

อิทธิพลของสัดส่วนอินเดียและค่าความหนาของชั้นแทรกอินเดียมเกลเลียนอาร์เซไนต์
ที่มีต่อโครงสร้างอินเดียอาร์เซไนต์ควอนตัมดอต



นาย ปุณยสิริ บุญเป็ง

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

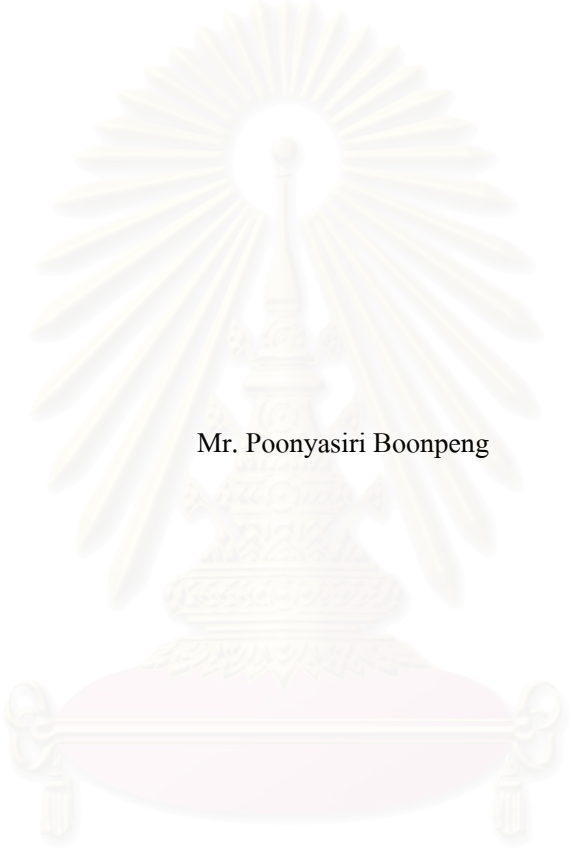
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF THE INDIUM COMPOSITION AND THICKNESS OF InGaAs
INSERTION LAYER ON InAs QUANTUM DOTS



Mr. Poonyasiri Boonpeng

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

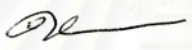
Chulalongkorn University

Academic Year 2006


Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ อธิธิพลของสัคส่วนอินเดียมและค่าความหนาของชั้นแทรกอินเดียม
เกลเลียมอาร์เซไนต์ที่มีต่อ โครงสร้างอินเดียมอาร์เซไนต์ควอนตัมดอต
โดย นาย ปุณยสิริ บุญเป็ง
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์

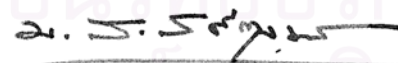
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการสอบ
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร)


..... กรรมการ
(ดร. สกฤทธรม เสนาะพิมพ์)

บุญศิริ บุญเป็ง : อิทธิพลของสัดส่วนอินเดียมและค่าความหนาของชั้นแทรกอินเดียม
 แกลเลียม อาร์เซไนด์ที่มีต่อโครงสร้างอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอต (EFFECT OF
 THE INDIUM COMPOSITION AND THICKNESS OF InGaAs INSERTION LAYER
 ON InAs QUANTUM DOTS) อ.ที่ปรึกษา : รศ. ดร. สมชัย รัตนธรรมพันธ์, 84 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาอิทธิพลของค่าสัดส่วนอินเดียม (X_{In}) และค่าความ
 หนาของชั้นแทรก $In_xGa_{1-x}As$ ที่มีผลต่อคุณลักษณะทางโครงสร้างและทางแสงของ InAs
 ควอนตัมดอต ซึ่งได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นแทรก $In_xGa_{1-x}As$ เท่ากับ 0.1 0.2
 และ 0.3 และค่าความหนาของชั้นแทรก $In_xGa_{1-x}As$ เท่ากับ 1 2 3 และ 4 ML โดยได้พบว่าค่าความ
 หนาแน่นของ InAs ควอนตัมดอตที่ปลูกบนชั้นผลึก GaAs เท่ากับ $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ และได้เพิ่มขึ้นเป็น
 1.4 ถึง $1.8 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ สำหรับ InAs ควอนตัมดอตที่ปลูกบนชั้นแทรก $In_xGa_{1-x}As$ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า
 สัดส่วนอินเดียมและค่าความหนาของชั้นแทรก $In_xGa_{1-x}As$ โดยอิทธิพลของค่าสัดส่วนอินเดียมและ
 ค่าความหนาของชั้นแทรก $In_xGa_{1-x}As$ มีผลต่อค่า FWHM ที่ได้จากการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์
 ซึ่งสอดคล้องกับค่าการกระจายเชิงขนาดของ InAs โดยค่าความสูงเฉลี่ยของ InAs ควอนตัมดอตที่
 ปลูกบนชั้นผลึก GaAs ได้เท่ากับ 4.8 nm และได้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปลูกบนชั้นแทรก $In_{0.1}Ga_{0.9}As$ แต่
 ค่าความสูงเฉลี่ยมีค่าลดลงเมื่อได้ทำการปลูกบนชั้นแทรก $In_{0.2}Ga_{0.8}As$ และ $In_{0.3}Ga_{0.7}As$ นอกจากนี้
 ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นกลบ $In_xGa_{1-x}As$ มีค่าความหนา 5 nm ที่มีต่อ
 คุณลักษณะทางแสงของ InAs ควอนตัมดอตที่มีชั้นแทรก $In_xGa_{1-x}As$ ด้วย ซึ่งจากผลการวัด
 โฟโตลูมิเนสเซนซ์พบว่าเมื่อทำการเพิ่มค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นกลบ $In_xGa_{1-x}As$ ลักษณะของ
 สเปกตรัมทางโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ InAs ควอนตัมดอต มีลักษณะเลื่อนไปทางค่าความยาวคลื่นที่
 ยาวขึ้น แต่ค่าความเข้มแสงของสเปกตรัมมีค่าลดลง นอกจากนี้ค่า FWHM มีค่าลดลงด้วยเมื่อ
 เปรียบเทียบกับ InAs ควอนตัมดอตที่ไม่มีชั้นกลบ $In_xGa_{1-x}As$

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าลายมือชื่อนิสิต ปุณศิริ บุญเป็ง
 สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้าลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา Sancho P.
 ปีการศึกษา 2549

4770362421 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD : InAs QUANTUM DOTS / InGaAs INSERTION LAYERS / HIGH DENSITY
DOTS / HIGH UNIFORMITY DOTS

POONYASIRI BOONPENG : EFFECT OF THE INDIUM COMPOSITION AND
THICKNESS OF InGaAs INSERTION LAYER ON InAs QDs. THESIS ADVISOR :
ASSOC. PROF. SOMCHAI RATANATHAMPAN, D. Eng., pp. 84

This thesis reported about the systematical study of the effects of In-mole-fraction and thickness of InGaAs insertion layer (IL) on both the structural and optical properties of InAs quantum dots. The In-mole-fraction of InGaAs IL was 0.1, 0.2 and 0.3 and the thickness of InGaAs IL was 1, 2, 3, and 4 monolayer (ML). The density of InAs QDs on GaAs was 1×10^{10} cm^{-2} and increased to $1.4-1.8 \times 10^{10}$ cm^{-2} for QDs grown on InGaAs IL. The results showed the dependence on the In-mole fraction and the thickness of InGaAs IL. The effect of In-mole-fraction and thickness of InGaAs IL on the FWHM from the photoluminescence (PL) results corresponded to the size distribution of InAs QDs. The average height of InAs QDs on GaAs was 4.8 nm. On the other hand, the average height of InAs QDs on $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ IL was increasing while the average height of InAs QDs which grown on $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ and $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ ILs were decreasing. Furthermore, the effects of In-mole-fraction of 5 nm InGaAs capping layer (CL) on optical properties of InAs quantum dots with InGaAs IL were studied. From the PL spectrum of InAs QDs with InGaAs IL and 5 nm InGaAs CL, it was found that while increasing the In composition of InGaAs CL, the red shift of PL spectrum is increasing but the Intensity of PL spectrum is decreasing. Moreover, FWHM of the PL spectrum of InAs QDs with additional InGaAs CL was relative small compared to one of InAs QDs without CL.

Department... Electrical Engineering... Student's signature... *Pomyasiri Boonpeng*
Field of study... Electrical Engineering... Advisor's signature... *Somchai Ratanathamp*
Academic year... 2006...

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ดำเนินการวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยได้รับการสนับสนุนจาก

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้
ความกรุณาให้คำแนะนำต่างๆ ที่มีค่าอย่างยิ่งอย่างต่อเนื่องทุกชั้นตอนตั้งแต่เริ่มต้นการทำวิทยานิพนธ์ จน
วิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

ผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน อัน
ประกอบด้วย ศ.ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว รศ.ดร.มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร รศ.ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์
และ อ.ดร.สกุลธรรม เสนาะพิมพ์

ผู้วิจัยขอขอบคุณคุณคุณบัณฑิตา รัฐวิเศษ คุณสุภ โขลก ไทยน้อย คุณพรชัย ช่างม่วง คุณพัฒนา
พันธวงศ์ คุณขวัญเรือน ไทยน้อย และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านเทคนิคและงาน
ทางด้านธุรการต่างๆ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณสุวารี สุรประภาพิชัย คุณวิภากร จีวะสุวรรณและนิติปรัชญาเอก โท
ตรี ทุกท่าน ในห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ที่ได้รับความช่วยเหลือ และคำแนะนำต่างๆ
ด้วยความเต็มใจ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลรอบข้างทุกท่านที่ให้ความห่วงใย และ
เป็นกำลังใจ ในการทำวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี
คุณประโยชน์อันจะเกิดจากผลงานวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยขอขอบเป็นเครื่องบูชาพระคุณบูรพาจารย์
ตลอดจนคุณบิดามารดาที่ได้มีส่วนช่วยวางรากฐานการศึกษาแก่ผู้วิจัย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (สกอ) สำนักสนับสนุนการ
วิจัย (สกว) ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ทุนสนับสนุน
สำหรับงานวิจัยนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
2 ความรู้พื้นฐาน.....	3
2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับโครงสร้าง Low-Dimension.....	3
2.2 อิทธิพลของความเครียดที่มีต่อโครงสร้าง Low-Dimension.....	7
2.3 การประดิษฐ์ควอนตัมดอต.....	9
2.3.1 เทคนิคลิโทกราฟีและการกัดขึ้นรูปทางเคมี.....	9
2.3.2 การประดิษฐ์ควอนตัมดอตจากกลไกการก่อตัวขึ้นเอง.....	10
2.3.2.1 Thermodynamically-Limited Growth.....	10
2.3.2.2 Kinetically-Controlled Growth.....	13
2.4 การปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy: MBE).....	14
2.4.1 ระบบการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุล.....	15
2.4.2 กลไกการเกิดผลึกของการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุล.....	19
2.5 การสอบเทียบค่าอุณหภูมิของแผ่นฐานในระหว่างการปลูกผลึกด้วย RHEED.....	22
2.5.1 การสอบเทียบค่าอุณหภูมิจากการสลายตัวของออกไซด์ที่ผิว.....	22
2.5.2 การสอบเทียบค่าอุณหภูมิจากการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบ RHEED.....	23
2.6 การวัดค่าอัตราการปลูกผลึกจาก RHEED Oscillation.....	24
2.7 การสังเกตรูปแบบ RHEED ในการปลูกควอนตัมดอตจากกลไกการก่อตัวขึ้นเอง.....	27
2.8 การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์.....	28

บทที่	ช หน้า
2.9 เทคนิค Atomic Force Microscopy (AFM)	30
2.9.1 กลไกการเก็บข้อมูล	31
2.9.1.1 Contact mode	31
2.9.1.2 Non-Contact mode	32
2.9.1.3 Tapping mode	32
2.9.1.4 Force Modulation mode	33
3 การทดลอง	36
3.1 การเตรียมแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น	36
3.2 การเตรียมการในห้องปลูกผลึกก่อนการปลูกผลึก	37
3.3 การศึกษาอิทธิพลของชั้นแทรกอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์	38
3.4 การศึกษาอิทธิพลของชั้นกลบอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์	40
4 ผลการทดลองและการอภิปราย	42
4.1 การศึกษาอิทธิพลของชั้นแทรกอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์	42
4.2 การศึกษาอิทธิพลของชั้นกลบอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์	56
5 สรุปผลการทดลอง	61
6 ข้อเสนอแนะ	63
รายการอ้างอิง	64
ภาคผนวก	66
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	71

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	อุณหภูมิจุดระเหิดของสารประกอบ III-V ชนิดต่างๆ20
3.1	ค่าอัตราการปลูกของแกเลียมและอินเดียมตามค่าสัดส่วนของอินเดียมในชั้นผลึกบาง อินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์และเวลาที่ใช้ปลูกชั้นผลึกบางที่มีค่าความหนา 1 ถึง 4 ML.....39



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบวัสดุที่มีขนาดเป็นก้อนมวลสาร (Bulk) ท่อนำคลื่น (Waveguide) ควอนตัมดอต (Quantum dot) และ อะตอม.....	4
2.2 โครงสร้างและความหนาแน่นสถานะ (D.O.S.) ของ (ก) วัสดุที่มีขนาดเป็นก้อนมวลสาร (ข) ควอนตัมเวลล์ (ค) ควอนตัมไวร์ และ (ง) ควอนตัมดอตโดย L อยู่ในระดับ μm ในขณะที่ L_x , L_y และ L_z อยู่ในระดับ nm.....	5
2.3 วิวัฒนาการของค่ากระแสซีดีเริ่มต้นของการเปล่งแสงเลเซอร์ของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ.....	7
2.4 แบบจำลองการจัดเรียงอะตอมของการปลูกผลึกอพิแทกซ์ (ก) Lattice-matched และ Lattice-mismatched ที่มีความเครียดในลักษณะ (ข) compressive และ (ค) tensile.....	9
2.5 กระบวนการประดิษฐ์ควอนตัมดอตด้วยวิธีลิโทกราฟีและการกัดขึ้นรูปทางเคมี.....	10
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานต่อหน่วยปริมาตรของดอตและขนาดของดอต.....	11
2.7 สมดุลเฟสไดอะแกรมของการปลูกผลึกแบบ lattice-mismatched.....	12
2.8 กระบวนการเกิดควอนตัมดอตตามทฤษฎี Mean-field.....	14
2.9 ความหนาแน่นพลังงาน ณ ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างควอนตัมดอต.....	14
2.10 โครงสร้างของระบบปลูกผลึกจากลำโมเลกุล RIBER รุ่น 32P.....	16
2.11 โครงสร้างของระบบ RHEED.....	17
2.12 แผนภาพอธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลงความเข้มของอิเล็กตรอนในขณะที่ทำการปลูกผลึก... ..	18
2.13 แผนภาพความสัมพันธ์ของรูปแบบ RHEED และอุณหภูมิของแผ่นผลึก (100) แกลเลียมอาร์เซไนด์ อินเดียมฟอสไฟด์ และ อินเดียมอาเซไนด์ภายใต้ไอของ Dimer.....	19
2.14 ปฏิริยาของการเกิดผลึก GaAs ในกรณี Ga-As ₂ -(100) GaAs.....	21
2.15 ปฏิริยาของการเกิดผลึก GaAs ในกรณี Ga-As ₄ -(100) GaAs.....	22
2.16 รูปแบบของ RHEED ของผิวหน้าภายใต้บรรยากาศ As ₄ (ก) ที่อุณหภูมิ 580°C ออกไซด์เริ่มสลายตัวจากผิวหน้าแผ่นผลึกฐาน (ข) ที่อุณหภูมิประมาณ 630°C ออกไซด์สลายตัวจากผิวหน้าและ (ค) ผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานสะอาดหลังจากให้อุณหภูมิมีค่าคงที่ประมาณ 630°C เป็นเวลานาน 20-30 นาที.....	23
2.17 ตัวอย่างการปรับเปลี่ยนรูปแบบ RHEED ที่อุณหภูมิต่างๆ ของแกลเลียมอาร์เซไนด์.....	23

