควอนตัมไวร์

#### 2.1.4 ควอนตัมดอต (Quantum dot)

ควอนตัมดอต โครงสร้างและความหนาแน่นสถานะดังในรูปที่ 2.2 (ง) ในโครงสร้างควอนตัมดอตนี้พาหะถูกกักขังใน 3 มิติ ดังนั้นพาหะจึงไม่มีมิติหรือพิกัดของการเคลื่อนที่ และพลังงานที่พาหะนำไฟฟ้ามีเพียงบางค่าเท่านั้น เนื่องจากระดับพลังงานที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นระดับพลังงานแบบไม่ต่อเนื่องที่เหมือนกับคุณสมบัติของพาหะนำไฟฟ้าในระดับอะตอม (Artificial atom) โดยมีพลังงาน  $E_{QD}$  ดังสมการ (2.8) และความหนาแน่นสถานะดังสมการ (2.9)

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

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

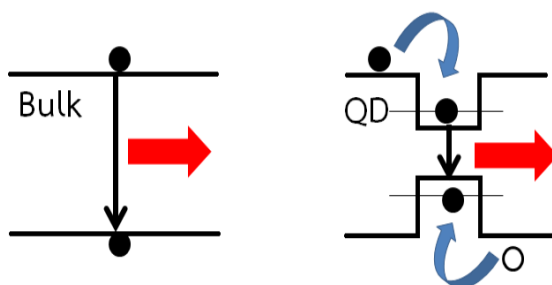
โดยที่  $\delta$  คือ เดลต้าฟังก์ชัน (Delta function)

$N_D$  คือ ปริมาตรความหนาแน่นของควอนตัมดอต

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

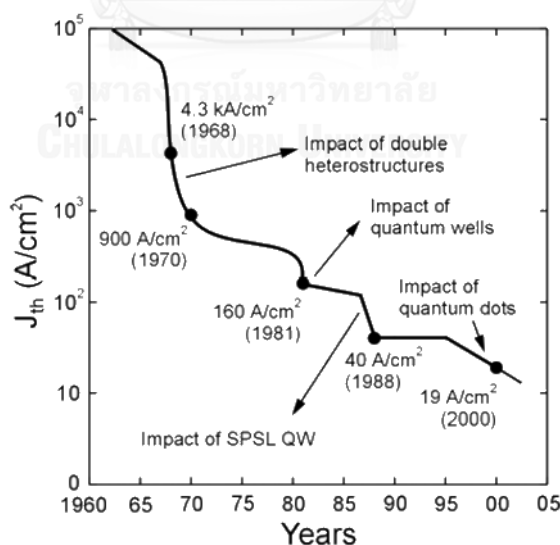
กล่าวโดยสรุปลักษณะสมบัติของระดับพลังงานภายในของโครงสร้างขนาดนาโน เช่น ควอนตัมดอตและควอนตัมเวลล์นั้นแตกต่างจากโครงสร้างที่มีขนาดเป็นก้อนมวลสาร โดยระดับพลังงานภายในของควอนตัมดอตมีลักษณะเป็นค่าไม่ต่อเนื่อง (discrete) เรียกว่า Quantized state ต่างจากแบบโครงสร้างที่มีขนาดเป็นก้อนมวลสารที่พาหะสามารถมีพลังงานได้ทุกระดับที่พลังงานที่ต่ำกว่า ค่าสูงสุดของแถบวาเลนซ์ (Valence band) และมีค่าสูงกว่าค่าต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า (Conduction band) ส่วนค่าความหนาแน่นของสถานะของควอนตัมดอตในอุดมคติมีลักษณะเป็น Delta function ดังในรูป 2.3 หมายความว่าพาหะมีระดับพลังงานได้เพียงบางค่าเท่านั้นหรือลักษณะที่ไม่ต่อเนื่อง





รูปที่ 2.3 ระดับพลังงานภายในของโครงสร้างกึ่งมวลสาร (ซ้าย) และ ควอนตัมดอต (ขวา)

ผลของการเปลี่ยนค่าความหนาแน่นของสถานะมีผลต่อคุณสมบัติพื้นฐานของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่นำโครงสร้างนาโนมาประยุกต์ใช้เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางแสงได้หลากหลาย และยังปรับแต่งคุณสมบัติของโฟตอนที่ปล่อยออกมาได้ เช่น โดยการแปรอัตราส่วนของสารประกอบของควอนตัมดอต ขนาดของควอนตัมดอต การเรียงตัวของกลุ่มของควอนตัมดอต ฯลฯ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถนำควอนตัมดอตมาประยุกต์ใช้เลเซอร์สารกึ่งตัวนำทำให้ค่ากระแสขีดเริ่มต้นของการเปล่งแสงเลเซอร์ (Threshold current) ต่ำลง เนื่องจากการมีความหนาแน่นของสถานะเป็น Delta function ในรูปที่ 2.4 แสดงวิวัฒนาการของค่ากระแสขีดเริ่มต้นของการเปล่งแสงเลเซอร์สารกึ่งตัวนำที่มีค่าลดลงเมื่อนำโครงสร้าง Low-dimension หรือโครงสร้างขนาดเล็กมาประยุกต์ใช้



รูปที่ 2.4 วิวัฒนาการของค่ากระแสขีดเริ่มต้นของการเปล่งแสงเลเซอร์ของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ [12]

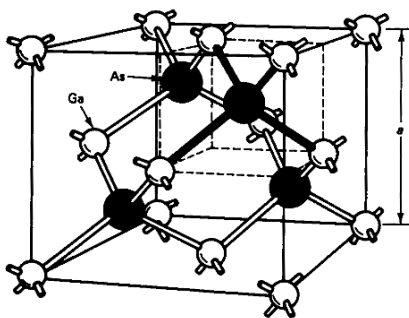
## 2.2 ความไม่เข้ากันของค่าคงตัวโครงผลึก (Lattice-mismatched)

ค่าคงตัวโครงผลึก (Lattice constant : a) คือค่าความกว้างของ Unit cell ของผลึก วัดจากศูนย์กลางอะตอมริมสุดด้านหนึ่งของ Unit cell ไปถึงศูนย์กลางอะตอมริมสุดอีกด้านหนึ่งของ Unit cell ดังในรูปที่ 2.5 ค่าคงตัวโครงผลึกมีค่ามากหรือน้อยนั้นขึ้นกับชนิดของอะตอมที่ประกอบกันเป็นผลึกโครงผลึก โดยที่ชนิดของสารเป็นตัวกำหนดลักษณะสมบัติที่มีผลต่อค่าคงตัวโครงผลึกเช่น แรงดึงดูดระหว่างอะตอม พันธะระหว่างอะตอม ทำให้สารประกอบหรือธาตุแต่ละชนิดมีค่าคงตัวโครงผลึกแตกต่างกันออกไป เช่น GaSb และ GaAs มีค่าคงตัวโครงผลึกที่ 6.0960 และ 5.6533 Å [13] ตามลำดับ แต่สารบางชนิดที่แตกต่างกันอาจมีค่าคงตัวโครงผลึกที่ใกล้เคียงกันมากจนถือได้ว่าค่าคงตัวโครงผลึกทั้งสองเข้ากันได้ (Lattice-matched) เช่น GaAs และ AlGaAs

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติเชิงกายภาพของ GaSb, GaAs, และ  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  [6]

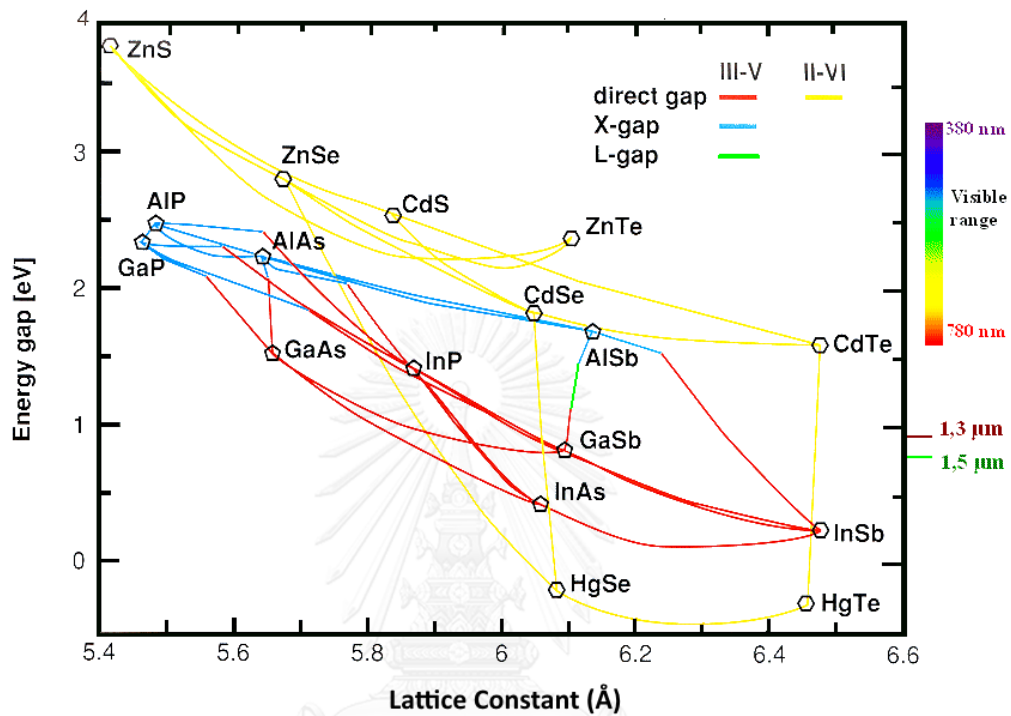
Material	Bandgap (eV) at 300 Kelvin	Lattice constant(Å)
GaAs	1.43	5.6533
GaSb	0.68	6.0960
$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	$0.324 + 0.7(1-x) + 0.4(1-x)^2$	$5.6533 + 0.405(x)$

สารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการทดลองภายใต้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แก่ GaSb, GaAs และ  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  โดยที่ค่าสัดส่วนของ In ดัง X เท่ากับ 7%, 15%, 20% และ 25% ซึ่งมีคุณสมบัติเชิงกายภาพโดยสรุปดังตารางที่ 2.1 ในกรณีของ  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ค่าคงตัวโครงผลึกจะเปลี่ยนไปตามค่า X นั้น หมายความว่า การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน In ต่อ Ga ใน  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกายภาพของ  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ทั้งค่าแถบช่องว่างพลังงานและค่าคงตัวโครงผลึก ซึ่งค่าคงตัวโครงผลึกที่เปลี่ยนแปลงไปมีความสำคัญต่อการดำเนินการปลูกเพราะว่าจะส่งผลให้ความเครียดเปลี่ยนแปลงไปและทำให้เกิดการผ่อนคลายความเครียด



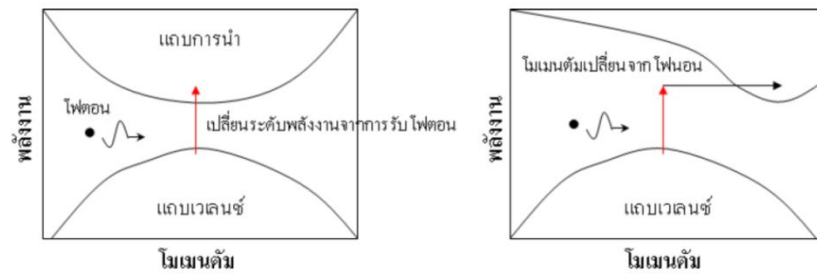
รูปที่ 2.5 Unit cell และขอบเขตของค่าคงตัวโครงผลึกของ GaAs [14]

ในการพิจารณาคุณสมบัติพื้นฐานวัสดุ เราสามารถคาดเดาคุณสมบัติและโครงสร้างที่จะเกิดขึ้นจากการปลูกผลึกได้ รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ของค่าคงตัวโครงสร้างผลึกและช่องว่างพลังงานของสารประกอบกึ่งตัวนำสำคัญที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ค่าคงตัวโครงสร้างผลึกและช่องว่างพลังงานของสารประกอบกึ่งตัวนำแต่ละชนิดที่อุณหภูมิห้อง เส้นเชื่อมแสดงความสัมพันธ์ของค่าโครงสร้างผลึกและช่องว่างพลังงานระหว่างสารประกอบ 2 ชนิด เส้นสีแดงคือมีช่องว่างพลังงานแบบตรง (Direct gap) และเส้นสีฟ้าคือมีช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง (Indirect gap) ในระบบ III-V [15]

ช่องว่างพลังงานมีผลต่อสมบัติเชิงแสงของวัสดุทั้งในแง่การตรวจจับแสงและการเปล่งแสงสำหรับสารประกอบที่มีช่องว่างพลังงานแบบตรง (Direct gap) เมื่อรับพลังงานจากโฟตอนเพียงพอทำให้อิเล็กตรอนสามารถเปลี่ยนระดับพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบนำไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.7 (ก) แต่ในสารประกอบที่มีช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง (Indirect gap) นอกจากต้องรับพลังงานจากโฟตอนแล้วจำเป็นต้องเปลี่ยนโมเมนตัมจากการรับหรือคลายโฟนอน (Phonon) ด้วยดังรูปที่ 2.7(ข) สารประกอบที่มีช่องว่างพลังงานแบบตรงจึงสามารถเปล่งแสงได้และตอบสนองต่อแสงได้ดีกว่าสารประกอบที่มีช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง

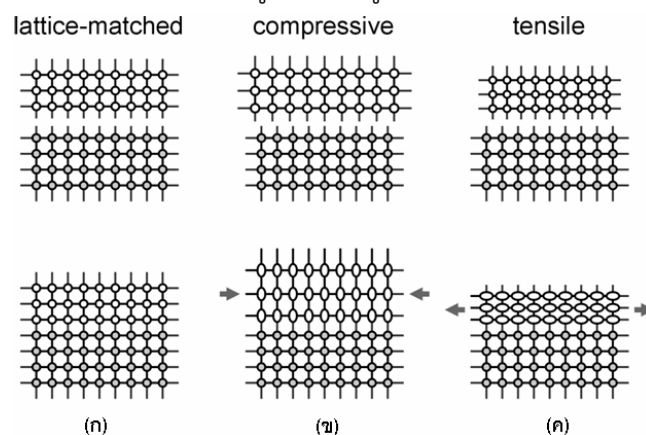


รูปที่ 2.7 แผนภาพแถบพลังงานการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบนำไฟฟ้าโดย (ก) การรับพลังงานจากโฟตอน เมื่อสารกึ่งตัวนำมีช่องว่างพลังงานเป็นแบบตรง และ (ข) รับพลังงานจากโฟตอนและ โมเมนตัมจากโฟนอน เมื่อสารกึ่งตัวนำมีช่องว่างพลังงานเป็นแบบไม่ตรง [16]

## 2.3 อิทธิพลของความเครียดและการผ่อนคลายความเครียดที่มีต่อโครงสร้าง

### Low-Dimension

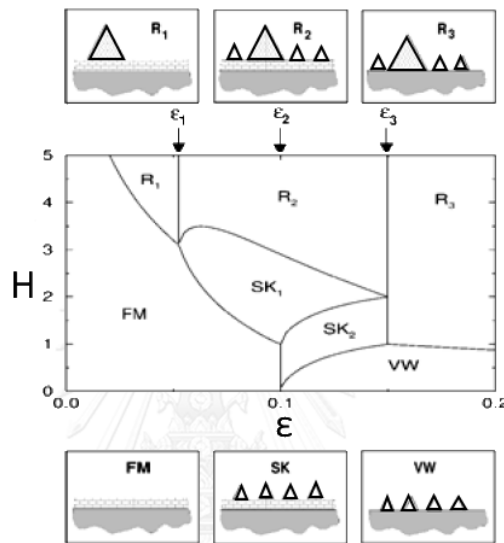
โครงสร้างขนาดนาโนของ GaSb บนชั้นแทรกของ InGaAs ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs (100) เกิดการก่อตัวแบบสามมิติ ซึ่งเป็นผลโดยตรงจากความเครียดและการผ่อนคลายความเครียด ด้วยผลของความไม่เข้ากันของค่าคงตัวโครงผลึกเป็นผลให้ชั้นผลึกด้านบน (Over layer) มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับค่าพลังงานระหว่างผิวรอยต่อ พลังงานของชั้นผลึกที่ปลูกและพลังงานของชั้นผลึกที่รองรับผลึกใหม่ที่ถูกลูกขึ้น การก่อตัวขึ้นของผลึกชั้นเกิดจากพลังงานของความเครียดแบบบีบอัด (Compressive) หรือแบบขยายตัว (Tensile) เนื่องจากในชั้นแรกๆ ของการก่อตัว Over layer ถูกบังคับให้ก่อตัวอย่างเป็นระเบียบด้วยค่าคงตัวโครงผลึกแนวขนานที่เท่ากับค่าของแผ่นฐานที่ถูกลูกทับ ขณะที่ค่าคงตัวโครงผลึกแนวตั้งฉากกับผิวหน้ามีการยืดตัวดังในรูป 2.8 โดยสภาพผิวหน้าดังกล่าวจัดได้ว่ามีความเครียดถูกสะสมอยู่ภายในผลึก



รูปที่ 2.8 แบบจำลองการจัดเรียงอะตอมของการปลูกผลึกอพิแทกซี (ก) วัสดุที่ปลูกมีค่าคงตัวโครงผลึกเท่ากับหรือเกือบเท่ากับค่าคงตัวโครงผลึกของแผ่นฐาน (Lattice-matched), และ Lattice-mismatched ที่มีความเครียดในลักษณะ (ข) Compressive และ (ค) Tensile [17]

## 2.4 การประดิษฐ์โครงสร้างขนาดนาโนด้วยวิธีปลูกผลึกแบบกลไกการก่อตัวขึ้นเอง

เพื่อให้ได้โครงสร้างขนาดนาโนที่มีความสมบูรณ์ของโครงผลึกและมีความสม่ำเสมอมากขึ้น หลักการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการประดิษฐ์โครงสร้างขนาดนาโนจากกลไกการก่อตัวขึ้นเองเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึง โดยเฉพาะความไม่พอดีกันของค่าคงตัวโครงผลึก ค่าความเครียด (Strain:  $\epsilon$ ) และความหนา (Thickness:  $H$ ) ดังในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แผนภาพเฟสสมดุล (Equilibrium phase diagram) ในรูปของฟังก์ชันระหว่าง  $H$  กับ  $\epsilon$  โดยภาพประกอบด้วยด้านบนและล่างแสดงถึงลักษณะของผิวหน้าของโหมดต่างๆ ทั้ง 6 โหมด สามเหลี่ยมเล็กสีขาวแทนโครงสร้างเกาะสามมิติที่มีเสถียรภาพ สามเหลี่ยมใหญ่ระบายสีข้างในแทนโครงสร้างเกาะสามมิติที่โตเต็มที่ (Ripening island) เฟสแต่ละรูปแบบถูกแบ่งด้วยเส้นขอบเขต  $Hc1(\epsilon)$ : FM-R1, FM-SK1;  $Hc2(\epsilon)$ : SK1-R2;  $Hc3(\epsilon)$ : SK2 -SK1;  $Hc4(\epsilon)$ : VW-SK2,VW-R3 [18]

รูปแบบการปลูกผลึกซึ่งขึ้นกับ  $\epsilon$  และ  $H$  ดังรูปที่ 2.7 มีอย่างต่ำ 3 โหมด ประกอบไปด้วย โหมดการเกิดขึ้นผลึกแบบสองมิติ (Frank-van der Merwe, FM) โหมดการเกิดขึ้น Wetting layer ผสมควอนตัมดอตซึ่งเรียกว่า สรานสกี-คราสตานอฟ (Stranski-Krastanov, SK) และโหมดการเกิดควอนตัมดอตอย่างเดียว ที่เรียกว่า โวลเมอร์-วีเบอร์ (Volmer-Weber, VW) โดยตัวแปรหลักในการกำหนดว่าการปลูกผลึกจะเกิดขึ้นในโหมดใด ได้แก่ ความหนาของชั้นฟิล์ม ( $H$ ) และความเครียดจากความไม่พอดีกันของค่าคงตัวโครงผลึก (Misfit strain:  $\epsilon$ ) ตามสมการ (2.10)

$$\epsilon = \frac{a_f - a_s}{a_s} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $a_f$  คือค่าคงตัวโครงผลึกของฟิล์มบางในสถานะสมดุล และ  $a_s$  คือค่าคงตัวโครงผลึกของแผ่นฐาน (substrate) ดังนั้นเมื่อค่าคงที่ผลึกของสารทั้งสองชนิดต่างกันมาก ( $a_f - a_s$  มีค่าสูง) ความเครียด ( $\varepsilon$ ) ก็มีสูงขึ้นไปด้วย ค่าความเครียด ( $\varepsilon$ ) และค่าความหนาของฟิล์มที่ถูกปลูก ( $H$ ) จะเป็นตัวกำหนดโหมดในการปลูกในรูปที่ 2.9 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. Frank-van de Merwe (FM, 2D growth mode) เป็นโหมดของการเกิดผลึกในระนาบแบบสองมิติอย่างสมบูรณ์แบบ โดยเกิดขึ้นจากการรักษาให้สถานะขณะปลูกชั้นผลึกอยู่ในส่วน FM ในแผนภาพเฟสสมดุล โดยมีความไม่เข้ากันของค่าคงตัวโครงผลึกน้อย ( $\varepsilon < 0.1$ ) และ ความหนาต้องไม่เกินขอบเขตของแผนภาพในบริเวณของ FM มิฉะนั้นชั้นผลึกจะก่อตัวในโหมด  $SK_1$ ,  $R_1$  หรือ  $R_2$  แทน ดังจะกล่าวรายละเอียดในลำดับต่อไป

2. Stranski-Krastanov (SK, 2D+3D growth mode) เป็นโหมดของการเกิดชั้นผลึกแบบสองมิติผสมกับสามมิติ เกิดจากการที่ค่าความเครียดจากความไม่เข้ากันของค่าคงตัวโครงผลึกของสารที่มาเกาะตัวกับสารตั้งต้นมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ  $0.05 < \varepsilon < 0.15$  ทำให้ชั้นผลึกชั้นแรกๆ สามารถเกาะตัวแบบสองมิติได้ โดยความเครียดสะสมอยู่ในชั้นฟิล์มกระทั่งการปลูกดำเนินต่อไปถึงค่าความหนาวิกฤต (critical thickness:  $H_c$ ) ชั้นผลึกสองมิติ (Wetting layer) ที่สะสมความเครียดไว้เกิดการคลายความเครียดเพื่อลดพลังงานรวมของระบบ เกิดเป็นโครงสร้างสามมิติหรือควอนตัมดอต (QD) ขึ้นมา อย่างไรก็ตามยังมีบางส่วนที่ยังคงสามารถเกาะกันแบบสองมิติได้ โดยยังคงมีความเครียดสะสมอยู่ส่วนหนึ่งเรียกว่า Wetting layer

การเกิด Wetting layer และ QD ในโหมด SK มีสองรูปแบบคือ  $SK_1$  และ  $SK_2$  ซึ่งมีผลสุดท้ายที่ได้ไม่ต่างกัน แต่มีลำดับการเกิดต่างกันตามความหนาชั้นผลึกที่เพิ่มขึ้น ในกรณีของโหมด  $SK_1$  มีการเกิดเป็นชั้นผลึกสองมิติก่อน เมื่อความหนาเพิ่มขึ้นชั้นผลึกสองมิติกลายเป็นรูปแบบสามมิติผสมกับสองมิติ แต่ในกรณีของโหมด  $SK_2$  นั้นมีการเกิดรูปแบบสองมิติก่อน เมื่อความหนาชั้นผลึกเพิ่มมากขึ้น ถึงค่อยเกิดชั้น Wetting layer ขึ้น ณ บริเวณที่ไม่มีการก่อตัวแบบสามมิติในตอนแรก ทำให้ผลสุดท้าย SK ทั้งสองโหมดให้ผิวหน้าที่มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกัน คือเป็นรูปแบบการผสมของโครงสร้างสองมิติและสามมิติ อย่างไรก็ตามโหมด  $SK_2$  แท้จริงแล้วคือการเกิดโครงสร้างสามมิติในโหมด VW ก่อน แต่ด้วยความเครียดไม่สูงเกินไป ทำให้มีชั้น Wetting layer เกิดขึ้นได้ ภายหลังเมื่อเพิ่มความหนา กลายจากโหมด VW เป็นโหมด  $SK_2$

3. Volmer-Weber (VW, 3D growth mode หรือ Island growth mode) เป็นโหมดการเกิดชั้นผลึกแบบสามมิติซึ่งเกิดขึ้นทันทีที่เริ่มทำการปลูกชั้นผลึก เนื่องจากค่า  $\varepsilon$  ที่สูง ( $\varepsilon > 0.1$ ) ผลึกของสารที่มาเกาะตัวบนสารตั้งต้นมีความเครียดสูงกว่าแบบ SK ผลึกจึงต้องก่อตัวเป็นรูปแบบเกาะสามมิติเพื่อคลายความเครียดทันที นอกจากโหมดการเกิดชั้นผลึกหลักสามโหมดข้างต้นแล้ว ยังมีโหมดรองซึ่งเป็นโหมดที่มีโครงสร้างสามมิติโตเต็มที่ (Ripening island) อีก 3 โหมดได้แก่

1.  $R_1$  (2D+3D growth mode) เมื่อ  $\varepsilon < \varepsilon_1$  และ  $H > 3$  ML โดยประมาณเป็นโหมดการเกิดขึ้นผลึกที่เกิดขึ้นได้เมื่อมีการเพิ่มความหนาชั้นผลึกไปมากกว่าความหนาวิกฤติสำหรับความเครียดค่าหนึ่งๆ  $H_c(\varepsilon)$  จากชั้นผลึกแบบ FM ซึ่งลักษณะผิวหน้าคือจะมีการก่อตัวแบบสามมิติที่โตเต็มที่ (ripening Island) และมี Wetting layer อยู่ด้านล่าง

2.  $R_2$  (2D+3D growth mode) เมื่อ  $\varepsilon_1 < \varepsilon < \varepsilon_3$  และ  $H > 2-3$  ML โดยประมาณเป็นโหมด การเกิด Wetting layer, เกาะสามมิติ และ เกาะสามมิติที่โตเต็มที่ ซึ่งรูปแบบการเกิดนี้เกิดจากการปลูก  $SK_1$  โดยเพิ่มความหนาไปเกินจุดแบ่ง  $SK_1 - R_2$  ดังในรูปที่ 2.9

3.  $R_3$  (3D growth mode) เมื่อ  $\varepsilon < \varepsilon_3$  และ  $H > 1$  ML โดยประมาณเป็นโหมดการเกิดขึ้นผลึกจากการเพิ่มความหนาจาก VW จนความหนาเกินกว่าจุดแบ่ง VW- $R_3$  ในรูปที่ 2.9 เป็นผลให้เกิดเกาะสามมิติแบบปกติ และเกาะสามมิติแบบที่โตเต็มที่โดยไม่มี Wetting layer

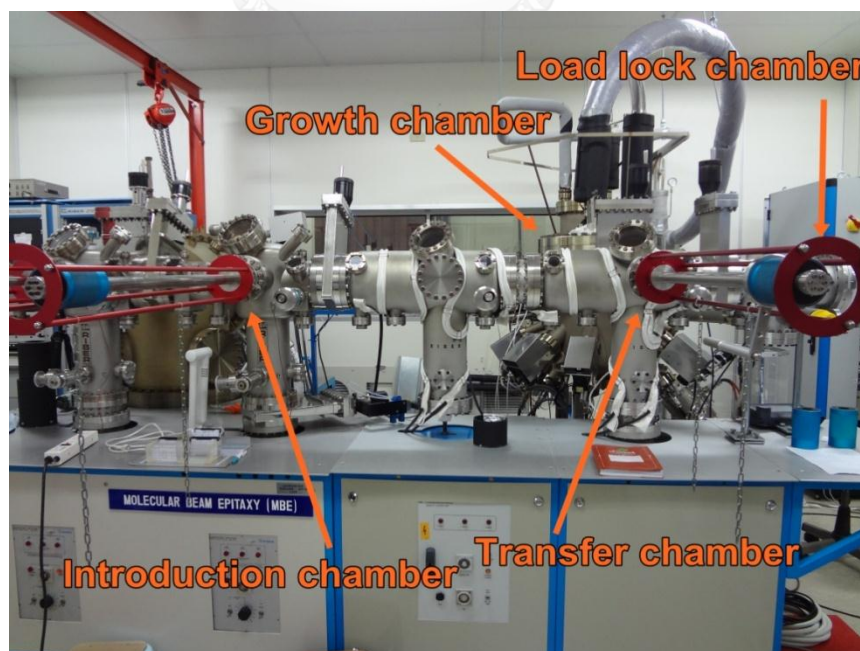
สรุปได้ว่ารูปแบบการเกิดขึ้นผลึกแบบต่างๆ มีปัจจัยสำคัญอยู่สองอย่างคือ 1) ความต่างค่าคงตัวโครงผลึกระหว่างสารที่ทำการปลูกกับสารที่เป็นแผ่นฐานตั้งต้น และ 2) ความหนาชั้นผลึกที่ทำการปลูก เนื่องจากสารแต่ละชนิดมีคุณสมบัติเฉพาะ (Characteristic) ที่แตกต่างกัน เช่น ค่าคงตัวโครงผลึกที่เข้ากันได้ได้ ถึงแม้ว่าจะเป็นคนละชนิดกัน เช่น GaAs และ AlGaAs เนื่องจากค่าคงตัวโครงผลึกมีค่าใกล้เคียงกันมากจนประมาณได้ว่ามีค่าคงตัวโครงผลึกเท่ากัน ทำให้สามารถปลูกชั้นผลึกได้ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบลักษณะของผลึก

สำหรับในส่วนเนื้อหาต่อไปเป็นการกล่าวถึงความรู้พื้นฐานของการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy: MBE)

## 2.5 การปลูกผลึกอิตีแพกซีจากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy: MBE)

การปลูกผลึกอิตีแพกซีจากลำโมเลกุล (MBE) สามารถปลูกชั้นผลึกแบบฟิล์มบางที่สามารถควบคุมความหนาได้อย่างแม่นยำในระดับชั้นอะตอม และสามารถควบคุมความบริสุทธิ์ของเนื้อสารให้เข้าใกล้ความเป็นอุดมคติ เนื่องจากกระบวนการปลูกผลึกเกิดภายใต้สภาวะสุญญากาศ ซึ่งมีความดันต่ำในระดับ  $10^{-9}$  ถึง  $10^{-12}$  Torr และมีระบบสร้างสุญญากาศที่ทำงานอย่างต่อเนื่องตลอดกระบวนการ เครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุลอาศัยหลักการปล่อยไอโมเลกุลออกไปเป็นลำ ฟันไปสู่ผิวของตัวอย่าง เพื่อให้ลำโมเลกุลแตก (Dissociate) ถ่ายเทพลังงานภายใน และไปเกาะตัว (Deposit) อยู่ที่ผิวหน้าของตัวอย่าง ส่งผลให้เกิดการปลูกผลึก (Growth) ในรูปแบบต่างๆได้

สำหรับข้อดีของการปลูกผลึกอิตีแพกซีด้วยวิธี MBE ได้แก่ การเตรียมผิวแผ่นผลึกฐานสามารถทำได้ง่าย โดยวิธีการทำความสะอาดด้วยความร้อน (Thermal cleaning) ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ความสามารถในการตรวจสอบ (Monitoring) โครงสร้างผิว (Surface structure) ที่สามารถกระทำได้ตลอดเวลาตั้งแต่ก่อนการเริ่มต้นการปลูกผลึกจนถึงสิ้นสุดกระบวนการปลูกผลึก นอกจากนี้การปลูกผลึกอิตีแพกซีด้วยวิธี MBE ที่ ดำเนินการในระบบสุญญากาศระดับสูงพิเศษทำให้ผลึกที่ปลูกได้นั้นมีความบริสุทธิ์สูงกว่าวิธีการอื่นๆ เนื่องจากก๊าซต่างๆ ที่ตกค้างในระบบมีผลกระทบต่อคุณภาพผลึก ได้แก่  $H_2O$ ,  $O_2$ ,  $CO$  และ  $CO_2$  เป็นต้น มีปริมาณที่ต่ำมากๆ ในสภาวะสุญญากาศระดับสูงพิเศษ จึงให้เราสามารถควบคุมคุณภาพของผลึกที่ปลูกได้เป็นอย่างดี



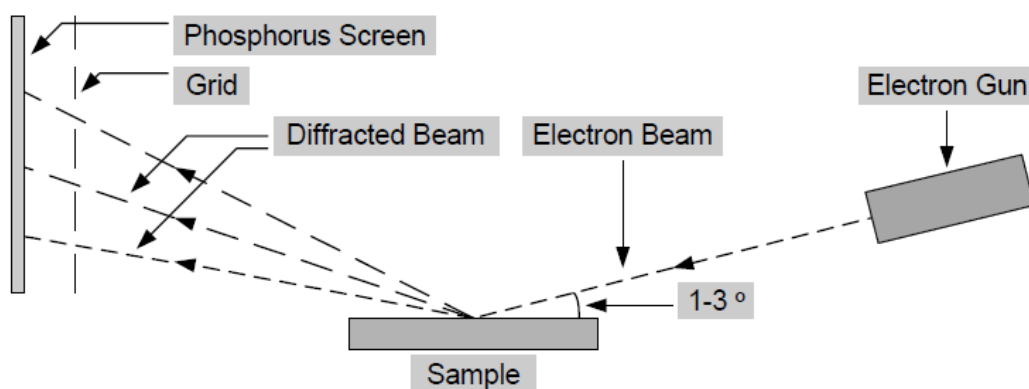
รูปที่ 2.10 โครงสร้างของระบบปลูกผลึกจากลำโมเลกุล RIBER รุ่น Compact 21



ระบบการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโม่เลกุล (MBE) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นระบบที่ผลิตโดยบริษัท RIBER รุ่น Compact 21 ซึ่งมีลักษณะเป็นโมดูล (Module) โดยประกอบด้วยส่วนห้องบรรจุแผ่นผลึกฐาน (Load lock Chamber) ห้องเตรียมแผ่นฐาน (Introduction Chamber) ห้องเคลื่อนย้าย (Transfer Chamber) และห้องปลูกผลึก (Growth Chamber) ดังในรูปที่ 2.10 โมดูลแต่ละส่วนที่ต่อกันนี้มีประตู เปิด/ปิด (Gate Valve) ต่อชั้นระหว่างโมดูล เพื่อรักษาภาวะสุญญากาศในแต่ละส่วนให้เป็นอิสระจากกัน และสามารถให้ช่องทางลำเลียงตัวบรรจุ (Cassette) ที่มีตัวรองรับแผ่นผลึกฐาน (Substrate holder) ผ่านเข้าออกจากโมดูลส่วนหนึ่งไปยังโมดูลอีกส่วนหนึ่ง ส่วนห้องบรรจุชุดแผ่นผลึกฐานเป็นส่วนติดต่อกับภายนอกที่มีสถานะความดันบรรยากาศปกติ ห้องเตรียมแผ่นฐานเป็นส่วนที่ใช้ในการทำความสะอาดเบื้องต้นด้วยการให้ความร้อนแก่แผ่นผลึกฐานก่อนการปลูกผลึกเพื่อไล่ความชื้นและขจัดออกไซด์ที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานก่อนการนำแผ่นผลึกฐานเข้าสู่ห้องปลูกผลึก ส่วนห้องเคลื่อนย้ายเป็นส่วนที่ใช้ในการลำเลียงตัวรองรับแผ่นฐานเข้าหรือออกจากส่วนห้องปลูกผลึก และห้องปลูกผลึกเป็นส่วนที่ดำเนินการกระบวนการปลูกผลึกอพิแทกซี ซึ่งภายในมีไนโตรเจนเหลวไหลผ่านช่องว่างภายในผนังห้อง เพื่อทำหน้าที่หล่อเย็นระบายความร้อนที่เกิดจาก Effusion Cell ให้แก่ห้องปลูกผลึก รวมถึงทำให้สถานะสุญญากาศในห้องปลูกผลึกดีขึ้น เนื่องจากความเย็นของไนโตรเจนเหลวช่วยในการทำให้มวลของบรรยากาศภายในมีความหนาแน่นมากขึ้น ทำให้ระบบปั๊ม Pump สุญญากาศสามารถทำงานได้ดียิ่งขึ้น โดยในส่วนห้องเตรียมแผ่นผลึกฐาน ห้องเคลื่อนย้าย และห้องปลูกผลึกมีระบบปั๊มสุญญากาศ ระดับสูงอยู่จำนวน 2 ชุด คือ ปั๊มชนิดไอออน (Ion Pump) และ ปั๊มชนิดไททานเนียมซับลิเมชัน (Ti sublimation Pump) สำหรับวัสดุที่ที่ใช้ในระบบการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโม่เลกุล ได้แก่ แกลเลียม (Gallium : Ga), อะลูมิเนียม (Aluminium : Al), อินเดียม (Indium : In), สารหนูหรืออาร์เซนิก (Arsenic : As), ซิลิคอน (Silicon: Si) และ พลวงหรือแอนติโมนี (Antimony: Sb) ซีแหล่งจ่ายลำโม่เลกุลของ Sb เป็นแบบ Cracker cell