รูปที่

2.18	ตัวอย่างรูปแบบ RHEED ชนิด (2×4) ในทิศทาง $[1\bar{1}0]$ และ $[110]$ ของแคลเซียมอาร์เซไนด์ที่ค่าอุณหภูมิ 580°C และรูปแบบ RHEED ชนิด (2×2) หรือ c(4×4) ในทิศทาง $[1\bar{1}0]$ และ $[110]$ ของชั้นแคลเซียมอาร์เซไนด์บัพเฟอร์ที่อุณหภูมิ 460°C.....	24
2.19	(ก) แผนภาพแสดงลักษณะการเกิดความเข้มแสง RHEED Oscillation ในขณะการปลูกชั้นผลึก (ข) และ (ค) แผนภาพ RHEED แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มของ Specular Beam ในขณะการปลูกผลึกแคลเซียมอาร์เซไนด์และอินเดียมแคลเซียมอาร์เซไนด์.....	25
2.20	ตัวอย่างการเทียบวัดค่าความเร็วในการปลูกชั้นผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์จากสัญญาณความเข้มแสงของ RHEED Oscillation.....	26
2.21	รูปแบบ RHEED ในทิศทาง $[1\bar{1}0]$ (ก) เมื่อเริ่มต้นการปลูกอินเดียมอาร์เซไนด์ (ข) เมื่อผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์ก่อตัวเป็นควอนตัมดอต เมื่อปลูกได้ค่าความหนา 1.8 ML ที่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐาน 500°C และ (ค) การเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของสัญญาณ RHEED ที่วัดจากตำแหน่งในกรอบสีขาว.....	27
2.22	แผนภาพจำลองการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงที่เกิดจากการรวมตัว.....	28
2.23	แผนภาพระบบการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์.....	29
2.24	องค์ประกอบหลักของเครื่องมือ Scanning Probe Microscope.....	30
2.25	ลักษณะของแรงกระทำระหว่างอะตอมที่เกิดขึ้นในระยะห่างวัตถุต่างๆ กัน.....	31
2.26	การเคลื่อนที่ของเข็มปลายแหลมไปบนผิวงาน ในเทคนิคแบบ Non-contact mode (ก) และ Contact mode (ข).....	31
2.27	ลักษณะการสั่น (oscillation) คานที่มีเข็มติดอยู่.....	33
2.28	หลักการทำงานของ AFM ในแบบ Force Modulation.....	34

รูปที่

3.1	แผนภาพโครงสร้างอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอทที่มีการแทรกชั้นผลึกบางอินเดียม แกเลียมอาร์เซไนด์ได้ชั้นควอนตัมดอท ซึ่งมีการปลูกกลับด้วยชั้นแกเลียมอาร์เซไนด์ หนา 100 nm สำหรับการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์และมีการปลูกอินเดียมอาร์เซไนด์ ควอนตัมดอทบนผิวหน้าของแผ่นฐานสำหรับการวัด AFM.....	39
3.2	แผนภาพโครงสร้างอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอทที่มีการแทรกชั้นผลึกบางอินเดียม แกเลียมอาร์เซไนด์ได้ชั้นควอนตัมดอท และปลูกกลับด้วยอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์มี ความหนา 5 nm และแกเลียมอาร์เซไนด์หนา 100 nm สำหรับการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์...41	41
4.1	ภาพ AFM ขนาด 1000×1000 nm ² ของโครงสร้าง InAs ควอนตัมดอทที่มีการแทรก ชั้นผลึกบาง In _{0.1} Ga _{0.9} As ได้ชั้นควอนตัมดอท โดยมีค่าความหนาของชั้นผลึก In _{0.1} Ga _{0.9} As (ก) 0 ML (ข) 1 ML (ค) 2 ML (ง) 3 ML และ (จ) 4 ML.....	44
4.2	ภาพ AFM ขนาด 1000×1000 nm ² ของโครงสร้าง InAs ควอนตัมดอทที่มีการแทรก ชั้นผลึกบาง In _{0.2} Ga _{0.8} As ได้ชั้นควอนตัมดอท โดยมีค่าความหนาของชั้นผลึก In _{0.2} Ga _{0.8} As (ก) 0 ML (ข) 1ML (ค) 2ML (ง) 3ML และ (จ) 4ML.....	45
4.3	ภาพ AFM ขนาด 1000×1000 nm ² ของโครงสร้าง InAs ควอนตัมดอทที่มีการแทรก ชั้นผลึกบาง In _{0.3} Ga _{0.7} As ได้ชั้นควอนตัมดอท โดยมีค่าความหนาของชั้นผลึก In _{0.3} Ga _{0.7} As (ก) 0 ML (ข) 1ML (ค) 2ML (ง) 3ML (จ) 4ML.....	46
4.4	กราฟความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นของอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอทที่ ได้มีการแทรกชั้นผลึกบางอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ได้ชั้นควอนตัมดอท โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาและค่าสัดส่วนอินเดียมของชั้นผลึกบาง.....	47
4.5	ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 77 K ของโครงสร้าง InAs ควอนตัมดอทที่มีการ แทรกชั้นผลึกบาง In _{0.1} Ga _{0.9} As ได้ชั้นควอนตัมดอท.....	49
4.6	ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 77 K ของโครงสร้าง InAs ควอนตัมดอทที่มีการ แทรกชั้นผลึกบาง In _{0.2} Ga _{0.8} As ได้ชั้นควอนตัมดอท.....	50
4.7	ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 77 K ของโครงสร้าง InAs ควอนตัมดอทที่มีการ แทรกชั้นผลึกบาง In _{0.3} Ga _{0.7} As ได้ชั้นควอนตัมดอท.....	51

4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า FWHM จากการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของโครงสร้างอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอตที่มีการแทรกชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ได้ชั้นควอนตัมดอต และค่าความหนาของชั้นผลึกแทรกที่ค่าสัดส่วนอินเดียมของชั้นผลึกแทรกมีค่า 0.1, 0.2 และ 0.3.....52

4.9 กราฟการกระจายเชิงขนาดของโครงสร้าง InAs ควอนตัมดอตที่ไม่มีชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์แทรกได้ควอนตัมดอต.....52

4.10 กราฟการกระจายเชิงขนาดของโครงสร้าง InAs ควอนตัมดอต ที่มีชั้นผลึกบาง $In_{0.1}Ga_{0.9}As$ แทรกได้ชั้นควอนตัมดอต.....53

4.11 กราฟการกระจายเชิงขนาดของโครงสร้าง InAs ควอนตัมดอต ที่มีชั้นผลึกบาง $In_{0.2}Ga_{0.8}As$ แทรกได้ชั้นควอนตัมดอต.....54

4.12 กราฟการกระจายเชิงขนาดของโครงสร้าง InAs ควอนตัมดอต ที่มีชั้นผลึกบาง $In_{0.3}Ga_{0.7}As$ แทรกได้ชั้นควอนตัมดอต.....55

4.13 (ก) กราฟค่าความเครียดแบบดึงในแนวตั้ง ($\epsilon(zz)$) และค่าความเครียดแบบอัด ($\epsilon(\pi\pi)$) ในแนวระนาบของโครงสร้างควอนตัมดอตที่เพิ่มขึ้นจากการปลูกกลบด้วย (ข) ชั้นผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์ เปลี่ยนเป็น (ค) ชั้นผลึกอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์.....57

4.14 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ที่อุณหภูมิ 77 K ของโครงสร้าง InAs ควอนตัมดอต ที่มีการแทรกชั้นผลึกบาง $In_{0.1}Ga_{0.9}As$ ได้ชั้นควอนตัมดอต และมีการปลูกกลบด้วยชั้น $In_{0.1}Ga_{0.9}As$ มีค่าความหนา 5 nm.....58

4.15 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ที่อุณหภูมิ 77 K ของโครงสร้าง InAs ควอนตัมดอต ที่มีการแทรกชั้นผลึกบาง $In_{0.2}Ga_{0.8}As$ ได้ชั้นควอนตัมดอต และมีการปลูกกลบด้วยชั้น $In_{0.2}Ga_{0.8}As$ มีค่าความหนา 5 nm.....59

4.16 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ที่อุณหภูมิ 77 K ของโครงสร้าง InAs ควอนตัมดอต ที่มีการแทรกชั้นผลึกบาง $In_{0.3}Ga_{0.7}As$ ได้ชั้นควอนตัมดอต และมีการปลูกกลบด้วยชั้น $In_{0.3}Ga_{0.7}As$ มีค่าความหนา 5 nm.....60

บทที่ 1

บทนำ

โครงสร้างควอนตัมคอตจากกลไกการก่อตัวขึ้นเอง (Self-assembled quantum dots) มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (Optoelectronic Devices) [1] ที่ใช้ในระบบสื่อสารทางแสง ตัวอย่างเช่น เลเซอร์ (Laser) และ โฟโตดีเทคเตอร์ (Photodetector) เนื่องจากโครงสร้างควอนตัมคอตจากกลไกการก่อตัวขึ้นเองนี้มีจุดบกพร่องน้อย เนื่องจากไม่ได้ใช้กระบวนการกัดขึ้นรูปทางเคมี ทำให้ได้สิ่งประดิษฐ์ที่มีคุณภาพทางแสงที่ดี แต่วิธีการประดิษฐ์จากกลไกการก่อตัวขึ้นเองนั้นมีขีดจำกัดที่ไม่สามารถกำหนดตำแหน่งที่เกิดควอนตัมคอตได้ และความไม่สม่ำเสมอของขนาดควอนตัมคอตที่ได้ ดังนั้นการนำโครงสร้างควอนตัมคอตจากกลไกการก่อตัวขึ้นเองมาประยุกต์ใช้ในสิ่งประดิษฐ์เลเซอร์สารกึ่งตัวนำที่มีความต้องการค่าความหนาแน่นของควอนตัมคอตสูง เพื่อให้ได้เส้นทางแสงที่สูงกว่าค่าสูญเสีย (Loss) ในโครงสร้างให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ และการกระจายเชิงขนาดที่ต่ำ เพื่อให้เส้นทางแสงมีค่าสูงสุดที่ทำให้ได้เลเซอร์ที่มีค่ากระแสจิดเริ่มต้นการเปล่งแสงเลเซอร์ที่มีค่าต่ำที่สุด ดังนั้นการพัฒนาเพื่อตอบสนองความต้องการดังกล่าวในการเพิ่มค่าความหนาแน่นของควอนตัมคอต ได้แก่ โครงสร้างควอนตัมที่มีหลายชั้น (Multi-stack) ซึ่งจำนวนชั้นของควอนตัมนั้นถูกจำกัดด้วย Plastic relaxation ของแรงบีบอัด [2] และระยะ Cavity สำหรับในโครงสร้าง Vertical-Cavity Surface Emitting Lasers (VCSELs) ด้วยสาเหตุดังกล่าวข้างต้นนี้ เป็นเหตุทำให้การพัฒนาวิธีการเพิ่มค่าความหนาแน่นของควอนตัมคอตเป็นที่สนใจ ตัวอย่างได้แก่ การปลูกผลึกในช่วงอุณหภูมิ 535 ถึง 480°C ที่ทำให้ค่าความหนาแน่นของควอนตัมคอตเพิ่มขึ้นถึง 10 เท่า [3] แต่การกระจายเชิงขนาดของควอนตัมคอตที่ได้มีความไม่สม่ำเสมอ อันทำให้สมรรถนะของการเปล่งแสงจากโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่ลดลง สำหรับอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถเพิ่มค่าความหนาแน่นของควอนตัมคอต ได้แก่ การแทรกชั้นผลึกสารกึ่งตัวนำระหว่างชั้นผลึกควอนตัมคอตและชั้นเมตริกซ์ โดยชั้นผลึกที่แทรกนี้มีค่าคงตัวผลึกแตกต่างไปจากค่าของควอนตัมคอตและค่าของเมตริกซ์ อันเป็นที่มาของวิทยานิพนธ์นี้

สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของชั้นแทรกผลึกอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่มีต่อค่าความหนาแน่น และการกระจายเชิงขนาดของควอนตัมคอตจากอินเดียมอาร์เซไนด์ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์ด้วยวิธีการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุล รวมถึงคุณสมบัติทางแสงที่ได้จากการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของโครงสร้างควอนตัมคอตที่ปลูกกลับด้วยแกลเลียมอาร์เซไนด์และอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ โดยสาระเนื้อหาของวิทยานิพนธ์นี้ได้แก่ ในบทที่ 2 กล่าวถึงความรู้พื้นฐานของโครงสร้าง Low-dimension กลไกการเกิดผลึก เทคนิค

การปลูกผลึกอพิแทกซีจากล้าโมเลกุล การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ รวมถึงวิธีการวัดผิวหน้าด้วย Atomic force microscope ในบทที่ 3 กล่าวถึงวิธีการทดลอง ในบทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลองและการอภิปราย และในบทที่ 5 เป็นสรุปสำหรับวิทยานิพนธ์นี้ และบทที่ 6 เป็นข้อเสนอแนะ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐาน

สำหรับในบทนี้เป็นความรู้พื้นฐานทางโครงสร้างของควอนตัมดอต รวมถึงโครงสร้าง Low-dimension และคุณสมบัติต่างๆ ของโครงสร้าง เทคนิคประดิษฐ์โครงสร้างควอนตัมดอตด้วยวิธีลิโทกราฟีและการกัดขึ้นรูปทางเคมี (Lithography and chemical etching) เทคนิคการปลูกผลึกแบบกลไกการก่อตัวขึ้นเอง (Self-assembled growth) และทฤษฎีเกี่ยวกับควอนตัมดอตจากกลไกการก่อตัวขึ้นเอง (Self-assembled QDs) ความรู้พื้นฐานของการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy: MBE) รวมถึงวิธีการวัดทางวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ และวิธีการวัดผิวหน้าด้วยเทคนิค Atomic Force Microscopy (AFM)