ข้อดีของระบบ MBE ที่เหนือกว่าวิธีการปลูกผลึกอพิแทกซีวิธีอื่นๆ ในเชิงเทคนิค คือ สามารถติดตั้งอุปกรณ์วิเคราะห์ต่างๆ เข้ากับระบบได้ ทำให้มีความคล่องตัว ความต่อเนื่องในการตรวจสอบวิเคราะห์ในขณะทำการปลูกผลึก และมีความสะดวก ซึ่งเหมาะสมสำหรับการวิจัยและการผลิตเชิงพาณิชย์ อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ เครื่องวิเคราะห์มวลของก๊าซ (Quadra pole mass spectrometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของอนุภาคที่เป็นก๊าซภายในส่วนห้องปลูกผลึก ซึ่งทำให้เราสามารถรู้สภาพบรรยากาศภายในส่วนห้องปลูกผลึก นอกจากนี้ยังสามารถใช้วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ (Composition) ของสารประกอบในขณะที่ทำการปลูกผลึกได้เช่นกัน

ระบบสร้างแผนภาพที่ได้จากการสะท้อนของการหักเหลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง (Reflection High Energy Electron Diffraction หรือ RHEED) เป็นระบบสำหรับใช้ในการตรวจสอบภาพผิวของตัวอย่างที่ใช้หลักการสะท้อน (reflection) และเลี้ยวเบน (diffraction) ของอิเล็กตรอนพลังงานสูง (high-energy electron) ระบบนี้ถูกติดตั้งภายในเครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุลเพื่อใช้สังเกตสถานการณ์ที่ผิวหน้าตัวอย่างในขณะดำเนินการปลูกผลึก และยังเป็นเครื่องมือสำคัญในการวัดเทียบอัตราปลูก (growth rate) อีกด้วย



รูปที่ 2.11 แผนผังแสดงระบบ RHEED [19]

ระบบ RHEED ประกอบด้วยปืนยิงอิเล็กตรอนพลังงานสูง (High-energy electron gun) โดยมีค่าพลังงานในระดับ 10-30 kV และจอเรืองแสงหรือฉากฟอสเฟออร์ (Phosphor screen) สำหรับปืนอิเล็กตรอนนั้นนิยมใช้ทั้งสแตนฟิลาเมนต์ (Tungsten filament) เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่ขั้วคาโทด (Cathode) เนื่องจากทั้งสแตนมีค่า Work function ต่ำ อิเล็กตรอนจึงถูกสกัดออกมาได้ง่าย เมื่ออิเล็กตรอนพุ่งมาที่ตัวอย่างทำมุม  $\theta$  (มีค่าประมาณ  $1^\circ - 3^\circ$ ) ดังในรูปที่ 2.11 อิเล็กตรอนจะสะท้อนและเลี้ยวเบนผ่านช่องระหว่างระนาบของอะตอมที่ผิวหน้าของตัวอย่าง (อะตอมที่อยู่ลึกกว่านี้จะไม่ผลกับ RHEED) และสุดท้ายไปตกกระทบที่จอเรืองแสงหรือฉากฟอสเฟออร์ ทำให้ฉากเปล่งแสงออกมาเป็นภาพที่สื่อถึงสภาพผิวหน้าของตัวอย่างในขณะนั้น

**สำหรับหน้าที่หลักของ RHEED ที่สำคัญสรุปได้มีดังนี้**

1. การตรวจสอบผิวหน้าแผ่นผลึกฐานในขณะที่ทำความสะอาดด้วยความร้อน (Thermal cleaning) ก่อนการปลูกผลึก
2. การควบคุมสภาวะเริ่มต้นของการปลูกผลึก
3. การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผิวในขณะทำการปลูกผลึก

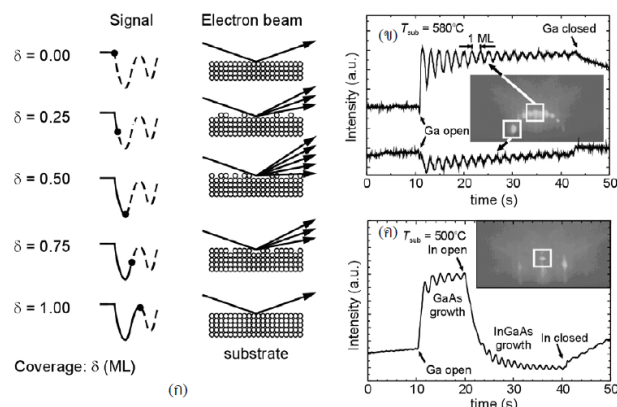
## 2.6 การวัดหาค่าอัตราการปลูกผลึกจาก RHEED Oscillation

การวัดหาค่าอัตราการปลูกผลึกด้วยวิธี RHEED Oscillation ในที่นี้ขอยกตัวอย่างกรณีของการปลูกผลึกแกเลียมอาร์เซไนด์บนแผ่นผลึกฐานแกเลียมอาร์เซไนด์ โดยเราสามารถสังเกตได้จาก Specular Beam ของ RHEED Pattern บน Phosphorus Screen ดังในรูปที่ 2.12 ซึ่งความเข้มของ Specular Beam ของ RHEED Pattern มีการเปลี่ยนแปลงในขณะที่ทำการปลูกผลึก การเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มนี้สามารถอธิบายได้จากการเปลี่ยนแปลงลักษณะของผิวหน้าหากผิวหน้ามีความสมบูรณ์ราบเรียบค่าความเข้มของ Specular Beam สว่างมากที่สุด แต่สำหรับผิวหน้าที่ยังไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดการกระเจิงแบบแพร่ซิม (Diffuse Scattering) ขึ้นทำให้ความเข้มของ Specular Beam สว่างน้อยลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มในหนึ่งรอบนั้นสอดคล้องกับค่าความหนาที่เปลี่ยนแปลงไป 1 monolayer (ML) อันมีหมายความว่าเราสามารถตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของค่าความผลึกได้จากการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของ Specular beam ที่เปลี่ยนแปลงไป เพื่อให้การวัดค่าอัตราการปลูกผลึกให้มีค่าแม่นยำ เราจะคำนวณหาจาก RHEED Oscillation โดยคำนวณจากจำนวนคาบของการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของ Specular beam ดังนั้นได้ค่าอัตราการปลูกผลึกสามารถได้ตามสมการ (2.11)

$$\text{Growthrate (ML/sec)} = \frac{\text{number of monolayer (ML)}}{\text{time (sec)}} \quad (2.11)$$

ตัวอย่าง เมื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของแสงสว่างมากที่สุดได้เท่ากับ 10 ครั้ง ใช้เวลา 20 วินาที

$$\text{Growthrate (ML/sec)} = \frac{10 \text{ (ML)}}{20 \text{ (sec)}} = 0.5 \frac{\text{ML}}{\text{sec}} \quad (2.12)$$



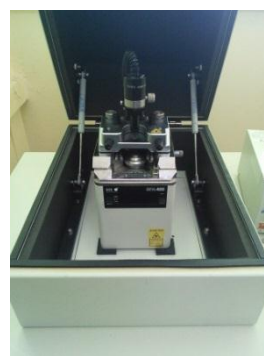
รูปที่ 2.12 (ก) แผนภาพแสดงลักษณะการเกิดความเข้มแสง RHEED Oscillation ในขณะการปลูกชั้นผลึก (ข) และ (ค) แผนภาพ RHEED แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มของ Specular Beam ในขณะการปลูกผลึกแกเลียมอาร์เซไนด์และอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ [19]

## 2.7 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM)

ในการศึกษาผิวหน้าของโครงสร้างที่ผ่านกระบวนการปลูกมาแล้ว เราสามารถทำการตรวจสอบผลที่ได้ทางกายภาพผิวหน้าของโครงสร้าง ซึ่งผลที่ได้สามารถสื่อถึงลักษณะสมบัติด้านอื่นๆ ได้ เช่น คุณสมบัติเชิงแสง และ/หรือ สมบัติเชิงไฟฟ้า โดยผลที่ได้จากการวัดลักษณะโครงสร้างทางผิวหน้าตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมสามารถนำไปเป็นข้อมูลการจำลองโครงสร้างเสมือนจริง (Simulation) เพื่อศึกษาลักษณะผลการเปล่งแสง (Photoluminescence) ของโครงสร้างได้ [20]



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.13 เครื่อง AFM ของ Seiko SPA-400 (ก) ชุดภาพจริงของเครื่องที่ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (ข) ส่วนประกอบภายในเครื่องของ Seiko SPA-400

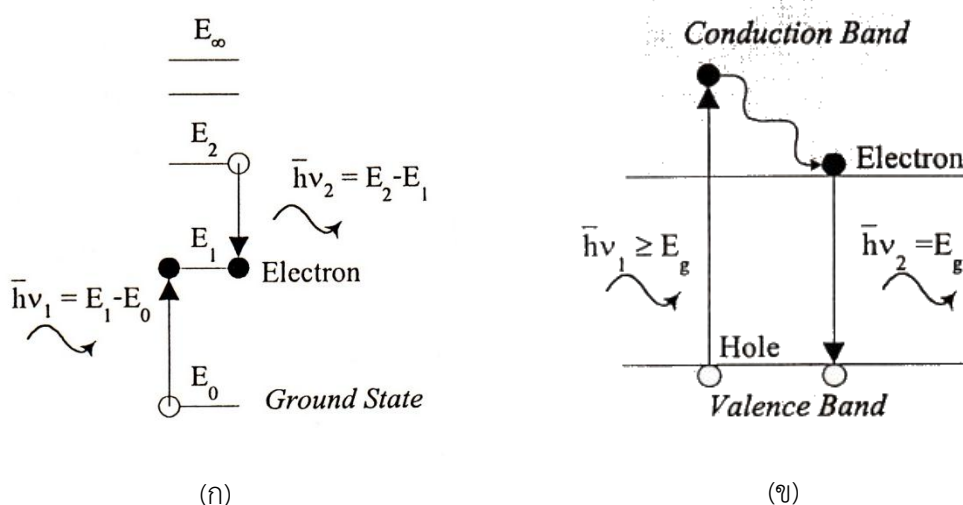
กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM) เป็นเครื่องมือหนึ่งที่ใช้สำหรับตรวจสอบผิวหน้าของตัวอย่างในระดับนาโนเมตร (ทางห้องวิจัยที่ผู้เขียนสังกัดอยู่ใช้เครื่อง AFM ของ Seiko รุ่น SPA-400 ดังรูปที่ 2.13 โดยการทำงานของเครื่องนั้นใช้หัวทิป (AFM tip) ซึ่งมีลักษณะเป็นคานปลายแหลม (Cantilever) กวาดผ่าน (Scan) ผิวหน้าของตัวอย่าง เมื่อหัวทิปกวาดผ่านผิวหน้าตัวอย่างที่มีความขรุขระ คานปลายแหลมของหัวทิปจะมีการขยับไปขึ้นหรือลงตามพื้นผิวหน้าที่ตำแหน่งนั้นๆ โดยการขยับของส่วนปลายของหัวทิปจะสื่อถึงลักษณะทางการกายภาพของผิวหน้าบริเวณที่ถูกกวาดผ่าน ส่วนการแปลงมาเป็นข้อมูลทางกายภาพของหน้านั้นได้จากการใช้แสงเลเซอร์ (LASER) ยิ่งไปที่หัวทิปที่มีคุณสมบัติสะท้อนแสง LASER ได้ดี เมื่อหัวทิปมีการเคลื่อนที่ ตัวตรวจจับแสง (Photodetector) ทำตรวจจับการเคลื่อนของหัวทิปจากแสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากปลายหัวทิป ผลลัพธ์ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมคือการแปลงลักษณะทางการกายภาพของผิวหน้ามาเป็นข้อมูลของพื้นผิวที่สามารถนำไปวิเคราะห์ต่อได้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สนใจผลเชิงกายภาพของผิวหน้าของตัวอย่าง เพื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะเชิงกายภาพของโครงสร้างขนาดนาโนของ GaSb บนแผ่นผลึกฐาน GaAs (100) ซึ่งผลการทดลองและการวิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมถูกแสดงไว้ในบทที่ 4

## 2.8 การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence: PL)

ตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการปลูกมาแล้วถูกนำวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงแสงด้วยวิธีโฟโตลูมิเนสเซนซ์โดยปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์การเปล่งแสงของวัสดุเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง กลไกหลักคือ การดูดกลืนแสง และการรวมตัวแบบเปล่งแสง

การดูดกลืนแสงเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างแสงและอะตอมหรือโมเลกุลของธาตุต่างๆ โดยอนุภาคที่รับผลกระทบมากที่สุดในการบวนการดูดกลืนแสงคือ อิเล็กตรอน เมื่อโฟตอนของแสงตกกระทบอะตอม โมเลกุล หรือ ผลึก ในกรณีที่พลังงานของโฟตอนมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าค่าความแตกต่างของระดับพลังงานอิเล็กตรอนระหว่างสถานะก่อนดูดกลืนแสงและสถานะหลังการดูดแสง อิเล็กตรอนก็จะย้ายสถานะจากสถานะแรกไปอยู่ในสถานะหนึ่งที่มีระดับพลังงานสูงกว่า ในกรณีอะตอมเดี่ยว ระดับพลังงานภายในอะตอมไม่ต่อเนื่องกัน ดังนั้นการดูดกลืนแสงจึงเกิดได้เฉพาะกับโฟตอนที่มีพลังงานเฉพาะบางค่าเท่านั้น แต่ในกรณีของสารกึ่งตัวนำสถานะว่างที่อิเล็กตรอนเข้าไปอยู่ได้มีอยู่อย่างต่อเนื่องในแถบนำไฟฟ้า ดังนั้นหากโฟตอนมีพลังงานมากกว่าความกว้างแถบพลังงาน ต้องห้ามปรากฏการณ์ดูดกลืนแสงจึงเกิดขึ้นได้ อย่างไรก็ตามจากการคำนวณความน่าจะเป็นในการเกิดปรากฏการณ์ดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำที่มีเงื่อนไขเพิ่มเติมบางประการ คือ ในการเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนอันเนื่องจากการดูดกลืนแสง ค่าโมเมนตัม  $\hbar k$  ของอิเล็กตรอนทั้งก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลงสถานะจะต้องคงที่เสมอ หรือที่เรียกว่ากฎแห่งการเลือกของโมเมนตัม (Momentum selection rule) หรือกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม [21] ปรากฏการณ์การดูดกลืนแสงดังกล่าวข้างต้นจัดแบบจำลองในรูปที่ 2.14

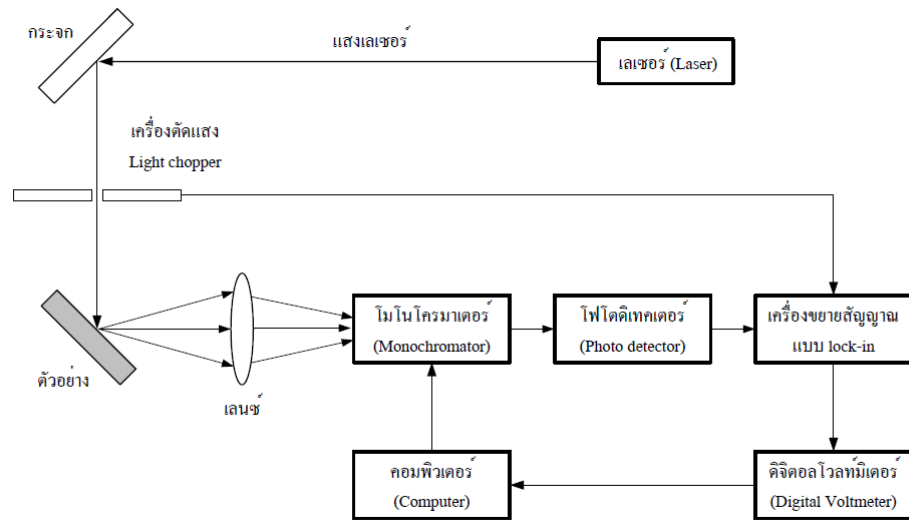


รูปที่ 2.14 กลไกการดูดกลืนและการคายโฟตอนใน (ก) อะตอมเดี่ยว และ (ข) สารกึ่งตัวนำ [21]