2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับโครงสร้าง Low-Dimension

เมื่อเรานำอะตอมตั้งแต่ 2 อะตอมมาอยู่ใกล้กัน อะตอมเหล่านั้นมีปฏิกริยายึดเหนี่ยวกัน อันทำให้เกิดระดับพลังงานของอะตอมที่ยึดเหนี่ยวกันกลายเป็นแถบพลังงานที่มีความต่อเนื่องและมีจำนวนมากว่าหนึ่งแถบพลังงาน โดยมีแถบพลังงานต้องห้าม (Energy gap) คั่นกลางระหว่างแถบนำไฟฟ้า (Conduction band) และแถบวาเลนซ์ (Valence band) ที่อุณหภูมิ 0 K นั้นแถบคอนดักชันปราศจากอิเล็กตรอน ในขณะที่แถบวาเลนซ์มีอิเล็กตรอนอยู่เต็ม เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 0 K แถบพลังงานทั้งสองจะมีทั้งอิเล็กตรอนในแถบคอนดักชันและมีโฮลในแถบวาเลนซ์ ซึ่งพาหะทั้งสองชนิดทำหน้าที่เป็นพาหะนำไฟฟ้า การควบคุมการเคลื่อนที่ของพาหะในแถบพลังงานทั้งสองเป็นพื้นฐานสำคัญของการควบคุมการทำงานของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ โดยในโครงสร้าง Low-dimension พาหะถูกกักบริเวณในทิศทางใดทิศทางหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งทิศทางก็ได้ และช่วงความยาวของการกักพาหะเป็นอัตราส่วนของความยาวคลื่นเดอบรอกลี (de Broglie wavelength) แปรผกผันกับค่ามวลประสิทธิผลของพาหะ (Carrier effective mass, m^*) และค่าอุณหภูมิ (T) ดังสมการ [4]

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

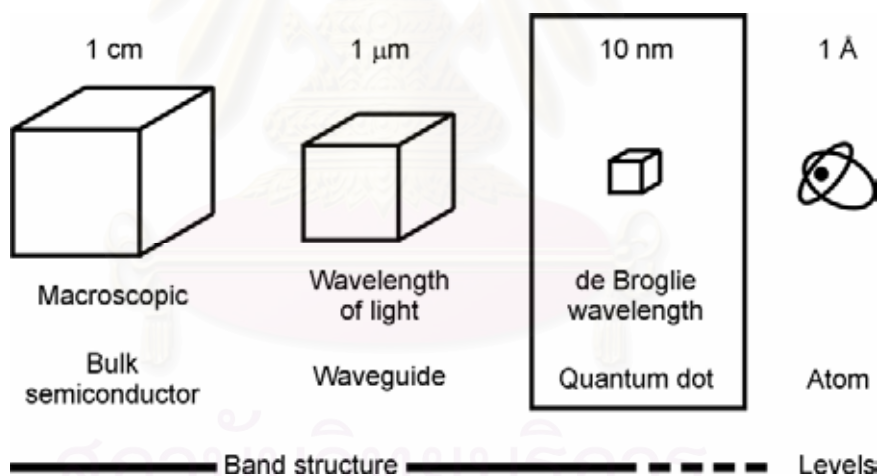
โดยที่ h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant)

p คือ โมเมนตัมของพาหะ (Carrier momentum)

k_B คือ ค่าคงตัวของโบลท์ซแมน (Boltzmann's constant)

ความยาวคลื่นเดอบรอยล์สำหรับสารกึ่งตัวนำประกอบหมู่ III-V มีค่าประมาณ 20 nm ที่อุณหภูมิ 300 K ผลจากการกักพาหะที่คาดว่าจะเป็ประโยชน์ต่อสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำนั้นมีมากมาย เช่นการเปลี่ยนสถานะระหว่างแถบพลังงาน (Intersubband transition) ภายในโครงสร้างซึ่งเป็นกลไกหลักสำคัญสำหรับโฟโตนิกเตอร์ในย่าน far-infrared ที่ความยาวคลื่นมากกว่า 9 μm [4]

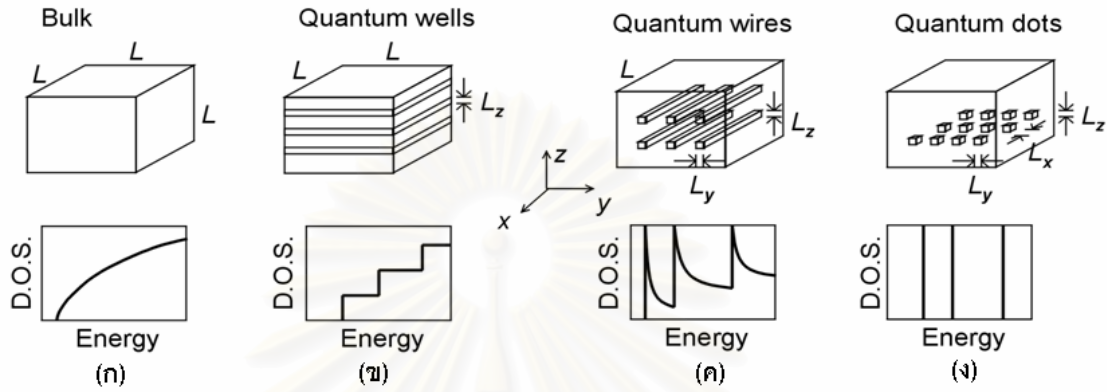
จากรูปที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบวัสดุที่มีขนาดเป็นก้อนมวลสาร (Bulk) ท่อนำคลื่น (Waveguide) ควอนตัมดอต (Quantum dot) และ อะตอม ซึ่งขนาดของโครงสร้างควอนตัมดอตมีค่าอยู่ในระดับของความยาวคลื่นเดอบรอยล์ สำหรับท่อนำคลื่นอยู่ในระดับไมโครเมตร ส่วนโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของวัสดุที่มีขนาดเป็นก้อนมวลสารกับอะตอมนั้นแตกต่างกัน โดยเราสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีแถบพลังงาน ส่วนอะตอมนั้นสามารถอธิบายด้วยแบบจำลองของระดับพลังงานแบบไม่ต่อเนื่อง



รูปที่ 2.1 การเปรียบเทียบวัสดุที่มีขนาดเป็นก้อนมวลสาร (Bulk) ท่อนำคลื่น (Waveguide) ควอนตัมดอต (Quantum dot) และ อะตอม

ความหนาแน่นของสถานะ (Density of states, D.O.S.) ของวัสดุที่มีขนาดเป็นก้อนมวลสาร และของโครงสร้าง Low-dimension ดังในรูปที่ 2.2 [5] ลักษณะแถบพลังงานที่แตกต่างกันระหว่างโครงสร้าง Low-dimension กับวัสดุรอบข้างที่ทำให้เกิดการกักพาหะขึ้น ในกรณีที่เป็นอิเล็กตรอนและโฮลถูกกักอยู่ในวัสดุชนิดเดียวกัน กำแพงศักย์สูงสุดนั้นถูกกำหนดจากแถบพลังงานที่ยกขึ้นในแถบคอนดักชันหรือแถบวาเลนซ์ [6] สำหรับในควอนตัมเวลล์ อิเล็กตรอนและโฮลสามารถเคลื่อนที่ได้

อิสระในระนาบ x-y ในควอนตัมไวร์อิเล็กตรอนและโฮลสามารถเคลื่อนที่ในทิศทาง x และในควอนตัมดอต พาหะถูกกักอยู่กับที่ ในควอนตัมดอตเป็นการกักพาหะใน 3 มิติทำให้เกิดการ quantization ของพลังงานดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ง)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างและความหนาแน่นสถานะ (D.O.S.) ของ (ก) วัสดุที่มีขนาดเป็นก้อนมวลสาร (ข) ควอนตัมเวลล์ (ค) ควอนตัมไวร์ และ (ง) ควอนตัมดอตโดย L อยู่ในระดับ μm ในขณะที่ L_x , L_y และ L_z อยู่ในระดับ nm [5]

ในกรณีของโครงสร้างในรูปที่ 2.2 (ก) พาหะสามารถเคลื่อนที่ได้อิสระทุกทิศทาง สำหรับควอนตัมเวลล์ในรูปที่ 2.2 (ข) พาหะถูกจำกัดทิศทางเคลื่อนไหวเฉพาะในแนวแกน z โดยสามารถเคลื่อนที่ได้อิสระในแนวระนาบ x - y สำหรับควอนตัมไวร์ในรูปที่ 2.2 (ค) พาหะถูกกักขังแบบ 2 มิติ จึงเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระเพียงมิติเดียว (แกน x) สำหรับควอนตัมดอตในรูปที่ 2.2 (ง) พาหะถูกกักขังใน 3 มิติ พาหะจึงไม่มีมิติหรือทิศทางที่เคลื่อนที่ได้เลย ระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนสามารถมีได้ในแต่ละโครงสร้างข้างต้นเป็นไปตามความสัมพันธ์

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

$$E_{\text{QW}} = E(k) = \frac{\hbar^2 k_{\parallel}^2}{2m^*} + E_{n,z} \quad \text{สำหรับ Quantum well} \quad (2.3)$$

$$E_{\text{QWR}} = E(k) = \frac{\hbar^2 k_{\perp}^2}{2m^*} + E_{m,y} + E_{n,z} \quad \text{สำหรับ Quantum wire} \quad (2.4)$$

$$E_{\text{QD}} = E_{l,x} + E_{m,y} + E_{n,z} \quad \text{สำหรับ Quantum dot} \quad (2.5)$$

โดย $k(k_x, k_y, k_z)$ คือ เวกเตอร์คลื่น (Wave vector) ของพาหะ

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

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

$$k_{\perp}^2 = k_z^2$$

$E_{l,x}$, $E_{m,y}$ และ $E_{n,z}$ คือ พลังงานที่เป็นฟังก์ชันของตัวเลขควอนตัม (Quantum number)

l , m , และ n

ความหนาแน่นของสถานะต่อหน่วยปริมาตรเป็นค่าจำนวนของสถานะ (Number of states) ระหว่างพลังงาน E และ $E + dE$ ของแต่ละโครงสร้างหาได้จาก [5]

$$D_{\text{bulk}}(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} E^{1/2} \quad (2.6)$$

$$D_{\text{QW}}(E) = \frac{m^*}{\pi \hbar^2} \sum_n \Theta(E - E_{n,z}) \quad (2.7)$$

$$D_{\text{QWR}}(E) = \frac{N_{\text{wi}}}{\pi} \frac{\sqrt{2m^*}}{\hbar} \sum_{m, n} \frac{1}{\sqrt{E - E_{m,y} - E_{n,z}}} \quad (2.8)$$

$$D_{\text{QD}}(E) = 2N_{\text{D}} \sum_{l, m, n} \delta(E - E_{l,x} - E_{m,y} - E_{n,z}) \quad (2.9)$$

โดย Θ คือ Heaviside's unit step function

N_{wi} คือ Area density ของควอนตัมไวร์

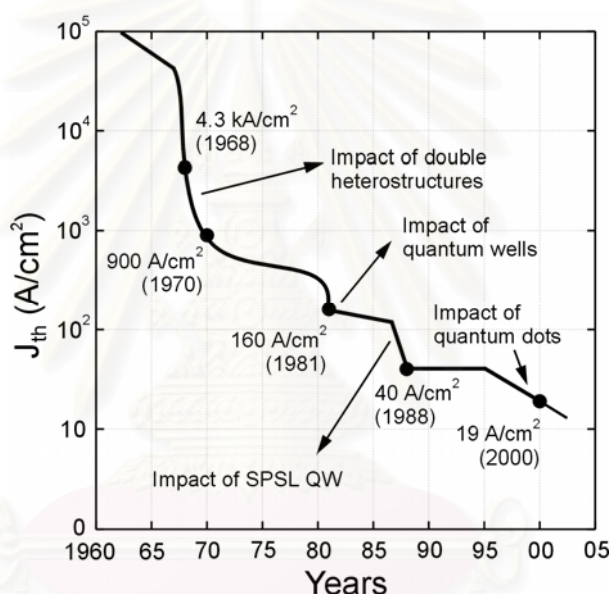
δ คือ เดลต้าฟังก์ชัน (Delta function)

N_{D} คือ Volume density ของควอนตัมดอต

ในกรณีของควอนตัมดอต ความหนาแน่นของสถานะมีลักษณะเป็นเดลต้าฟังก์ชัน ซึ่งคล้ายกับระดับพลังงานไม่ต่อเนื่องของอะตอม ในช่วงต้นที่ได้กล่าวมานั้นเป็นกรณีอุดมคติ แต่ในความจริง

นั้นอาจแตกต่างกันออกไป ซึ่งทำให้โครงสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโครงสร้างควอนตัมดอตแตกต่างกันไปจากทฤษฎีที่ได้กล่าวมาแล้ว

เมื่อโครงสร้างนาโนเปลี่ยนจาก Bulk เป็นโครงสร้าง Low-dimension ดังในรูปที่ 2.2 การเปลี่ยนค่าความหนาแน่นของสถานะมีผลต่อคุณสมบัติพื้นฐานของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่นำโครงสร้างนาโนมาประยุกต์ใช้ เช่น เลเซอร์สารกึ่งตัวนำที่นำควอนตัมดอตมาประยุกต์ใช้มีค่ากระแสขีดเริ่มต้นของการเปล่งแสงเลเซอร์ (Threshold current) ต่ำ เนื่องจากการมีความหนาแน่นของสถานะเป็นเคลต้าฟังก์ชัน จากรูปที่ 2.3 แสดงวิวัฒนาการของค่ากระแสขีดเริ่มต้นของการเปล่งแสงเลเซอร์ของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อนำโครงสร้าง Low-dimension มาประยุกต์ใช้



รูปที่ 2.3 วิวัฒนาการของค่ากระแสขีดเริ่มต้นของการเปล่งแสงเลเซอร์ของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ [7]

2.2 อิทธิพลของความเครียดที่มีต่อโครงสร้าง Low-Dimension

ควอนตัมดอตจากกลไกการก่อตัวขึ้นเองเกิดจากการปลูกผลึกที่มีค่าคงตัวผลึก (Lattice constant) แตกต่างไปจากค่าคงตัวผลึกของแผ่นฐาน ซึ่งทำให้เกิดการไม่เข้ากันของค่าคงตัวผลึก (Lattice mismatched) ดังนั้นความเข้าใจเกี่ยวกับอิทธิพลของความเครียดที่มีต่อคุณสมบัติของวัสดุจึงเป็นสิ่งสำคัญ รูปที่ 2.4 แสดงแบบจำลองของการจัดเรียงอะตอมของแผ่นฐาน (อะตอมที่บ) และอะตอมของชั้นที่ต้องการปลูก (อะตอมโปร่ง) ก่อน (ภาพบน) และหลัง (ภาพล่าง) ของการปลูกผลึกอพิแทกซี ในกรณีของการปลูกผลึกอพิแทกซีแบบ Lattice-matched ในรูปที่ 2.4 (ก) วัสดุที่ปลูกมีค่าคงตัวผลึกเท่ากับหรือเกือบเท่ากับค่าคงตัวผลึกของแผ่นฐาน เช่น AlGaAs/GaAs ในการปลูกผลึกที่ต้องการให้เกิดความเค้นหรือความเครียดขึ้น เราสามารถทำได้ด้วยการปลูกผลึกที่มีค่า

คงตัวผลึกแตกต่างกันไปจากค่าคงตัวผลึกของแผ่นผลึกฐาน ความเครียดแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือแบบอัด (Compressive) และแบบดึง (Tensile) ในระหว่างการปลูกผลึก อะตอมที่ปลูกจะมีค่าคงที่โครงผลึกเท่ากับแผ่นฐานดังรูปที่ 2.4 (ข) และ (ค) เงื่อนไขนี้ทำให้เกิดแรงเครียดในระนาบ (In-plane strain) ϵ_{\parallel} ซึ่งมีค่าตามความสัมพันธ์

$$\epsilon_{\parallel} = \epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \frac{(a_s - a_c)}{a_c} \quad (2.10)$$

โดย a_c คือ ค่าคงตัวผลึกของวัสดุที่ปลูก
 a_s คือ ค่าคงตัวผลึกของแผ่นฐาน

ส่วนแรงเครียดในทิศตั้งฉากกับระนาบที่ปลูกหาได้จาก

$$\epsilon_{\perp} = \epsilon_{zz} = -\left(\frac{2\sigma}{1-\sigma}\right)\epsilon_{\parallel} \quad (2.11)$$

โดย σ คือ Poisson's ratio

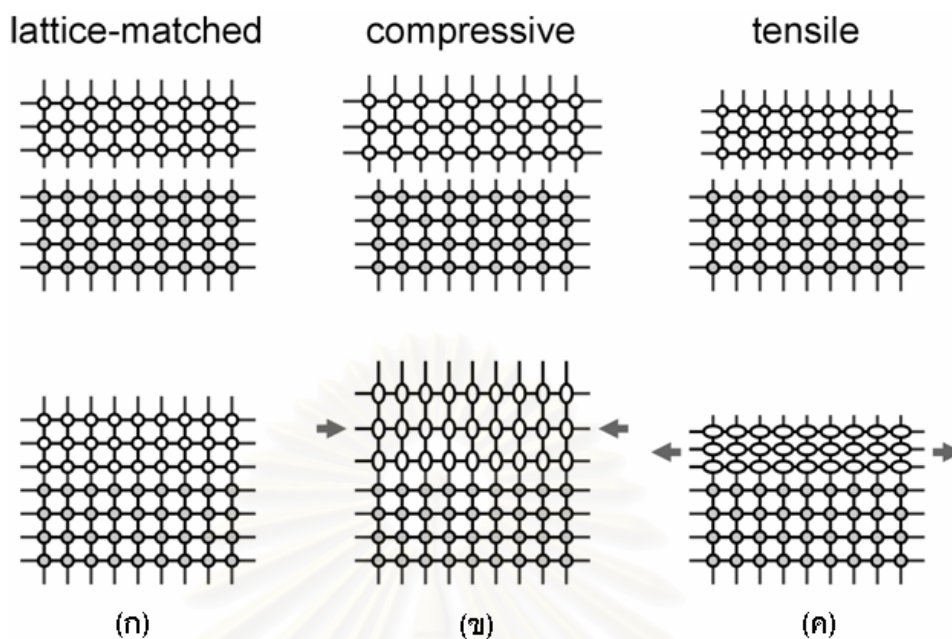
แรงเครียดรวม (Uniaxial strain), ϵ_{ax} สามารถหาได้จาก

$$\epsilon_{ax} = \epsilon_{\perp} - \epsilon_{\parallel} \quad (2.12)$$

และแรง hydrostatic, $\epsilon_{vol} (= \frac{\Delta V}{V})$ หาได้จาก

$$\epsilon_{vol} = \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz} \approx \epsilon_{\parallel} \quad (2.13)$$

แรงเครียดรวมและแรง hydrostatic จะมีผลต่อความหนาวิกฤติ (critical thickness) ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการปลูกควอนตัมดอตจากกลไกการก่อตัวขึ้นเอง



รูปที่ 2.4 แบบจำลองการจัดเรียงอะตอมของการปลูกผลึกอิมพิแทกซ์ (ก) Lattice-matched, และ Lattice-mismatched ที่มีความเครียดในลักษณะ (ข) compressive และ (ค) tensile

2.3 การประดิษฐ์ควอนตัมดอต

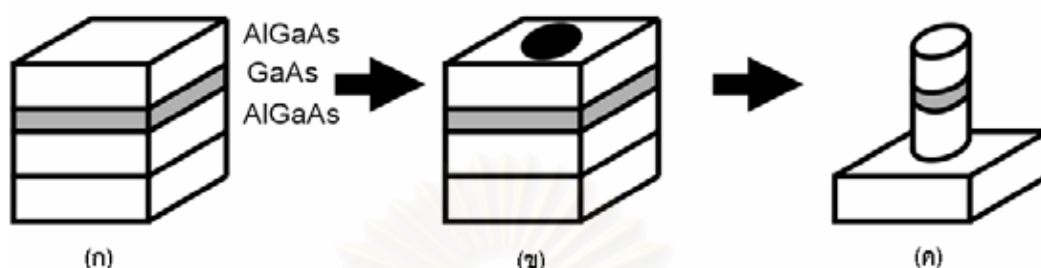
วิธีการประดิษฐ์โครงสร้างควอนตัมดอตนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กระบวนการ ได้แก่ เทคนิคลิโทกราฟี (Lithography) และการกัดขึ้นรูปทางเคมี (Chemical etching) และการปลูกผลึกควอนตัมดอตจากกลไกการก่อตัวขึ้นเอง

2.3.1 เทคนิคลิโทกราฟีและการกัดขึ้นรูปทางเคมี

การประดิษฐ์ควอนตัมดอตด้วยเทคนิคลิโทกราฟีและการกัดขึ้นรูปทางเคมีสามารถอธิบายได้จากรูปที่ 2.5 โดยกระบวนการประดิษฐ์ควอนตัมดอตนี้เริ่มต้นจากการปลูกผลึกโครงสร้างควอนตัมเวลด์จากวิธีการปลูกผลึกอิมพิแทกซ์ดังรูปที่ 2.5 (ก) จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการลิโทกราฟีด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron beam lithography) หรือกระบวนการลิโทกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ (x-ray lithography) เนื่องจากต้องการความละเอียดของรูปแบบสูง (High resolution) เพื่อให้ได้รูปแบบ (รูปที่ 2.5 (ข)) สุดท้ายทำการกัดขึ้นรูปทางเคมีเพื่อให้ได้โครงสร้างควอนตัมดอตดังรูปที่ 2.5 (ค)

อย่างไรก็ตามโครงสร้างควอนตัมดอตที่ได้วิธีการนี้ พื้นผิวที่ได้นั้นถูกทำลายระหว่างกระบวนการกัดขึ้นรูปทางเคมีทำให้เกิดตำหนิ (Damage) หรือจุดบกพร่อง (Defect) ขึ้น อันทำให้ไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เชิงแสงได้ นอกจากนี้เทคนิคดังกล่าวยังมีข้อจำกัดเรื่องขนาดของ

ควอนตัมดอทไม่สามารถทำให้เล็กลงไปกว่าค่าความละเอียดของกระบวนการทำลิโทกราฟีได้ ดังนั้นการสร้างควอนตัมดอทจากวิธีนี้ จึงไม่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน



รูปที่ 2.5 กระบวนการประดิษฐ์ควอนตัมดอทด้วยวิธีลิโทกราฟีและการก่อดินรูปทางเคมี

2.3.2 การประดิษฐ์ควอนตัมดอทจากกลไกการก่อดินรูปตัวเอง

เพื่อให้ได้ควอนตัมดอทที่มีความสมบูรณ์และความสม่ำเสมอมากยิ่งขึ้น หลักการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการประดิษฐ์ควอนตัมดอทจากกลไกการก่อดินรูปตัวเองเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึง โดยเนื้อหาสาระในหัวข้อนี้เป็นการอธิบายหลักการควบคุมการปลูกผลึกแบบ Thermodynamically-limited growth และ Kinetically-controlled growth

2.3.2.1 Thermodynamically-Limited Growth

ทฤษฎีเทอร์โมไดนามิกของการปลูกผลึกแบบกลไกการก่อดินรูปตัวเองถูกนำเสนอโดย Shchukin et al. [8] โดยอาศัยหลักการ Energy minimization และ สมดุลของแรงเครียดภายในควอนตัมดอท

ถ้าพิจารณาพลังงานรวมของควอนตัมดอทเดี่ยว E_{island} สามารถเขียนเป็นสมการได้คือ

$$E_{\text{island}} = E_{\text{elastic}} + E_{\text{surf}} + E_{\text{edge}} \quad (2.14)$$

โดย E_{elastic} คือค่าพลังงาน Elastic strain

E_{surf} คือค่าพลังงานผิวและ

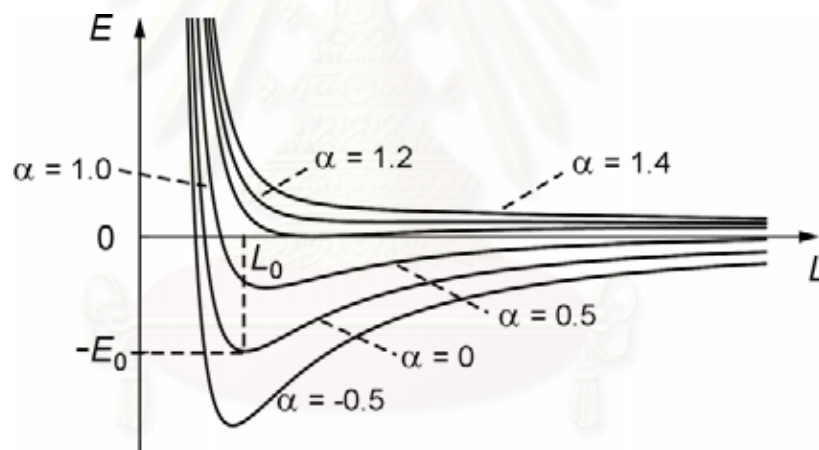
E_{edge} คือค่าพลังงานที่ขอบของดอท

สมมติให้ดอทมีรูปร่างทรงปิรามิดที่มีฐานเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสกว้าง L พลังงานต่อหน่วยปริมาตรสามารถหาได้จาก

$$E(L) = E_0 \left[-2 \left(\frac{L_0}{L} \right)^2 \ln \left(\frac{e^{1/2} L}{L_0} \right) + \frac{2\alpha}{e^{1/2}} \left(\frac{L_0}{L} \right) \right] \quad (2.15)$$

โดย α คือ ตัวแปรที่เป็นฟังก์ชันของพลังงานผิวและพลังงาน Elastic strain
 E_0 คือ Characteristic energy
 L_0 คือ Characteristic length

ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของคอตต่อหน่วยปริมาตรในสมการที่ (2.15) ดังในรูปที่ 2.6 โดย α มีค่าต่างๆ เนื่องจากไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างรูปทรงของคอตกับพลังงานทำให้ไม่สามารถหาค่าที่แน่ชัดของ α , E_0 และ L_0 ได้ อย่างไรก็ตาม สามารถกล่าวได้ว่าขนาดของคอตที่เสถียรที่สุด L_{opt} นั้นสอดคล้องกับค่าต่ำสุดของ $E(L)$, $E_{min}(L) = E(L_{opt}) < 0$



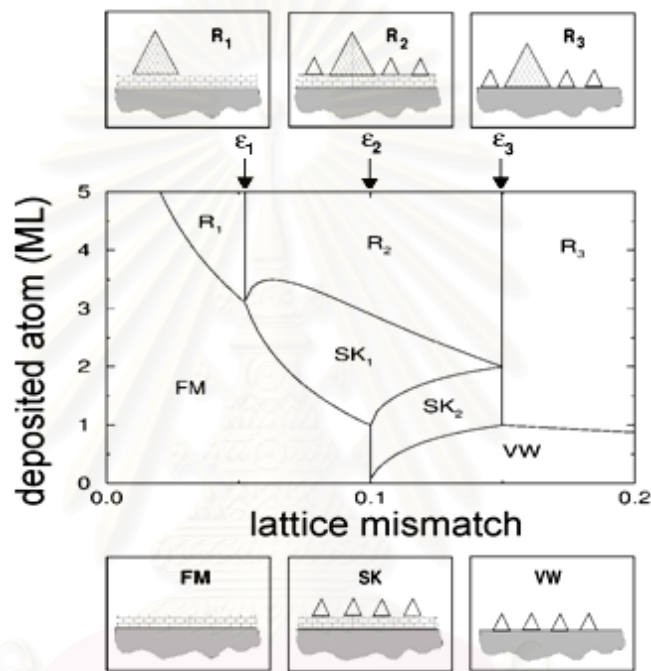
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานต่อหน่วยปริมาตรของคอตและขนาดของคอต [9]

ในการปลูกควอนตัมคอตจำเป็นต้องมีชั้น Wetting ดังนั้นค่าต่ำสุดของพลังงานของระบบจะต้องรวมพลังงานของชั้น Wetting ด้วย ดังนั้นพลังงานรวมต่อหน่วยเซลล์ (Unit cell) ของระบบคือ

$$E = E_{WL}(Q_1) + Q_2 E_{island}(Q_2) + (Q - Q_1 - Q_2) E_{rip} \quad (2.16)$$

โดย E_{WL} คือ พลังงานของชั้น Wetting

จากสมการที่ (2.16) ปริมาณของสารที่ใช้ในการปลูกเท่ากับ Q monolayer เป็นส่วนของชั้น Wetting Q_1 monolayer และของเกาะ Q_2 monolayer ส่วนที่เหลือเป็นส่วนคอตที่สมบูรณ์ ซึ่งพลังงาน E_{np} หาได้จากการหาค่าลิมิต $L \rightarrow \infty$ การคำนวณหาค่าต่ำสุดของพลังงานในสมการที่ (2.16) ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า Q_1 และ Q_2 อีกวิธีหนึ่งสามารถหาได้จากสมดุลเฟสไดอะแกรมของระบบ การปลูกผลึกแบบ Lattice-mismatched เป็นฟังก์ชันของ Lattice mismatch ϵ_0 และจำนวนวัสดุที่ปลูก, Q ดังในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 สมดุลเฟสไดอะแกรมของการปลูกผลึกแบบ Lattice-mismatched [10]