เมื่ออิเล็กตรอนเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่า สถานะเดิมของอิเล็กตรอนก็กลายเป็นสถานะว่าง เนื่องจากสถานะดังกล่าวไม่มีอิเล็กตรอน สำหรับในกรณีของสารกึ่งตัวนำก็คือเกิดโฮลขึ้นในแถบวาเลนซ์ ทั้งอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นนี้คงอยู่ได้ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง เราเรียกว่าช่วงเวลาอายุพาหะ (Carrier Lifetime) โดยช่วงระยะเวลานี้คืออิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานเกินกว่าความกว้างแถบพลังงานต้องห้ามที่ได้เปลี่ยนสถานะไปอยู่ระดับพลังงานที่สูงกว่าขอบของแถบพลังงานต้องห้ามก็จะคายพลังงานส่วนหนึ่งออกในรูปโฟนอน แล้วอิเล็กตรอนนั้นลดระดับพลังงานกลับมารออยู่ที่ขอบของแถบนำไฟฟ้า จากนั้นจึงลดระดับพลังงานสู่แถบวาเลนซ์ลงในสถานะว่างหรือโฮลหรือในอีกความหมายหนึ่งก็กลับมารวมตัวกับโฮลอีกครั้งหนึ่ง กระบวนการนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์การรวมตัว (Recombination)

การรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลจะเกิดผลใน 2 ลักษณะ นั่นคือเกิดการเปล่งแสงที่มีพลังงานโฟตอนเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานของอิเล็กตรอนและโฮล เรียกว่า การรวมตัวแบบเปล่งแสง (Radiative recombination) และอีกลักษณะหนึ่งเป็นการปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟนอนแก๊วโคจรผลึก เรียกว่า การรวมตัวแบบไม่เปล่งแสง (Non-radiative recombination) โดยปรากฏการณ์ทั้งสองลักษณะเกิดขึ้นพร้อมๆกัน การเปล่งแสงที่สังเกตได้จะขึ้นอยู่กับว่าปรากฏการณ์ใดเกิดมากกว่ากัน โดยทั่วไปแล้วการรวมตัวที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำมีประสิทธิภาพในการเปล่งแสงของผลึกที่ดีกว่า เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำจะมีจำนวนโฟนอนน้อย สิ่งที่รบกวนการรวมตัวแบบเปล่งแสงย่อมมีน้อย ดังนั้นเพื่อให้การวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์มีสัญญาณแรง จึงควรวัดที่อุณหภูมิต่ำ

ระบบการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์มีการจัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 2.15 เริ่มจากการส่องแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 514.5 nm โดยแสงเลเซอร์ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดโฟตอนในการกระตุ้นตัวอย่าง โดยตัวอย่างถูกทำการวัดที่อุณหภูมิ 20 - 140K ซึ่งใช้ในโตรเจนเหลวหรือฮีเลียมเหลวในการหล่อเย็น แสงที่ได้จากตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นถูกรวบรวมด้วยเลนส์ เพื่อให้แสงที่ได้มีค่าความเข้มสูงขึ้นและผ่านเข้าไปยังโมโนโครมาเตอร์ (Monochromator) ซึ่งโมโนโครมาเตอร์ทำหน้าที่ในการแยกสเปกตรัมของแสงที่ได้จากตัวอย่าง โดยแสงที่ได้จะผ่านได้เฉพาะแสงที่มีค่าความยาวคลื่นตามที่โมโนโครมาเตอร์ได้ตั้งหรือกำหนดค่าไว้ จากนั้นแสงที่ผ่านโมโนโครมาเตอร์ไปยังโฟโตดีเทคเตอร์ (Photodetector) เพื่อแปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยสัญญาณนี้อยู่ในรูปของกระแสที่มีขนาดเล็กมาก ดังนั้นจึงต้องให้สัญญาณผ่านเครื่องขยายสัญญาณชนิดล็อกอินแอมพลิไฟเออร์ (Lock-in Amplifier) ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ได้จากโฟโตดีเทคเตอร์ และแปลงสัญญาณให้เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้นี้ผ่านมัลติมิเตอร์แบบเชิงเลข (Digital Multimeter) และส่งข้อมูลดิจิทัลไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อทำการสร้างกราฟสเปกตรัมความสัมพันธ์ระหว่างค่าขนาดสัญญาณแสงที่ได้และค่าความยาวคลื่นหรือค่าพลังงานโฟตอนของแต่ละตัวอย่าง [22]



รูปที่ 2.15 แผนภาพระบบการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ [22]



## บทที่ 3

### การทดลอง

สำหรับบทนี้เป็นรายละเอียดของขั้นตอนการทดลองในศึกษาอิทธิพลของชั้นแทรกบาง InGaAs ต่อคุณสมบัติของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb โดยกล่าวถึงขั้นตอนการประดิษฐ์โครงสร้างขนาดนาโน GaSb ที่มีชั้นแทรก InGaAs บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs (100) ด้วยวิธีการปลูกผลึกอิมพิแทกซ์จากลำโมเลกุล รวมถึงรายละเอียดของตัวอย่างในการศึกษานี้เพื่อวิเคราะห์ผลของชั้นแทรก InGaAs ในงานวิจัยได้ทำการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของโครงสร้างขนาดนาโนและผลการกระจายเชิงขนาดของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb ที่ก่อตัวขึ้นเอง ผลในกรณีที่มีชั้นแทรก InGaAs ได้ชั้นโครงสร้างขนาดนาโน GaSb โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของชั้นแทรก InGaAs ได้แก่ ค่าสัดส่วนของ In และค่าความหนาของชั้นแทรก InGaAs ในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานในขณะที่ปลูกโครงสร้างขนาดนาโน GaSb ที่  $450^{\circ}\text{C}$  โดยค่าอัตราการปลูกผลึก GaSb เท่ากับ  $0.1\text{ ML/s}$  ค่าปริมาณในการปลูกของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb เท่ากับ  $3\text{ ML}$  และค่าเวลา Soaking โดยใช้  $\text{Sb}_4$  ฟันก่อนปลูกโครงสร้างขนาดนาโน GaSb เท่ากับ  $60$  วินาที ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 การเตรียมแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น

แผ่นผลึกฐาน (Substrate) เริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองนี้คือแผ่นผลึกเดี่ยว (Single crystal wafer) แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) ที่มีทิศทางผิวหน้าผลึก (Orientation) อยู่ในระนาบ (100) แผ่นผลึกฐานเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองนี้มีคุณสมบัติกึ่งฉนวน (Semi-insulator) และมีผิวหน้าแผ่นผลึกฐานที่พร้อมใช้งาน (Epi-ready) ซึ่งมีรูปร่างเป็นวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $4$  นิ้ว โดยแต่ละตัวอย่างเป็นชิ้นส่วน  $1$  ส่วนที่ได้จากการตัดแบ่งแผ่นผลึกเดี่ยว GaAs ข้างต้นออกเป็น  $12$  ชิ้นโดยมีพื้นที่ผิวประมาณใกล้เคียงกัน นำแผ่นผลึกฐานที่ตัดแล้วไปติดตั้งบนตัวรองแผ่นฐานด้วยอินเดียมหลอมเหลวและนำตัวรองแผ่นฐานที่มีแผ่นผลึกฐาน GaAs ที่ติดอยู่ไปบรรจุใส่ในระบบ MBE ต่อไป

หลังจากนั้นนำตัวรองแผ่นฐานที่มีแผ่นผลึกฐาน GaAs ติดอยู่ ทำการบรรจุใส่ในตัวลำเรียงแผ่นผลึกฐาน (Cassette) เพื่อใช้เป็นตัวลำเรียงตัวรองแผ่นฐานเคลื่อนที่เข้าสู่ระบบ MBE โดยเริ่มต้นด้วยการส่งผ่านไปสู่ห้องบรรจุแผ่นผลึกฐาน (Load lock Chamber) และนำเข้าสู่ห้องเตรียมผิวหน้าแผ่นผลึกฐานด้วยความร้อน (Thermal cleaning) เพื่อทำการไล่ความชื้นและสิ่งสกปรกที่ผิว



(Outgassing) ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ  $450^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการลำเรียงตัวรองแผ่นฐานที่มีแผ่นผลึกฐาน GaAs ติดอยู่ที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยความร้อนแล้วเข้าห้องปลูกผลึก (Growth Chamber) ซึ่งก่อนการนำตัวรองแผ่นฐานที่มีแผ่นผลึกฐาน GaAs ติดอยู่เข้าห้องปลูกผลึกทำการปรับค่าอุณหภูมิของ Effusion cell ที่บรรจุ Ga In As และ Sb ให้มีค่าความดันไอตามที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิของเซลล์ Ga และ In ใช้อัตรา  $30^{\circ}\text{C}/\text{นาที่}$  สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิของเซลล์ As ใช้อัตรา  $10^{\circ}\text{C}/\text{นาที่}$  และการเพิ่มอุณหภูมิของเซลล์ Sb ซึ่งเซลล์สำหรับ Sb เป็นเซลล์แบบ Cracker valve ใช้อัตรา  $5^{\circ}\text{C}/\text{นาที่}$  การเพิ่มอุณหภูมิของเซลล์ Ga และ In ในตอนแรกนั้นต้องทำการเพิ่มอุณหภูมิให้อยู่สูงกว่าค่าที่ใช้งานประมาณ  $30^{\circ}\text{C}$  นานประมาณ 10 นาที เพื่อทำความสะอาดเซลล์ (Degas cell) หลังจากนั้นจึงลดอุณหภูมิของเซลล์ไปยังค่าอุณหภูมิใช้งาน

### 3.2 การเตรียมการในห้องปลูกผลึกก่อนการปลูกผลึก

หลังจากที่ได้นำแผ่นฐานเริ่มต้นที่ผ่านกระบวนการตามในหัวข้อที่ 3.1 ทำการลำเรียงต่อไปเข้าสู่ห้องปลูกผลึก แล้วทำการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานในอัตรา  $30^{\circ}\text{C}/\text{นาที่}$  (ในช่วงอุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  ถึง  $450^{\circ}\text{C}$ ) และ  $10^{\circ}\text{C}/\text{นาที่}$  (ในช่วงอุณหภูมิ  $450^{\circ}\text{C}$  ถึง  $600^{\circ}\text{C}$ ) จากสภาวะปกติมีอุณหภูมิอยู่ที่  $100^{\circ}\text{C}$  ทำการเปิด Shutter ของ  $\text{As}_4$  เพื่อชดเชยการสูญเสียอาร์เซนิกของแผ่นผลึกฐานในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง ในขณะเดียวกันมีการตรวจสอบผิวหน้าแผ่นผลึกฐานด้วย RHEED ซึ่งตามปกติในขั้นเริ่มต้นของกระบวนการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน GaAs นั้นมีชั้นออกไซด์ ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ) อยู่ที่ผิว แต่ออกไซด์นี้จะสลายตัวเมื่ออุณหภูมิสูงตั้งแต่  $580^{\circ}\text{C}$  เป็นต้นไป ซึ่งในกรณีนี้มีผลทำให้รูปแบบของ RHEED ที่ปรากฏมีความสว่างและชัดเจนขึ้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า อุณหภูมิ Deoxidation และจะปรากฏชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีความสะอาด ในขั้นตอนนี้ตั้งให้อุณหภูมิมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิ Deoxidation ประมาณ  $30^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลาประมาณ 10 นาที เพื่อให้ผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานสะอาด ซึ่งรูปแบบของ RHEED ที่ได้จากผิวหน้าสะอาดของแผ่นผลึกฐาน GaAs ที่อุณหภูมิดังกล่าวเป็นแบบ  $c(2 \times 4)$  ในขั้นนี้เป็นการเริ่มต้นของการเตรียมการทดลองทั้งหมดในวิทยานิพนธ์นี้

### 3.3 การศึกษาอิทธิพลของชั้นแทรกอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์

ในการทดลองนี้เป็นรายละเอียดของการศึกษาอิทธิพลของค่าความหนาและค่าสัดส่วน In ในชั้นผลึกบาง InGaAs ที่แทรกได้ชั้นโครงสร้างขนาดนาโน GaSb ต่อค่าความหนาแน่นของโครงสร้างขนาดนาโนและการกระจายเชิงขนาดของโครงสร้างขนาดนาโน โดยกำหนดให้ค่าความหนาของชั้นแทรก  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 4 ML และค่าสัดส่วนของอินเดียมในชั้นแทรก  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  มีค่า

ดังนั้น  $X_{In}=7\%$ ,  $15\%$ ,  $20\%$  และ  $25\%$  ในส่วนค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb ในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานในขณะที่ปลูกโครงสร้างขนาดนาโน GaSb เท่ากับ  $450^{\circ}\text{C}$  ค่าอัตราการปลูกผลึก GaSb เท่ากับ  $0.1\text{ ML/s}$  ค่าปริมาณในการปลูกของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb เท่ากับ  $3\text{ ML}$  และค่าเวลา Soaking โดยใช้  $\text{Sb}_4$  ฟังก์ชันก่อนปลูกโครงสร้างขนาดนาโน GaSb เท่ากับ  $60$  วินาที ค่าความดันไอ  $\text{Sb}_4$  ประมาณ  $5 \times 10^{-7}\text{ Torr}$  และ ค่าความดันไอ Ga เท่ากับ  $2 \times 10^{-7}\text{ Torr}$  โดยอัตราส่วน III/V เท่ากับ  $3$  โดยโครงสร้างของตัวอย่างตัวอย่างในการทดลองนี้ตั้งในรูปที่ 3.1 และแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นในกระบวนการนี้ได้ผ่านการเตรียมการในหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 มาแล้วตามลำดับ จากนั้นทำการปลูกผลึกตามลำดับขั้นตอนดังนี้

(ก) ทำการปลูกชั้นบัฟเฟอร์ GaAs หนา  $100\text{ nm}$  ที่อุณหภูมิผิวหน้าแผ่นผลึกฐานประมาณ  $580^{\circ}\text{C}$  และทำการเทียบวัดค่าอุณหภูมิของแผ่นฐานด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของ RHEED ตามอุณหภูมิ โดยใช้วิธีการที่เรียกว่า RHEED Pattern Transition เพื่อเทียบหาอุณหภูมิในการปลูกโครงสร้างขนาดนาโน GaSb (ที่  $450^{\circ}\text{C}$ ) จากนั้นทำการปลูกชั้นบัฟเฟอร์ GaAs หนา  $100\text{ nm}$  ที่อุณหภูมิผิวหน้าแผ่นผลึกฐานประมาณ  $580^{\circ}\text{C}$

(ข) ปรับค่าอุณหภูมิผิวหน้าแผ่นผลึกฐานไปยัง  $500^{\circ}\text{C}$  ทิ้งไว้เป็นเวลา  $10$  นาที เพื่อให้อุณหภูมิคงที่ จากนั้นทำการปลูกชั้นแทรก InGaAs ที่มีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของตัวอย่างคือค่าความหนาเท่ากับ  $0$  ถึง  $4\text{ ML}$  และค่าสัดส่วนของ In เท่ากับ  $7\%$ ,  $15\%$ ,  $20\%$  และ  $25\%$  เวลาในการปลูกชั้นผลึกบาง InGaAs ตามค่าสัดส่วนของอินเดียมต่างๆ ดังปรากฏในตารางที่ 3.1

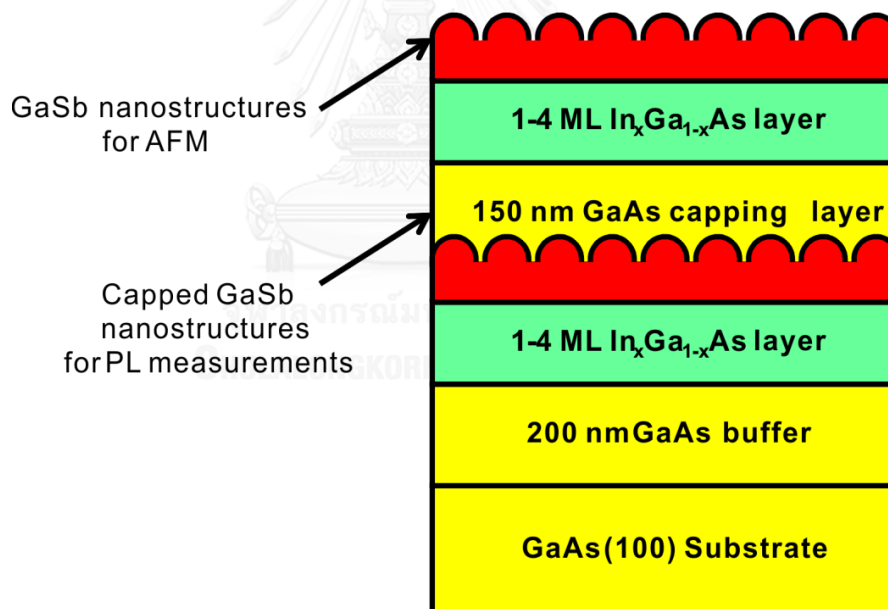
(ค) ทำการปรับค่าอุณหภูมิผิวหน้าแผ่นผลึกฐานไปยัง  $450^{\circ}\text{C}$  จากนั้นปิด Shutter  $\text{As}_4$  แล้วรอค่าความดันอากาศภายในห้องปลูกให้ต่ำกว่า  $5 \times 10^{-9}\text{ Torr}$  เพื่อไม่ให้มีสิ่งเจือปนหรือปนเปื้อนและให้บรรยากาศมี As ตกค้างน้อยที่สุด เมื่อความดันอากาศภายในห้องปลูกต่ำกว่า  $5 \times 10^{-9}\text{ Torr}$  เริ่มเข้าสู่กระบวนการปลูกโครงสร้างขนาดนาโน GaSb โดยอัตราการปลูกผลึก GaSb เท่ากับ  $0.1\text{ ML/s}$  ค่าปริมาณในการปลูกของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb เท่ากับ  $3\text{ ML}$  และค่าเวลา Soaking โดยใช้  $\text{Sb}_4$  ฟังก์ชันก่อนทำการปลูกโครงสร้างขนาดนาโน GaSb เป็นเวลา  $60$  วินาที

(ง) ทำการปลูกกลบโครงสร้างขนาดนาโนด้วยชั้น GaSb หนา  $150\text{ nm}$  เพื่อใช้ในการวัดผลด้วยวิธีโพโตลูมิเนสเซนซ์