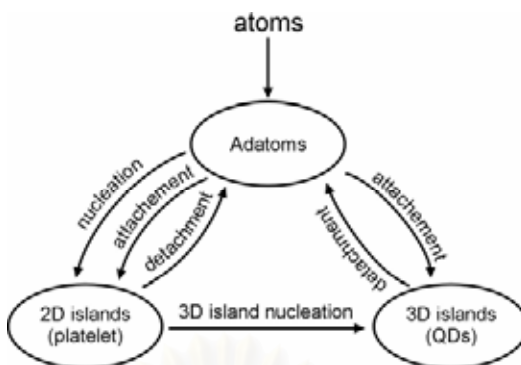
ผลที่ได้จากการปลูกผลึกในระบบ Lattice-mismatched ในรูปที่ 2.7 ขึ้นกับปริมาณอะตอมที่ปลูกและค่า Lattice mismatch ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น 7 สถานะ ดังนี้คือ

- 1) สถานะ FM (Frank van der Merve) ถ้าปริมาณอะตอมที่ปลูกมีค่าน้อยกว่าค่าวิกฤต H_{c1} ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า Lattice mismatch และมี Lattice mismatch อยู่ในช่วง 0 ถึง ϵ_2 โดยเป็นการปลูกผลึกโหมด Frank van der Merve ทำให้เกิดผลึกในระนาบแบบ 2 มิติขึ้น
- 2) สถานะ R_1 พิจารณาค่า Lattice mismatch อยู่ในช่วง 0 ถึง ϵ_1 เมื่อปลูกผลึกเพิ่มจนอะตอมมีปริมาณเกินกว่าที่จะคงสถานะ FM ทำให้เกิดการก่อตัวในสถานะ R_1 ทำให้เกิดเป็นชั้น Wetting และเกิดเกาะที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

- 3) สถานะ SK_1 (Stranski Krastanow) พิจารณาค่า Lattice mismatch อยู่ในช่วง ϵ_1 ถึง ϵ_2 เมื่อปริมาณอะตอมเพิ่มขึ้นกว่าที่จะคงสถานะ FM ทำให้เกิดการก่อตัวเป็นชั้น Wetting และมีเกาะที่มีขนาดใกล้เคียงกันเกิดขึ้น
 - 4) สถานะ R_2 เป็นสถานะเมื่อปริมาณอะตอมเพิ่มขึ้นจากสถานะ SK_1 จึงทำให้เกิดเป็นชั้น Wetting และมีเกาะที่มีขนาดใกล้เคียงกันพร้อมทั้งมีเกาะที่มีขนาดต่างกันเกิดขึ้น
 - 5) สถานะ VW เป็นสถานะที่ปลูกผลึก โดยมีค่า Lattice mismatch มากกว่า ϵ_2 ซึ่งเป็นการปลูกผลึกในโหมด Volmer Weber ทำให้เกิดเป็นเกาะที่มีขนาดใกล้เคียงกันแต่ไม่มีชั้น Wetting
 - 6) สถานะ SK_2 เป็นสถานะที่ปลูกผลึกเพิ่มต่อจากสถานะ VW และมีค่า Lattice mismatch อยู่ในช่วง ϵ_2 ถึง ϵ_3 ทำให้เกิดเป็นชั้น Wetting เพิ่มขึ้นมานอกเหนือจากเกาะ
 - 7) สถานะ R_3 เป็นสถานะที่ปลูกผลึกเพิ่มต่อจากสถานะ VW และมีค่า Lattice mismatch มากกว่า ϵ_3 ทำให้เกิดเป็นเกาะที่มีขนาดต่างกันมากและไม่มีชั้น Wetting
- ดังนั้นการปลูกควอนตัมคอตจากกลไกการก่อตัวขึ้นเองนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงปริมาณผลึกที่ปลูก และค่า Lattice mismatch ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานะที่เราต้องปลูกนั่นเอง

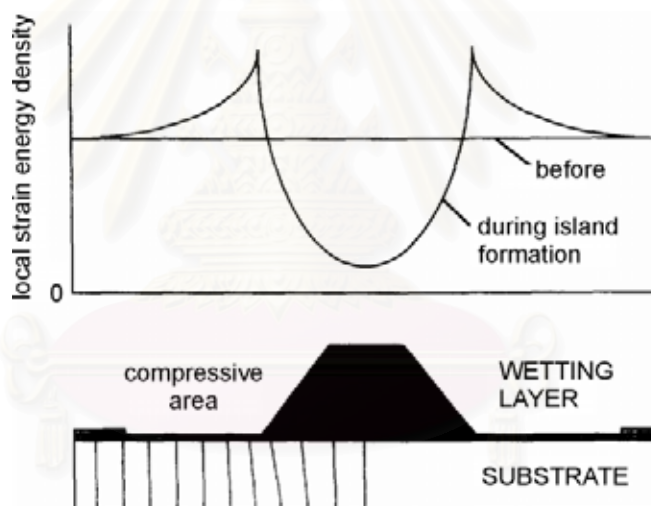
2.3.2.2 Kinetically-Controlled Growth

อีกวิธีหนึ่งที่สามารถใช้ในการพยากรณ์การเกิดของควอนตัมคอตได้คือ Kinetic theory ซึ่งเป็นการคำนวณเชิงเวลาเช่นเดียวกับ Nucleation theory, Kinetic Monte Carlo simulation ในหัวข้อนี้ใช้ทฤษฎี Mean-field จากรูปที่ 2.8 เริ่มต้นจากเมื่ออะตอมแพร่มาถึงที่ผิวกลายเป็น adatoms จำนวนของ adatoms เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงต้นเกิดการก่อตัวเป็นเกาะ 2 มิติขึ้น โดยที่อะตอมบางส่วนภายในเกาะแบบ 2 มิติ สามารถหลุดออกมาแล้วกลายเป็น adatoms ได้อีกครั้ง ถ้าขนาดเกาะน้อยกว่าค่าวิกฤต แต่เมื่อปลูกผลึกต่อไป เกาะแบบ 2 มิติจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากมี adatoms มาเกาะเพิ่มขึ้น ถ้าขนาดของเกาะ 2 มิติมีขนาดเกินกว่าค่าลิมิต การปลูกจะเปลี่ยนจาก 2 มิติเป็น 3 มิติ adatoms สามารถเกาะเพิ่มหรือหลุดออกในอัตราที่สอดคล้องกับการกระจายพลังงานของระบบ



รูปที่ 2.8 กระบวนการเกิดควอนตัมดอตตามทฤษฎี Mean-field [11]

ขีดจำกัด (Limitation) ของขนาดของควอนตัมดอตสามารถอธิบายโดย Self-limiting growth โดยศึกษา Strain energy รอบๆ เกาะ 3 มิติระหว่างการก่อตัวของเกาะดังในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ความหนาแน่นพลังงาน ณ ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างควอนตัมดอต [11]

ความหนาแน่นพลังงานเกิดขึ้นจากการก่อตัวของควอนตัมดอต ส่งผลต่อ Surface chemical potential ค่าพลังงานต่ำสุดอยู่ที่ยอดของเกาะซึ่งมีความเครียดน้อยที่สุด และมีค่ามากที่สุดที่ขอบของเกาะเพราะมีความเครียดแบบอัดสูง แรงอัดถูกส่งต่อไปยังแผ่นฐานก่อให้เกิดการ Misfit ระหว่างแผ่นฐานและชั้น Wetting รอบๆ เกาะ จึงเกิดเป็นกำแพงศักย์รอบดอตและเกิดเป็น โชนที่ไม่เหมาะสมสำหรับการก่อตัวของ adatoms

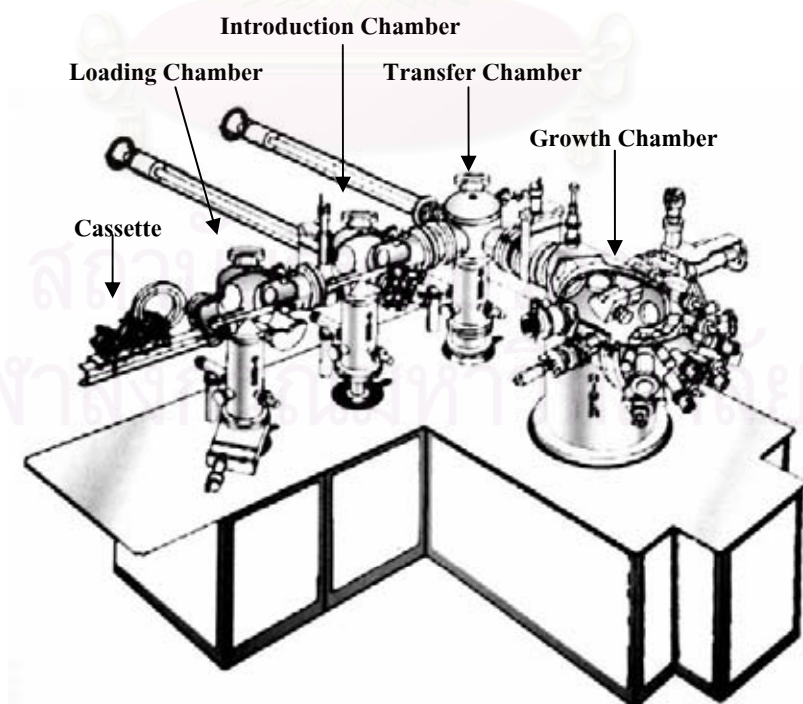
2.4 การปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy: MBE)

การปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุลหรือ MBE เป็นเทคนิคการปลูกชั้นผลึกสารประกอบกึ่งตัวนำบนแผ่นฐาน (Substrate) ที่เป็นผลึกเดี่ยว (Single Crystal) โดยการพ่นลำโมเลกุลของก๊าซหรืออะตอมของธาตุที่เป็นวัตถุดิบลงบนผิวหน้าแผ่นผลึกฐาน ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบของสารประกอบสารกึ่งตัวนำ โมเลกุลหรือก๊าซของอะตอมเหล่านั้นได้จากการระเหยหรือระเหิด (Evaporation) วัสดุที่มีธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารประกอบ (Constituent species) ภายใต้สภาวะสุญญากาศระดับสูงพิเศษ (Ultra-high Vacuum) ปฏิกิริยาของการเกิดเป็นสารประกอบนี้เกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน ค่าอัตราส่วนของสารประกอบและคุณสมบัติของชั้นผลึกอพิแทกซีที่ปลูกได้นั้นขึ้นอยู่กับเงื่อนไขและตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการปลูกผลึก ได้แก่ ค่าอัตราส่วนค่าความดันไอของลำโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบ ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูก ฯลฯ เป็นต้น นอกจากนี้อัตราการผลิตนี้ขึ้นอยู่กับค่าความดันไอขององค์ประกอบที่มีคุณสมบัติการเกาะติด (Impinging) ผิวหน้าแผ่นผลึกฐาน สำหรับข้อดีของการปลูกผลึกอพิแทกซีด้วยวิธี MBE ได้แก่ การเตรียมผิวแผ่นผลึกฐานสามารถทำได้ง่าย โดยวิธีการทำความสะอาดด้วยความร้อน (Thermal cleaning) ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ความสามารถในการตรวจสอบ (Monitoring) โครงสร้างผิว (Surface structure) ที่สามารถกระทำได้ตลอดเวลาตั้งแต่ก่อนการเริ่มต้นการปลูกผลึกจนถึงสิ้นสุดกระบวนการปลูกผลึก นอกจากนี้การปลูกผลึกอพิแทกซีด้วยวิธี MBE ที่ดำเนินการในระบบสุญญากาศระดับสูงพิเศษทำให้ผลึกที่ปลูกได้นั้นมีความบริสุทธิ์สูงกว่าวิธีการอื่นๆ เนื่องจากก๊าซต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อคุณภาพผลึก ได้แก่ H_2O , O_2 , CO และ CO_2 เป็นต้น มีปริมาณที่ต่ำมากๆ ในสภาวะสุญญากาศระดับสูงพิเศษ จึงให้เราสามารถควบคุมคุณภาพของผลึกที่ปลูกได้เป็นอย่างดี

2.4.1 ระบบการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล

ระบบการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล (MBE) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นระบบของบริษัท RIBER รุ่น 32P ซึ่งมีลักษณะเป็นโมดูล (Module) โดยประกอบด้วยส่วนห้องบรรจุแผ่นผลึกฐาน (Load lock Chamber) ส่วนห้องเตรียมแผ่นฐาน (Introduction Chamber) ส่วนห้องเคลื่อนย้าย (Transfer Chamber) และส่วนห้องปลูกผลึก (Growth Chamber) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 โมดูลแต่ละส่วนที่ต่อกันนี้มีประตูเปิด/ปิด (Gate Valve) ต่อชั้นระหว่างโมดูล เพื่อรักษาสภาวะสุญญากาศในแต่ละส่วนให้เป็นอิสระจากกัน และสามารถให้ตัวพาหะใส่แผ่นผลึกฐาน (Cassette) ที่มีตัวรองแผ่นผลึกฐาน (Substrate holder) ผ่านเข้าออกจากโมดูลส่วนหนึ่งไปยังโมดูลอีกส่วนหนึ่ง ส่วนห้องบรรจุชุดแผ่นผลึกฐานเป็นส่วนติดต่อกับภายนอกที่มีสภาวะความดันบรรยากาศปกติ ซึ่งห้องนี้มีปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) ติดตั้งอยู่จำนวน 2 ชุด คือ ปั๊มไดอะแฟรม (Diaphragm Pump) และ ปั๊มดูดซับ (Sorption Pump) เพื่อสร้างสภาวะสุญญากาศระดับปานกลาง (10^{-4} Torr) ในการเคลื่อนย้าย

รถใส่ชุดแผ่นฐานที่มีตัวรองแผ่นฐานผ่านเข้าหรือออกระหว่างส่วนห้องบรรจุแผ่นฐานและส่วนห้องเตรียมแผ่นฐาน โดยสามารถปรับสภาวะของห้องจากสุญญากาศสู่สภาวะบรรยากาศปกติด้วยการเติมก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ส่วนห้องเตรียมแผ่นฐานเป็นส่วนที่ใช้ในการให้ความร้อนกับแผ่นผลึกฐานก่อนการปลูกผลึก เพื่อไล่ความชื้นและขจัดออกไซด์ที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานก่อนการนำแผ่นผลึกฐานเข้าสู่ห้องปลูกผลึก ส่วนห้องเคลื่อนย้ายเป็นส่วนที่ใช้ในการลำเลียงตัวรองแผ่นฐานเข้าหรือออกจากส่วนห้องปลูกผลึก และส่วนห้องปลูกผลึกเป็นส่วนที่ดำเนินการกระบวนการปลูกผลึกอพิแทกซี ซึ่งมีไนโตรเจนเหลวไหลผ่านผนังห้อง เพื่อทำหน้าที่หล่อเย็นระบายความร้อนที่เกิดจาก Effusion Cell ให้แก่ห้องปลูกผลึก รวมถึงทำให้สภาวะสุญญากาศในห้องปลูกผลึกดีขึ้น เนื่องจากความเย็นของไนโตรเจนเหลวส่งผลให้มวลของบรรยากาศภายในมีความหนาแน่นมากขึ้น ทำให้ระบบปั๊มสุญญากาศสามารถทำงานได้ดียิ่งขึ้น โดยในส่วนห้องเตรียมแผ่นผลึกฐาน ส่วนห้องเคลื่อนย้าย และส่วนห้องปลูกผลึกมีปั๊มสุญญากาศระดับสูงอยู่จำนวน 2 ชุด คือ ปั๊มไอออน (Ion Pump) และปั๊มไททานเนียมซับลิเมชัน (Ti sublimation Pump) สำหรับวัตถุดิบที่ใช้ในระบบการปลูกผลึกอพิแทกซีจากล้าโมเลกุลของงานวิจัยนี้ ได้แก่ แกลเลียม (Gallium : Ga) อลูมิเนียม (Aluminium : Al) อินเดียม (Indium : In) อาร์เซนิก (Arsenic : As) ฟอสฟอรัส (Phosphorus : P) (ได้จากการสลายตัวของแกลเลียมฟอสไฟด์ (Gallium Phosphide : GaP) ใน Knudsen cell ที่มี Ga-trapping Cap) ซิลิคอน (Silicon : Si) (สารเจือปนชนิดเอ็น (n-type dopant)) และ แมกนีเซียม (Magnesium : Mg) (สารเจือปนชนิดพี (p-type dopant))

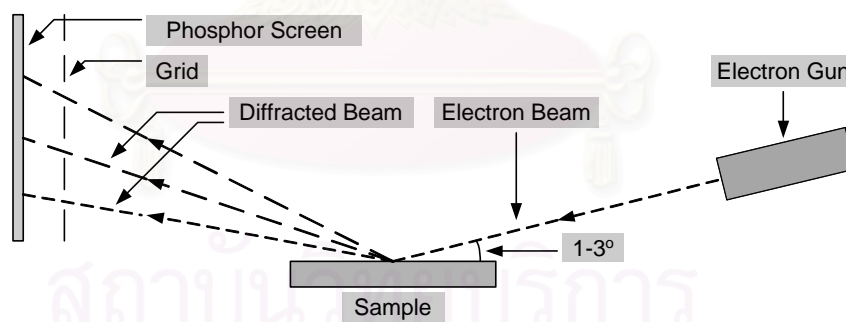


รูปที่ 2.10 โครงสร้างของระบบปลูกผลึกจากล้าโมเลกุล RIBER รุ่น 32P

นอกจากนี้ข้อเด่นของระบบ MBE ที่เหนือกว่าวิธีการปลูกผลึกอพิเทกซ์วิธีอื่นๆ ในเชิงเทคนิคก็คือสามารถติดตั้งอุปกรณ์วิเคราะห์ต่างๆ เข้ากับระบบได้ ทำให้มีความต่อเนื่องในการตรวจสอบ วิเคราะห์ และมีความสะดวก ซึ่งเหมาะสมสำหรับการวิจัยและการผลิตเชิงพาณิชย์ อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่

เครื่องวิเคราะห์มวล (Quadrupole mass spectrometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของอนุภาคที่เป็นก๊าซภายในส่วนห้องปลูกผลึก ซึ่งทำให้เราสามารถรู้สภาพบรรยากาศภายในส่วนห้องปลูกผลึก นอกจากนี้ยังสามารถใช้วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ (Composition) ของสารประกอบในขณะที่ทำการปลูกผลึกได้เช่นกัน

ระบบสร้างแผนภาพที่ได้จากการสะท้อนของการหักเหลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง (Reflection High Energy Electron Diffraction หรือ RHEED) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และตรวจสอบโครงสร้างผิว (Surface structure) โดยข้อมูลที่ได้จาก RHEED นี้บ่งบอกรูปแบบของลักษณะโครงสร้างเชิงไมโคร (Microstructure) และความเรียบของผิว ซึ่งลักษณะรูปแบบที่ได้จากรูปแบบ RHEED นี้ขึ้นกับลักษณะการเรียงตัวของอะตอมไปในลักษณะ 3 มิติ ทำให้รูปแบบ RHEED ที่ปรากฏขึ้นแตกต่างกันไป โดยลำอิเล็กตรอนมีทิศทางไปยังแผ่นผลึกฐานทำมุม 1-3 องศา และใช้พลังงาน 15-30 KeV ซึ่งระบบ RHEED ที่ติดตั้งในส่วนห้องปลูกผลึกแสดงดังรูปที่ 2.11

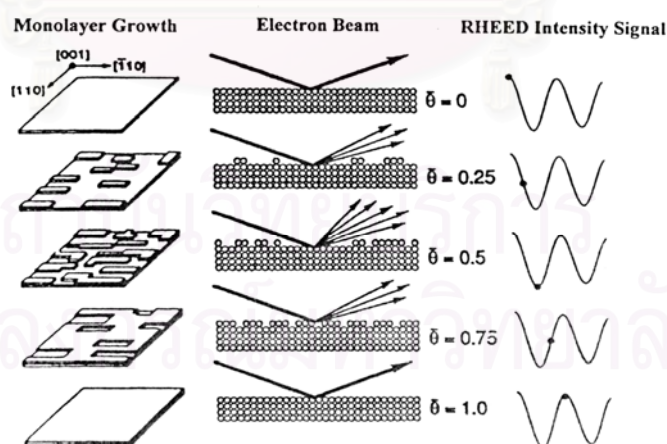


รูปที่ 2.11 โครงสร้างของระบบ RHEED

สำหรับหน้าที่หลักสำคัญของ RHEED ที่สรุปได้มีดังนี้

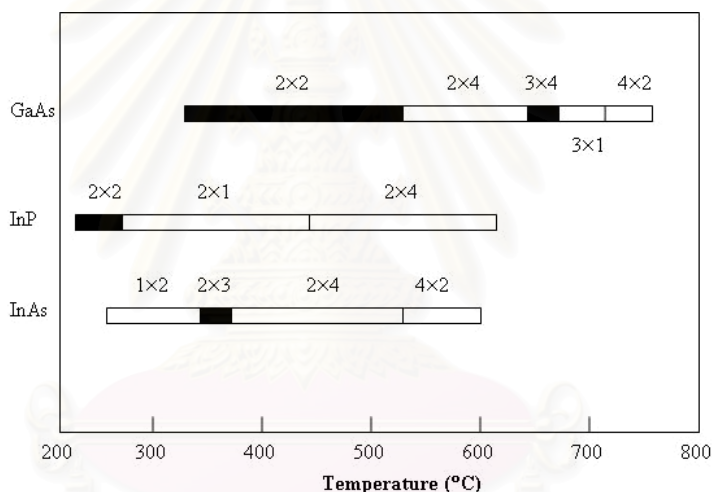
1. การตรวจสอบผิวหน้าแผ่นผลึกฐานในขณะที่ทำความสะอาดด้วยความร้อน (Thermal cleaning) ก่อนการปลูกผลึก
2. การควบคุมสถานะเริ่มต้นของการปลูกผลึก
3. การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผิวในขณะที่ทำการปลูกผลึก

นอกจากนี้ RHEED ยังสามารถใช้ในการสอบเทียบอัตราการปลูกผลึก (Growth rate calibration) ได้ เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสง RHEED ในขณะที่ทำการปลูกผลึก ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามรูปที่ 2.12 ตามปกติผิวหน้าของผลึกก่อนการปลูกผลึกที่มีความเรียบทำให้อิเล็กตรอนสามารถสะท้อนผ่านผิวหน้าผลึกที่มีอะตอมเรียงตัวเป็นระเบียบ ซึ่งความเข้มของอิเล็กตรอนที่สะท้อนผ่านไปบนกรณีนี้นี้มีค่าความเข้มสูงสุด แต่เมื่อการปลูกผลึกเริ่มต้นขึ้นการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสง RHEED มีค่าลดลงในขณะที่ทำการปลูกผลึก อันเกิดจากการกระเจิง (Scattering) ของลำอิเล็กตรอน อันเนื่องมาจากผลึกที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของแผ่นผลึกเกิดการเรียงตัวของก้อนผลึกขนาดเล็ก (Cluster) โดยก้อนผลึกขนาดเล็กที่เกิดขึ้นนั้นมีลักษณะกระจายไม่เป็นระเบียบ เป็นผลทำให้ความเข้มของลำอิเล็กตรอนมีค่าลดลง จนกระทั่งก้อนผลึกขนาดเล็กเหล่านั้นคลุมผิวหน้าของผลึกมากกว่าครึ่งหนึ่งความเข้มแสงของ RHEED จะกลับมามีความเข้มเพิ่มขึ้นอีกจนมีค่าสูงสุดเมื่อผลึกเรียงเต็มผิวหน้าแผ่นผลึกฐาน ซึ่งความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความเข้มและค่าความหนาของผลึกที่เกิดขึ้นนี้มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนาหนึ่งชั้นโมเลกุล (Monolayer) ด้วยเหตุนี้เองทำให้เราสามารถควบคุมค่าความหนาของชั้นผลึกที่ได้ ดังนั้น RHEED จึงเป็นเครื่องมือสำคัญในเทคนิค Phase-locked epitaxy หรือ PLE และ Migration enhanced epitaxy หรือ MEE ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน แต่อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้มีขีดจำกัดคือการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสง RHEED นั้นมีลักษณะที่แตกต่างกันไปตามเงื่อนไขในสภาวะที่แตกต่างกันอีกด้วย



รูปที่ 2.12 แผนภาพอธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลงความเข้มของอิเล็กตรอนในขณะที่ทำการปลูกผลึก

นอกจากนี้รูปแบบ (Pattern) ของ RHEED ที่ได้ของผลึกแต่ละชนิดสามารถบ่งบอกถึง ช่วงค่าอุณหภูมิของผิวหน้าผลึกได้ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งปัจจุบันยังนิยมใช้วิธีนี้ในการตรวจสอบอุณหภูมิ ผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานในการปลูกวิธี MBE และสามารถใช้ได้กับสารประกอบเกือบทุกชนิด โดยเฉพาะสารประกอบกึ่งตัวนำที่ค่าแถบพลังงานมีค่าน้อยมาก อันเป็นข้อดีที่เหนือกว่าวิธีการวัด ด้วย Pyrometer ซึ่งไม่สามารถใช้ได้ในกรณีนี้ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้มีความคลาดเคลื่อนมากกว่า 10°C และมีความยุ่งยากในการอ่านรูปแบบ RHEED ในการเทียบอุณหภูมิ โดยขึ้นกับความชำนาญ ของผู้อ่านเป็นอย่างมาก



รูปที่ 2.13 แผนภาพความสัมพันธ์ของรูปแบบ RHEED และอุณหภูมิของแผ่นผลึก (100) แกลเลียม อาร์เซไนด์ อินเดียมฟอสไฟด์ และ อินเดียมอาร์เซไนด์ภายใต้ไอของ Dimer [12]

2.4.2 กลไกการเกิดผลึกของการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล

กลไกการเกิดผลึกของการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุลสำหรับสารประกอบกึ่งตัวนำ กลุ่ม III-V นั้นเกิดจากอะตอมของธาตุหมู่ III เป็นหลัก เนื่องจากความสามารถของการเกาะติดผิว แผ่นผลึกฐานสูง ซึ่งตามปกติแล้วผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานก่อนการปลูกถูกปกคลุมด้วยบรรยากาศ ของโมเลกุลธาตุหมู่ V เพื่อชดเชยการสูญเสียที่เกิดขึ้นในขณะที่แผ่นผลึกฐานมีค่าอุณหภูมิสูง อัน เป็นผลทำให้ผิวหน้าแผ่นผลึกฐานเป็นชั้นของอะตอมหมู่ V ดังนั้นอะตอมของธาตุหมู่ III จึงเรียงตัว เกาะลงบนชั้นของอะตอมหมู่ V จนเต็มเป็นชั้นของอะตอมหมู่ III จากนั้นอะตอมของธาตุหมู่ V ทำ

ปฏิกิริยาเกาะบนอะตอมของธาตุหมู่ III หรือถูกดูดซับ (Adsorb) จากอะตอมของธาตุหมู่ III โดยลักษณะของการเรียงตัวของอะตอมของธาตุหมู่ III และหมู่ V นั้นเรียงตัวสลับกันไปตลอดการปลูกผลึก ซึ่งอะตอมของธาตุหมู่ V ได้จากการแตกตัวของโมเลกุลที่อยู่ในรูป Dimer หรือ Tetramer ทำให้กระบวนการเกิดผลึกเป็นแบบได้สัดส่วนตามโครงสร้าง (Stoichiometric) โดยโมเลกุลส่วนเกินของธาตุหมู่ V จะถูกปล่อยคายออก (Desorb) จากผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีความสำคัญสำหรับการปลูกผลึกวิธีนี้ ดังนั้นหากอุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีค่าสูงทำให้เกิดผลดังต่อไปนี้

- ก) ในกรณีที่อุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีค่าสูงกว่าจุดระเหิดของธาตุหมู่ V ทำให้เกิดการปล่อยคายอะตอมของธาตุหมู่ V ออกจากผิวแผ่นผลึกฐาน
- ข) ในกรณีที่อุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีค่าสูงขึ้นและมีค่าสูงกว่าจะระเหิดของธาตุหมู่ III ทำให้เกิดการปล่อยคายอะตอมของธาตุหมู่ III ออกจากผิวแผ่นผลึกฐาน

ตารางที่ 2.1 อุณหภูมิจุดระเหิดของสารประกอบ III-V ชนิดต่างๆ [13]

สารประกอบ	$T_{CS}(^{\circ}C)$	$T_{max}(V_4)(^{\circ}C)$	$T_{max}(V_2)(^{\circ}C)$	J_{V_4}/J_{III}
AlP	>700	640	700	~1.0/1
GaP	670	490	750	~1.0/1
InP	363	>450	>500	~3.0/1
AlAs	>750	630	750	~1.5/1
GaAs	~620	480	>760	~1.0/1
InAs	~370	~450	~550	~5.0/1

T_{CS} หมายถึงอุณหภูมิของการระเหิด (Congruent Sublimation Temperature)

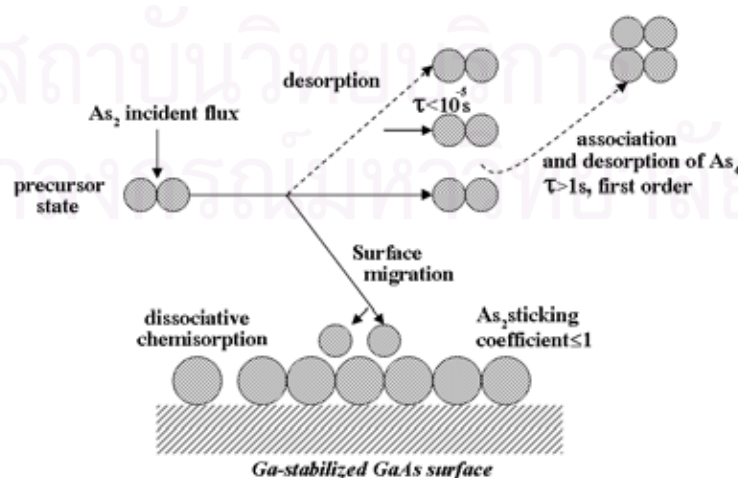
$T_{max}(V_4)$ หมายถึงอุณหภูมิสูงสุดในบรรยากาศ Tetramer โมเลกุลของธาตุหมู่ V