(จ) ดำเนินการปลูกซ้ำตามข้อ (ข) และ (ค) เพื่อนำตัวอย่างมาใช้ในการวิเคราะห์ผิวหน้าด้วยเครื่อง AFM จากนั้นทำการลดอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานไปยัง  $100^{\circ}\text{C}$  โดยทันที

ตารางที่ 3.1 ค่าอัตราการปลูกของ Ga และ In ตามค่าสัดส่วนของ In ในชั้นแทรก InGaAs และเวลาที่ใช้ปลูกชั้นแทรกที่มีค่าความหนา 1 ถึง 4 ML

ค่าสัดส่วนของ		อัตราการปลูก (ML/s)		อัตราการปลูกชั้นแทรก $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (ML/s)	เวลาที่ใช้ในการปลูก $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (s)			
%In	%Ga	In	Ga		1 ML	2 ML	3 ML	4 ML
7	93	0.025	0.332	0.357	2.8	5.6	8.4	11.2
15	85	0.025	0.142	0.167	6.0	12.0	18.0	24.0
20	80	0.025	0.1	0.125	8.0	16.0	24.0	32.0
25	75	0.033	0.1	0.133	7.5	15.0	22.5	30.0



รูปที่ 3.1 แผนภาพโครงสร้างขนาดนาโนแกเลียมแอนติโมนีที่มีการแทรกชั้นผลึกบางอินเดียม แกเลียมอาร์เซไนด์ใต้ชั้นโครงสร้างขนาดนาโนแกเลียมแอนติโมนี ซึ่งมีการปลูกกบด้วยชั้นแกเลียมอาร์เซไนด์หนา 150 nm สำหรับการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ และมีการปลูกโครงสร้างขนาดนาโนแกเลียมแอนติโมนีบนผิวหน้าของแผ่นฐานแกเลียมอาร์เซไนด์ (100) สำหรับการวัด AFM

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปรายผล

บทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดลองตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 และการอภิปรายผลการทดลอง จากการศึกษาการประดิษฐ์โครงสร้างขนาดนาโนของแกเลียมแอนติโมนด์ (GaSb) ที่มีชั้นแทรกอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ (InGaAs) บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นแกเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) (100) ที่มีผลค่าความหนาแน่นและผลการกระจายเชิงขนาดของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb ที่ก่อตัวขึ้นเองด้วยการปลูกอิมพิแทกซ์ผลึกด้วยลำโมเลกุลและการศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb ที่ก่อตัวขึ้นเองในกรณีที่มีชั้นแทรก InGaAs ได้ชั้นโครงสร้างขนาดนาโนของ GaSb โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของชั้นแทรกของ InGaAs ได้แก่ ค่าสัดส่วนของอินเดียม (In) และค่าความหนาแน่นของชั้นแทรก InGaAs

#### 4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพผิวหน้าของโครงสร้างขนาดนาโนแกเลียมแอนติโมนด์ที่มีชั้นแทรกอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นแกเลียมอาร์เซไนด์ (100)

เมื่อได้ดำเนินการปลูกโครงสร้างขนาดนาโน GaSb จากกลไกการก่อตัวขึ้นเองที่มีชั้นแทรก InGaAs ได้ชั้นโครงสร้างขนาดนาโน GaSb บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs (100) โดยมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขค่าความหนาแน่นและค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นแทรก InGaAs ตามหัวข้อที่ 3.3 โดยตารางที่ 4.1 แสดงภาพผิวหน้าที่ได้จากเครื่อง AFM ตารางที่ 4.2 แสดงภาพ AFM แบบ 3 มิติ (3D) ตารางที่ 4.3 แสดงแผนภาพการกระจายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในทิศ [110] และตารางที่ 4.4 แสดงแผนภาพการกระจายขนาดความสูงของแต่ละตัวอย่าง โดยกราฟความสัมพันธ์ความหนาแน่น ความสูง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในทิศ [110] และ 1-10 ของแต่ละตัวอย่างโครงสร้างขนาดนาโน GaSb แบบที่ก่อตัวขึ้นเองที่มีชั้นแทรก InGaAs ได้ชั้นโครงสร้างขนาดนาโน GaSb ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นและค่าสัดส่วนอินเดียมของชั้นแทรก InGaAs ดังในรูปที่ 4.1, 4.2, 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ และตารางสรุปค่าความหนาแน่น ค่าความกว้างของฐานวัดในทิศ [110] และ [1-10] ค่าความสูง และค่าความกว้างของฐาน [1-10]/[110] ของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นและค่าสัดส่วนอินเดียมของชั้นแทรก InGaAs ดังในตารางที่ 4.5

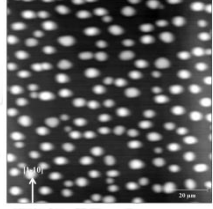
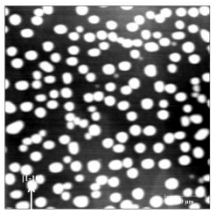
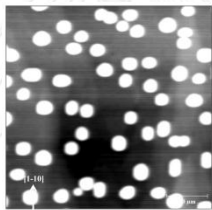
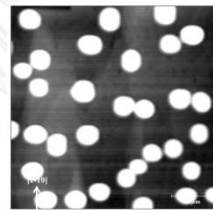
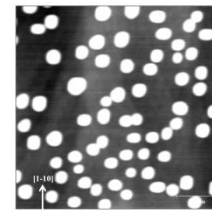
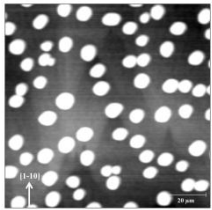
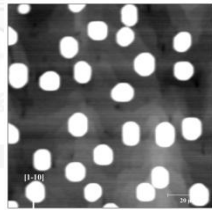
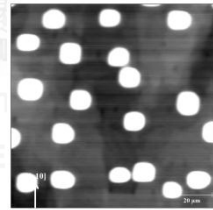
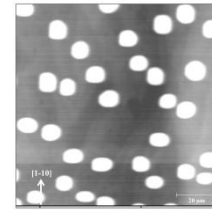
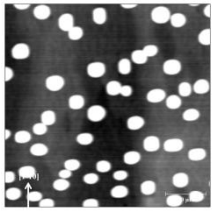
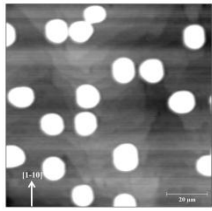
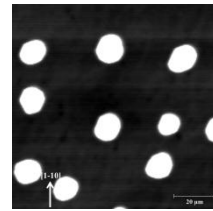
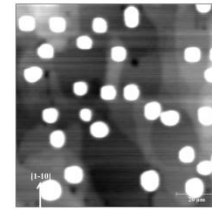
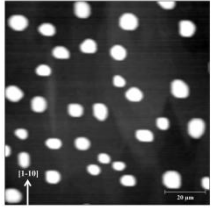
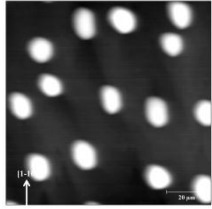
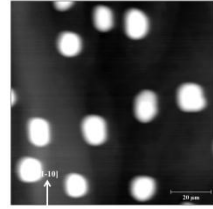
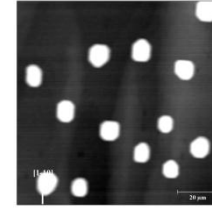
จากตารางที่ 4.1 ภาพ AFM ผลการวัดผิวหน้าของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb จากกลไกการก่อตัวขึ้นเองที่มีชั้นแทรก InGaAs ได้ชั้นโครงสร้างขนาดนาโน GaSb บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs (100) มีค่าความหนาแน่นของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb อยู่ในช่วง  $1.0 \times 10^9$  ถึง  $1.3 \times 10^{10}$   $\text{cm}^{-2}$  พบว่าเมื่อทำการปลูกผลึก GaSb ลงบนชั้นแทรก InGaAs โดยการเปลี่ยนแปลงความหนาและค่าสัดส่วนอินเดียมของชั้นแทรก InGaAs ทำให้ความหนาแน่นของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb มีแนวโน้มลดลงและขนาดของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอ้างอิงที่ไม่มีชั้นแทรก ดังในตารางที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ เนื่องจากความแตกต่างค่าสัดส่วนอินเดียมและความหนาของชั้นแทรกและการสะสมของพลังงานความเครียดที่เพิ่มมากยิ่งขึ้นตามค่าสัดส่วนอินเดียมและความหนาของชั้นแทรก สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นและค่าความหนาของชั้นแทรกที่มีค่าสัดส่วนอินเดียมต่างๆ ดังในรูปที่ 4.1 จากรูปนี้ชี้ให้เห็นว่าค่าความหนาและสัดส่วนอินเดียมของชั้นแทรก InGaAs มีผลทำให้ค่าความหนาแน่นลดลงเมื่อค่าความหนาและค่าสัดส่วนอินเดียมของชั้นแทรกมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงและค่าความหนาของชั้นแทรกที่มีค่าสัดส่วนอินเดียมต่างๆ ดังในรูปที่ 4.2 เมื่อเราพิจารณาค่าขนาดความกว้างของฐานในทิศทาง [110] และ [1-10] ค่าความกว้างของฐานดังกล่าวมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความหนาและค่าสัดส่วนอินเดียมของชั้นแทรกมีค่าเพิ่มขึ้นดังในรูปที่ 4.3 และ 4.4 เนื่องจากอะตอมของอินเดียมที่มีปริมาณมากเกินไปทำให้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb เนื่องด้วยการเพิ่มอะตอมอินเดียมปริมาณมากส่งผลให้อะตอมอินเดียมและอาร์เซนิกอาจเข้าไปรวมอยู่ในโครงสร้างขนาดนาโน GaSb ทำให้เกิดความไม่เข้าตักกันของโครงผลึก เนื่องจากผลของอินเดียมทำให้ผลึกบางส่วนกลายเป็น Ga(InAs)Sb ทำให้มีค่าคงตัวโครงผลึกแตกต่างไปจาก GaSb และค่าพลังงานในโครงสร้างขนาดนาโน พลังงานในชั้นแทรกและพลังงานระหว่างผิวรอยต่อ ที่แตกต่างกันไปตามค่าความหนาและค่าสัดส่วนอินเดียมของชั้นแทรก มีผลทำให้ค่าสัดส่วนของขนาดฐานในทิศทาง [110] และ [1-10] (aspect ratio) ของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb เพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้ค่าสัดส่วน (aspect ratio) ของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb ที่มีค่ามากนี้เกิดจากการผ่อนคลายพลังงานความเครียดได้มากขึ้น [23]

จากค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความสูงของตัวอย่างโครงสร้างขนาดนาโน GaSb แบบที่ก่อตัวขึ้นเองที่มีชั้นแทรก InGaAs ได้ชั้นโครงสร้างขนาดนาโน GaSb ที่ได้จากผลการทดลองนี้ พบว่าเมื่อเพิ่มค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นแทรกจาก 0% เป็น 7% กับค่าความหนาเท่ากับ 1, 2, 3 และ 4 ML ตามลำดับ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความสูงของตัวอย่างโครงสร้างขนาดนาโน GaSb อย่างฉับพลัน นอกจากนี้การเพิ่มค่าสัดส่วนอินเดียมและค่าความหนาของแต่ละชั้นแทรก InGaAs พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความสูงของตัวอย่างโครงสร้างขนาดนาโน GaSb มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ค่าใกล้เคียงกัน และขนาดการกระจายตัวกับความสม่ำเสมอ


















ของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb มีแนวโน้มดีขึ้น ยกเว้นที่ค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นแทรกเท่ากับ 25% กับค่าความหนาเท่ากับ 1, 2, 3 และ 4 ML ตามลำดับ พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างโครงสร้างขนาดนาโน GaSb มีค่าลดลง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานพื้นผิว (Surface energy) พลังงานพื้นที่ผิวร่วม (Interface energy) และ พลังงานความเครียด (Strain energy) [23, 24] ทั้งนี้ได้สรุปค่าความหนา ขนาดความกว้างฐาน ความสูง และค่าอัตราส่วนความกว้างขวางฐาน  $[110]/[1-10]$  ไว้ในตารางที่ 4.5

ในการศึกษารูปร่างโครงสร้างขนาดนาโน GaSb พบว่าโครงสร้างของฐานมีรูปร่างคล้ายวงรี โดยขึ้นอยู่กับทิศทาง (Anisotropic shape) จากข้อมูลที่ได้จาก AFM พบว่ารูปร่างโครงสร้างขนาดนาโน GaSb ที่มีไม่ชั้นแทรก InGaAs มีการยืดขยาย (Elongation) ไปในทิศทาง  $[110]$  และเมื่อทำการเพิ่มชั้นแทรก InGaAs โดยการเปลี่ยนแปลงความหนาและค่าสัดส่วนอินเดียมของชั้นแทรก InGaAs พบว่ามีการยืดขยายออกไปอย่างทีละเล็กละน้อยจากทิศทาง  $[110]$  จนเป็นรูปร่างที่ไม่ขึ้นอยู่กับทิศทาง (Isotropic shape) หรือเกือบจะไม่มี การยืดขยาย (No elongation) สิ่งนี้ให้นัยสำคัญคุณสมบัติโดยแท้ของผลอิทธิพลการยืดขยายโครงสร้างของโครงสร้างขนาดนาโน ยกตัวอย่างเช่น คุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก (Polarization dependency) [25] และ คุณสมบัติการส่งผ่าน (Transport properties) [26] เป็นต้น

ตารางที่ 4.1 ภาพ AFM ขนาด  $1000 \times 1000 \text{ nm}^2$  ของแต่ละตัวอย่างโครงสร้างขนาดนาโน GaSb โดยมี การเปลี่ยนแปลงค่าความหนาและค่าสัดส่วน In ของชั้นแทรก  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

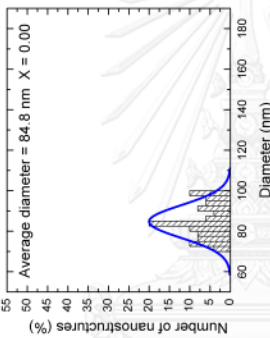
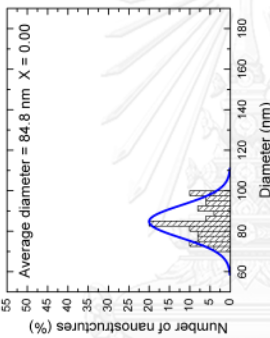
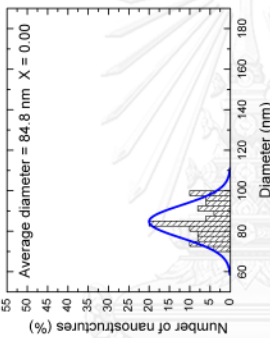
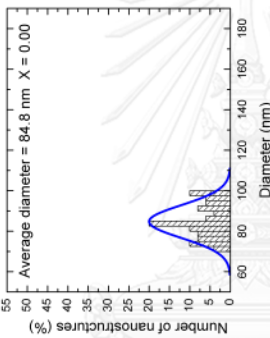
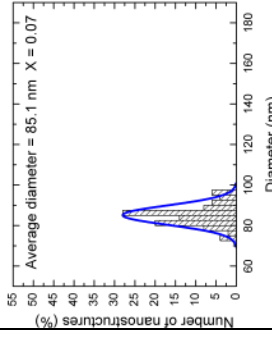
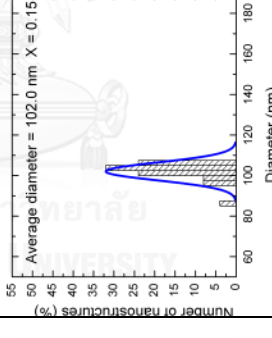
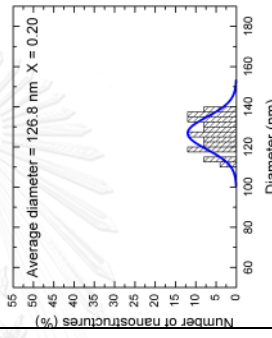
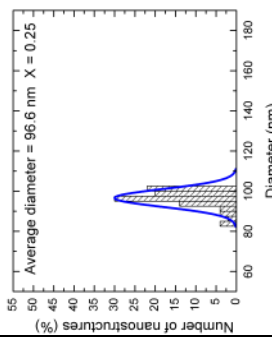
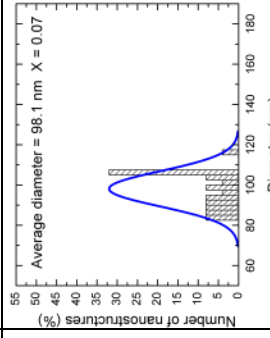
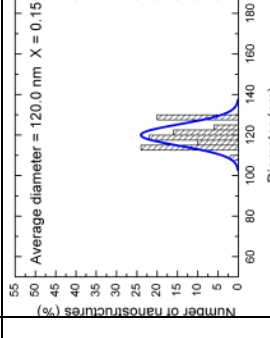
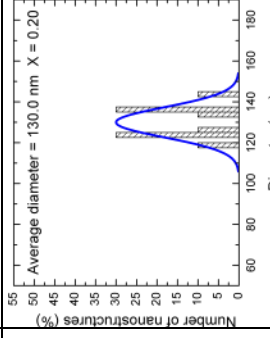
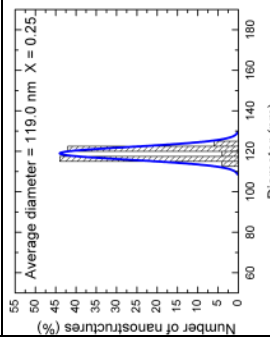
ความหนา ของชั้น แทรก $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (ML)	ค่าสัดส่วนของ In (%)			
	7	15	20	25
0				
1				
2				
3				
4				

ตารางที่ 4.2 ภาพ AFM แบบ 3 มิติ (3D) ของแต่ละตัวอย่างโครงสร้างขนาดนาโน GaSb โดยมี การเปลี่ยนแปลงค่าความหนาและค่าสัดส่วน In ของชั้นแทรก  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

ความหนาของชั้นแทรก $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (ML)	ค่าสัดส่วนของ In (%)			
	7	15	20	25
0				
1				
2				
3				
4				



ตารางที่ 4.3 แผนภาพการกระจายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในทิศ [110] ของแต่ละตัวอย่างโครงสร้างขนาดนาโน GaSb โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาและค่าสัดส่วน In ของชั้นแทรก  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

ความหนาของชั้นแทรก $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (ML)	ค่าสัดส่วนของ In (%)			
	7	15	20	25
0				
1				
2				

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

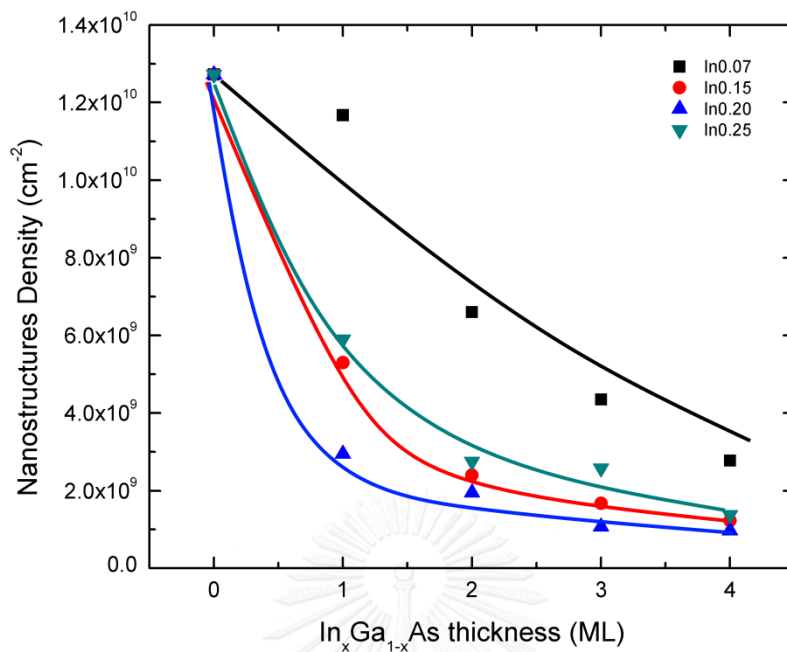
ค่าสัดส่วนของ In (%)		ค่าสัดส่วนของ In (%)			
		7	15	20	25
ความหนาของ ชั้นแทรก $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (ML)	3	<p>Average diameter = 100.1 nm X = 0.07</p>	<p>Average diameter = 142.4 nm X = 0.15</p>	<p>Average diameter = 159.7 nm X = 0.20</p>	<p>Average diameter = 118.5 nm X = 0.25</p>
	4	<p>Average diameter = 105.1 nm X = 0.07</p>	<p>Average diameter = 156.0 nm X = 0.15</p>	<p>Average diameter = 162.0 nm X = 0.20</p>	<p>Average diameter = 127.3 nm X = 0.25</p>

ตารางที่ 4.4 แผนภาพการกระจายขนาดความสูงของแต่ละตัวอย่างโครงสร้างขนาดนาโน GaSb โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาและค่าสัดส่วน In ของชั้นแทรก  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

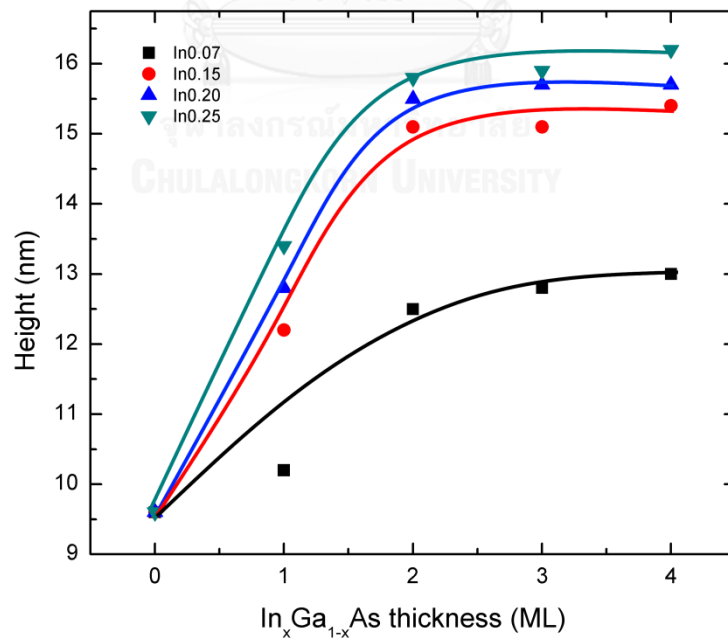
ความหนาของชั้นแทรก $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (ML)	ค่าสัดส่วนของ In (%)			
	7	15	20	25
0				
1				
2				

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

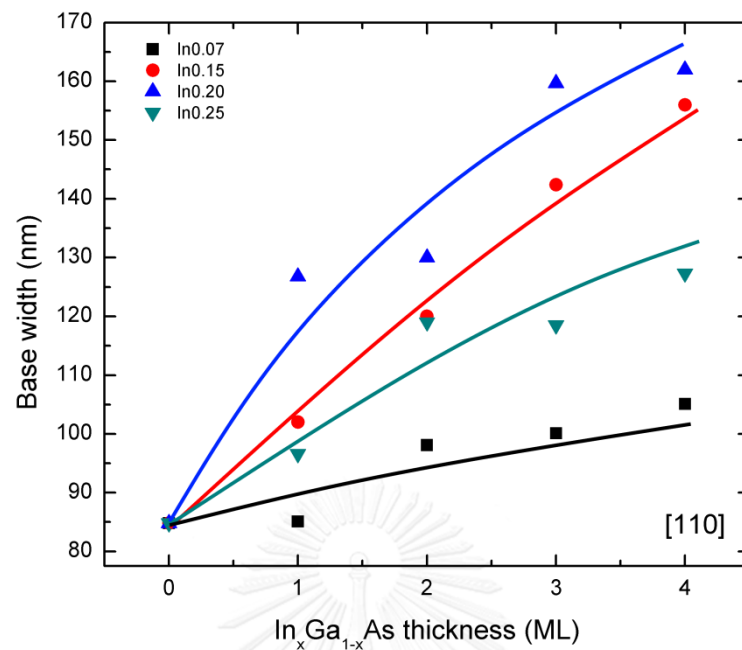
ค่าสัดส่วนของ In (%)			
ความหนาของ ชั้นแทรก $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (ML)	25		
	20		
	15		
	7		
3			
4			



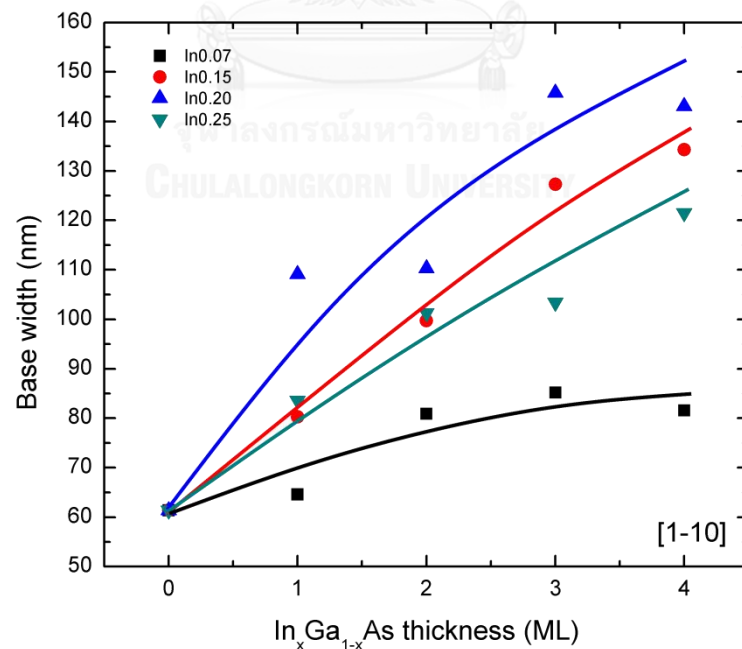
รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ความหนาแน่นของตัวอย่างโครงสร้างขนาดนาโน GaSb แบบที่ก่อตัวขึ้นเองที่มีชั้นแทรก In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As ได้ชั้นโครงสร้างขนาดนาโน GaSb โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นและค่าสัดส่วน In ของชั้นแทรก



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ความสูงของตัวอย่างโครงสร้างขนาดนาโน GaSb แบบที่ก่อตัวขึ้นเองที่มีชั้นแทรก In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As ได้ชั้นโครงสร้างขนาดนาโน GaSb โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นและค่าสัดส่วน In ของชั้นแทรก



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในทิศ [110] ของตัวอย่างโครงสร้างขนาดนาโน GaSb แบบที่ ก่อตัวขึ้นเองที่มีชั้นแทรก  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ใต้ชั้นโครงสร้างขนาดนาโน GaSb โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาและค่า สัดส่วน In ของชั้นแทรก



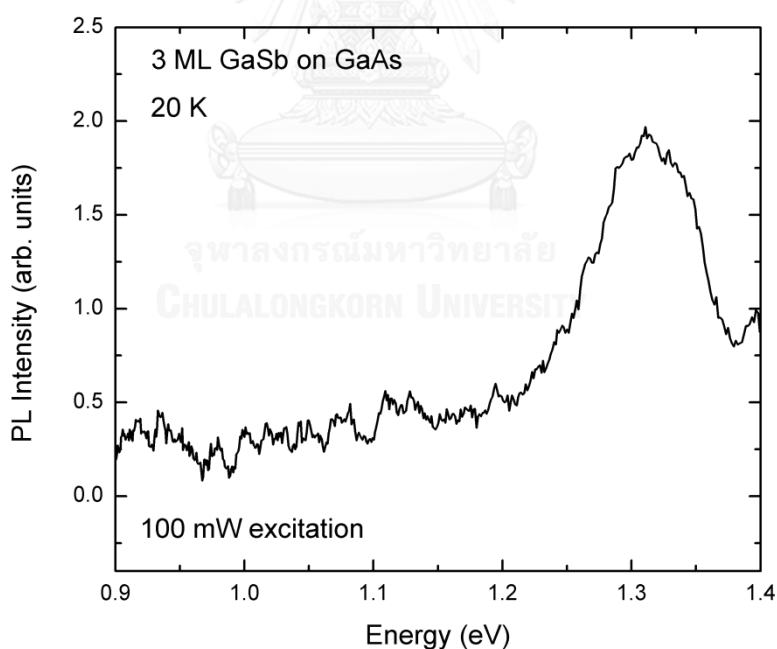
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในทิศ [1-10] ของตัวอย่างโครงสร้างขนาดนาโน GaSb แบบที่ ก่อตัวขึ้นเองที่มีชั้นแทรก  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ใต้ชั้นโครงสร้างขนาดนาโน GaSb โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาและค่า สัดส่วน In ของชั้นแทรก

ตารางที่ 4.5 สรุป ค่าความหนาแน่น ค่าความกว้างของฐานวัดในทิศ [110] และ [1-10] ค่าความสูง และค่าความกว้างของฐาน [1-10]/[110] ของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นและค่าสัดส่วน In ของชั้นแทรก  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

ค่าความหนาแน่นของชั้นแทรก $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (ML)	ค่าสัดส่วนของ In (%)	ค่าความหนาแน่นของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb ( $\text{cm}^{-2}$ )	ค่าความกว้างของฐานโครงสร้างขนาดนาโน GaSb (nm) วัดในทิศ [110]	ค่าความกว้างของฐานโครงสร้างขนาดนาโน GaSb (nm) วัดในทิศ [1-10]	ค่าความสูงของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb (nm) วัดในทิศ [110]	ค่าความกว้างของฐานโครงสร้างขนาดนาโน GaSb [1-10]/[110]
0 ML	0	$1.3 \times 10^{10}$	84.8	61.4	9.6	0.72
1 ML	7	$1.3 \times 10^{10}$	85.1	64.6	10.2	0.76
	15	$5.3 \times 10^9$	102.0	80.3	12.2	0.79
	20	$3.0 \times 10^9$	126.8	109.1	12.8	0.86
	25	$5.9 \times 10^9$	96.6	83.6	13.4	0.87
2 ML	7	$6.6 \times 10^9$	98.1	80.9	12.5	0.82
	15	$2.4 \times 10^9$	120.0	99.7	15.1	0.83
	20	$2.0 \times 10^9$	130.0	110.3	15.5	0.85
	25	$2.8 \times 10^9$	119.0	101.3	15.8	0.85
3 ML	7	$4.4 \times 10^9$	100.1	85.2	12.8	0.85
	15	$1.7 \times 10^9$	142.4	127.3	15.1	0.87
	20	$1.1 \times 10^9$	159.7	145.8	15.7	0.91
	25	$2.3 \times 10^9$	118.5	103.4	15.9	0.87
4 ML	7	$2.9 \times 10^9$	105.1	81.6	13.0	0.78
	15	$1.2 \times 10^9$	156.0	134.3	15.4	0.86
	20	$1.0 \times 10^9$	162.0	143.1	15.7	0.88
	25	$1.4 \times 10^9$	127.3	121.5	16.2	0.95

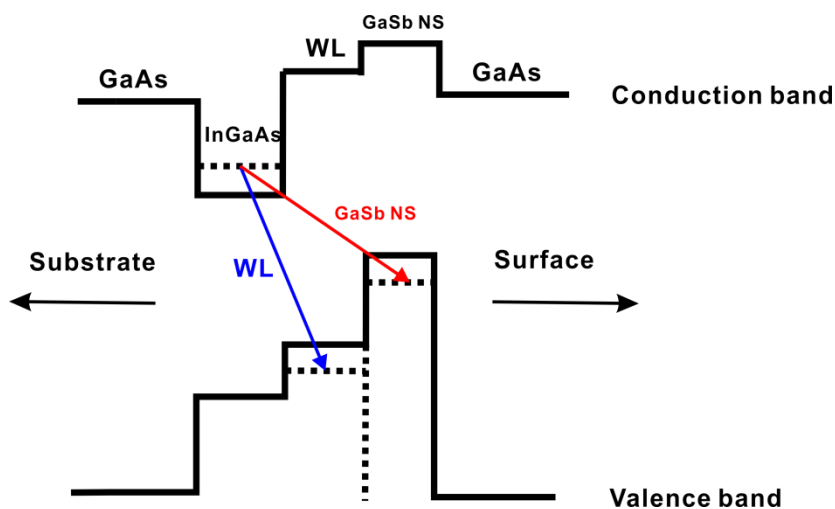
#### 4.2 การศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของโครงสร้างขนาดนาโนแกเลียมแอนติโมนด์ที่มีชั้นแทรกอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นแกเลียมอาร์เซไนด์ (100)

จากรูปที่ 4.5 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb ที่ไม่มีชั้นแทรก InGaAs ได้ชั้นโครงสร้างขนาดนาโน GaSb พบว่าตำแหน่งพลังงานของค่ายอดสูงสุดจากโครงสร้างขนาดนาโน GaSb อยู่ที่ประมาณ 1.17 eV และตำแหน่งพลังงานของค่ายอดสูงสุด GaSb layer หรือที่เรียกว่า Wetting layer (WL) อยู่ที่ประมาณ 1.32 eV อย่างไรก็ตามความเข้มโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (PL intensity) ของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb ที่ไม่มีชั้นแทรก InGaAs ยังคงมีความเข้มโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่ต่ำ (weak) มาก ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb จากกลไกการก่อตัวขึ้นเองที่มีชั้นแทรก InGaAs ได้ชั้นโครงสร้างขนาดนาโน GaSb บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs (100) เมื่อพิจารณาค่าพลังงานโฟตอนที่ได้ในกรณีมีค่าน้อยกว่าค่าแถบพลังงานของ GaAs แต่มีค่ามากกว่าของ GaSb เนื่องจากการเรียงตัวแถบพลังงานในกรณีนี้เป็นแบบ Type II ดังในรูปที่ 4.6



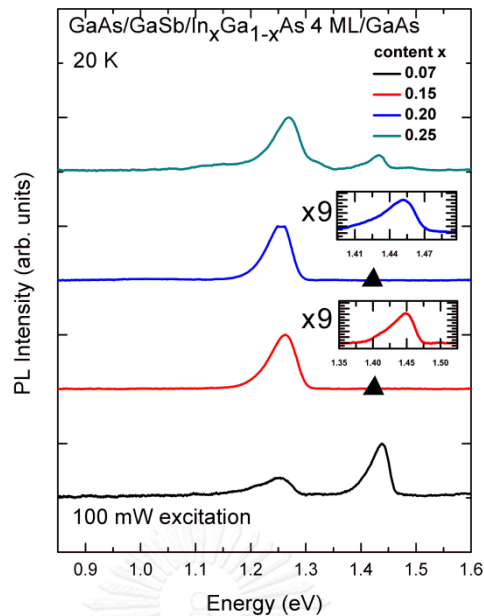
รูปที่ 4.5 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 20 K ของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb ที่ไม่มีชั้นแทรก InGaAs ได้ชั้นโครงสร้างขนาดนาโน GaSb





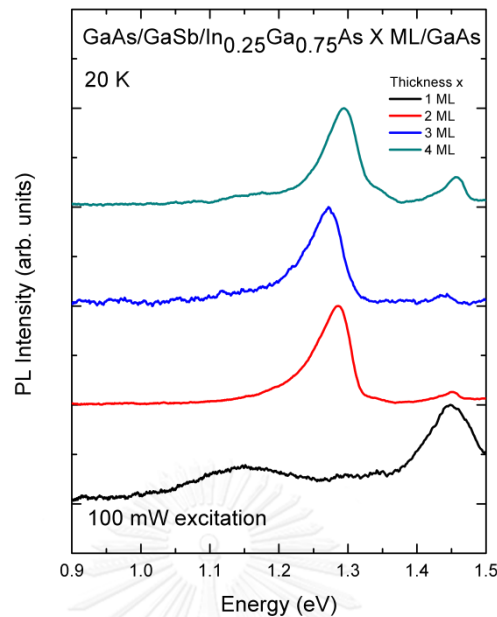
รูปที่ 4.6 แถบพลังงานของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb จากกลไกการก่อตัวขึ้นเองที่มีชั้นแทรก InGaAs ใต้ชั้นโครงสร้างขนาดนาโน GaSb บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs (100)