$T_{max}(V_2)$ หมายถึงอุณหภูมิสูงสุดในบรรยากาศ Dimer โมเลกุลของธาตุหมู่ V

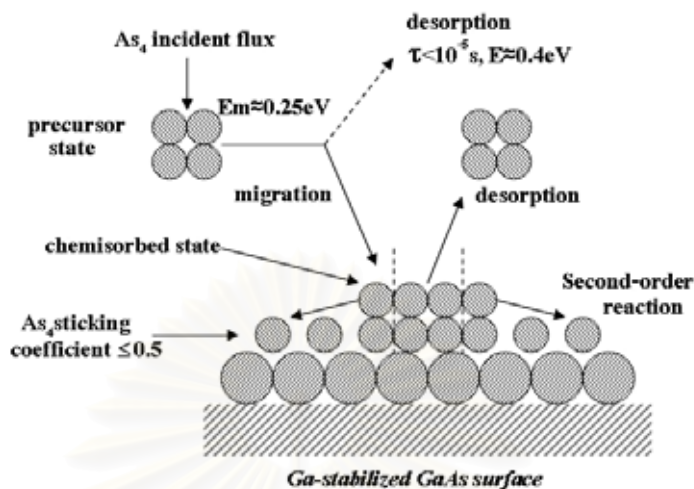
J_{V_4}/J_{III} หมายถึงค่าอัตราส่วน flux ของ V/III ที่เกิดจากการสลายตัว (Decomposition)

ดังนั้นอุณหภูมิของแผ่นฐานจึงควรอยู่ในระดับที่ไม่เกิดสาเหตุในข้อ ข) จึงมีความจำเป็นที่ต้องทำการชดเชยอะตอมธาตุหมู่ V ที่สูญเสียไป เนื่องจากผลในข้อ ก) ซึ่งค่าอุณหภูมิการระเหิดของสารประกอบชนิดต่างๆ มีค่าตามตารางที่ 2.1

การอธิบายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขณะปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุลนั้นเราสามารถใส่แบบจำลองตามรูปที่ 2.14 และ 2.15 อันเป็นตัวอย่างของ GaAs ซึ่งปฏิกิริยานั้นสามารถเกิดขึ้นได้ 2 กรณี คือ กรณีของ Ga-As₂-(100) GaAs และกรณีของ Ga-As₄-(100) GaAs สำหรับในกรณี Ga-As₂-(100) GaAs ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเริ่มต้นจากอะตอมของ Ga เกาะติดบนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานเรียงตัวเป็นชั้น (layer) จากนั้นโมเลกุล As₂ ทำปฏิกิริยากับอะตอมของ Ga โดยแตกตัวเป็นอะตอม As และเกาะตัวบนชั้นอะตอม Ga สำหรับอัตราการเกาะของโมเลกุล As₂ ที่ผิวหน้าแผ่นผลึกฐานขึ้นกับค่า Flux ของ Ga โดยโมเลกุล As₂ ส่วนเกินนั้นจะระเหิดไป ทำให้เกิดผลึกเป็นแบบ Stoichiometric Growth ตามรูปที่ 2.14 สำหรับกรณี Ga-As₄-(100) GaAs นั้นเป็นปฏิกิริยาที่ซับซ้อนกว่า โดยโมเลกุล As₄ คู่หนึ่งทำปฏิกิริยากับอะตอม Ga ที่อยู่ใกล้เคียง ซึ่งอะตอม Ga ได้เกาะอยู่ที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากโมเลกุล As₄ แต่ละโมเลกุลแตกตัวให้อะตอม As จำนวน 2 อะตอมเกาะลงบนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานด้วยการดูดซับ (Adsorb) จากอะตอมของ Ga โดยจำนวนอะตอมของ As ที่เกาะลงบนผิวหน้ามีสัดส่วนเท่ากับจำนวนอะตอมของ Ga ที่เกาะที่ผิวหน้า ส่วนอะตอม As ส่วนที่เหลือจำนวน 4 อะตอมนั้นจะรวมตัวกันเป็นโมเลกุล As₄ และถูกปล่อย (Desorb) ออกจากผิวไป ดังนั้นในกรณีนี้จึงมีความจำเป็นต้องให้ค่าความหนาแน่นของโมเลกุล As₄ หรือ Flux ของ As₄ (J_{As_4}) มีค่ามากกว่าค่าความหนาแน่นของโมเลกุล Ga หรือ Flux ของ Ga (J_{Ga}) เพื่อให้จำนวนโมเลกุล As₄ มีจำนวนมากเพียงพอสำหรับปฏิกิริยาที่มีส่วนที่เกาะเรียงตัวในผลึกและส่วนที่ปล่อยออก ในขณะที่ทำการปลูกผลึกนั้นอะตอมของ As สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนหนึ่งที่เกาะลงบนผิว (Absorb) ของอะตอม Ga เรียงตัวเป็นโครงร่างผลึก และอีกส่วนหนึ่งที่ถูกปล่อย (Desorb) ออกมา ซึ่งเป็นส่วนที่สูญเสียไปและการสูญเสียนี้มีอัตราเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 2.14 ปฏิกิริยาของการเกิดผลึก GaAs ในกรณี Ga-As₂-(100) GaAs



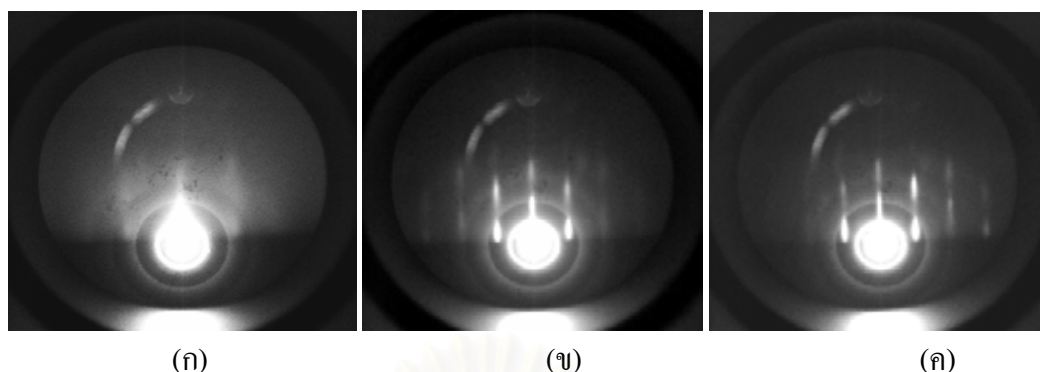
รูปที่ 2.15 ปฏิกิริยาของการเกิดผลึก GaAs ในกรณี Ga-As₄-(100) GaAs

2.5 การสอบเทียบค่าอุณหภูมิของแผ่นฐานในระหว่างการปลูกผลึกด้วย RHEED

วิธีการสอบเทียบค่าอุณหภูมิของแผ่นฐานในระหว่างการปลูกผลึกด้วย RHEED มีอยู่ด้วยกัน 2 วิธีคือ

2.5.1. การสอบเทียบค่าอุณหภูมิจากการสลายตัวของออกไซด์ที่ผิว (Oxide desorption)

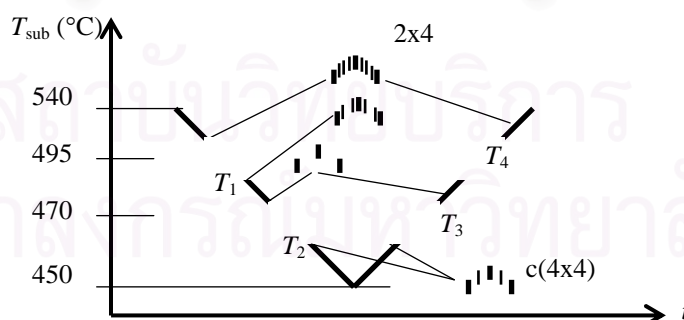
เป็นที่ทราบกันดีว่าออกไซด์ของแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่เกิดขึ้นผิวของแผ่นผลึกฐานตามธรรมชาตินั้นจะสลายออกจากผิวที่อุณหภูมิ 580°C [14] ดังนั้นจากการสังเกตลักษณะรูปแบบของ RHEED ที่ปรากฏขึ้นในระหว่างการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานในครั้งแรกก่อนเริ่มทำการปลูกผลึกจะทำให้ทราบว่าอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิ้ลนั้นแตกต่างจากค่าอุณหภูมิจริงบนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์อยู่เท่าไร ยกตัวอย่างเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานเพิ่มขึ้นในตอนแรกจะไม่มีลักษณะรูปแบบ RHEED ลักษณะภาพที่สังเกตได้จะเป็นเพียงแสงสะท้อนของลำอิเล็กตรอนที่สะท้อนแผ่นผลึกฐานมาตกกระทบบนแผ่นฟลูออเรสเซนต์เท่านั้น และหลังจากทำการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานขึ้นไปจนมีค่าสูงเพียงพอที่ทำให้ออกไซด์ที่ผิวหน้าสลายตัว (ที่ ~580°C) ทำให้ลำอิเล็กตรอนสามารถสะท้อนกับอะตอมของแกลเลียมและอาร์เซไนด์ที่อยู่บนผิวหน้าได้จะทำให้เริ่มเห็นรูปแบบของ RHEED ของผิวหน้าแกลเลียมอาร์เซไนด์ดังในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 รูปแบบของ RHEED ของผิวหน้าภายใต้บรรยากาศ As_4 (ก) ที่อุณหภูมิ $580^{\circ}C$ ออกไซด์เริ่มสลายตัวจากผิวหน้าแผ่นผลึกฐาน (ข) ที่อุณหภูมิประมาณ $630^{\circ}C$ ออกไซด์สลายตัวจากผิวหน้าและ (ค) ผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานสะอาดหลังจากให้อุณหภูมิมีค่าคงที่ประมาณ $630^{\circ}C$ เป็นเวลานาน 20-30 นาที

2.5.2. การสอบเทียบค่าอุณหภูมิจากการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบ RHEED

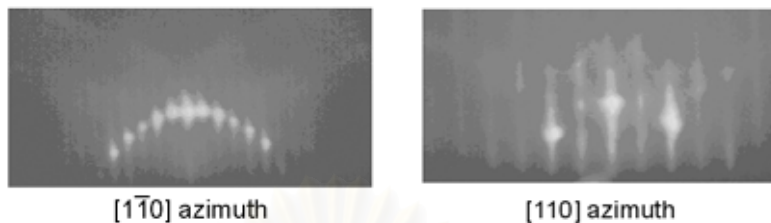
หลังจากทำการปลูกผลึกชั้นบัฟเฟอร์แกลเลียมอาร์เซไนด์ให้ได้ความหนาหนึ่งโดยทั่วไปจะมีค่ามากกว่า 200 นาโนเมตร เพื่อทำการปรับผิวหน้าให้เรียบและเป็นการลดจุดบกพร่องบนผิวหน้า ทำให้ผิวหน้าเป็นผลึกที่มีคุณภาพดีขึ้น จากนั้นเราทำการสอบเทียบวัดอุณหภูมิของผิวหน้าได้ โดยการสังเกตรูปแบบ RHEED ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่ออุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานมีการเปลี่ยนแปลงไป ตัวอย่างดังรูปที่ 2.17 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบ RHEED ที่ปรากฏที่อุณหภูมิต่างๆ ของแกลเลียมอาร์เซไนด์



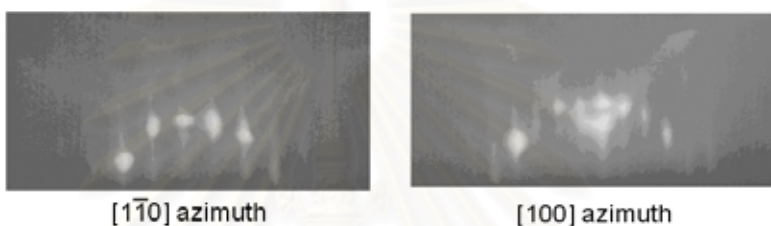
รูปที่ 2.17 ตัวอย่างการปรับเปลี่ยนรูปแบบ RHEED ที่อุณหภูมิต่างๆ ของแกลเลียมอาร์เซไนด์

จากการสังเกตรูปแบบ RHEED โดยจะพบว่าหากเราทำการลดอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานลงภายใต้ความดันไออาร์เซนิกคงที่รูปแบบ RHEED นั้นมีการเปลี่ยนแปลงจากลักษณะรูปแบบชนิด

(2×4) เป็นชนิด (2×2) หรือ c(4×4) ที่อุณหภูมิ 500°C [15] ดังนั้นการสังเกตรูปแบบ RHEED นี้ จะทำให้ทราบอุณหภูมิจริงบนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานได้



(ก) (2×4) ที่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานเท่ากับ 580°C



(ข) (2×2) หรือ c(4×4) ที่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานเท่ากับ 460°C

รูปที่ 2.18 ตัวอย่างรูปแบบ RHEED ชนิด (2×4) ในทิศทาง $[1\bar{1}0]$ และ $[110]$ ของแคลเซียมอาร์เซไนด์ที่อุณหภูมิ 580°C และรูปแบบ RHEED ชนิด (2×2) หรือ c(4×4) ในทิศทาง $[1\bar{1}0]$ และ $[110]$ ของชั้นแคลเซียมอาร์เซไนด์บัพเฟอร์ที่อุณหภูมิ 460°C