รูปที่ 4.7 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 20 K ของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb ที่มีชั้นแทรก 4-ML  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าสัดส่วนของอินเดียมในชั้นแทรกเท่ากับ  $X=7\%$ ,  $15\%$ ,  $20\%$  และ  $25\%$  ใต้ชั้นโครงสร้างขนาดนาโน GaSb โดยแต่ละตัวอย่างมีค่ายอดสูงสุดที่  $1.25\text{-}1.31\text{ eV}$  ซึ่งได้จากชั้น Wetting layer [3] และค่ายอดที่  $1.44\text{ eV}$  ซึ่งได้จากการเปลี่ยนระดับพลังงานของซิลิกอนในตำแหน่ง As ในสารประกอบ GaAs และเชื่อว่ามีความสัมพันธ์กับสิ่งเจือปนอื่น (System-dependent impurities) [27] สำหรับตัวอย่างที่มีค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นแทรก  $25\%$  เราจะเห็นค่ายอดขนาดเล็กที่  $1.1\text{ eV}$  ที่ได้จากโครงสร้างขนาดนาโน GaSb อย่างไรก็ตามตัวอย่างนั้นไม่สามารถสังเกตได้ เนื่องจากสัญญาณมีขนาดเล็กเกินไป



รูปที่ 4.7 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 20 K ของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb ที่มีชั้นแทรก 4 ML  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าสัดส่วนของอินเดียมในชั้นแทรกเท่ากับ  $x=7\%$ ,  $15\%$ ,  $20\%$  และ  $25\%$  ได้ชั้นโครงสร้างขนาดนาโน GaSb

รูปที่ 4.8 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 20 K ของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb ที่มีชั้นแทรก  $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$  ได้ชั้นโครงสร้างขนาดนาโน GaSb โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาชั้นแทรก  $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$  เท่ากับ 1 ML, 2 ML, 3 ML และ 4 ML ได้ชั้นโครงสร้างขนาดนาโน GaSb พบว่าแต่ละตัวอย่างมีค่ายอดทั้งหมด 3 ค่ายอด ตำแหน่งแรกนั้นคือค่ายอดที่คาดว่ามาจากโครงสร้างขนาดนาโน GaSb อยู่ในช่วงประมาณ 0.99-1.17 eV เนื่องจากการกระจายตัวของขนาดความสูงที่ใกล้เคียงกัน (Size distribution) [28] ของโครงสร้างนาโน GaSb ทำให้ตำแหน่งของค่ายอดของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb มีค่าใกล้เคียงกันมากเมื่อเพิ่มค่าความหนาและค่าสัดส่วนอินเดียมในแทรกผลึกบาง InGaAs ตำแหน่งที่สองคือค่ายอดในช่วงประมาณ 1.25-1.31 eV ได้จาก GaSb layer หรือที่เรียกว่า Wetting layer (WL) [3] และตำแหน่งที่สามคือค่ายอดที่ประมาณ 1.44 eV จากระดับพลังงานของในซิลิกอน (As-site) ในก้อนมวลสาร (Bulk) ของ GaAs และเชื่อว่ามีความสัมพันธ์กับสิ่งเจือปนอื่น (System-dependent impurities) [27] อย่างไรก็ตามพบว่าความเข้มโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของโครงสร้างขนาดนาโนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าความหนาและค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นแทรก  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  แสดงให้เห็นว่าอิเล็กตรอนถูกกักขังในชั้นแทรก InGaAs ทำให้การรวมตัวของพาหะ (carrier recombination) ในโครงสร้างนี้มีความเข้มโฟโตลูมิเนสเซนซ์สูงขึ้น

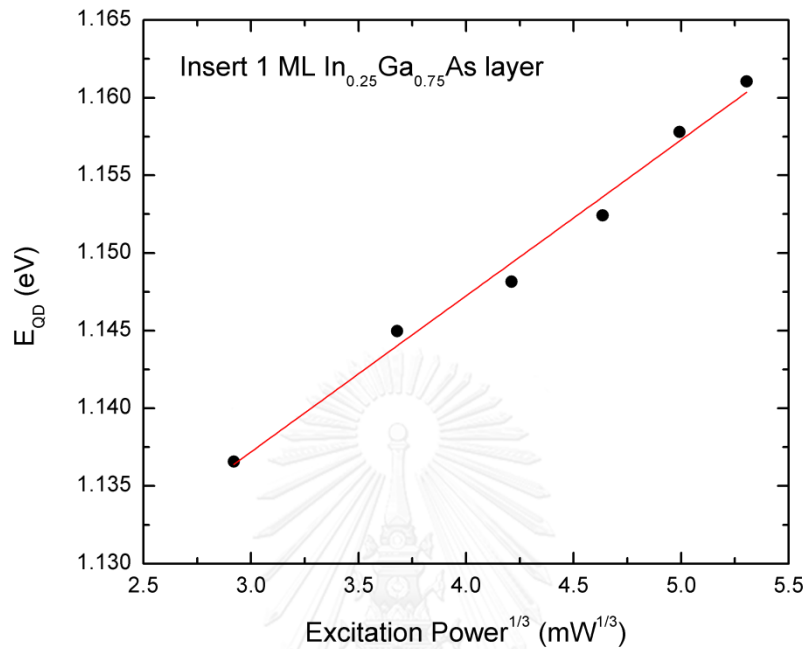


รูปที่ 4.8 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 20 K ของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb ที่มีชั้นแทรก  $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$  ได้ชั้นโครงสร้างขนาดนาโน GaSb โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาชั้นแทรก  $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$  เท่ากับ 1 ML, 2 ML, 3 ML และ 4 ML ได้ชั้นโครงสร้างขนาดนาโน GaSb

นอกจากนี้ยังได้ทำการยกตัวอย่างการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของตัวอย่างโดยการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังงานแสงที่กระตุ้นจากการปรับกำลังของเลเซอร์ระหว่าง 5–150 mW และเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวอย่างในขณะวัดระหว่าง 20–200 K เพื่อทำการวิเคราะห์ผลความเป็น type-II band alignment ที่ซึ่งผลของการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่ได้จากตัวอย่างของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb จากกลไกการก่อตัวขึ้นเองที่มีชั้นแทรกที่มีค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นแทรกเท่ากับ 25% มีค่าความหนาเท่ากับ 1 ML (1-ML  $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ ) ได้ชั้นโครงสร้างขนาดนาโนของ GaSb บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs (100) ดังในรูปที่ 4.9 และ 4.10

จากรูปที่ 4.9 พบว่าตำแหน่งพลังงานของค่ายอดโครงสร้างขนาดนาโน GaSb มีแนวโน้มเคลื่อนที่ Blueshift เมื่อทำการเพิ่มกำลังงานแสงที่ถูกกระตุ้นจากการปรับกำลังของเลเซอร์ (Laser power) ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในที่ระหว่างพื้นผิว เหนี่ยวนำให้โฮลที่ถูกกักขังในแถบวาเลนซ์กับอิเล็กตรอนที่ถูกกักขังในแถบนำไฟฟ้าเกิดแรงดึงดูดคู่ออมป์ ด้วยเหตุนี้ทำให้เกิดแถบพลังงานที่เอียง (bend) นำไปสู่ triangular quantum well ที่ขึ้นขึ้น ส่งผลให้ระดับพลังงานควอนไทซ์ (quantize) ของพาหะสูงขึ้นไปทำให้ตำแหน่งพลังงานของค่ายอดเคลื่อนที่ไปยังพลังงานที่สูงกว่า (Higher energy) [3] โดยการศึกษาการจัดเรียงตัวของแถบพลังงานแบบ type-II ของโครงสร้างขนาดนาโนหรือ

ควอนตัมดอทนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ถูกรวบรวมโดย Sun et al. [28], Hatami et al.[29] และ Hogg et al.[30]

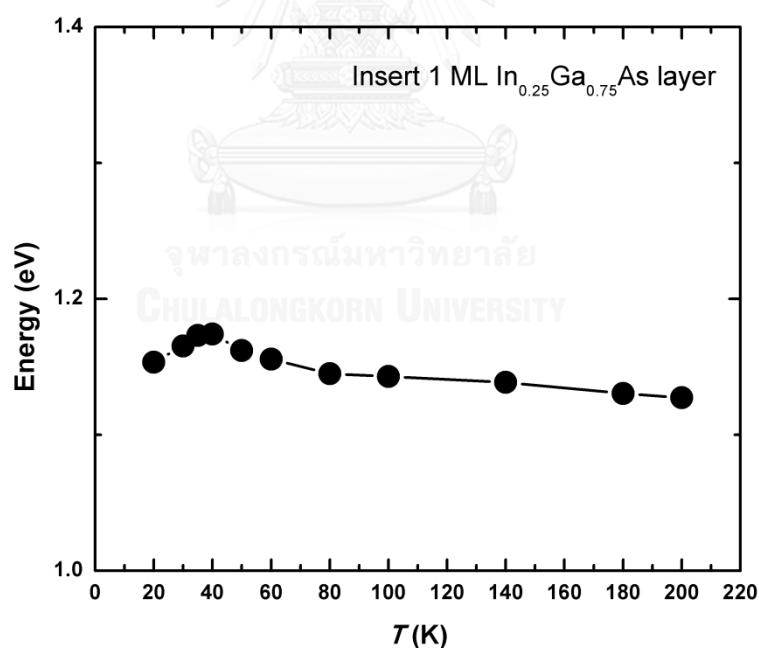


รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ตำแหน่งพลังงานค่ายอดของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb กับ ค่ารากที่ 3 ของค่ากำลังงานแสงที่กระตุ้น

เพื่อที่จะศึกษาความเสถียรและคุณภาพโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของตัวอย่าง จึงได้ทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในขณะวัดโครงสร้างขนาดนาโน GaSb ดังรูปที่ 4.10 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่ใช้กำลังแสงในการกระตุ้น 100 mW โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในขณะวัดโครงสร้างขนาดนาโน GaSb ที่มีชั้นแทรก 1-ML In<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>As ได้ขึ้นโครงสร้างขนาดนาโน GaSb เป็นความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งพลังงานของค่ายอดโครงสร้างขนาดนาโน GaSb กับค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นในช่วงแรกตำแหน่งพลังงานของค่ายอดโครงสร้างขนาดนาโน GaSb เคลื่อนที่ Blueshift เล็กน้อย และ Redshift หลังจากเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณมากกว่า 50 K เนื่องจากเกิดจากการหดตัวของช่องว่างแถบพลังงาน (Bandgap shrinkage) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น อย่างไรก็ตามที่เขตอุณหภูมิต่ำเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ตำแหน่งพลังงานของค่ายอดของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb เกิด Blueshift สามารถอธิบายหรือพิจารณาจากความไม่สม่ำเสมอของขนาดโครงสร้างนาโนหรือดอต (Dot size nonuniformity) เมื่อมีการกระตุ้นโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (PL excitation) ไม่สูงมากนัก การสร้างพาหะให้เกิดการรวมตัวและปล่อยพลังงานแสงมีแนวโน้มเกิดจากการที่พาหะมีอยู่ (Occupy) ในโครงสร้างขนาดนาโนหรือดอตใหญ่ที่ซึ่งมีระดับพลังงานต่ำกว่าโครงสร้างขนาดนาโน

หรือดอตเล็ก เนื่องมาจากระบบของ GaSb/GaAs หรือ GaSb/InGaAs/GaAs อิเล็กตรอนจะถูกกักขัง (Confine) น้อยมากในแถบนำไฟฟ้า ดังนั้นในระบบนี้การสร้างพาหะให้เกิดการรวมตัวและปล่อยพลังงานแสงจะเกิดจากโฮลที่มีแนวโน้มอยู่ในโครงสร้างขนาดนาโนหรือดอตใหญ่ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้โฮลที่มีแนวโน้มอยู่ในโครงสร้างขนาดนาโนหรือดอตใหญ่จะถูกส่งผ่าน (Transfer) ได้ง่ายกว่าโฮลที่อยู่ในโครงสร้างขนาดนาโนหรือดอตเล็กจึงเป็นผลให้ตำแหน่งพลังงานของค้ำยอดโครงสร้างขนาดนาโน GaSb เคลื่อนที่ Blueshift ในช่วงแรกของการเพิ่มอุณหภูมิ [31]

จากการศึกษาโครงสร้างขนาดนาโนของแกลเลียมแอนติโมนด์ (GaSb) จากกลไกการก่อตัวขึ้นเองที่มีชั้นแทรกของอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ (InGaAs) ได้ชั้นโครงสร้างขนาดนาโน GaSb บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs (100) นี้จะเห็นได้ว่าสามารถพัฒนาการกักขังพาหะได้ดีขึ้น ความเข้มโฟโตลูมิเนสเซนซ์สูงขึ้น และตำแหน่งพลังงานของค้ำยอดโครงสร้างขนาดนาโนเข้าใกล้ 1300 nm หรือ 0.95 eV ได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างขนาดนาโน GaSb บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs (100)



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ค้ำยอดของตำแหน่งพลังงานของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb กับค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

บทนี้เป็นสรุปผลการทดลองที่ได้ดำเนินการอภิปรายผลการทดลองในการศึกษาการประดิษฐ์โครงสร้างขนาดนาโน GaSb ที่มีชั้นแทรกของ InGaAs บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs (100) ที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นของโครงสร้างขนาดนาโนและผลการกระจายเชิงขนาดของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb ที่ก่อตัวขึ้นเอง ด้วยการปลูกอิพิแทกซ์ผลึกจากลำโมเลกุลและการศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของโครงสร้างขนาดนาโนของ GaSb ที่ก่อตัวขึ้นเอง จากผลการทดลองในกรณีที่มีชั้นแทรกของ InGaAs ใต้ชั้นโครงสร้างขนาดนาโนของ GaSb โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของชั้นแทรกของ InGaAs ได้แก่ ค่าสัดส่วนของอินเดียม (In) ในชั้นแทรก InGaAs และค่าความหนาแน่นของชั้นแทรก InGaAs ตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 สามารถสรุปได้ดังนี้

#### 5.1 การศึกษาลักษณะเชิงกายภาพผิวหน้าของโครงสร้างขนาดนาโนแกลเลียมแอนติโมนด์ที่มีชั้นแทรกอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นแกลเลียมอาร์เซไนด์ (100)

จากการปลูกโครงสร้างขนาดนาโน GaSb จากกลไกการก่อตัวขึ้นเองที่มีชั้นแทรก InGaAs ใต้ชั้นโครงสร้างขนาดนาโน GaSb บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs (100) โดยมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขค่าความหนาแน่นของชั้นแทรกและค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นแทรกตามหัวข้อที่ 3.3 มีค่าความหนาแน่นของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb อยู่ในช่วง  $1.0 \times 10^9$  ถึง  $1.3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  พบว่าเมื่อทำการปลูกผลึก GaSb ลงบนชั้นแทรก InGaAs ค่าความหนาแน่นของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb มีค่าลดลง และขนาดมิติของโครงสร้างขนาดนาโนของแกลเลียมแอนติโมนด์มีค่าเพิ่มขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของชั้นแทรกและค่าสัดส่วนอินเดียมของชั้นแทรก เนื่องจากความแตกต่างของค่าความหนาแน่นและค่าสัดส่วนอินเดียมของชั้นแทรก InGaAs อย่างไรก็ตามการปลูกผลึก GaSb ลงบนชั้นแทรก InGaAs ที่มีค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นแทรก โดยค่าความสูง ค่าขนาดความกว้างของฐานในทิศทาง [110] และ [1-10] มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความหนาแน่นและค่าสัดส่วนของอินเดียมในชั้นแทรกมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นแทรกมี 25% พบว่าขนาดของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb มีค่าลดลงทุกค่าความหนาแน่นของชั้นแทรก นอกจากนี้การศึกษารูปร่างที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง (Anisotropic shape) ของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb จากข้อมูลที่ได้จาก AFM พบว่ารูปร่างโครงสร้างขนาดนาโนแกลเลียมแอนติโมนด์มีการยืดขยาย (Elongation) ออกไปอย่างทีละเล็กละน้อยจากทิศทาง [110] จน

เป็นรูปร่างที่ไม่ขึ้นอยู่กับการทิศทาง (Isotropic shape) หรือเกือบจะไม่มี การยืดขยาย (No elongation) เมื่อมีการเพิ่มความหนาเกินกว่า 3 ML เป็นต้น ทุกค่าสัดส่วนอินเดียมของชั้นแทรก InGaAs ยกเว้นกรณีที่ค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นแทรกมีค่า 15% ที่การขยายความกว้างฐานมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความหนาของชั้นแทรก

## 5.2 การศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของโครงสร้างขนาดนาโนแกเลียมแอนติโมนด์ที่มีชั้นแทรกอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นแกเลียมอาร์เซไนด์ (100)

ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่ได้จากชิ้นงานบางตัวอย่างของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb จากกลไกการก่อตัวขึ้นเองที่มีชั้นแทรก InGaAs ได้ชั้นโครงสร้างขนาดนาโน GaSb บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs (100) โดยมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขค่าความหนาของชั้นแทรกและค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นแทรก InGaAs พบว่าความเข้มโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (PL intensity) เพิ่มขึ้นเมื่อค่าความหนาของชั้นแทรกและค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นแทรก InGaAs เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าอิเล็กตรอนถูกกักขังในชั้นแทรก InGaAs ทำให้การรวมตัวของพาหะ (carrier recombination) ในโครงสร้างนี้มีความเข้มโฟโตลูมิเนสเซนซ์สูงขึ้น และตำแหน่งพลังงานของค่ายอดโครงสร้างขนาดนาโนเข้าใกล้ 1300 nm หรือ 0.95 eV ได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างขนาดนาโน GaSb บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs (100)

### ผลงานตีพิมพ์

1. **K. Khoklang**, S. Kiravittaya, M. Kunrugsa, P. Prongjit, S. Thainoi, S. Ratanathamphan, and S. Panyakeow, *Molecular beam epitaxial growth of GaSb quantum dots on (001) GaAs substrate with InGaAs insertion layer*. Journal of Crystal Growth, 425 (2015) pp. 291–294.
2. **K. Khoklang**, S. Kiravittaya, S. Thainoi, S. Panyakeow, and S. Ratanathamphan, *In-mole-fraction of InGaAs Insertion Layers Effects on the Structural and Optical Properties of GaSb Quantum Dots Grown on (100) GaAs Substrate*, In Proc. 12th international conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2015



## ผลงานนำเสนอ

### การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

#### ● Poster presentation

1. K. Khoklang, S. Kiravittaya, S. Thainoi, S. Ratanathamaphan, and S. Panyakeow, *Molecular beam epitaxial growth of GaSb quantum dots on (001) GaAs substrate with InGaAs insertion layer*. Abstract book of 18<sup>th</sup> international conference on molecular beam epitaxy (MBE), 2014.
2. K. Khoklang, S. Kiravittaya, S. Thainoi, S. Panyakeow, and S. Ratanathamaphan, *In-mole-fraction of InGaAs insertion layers effects on the structural and optical properties of GaSb quantum dots*, Abstract book of 8th the International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT), 2015.

#### ● Oral presentation

1. K. Khoklang, S. Kiravittaya, S. Thainoi, S. Panyakeow, and S. Ratanathamaphan, *In-mole-fraction of InGaAs Insertion Layers Effects on the Structural and Optical Properties of GaSb Quantum Dots Grown on (100) GaAs Substrate*, In Proc. 12th international conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2015.

## รายการอ้างอิง

1. Arakawa, Y., and Sakaki, H., *Multidimensional quantum well laser and temperature dependence of its threshold current*. Applied Physics Letters, 1982. **40**(11): p. 939-941.
2. Zhang, S.H., and et al. , *Controlled optical properties of GaSb/InGaAs type-II quantum dots grown on InP substrate*. Applied Physics Letters, 2012. **100**(25): p. 251908-251908-4.
3. Suzuki, K., Hogg, R. A., and Arakawa, Y., *Structural and optical properties of type II GaSb/GaAs self-assembled quantum dots grown by molecular beam epitaxy*. Journal of Applied Physics, 1999. **85**(12): p. 8349-8352.
4. Li, Y., Weatherly, G. C., and Niewczas, M., *Crack healing during molecular-beam-epitaxy growth of GaP/GaAs thin films*. Journal of Applied Physics, 2005. **98**(1).
5. Veloso, A.B., and et al., *Carrier dynamics in stacked InPGaAs quantum dots*. Applied Physics Letters, 2007. **91**(12).
6. Cullis, A.G., and et al., *Stranski-Krastanow transition and epitaxial island growth*. Physical Review B, 2002. **66**(8).
7. Boonpeng, P., Panyakeow S., and Ratanathamphan, S., *In-mole-fraction and thickness of ultra-thin InGaAs insertion layers effects on the structural and optical properties of InAs quantum dots*. Journal of Advanced Materials Research, 2008. **31**: p. 132-134.
8. Cheng, K.Y., *Molecular beam epitaxy technology of III-V compound semiconductors for optoelectronic applications*. Proceeding of IEEE, 1997. **85**: p. 1694-1714.
9. Bimberg, D., Grundmann, M., and Ledentsov, N. N. , *Quantum dot heterostructures*. Chichester Wiley, 1999.
10. Sugawara, M., *Semiconductors and Semimentals : Self-assembled InGaAs/GaAs quantum dots*. San Diego: Academic Press, 1999. **60**: p. 1-116,.

11. Wolfe, C.M., and et al., *Physical properties of semiconductors*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall., 1989.
12. Alferov, Z.I., *Nobel Lecture: the double heterostructure concept and its applications*. Reviews of Modern Physics, 2001. **73**: p. 767-782.
13. Bhattacharya, P., *Properties of Lattice matched and Strain Indium Gallium Arsenide*. London : INSPEC, 1993.
14. Kayali, S., Ponchak, G., and Shaw, R., *GaAs MMIC Reliability Assurance Guideline for Space Application*. Jet Propulsion Laboratory, 1996.
15. Föll, H. *Semiconductors I*. 2011 [cited 2015 May].
16. Patanasemakul, N., *Optical emission from InAs quantum dot molecules in Electrical engineering 2011*, Chulalongkorn p. 92.
17. Adachi, S., *Physical properties of III-V semiconductor compounds*. 1992: Canada : Wiley.
18. Daruka, Y., and Barabasi, A.L. , *Dislocation-free island formation in heteroepitaxial growth: A study at equilibrium*. Physical Review Letters, 1997. **79**: p. 3708-3711.
19. Herman, M.A., and Sitter, H., *Molecular beam epitaxy fundamentals and current status*. 1989, Berlin: Spinger-Verlag.
20. Thudsalingkarnsakul, N., and et al., *Effective one-dimensional electronic structure of InGaAs quantum dot molecules*. Microelectronic Engineering, 2008. **85**(5–6): p. 1225-1228.
21. สร้อยมาติ, ณ., การศึกษาโครงสร้างควอนตัมเวลล์ของอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์/แกลเลียมอาร์เซไนด์ที่เตรียมโดยวิธีการปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล. 2541, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
22. บุญเป็ง, ป., อิทธิพลของสัดส่วนอินเดียมและค่าความหนาของชั้นแทรกอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่มีต่อโครงสร้างอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอต. 2549, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
23. Shchukin, V.A., and Bimberg, D., *Spontaneous ordering of nanostructures on crystal surfaces*. Reviews of Modern Physics, 1999. **71**(4): p. 1125-1171.
24. Eisele Holger, D.M., *Critical thickness of the 2-dimensional to 3-dimensional transition in GaSb/GaAs(001) quantum dot growth*. Journal of Crystal Growth, 2012. **338**(1): p. 103-106.

25. Jiang, C., et al., *Molecular beam epitaxial growth of very large lateral anisotropic GaSb/GaAs quantum dots*. Journal of Crystal Growth, 2007. **301-302**(0): p. 828-832.
26. Li, G., Jiang, C., and Sakaki, H. *Anisotropic scattering of elongated GaSb/GaAs quantum dots embedded near two-dimensional electron gas*. in *Nanoelectronics Conference (INEC), 2010 3rd International*. 2010.
27. Parker, E.H.C., *The Technology and physics of Molecular beam epitaxy*. 1985: Sir John Cass school of physical science and technology city of London Polytechnic London, England. 107-109.
28. Sun, C.K., and et al., *Optical investigations of the dynamic behavior of GaSb/GaAs quantum dots*. Applied Physics Letters, 1996. **68**(11): p. 1543-1545.
29. Hatami, F., and et al., *Carrier dynamics in type-II GaSb/GaAs quantum dots*. Physical Review B, 1998. **57**(8): p. 4635-4641.
30. Hogg, R.A., and et al., *Optical spectroscopy of self-assembled type II GaSb/GaAs quantum dot structures grown by molecular beam epitaxy*. Applied Physics Letters, 1998. **72**(22): p. 2856-2858.
31. Cui, K., and et al., *Multilayered type-II GaSb/GaAs self-assembled quantum dot structure with light emission at room temperature*. Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 2012. **45**(0): p. 173-176.

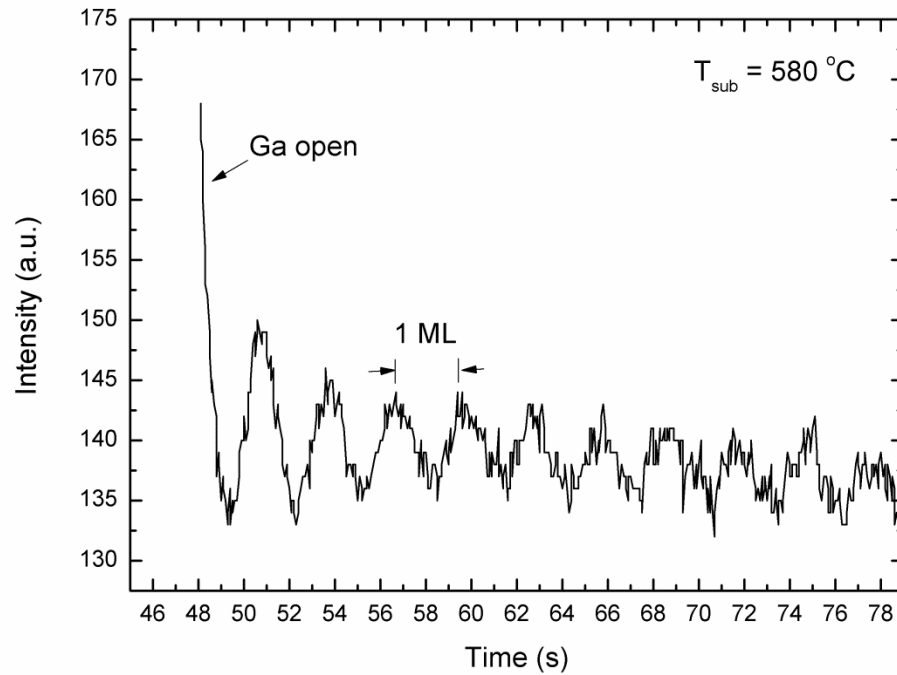


ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## ภาคผนวก

ตัวอย่างการวัดหาค่าอัตราการปลูกผลึกจาก RHEED Oscillation ที่ได้จากการทดลอง

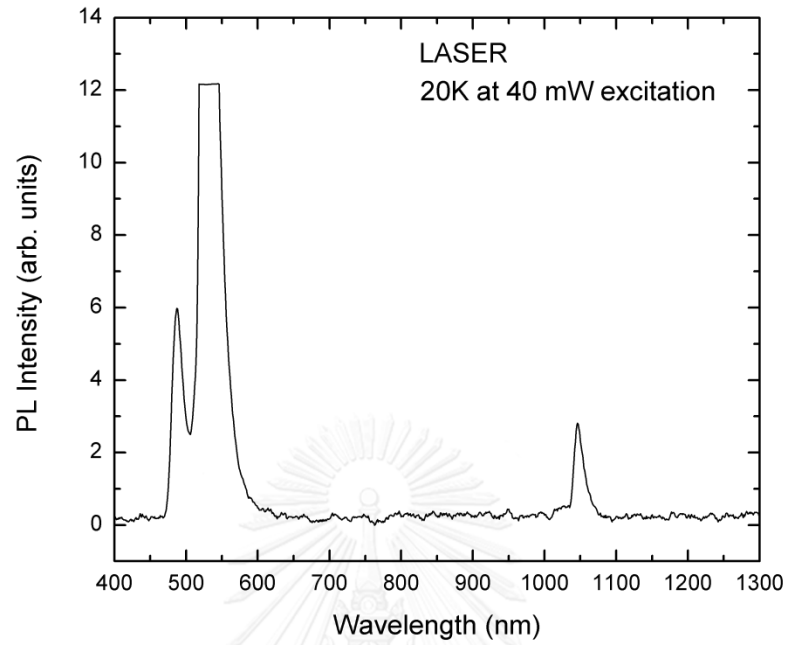


รูปที่ 1 แผนภาพ การเปลี่ยนแปลงความเข้มของ Specular Beam ในขณะการปลูกผลึกแกเลียมอาร์เซไนด์ที่  
Growth rate = 0.333 ML

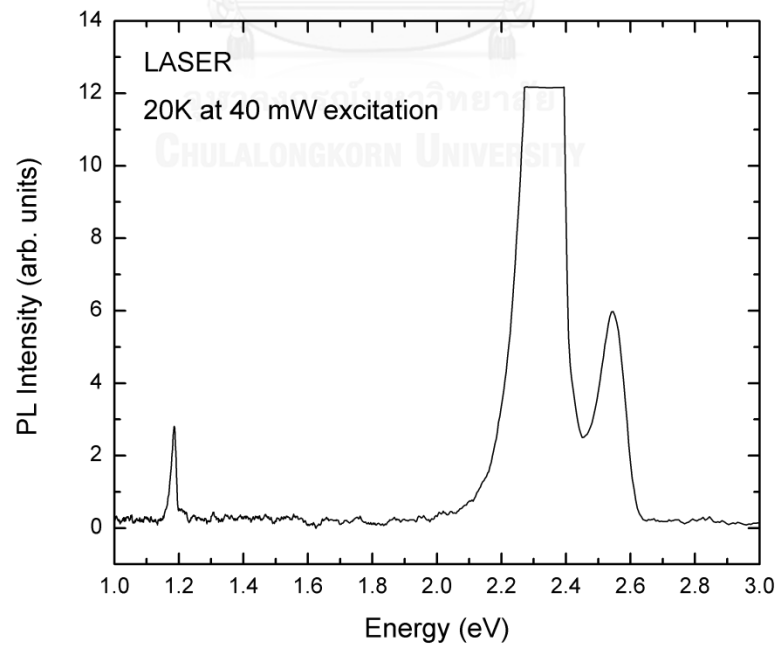
เมื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของแสงสว่างมากที่สุดได้เท่ากับ 4 ครั้ง ใช้เวลา 12 วินาที

$$\text{Growth rate (ML/sec)} = \frac{4 \text{ (ML)}}{62.5 - 50.5 \text{ (sec)}} = 0.333 \frac{\text{ML}}{\text{sec}}$$

ความเข้มโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ LASER ที่ใช้ในการทดลอง

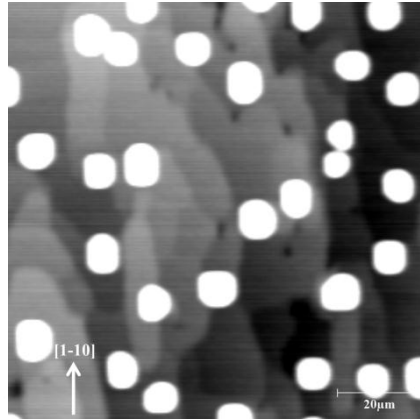


รูปที่ 2 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 20 K ของ Laser กับค่าความยาวคลื่น (nm)

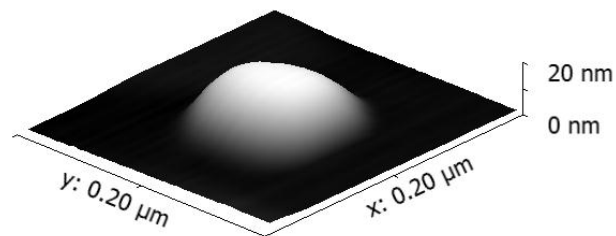


รูปที่ 3 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 20 K ของ Laser กับค่าพลังงาน (eV)

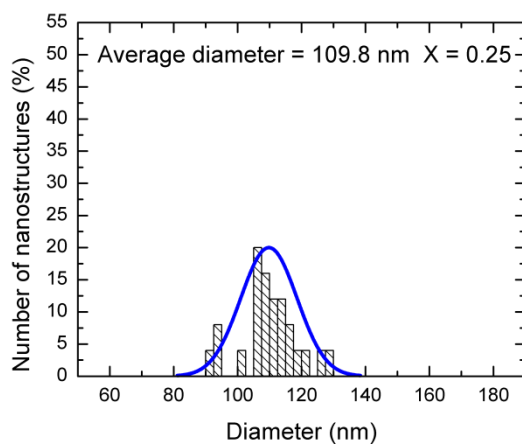
โครงสร้างเชิงกายภาพของชั้นงานโครงสร้างขนาดนาโน GaSb ที่มีชั้นแทรก  $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$  เท่ากับ 4 ML ได้ชั้นโครงสร้างขนาดนาโน GaSb ที่ปลูกโดยใช้อุณหภูมิ  $T_{\text{tran}}$  ต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง  $10^\circ\text{C}$



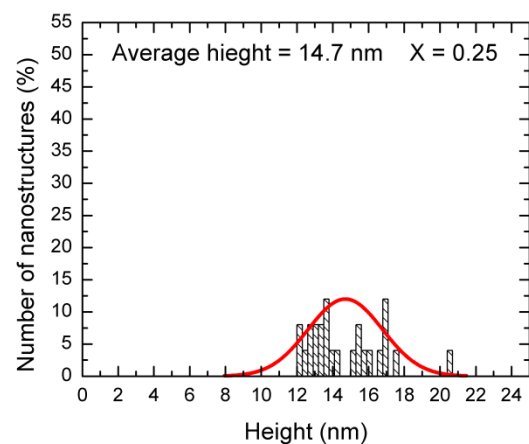
รูปที่ 4 ภาพ AFM ขนาด  $1000 \times 1000 \text{ nm}^2$  โดยมีความหนาแน่นของโครงสร้างขนาดนาโน GaSb ประมาณ  $2.4 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$



รูปที่ 5 ภาพ AFM แบบ 3 มิติ (3D)



รูปที่ 6 แผนภาพการกระจายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง



รูปที่ 7 แผนภาพการกระจายขนาดความสูง



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกมลชนก ขอกกลาง เกิดเมื่อวันที่ 19 มีนาคม พ.ศ. 2533 ที่อำเภอวิเชียรบุรี จังหวัดเพชรบูรณ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุขั้นสูงและนาโนเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากรในปีการศึกษา 2554 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมมหาบัณฑิตที่ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2555 โดยระหว่างการศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมมหาบัณฑิตได้รับทุนจากองค์การสนับสนุนนักศึกษาแห่งประเทศไทยญี่ปุ่น หรือ Japan Student Services Organization (JASSO) ไปเป็นนักเรียนแลกเปลี่ยน สาขาวิชา Quantum Engineering Design Course ภาควิชา Precision Science & Technology and Applied Physics ที่ Graduate School of Engineering มหาวิทยาลัยโอซาก้าเมื่อปี พ.ศ. 2556 ถึง พ.ศ.2557