2.6 การวัดค่าอัตราการปลูกผลึกจาก RHEED Oscillation

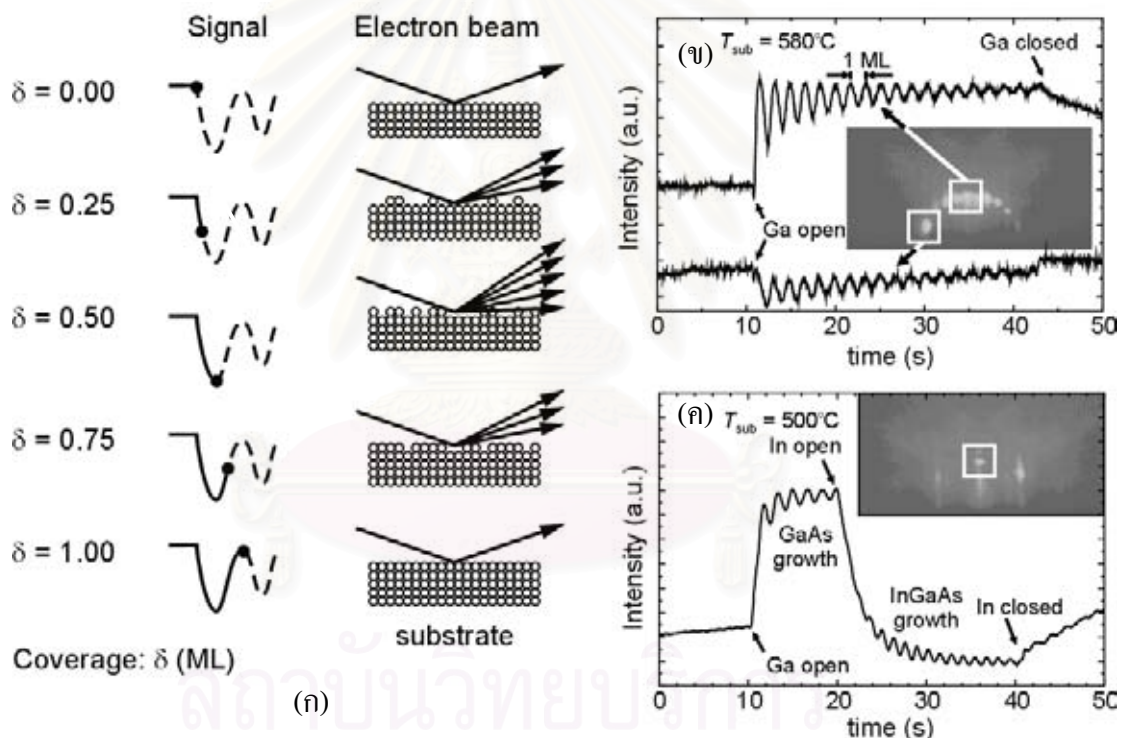
การวัดค่าอัตราการความเร็วในการปลูกผลึกแคลเซียมอาร์เซไนด์บนแผ่นผลึกฐานแคลเซียมอาร์เซไนด์สามารถสังเกตได้จาก Specular Beam ของ RHEED Pattern บน Phosphorus Screen ดังในรูปที่ 2.19 ซึ่งความเข้มของ Specular Beam จะมีการเปลี่ยนแปลงในขณะที่ทำการปลูกผลึก การเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มนี้สามารถอธิบายได้จากการเปลี่ยนแปลงลักษณะของผิวหน้า หากผิวหน้ามีความสมบูรณ์ราบเรียบค่าความเข้มของ Specular Beam สว่างมากที่สุด แต่สำหรับผิวหน้าที่ยังไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดการกระเจิงแบบแพร่ซิม (Diffuse Scattering) ขึ้นทำให้ความเข้มของ Specular Beam สว่างน้อยลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มในหนึ่งรอบนั้นสอดคล้องกับค่าความหนาที่เปลี่ยนแปลงไป 1 monolayer (ML) อันมีหมายความว่าเราสามารถตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของค่าความผลึกได้จากการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของ Specular beam ที่เปลี่ยนแปลงไป เพื่อให้การวัดค่าอัตราการปลูกผลึกให้มีความแม่นยำ เราจะคำนวณหาจาก RHEED

Oscillation โดยคำนวณจากจำนวนคาบของการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของ Specular beam ดังนั้นได้ค่าอัตราการปลูกผลึกสามารถได้ตามสมการ

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

ตัวอย่าง เมื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของแสงสว่างมากที่สุดได้เท่ากับ 10 ครั้ง ใช้เวลา 20 วินาที

$$\text{Growth Rate of GaAs (ML/s)} = \frac{10 \text{ ML}}{20 \text{ sec}} = 0.5 \text{ ML/s}$$



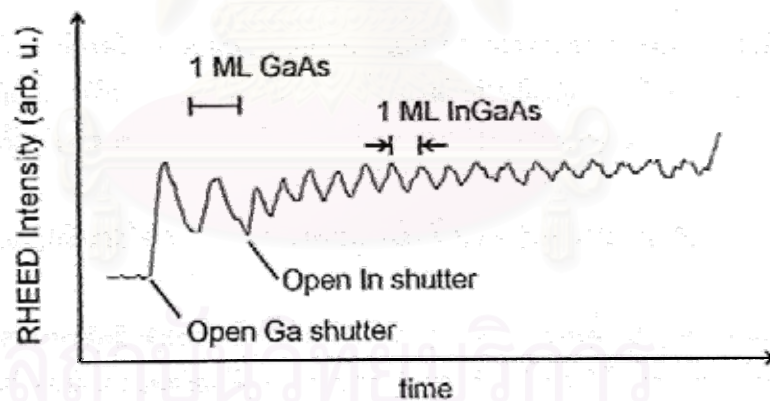
รูปที่ 2.19 (ก) แผนภาพแสดงลักษณะการเกิดความเข้มแสง RHEED Oscillation ในขณะการปลูกชั้นผลึก (ข) และ (ค) แผนภาพ RHEED แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มของ Specular Beam ในขณะการปลูกผลึกแกเลียมอาร์เซไนด์และอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์

นอกจากนี้ในการหาค่าอัตราการปลูกผลึกสำหรับชั้นอินเดียมอาร์เซไนด์บนแผ่นผลึกฐานแกเลียมอาร์เซไนด์นั้นแตกต่างกันไป เนื่องจากผลของความแตกต่างของค่าคงตัวผลึกระหว่างอินเดียมอาร์เซไนด์และแกเลียมอาร์เซไนด์ โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบ RHEED

ในขณะที่ทำการปลูกผลึกในกรณีนี้ตั้งในรูปที่ 2.20 ซึ่งในทางปฏิบัติเราสามารถหาค่าอัตราการปลูกของอินเดียมอาร์เซไนด์ได้จากผลต่างของค่าอัตราการปลูกผลึกระหว่างค่าของอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์และค่าของแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่หาได้การ RHEED Oscillation แต่การเปลี่ยนแปลงของรูปแบบ RHEED ในกรณีมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงดังในรูปที่ 2.21 โดยที่เราต้องรู้ค่าความหนาวิกฤติที่แน่นอน จึงจะทำให้เราสามารถคำนวณค่าอัตราการปลูกผลึกได้อย่างแม่นยำ และวิธีการนี้เหมาะสำหรับใช้ในการวัดค่าอัตราการปลูกผลึกที่มีค่าต่ำเท่านั้น สำหรับวิธีการหาค่าอัตราการปลูกผลึกจาก RHEED Oscillation ตามปกติ นอกจากค่าอัตราการปลูกผลึกแล้ว เรายังวิเคราะห์หาค่าสัดส่วนของอินเดียมและแกลเลียมอย่างเหมาะสม จากการสังเกตความแตกต่างของค่าความเร็วในการปลูกผลึกได้แล้วทำการวัดสัญญาณความเข้มแสงของ RHEED Oscillation เราจะสามารถหาค่าอัตราในการปลูกชั้นอินเดียมอาร์เซไนด์ (r_{InAs}) ที่อุณหภูมิเซลล์อินเดียมต่างๆ ได้ดังสมการ

$$r_{\text{InAs}} = r_{\text{InGaAs}} - r_{\text{GaAs}}$$

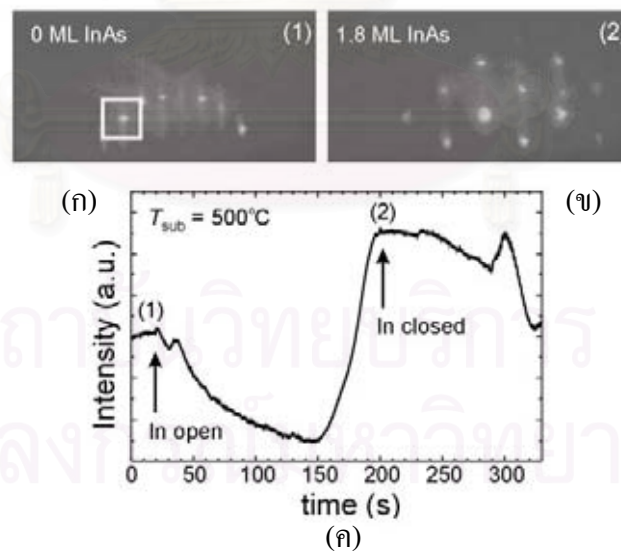
โดย r_{InGaAs} และ r_{GaAs} คือค่าอัตราการปลูกชั้นผลึกอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์และแกลเลียมอาร์เซไนด์ตามลำดับ ตัวอย่างการวัดค่าอัตราการปลูกชั้นผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์ด้วยวิธีนี้ตั้งในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ตัวอย่างการเทียบวัดค่าความเร็วในการปลูกชั้นผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์จากสัญญาณความเข้มแสงของ RHEED Oscillation

2.7 การสังเกตรูปแบบ RHEED ในการปลูกควอนตัมดอตจากกลไกการก่อตัวขึ้นเอง

ในกระบวนการปลูกควอนตัมดอตจากกลไกการก่อตัวขึ้นเองนั้นสามารถสังเกตการเกิดควอนตัมดอตในระหว่างการปลูกผลึกจากรูปแบบ RHEED ในขณะที่ทำการปลูกผลึก นั่นคือ เมื่อทำการปลูกชั้นผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์ลงบนผิวของแกลเลียมอาร์เซไนด์ในช่วงแรกอะตอมจะก่อตัวในลักษณะ 2 มิติ เมื่อค่าความหนาของชั้นผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์มีค่าเกินกว่าค่าความหนาวิกฤติ (Critical thickness) ซึ่งมีค่าประมาณ 1.6-1.7 ML อันทำให้โมเลกุลของอินเดียมอาร์เซไนด์เกิดการผ่อนคลายเกิดเป็นควอนตัมดอตจากกลไกการก่อตัวขึ้นเอง ซึ่งได้กล่าวมาแล้วสำหรับการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบ RHEED ดังในรูปที่ 2.21 ซึ่งเป็นตัวอย่างรูปแบบ RHEED ในขณะที่ทำการปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์ โดยค่าอัตราการปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์เท่ากับ 0.01 ML/s จากรูปจะเห็นว่าสัญญาณ RHEED มีค่าความเข้มลดลงเมื่อเริ่มทำการปลูกชั้นอินเดียมอาร์เซไนด์ในช่วงแรก และเมื่อค่าความหนาผลึกมีค่าเท่ากับค่าความหนาวิกฤติ รูปแบบ RHEED ที่ได้เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมที่มีลักษณะ Streaky ไปเป็นลักษณะ Spotty โดยค่าความเข้มของสัญญาณ RHEED ในช่วงหลังจะเพิ่มขึ้นซึ่งบ่งบอกถึงการเกิดการเรียงตัวของอะตอมในลักษณะ 3 มิติ ในโหมด S-K (Stranski-Krastanow) และชั้นที่มีลักษณะ 2 มิติที่เกิดขึ้นก่อนเกิดควอนตัมดอตคือ Wetting layer

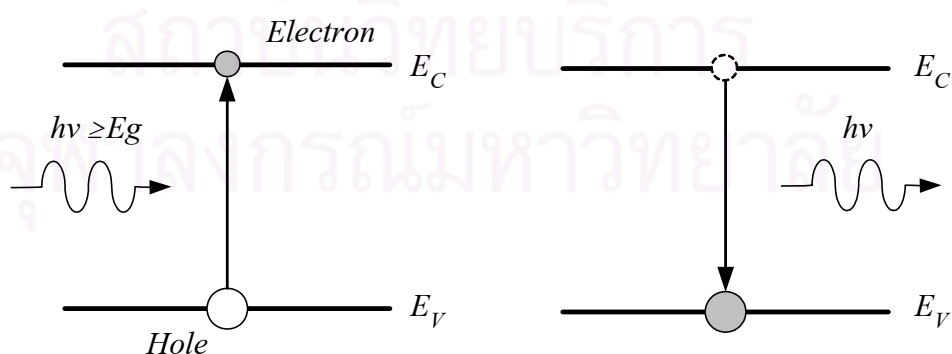


รูปที่ 2.21 รูปแบบ RHEED ในทิศทาง $[1\bar{1}0]$ (ก) เมื่อเริ่มต้นการปลูกอินเดียมอาร์เซไนด์ (ข) เมื่อผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์ก่อตัวเป็นควอนตัมดอต เมื่อปลูกได้ค่าความหนา 1.8 ML ที่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐาน 500°C และ (ค) การเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของสัญญาณ RHEED ที่วัดจากตำแหน่งในกรอบสีขาว

2.8 การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์

การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์เป็นวิธีการวัดคุณสมบัติการเปล่งแสงของสารกึ่งตัวนำ โดยการกระตุ้นด้วยแสงที่มีค่าพลังงานโฟตอนไม่น้อยกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Energy Band Gap) ของสารกึ่งตัวนำ ผลจากการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดพาหะส่วนเกิน (Excess carrier) ขึ้น โดยในสภาวะปกติอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (Valence Band) ได้รับความพลังงานจากการกระตุ้นนี้หรือได้รับพลังงานจากโฟตอน ทำให้ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนเปลี่ยนไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้า (Conduction Band) ซึ่งเป็นสภาวะที่มีระดับพลังงานสูงกว่าเดิม ผลจากเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนนี้ทำให้เกิดสเตทว่างหรือโฮล (Hole) ขึ้นในแถบวาเลนซ์ ซึ่งอิเล็กตรอนที่อยู่ในสเตทใหม่นี้สามารถอยู่ในสภาวะดังกล่าวได้ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง จากนั้นอิเล็กตรอนและโฮลหรือพาหะส่วนเกินที่เกิดขึ้นมาจะรวมตัวกัน (Recombination) ซึ่งการรวมตัวนี้อิเล็กตรอนคายพลังงานออกมาในรูปของโฟตอนที่มีค่าประมาณเท่ากับค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap energy) หรือค่าผลต่างของระดับพลังงานที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในขณะที่คายพลังงาน เมื่อวัดสเปกตรัมของแสงที่ได้จากการเปล่งแสงนี้จะทำให้ทราบค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำได้ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานต่างๆ เช่นการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานแบบ Band to Impurity level เป็นต้น ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะของสเปกตรัมที่ได้

นอกจากนี้การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ยังสามารถใช้ในการวัดคุณสมบัติทางแสงของโครงสร้างควอนตัมได้เช่นกัน ทำให้ทราบค่าพลังงานในการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานย่อยได้เช่นเดียวกัน โดยอิเล็กตรอนในระดับพลังงานปกติถูกแสงกระตุ้นให้ขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานย่อยของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานย่อยที่อยู่ในแถบนำไฟฟ้า จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นนี้ก็คายพลังงานออกมาในรูปของแสง (Photon) เพื่อลดระดับพลังงานกลับคืนสู่สภาวะปกติ

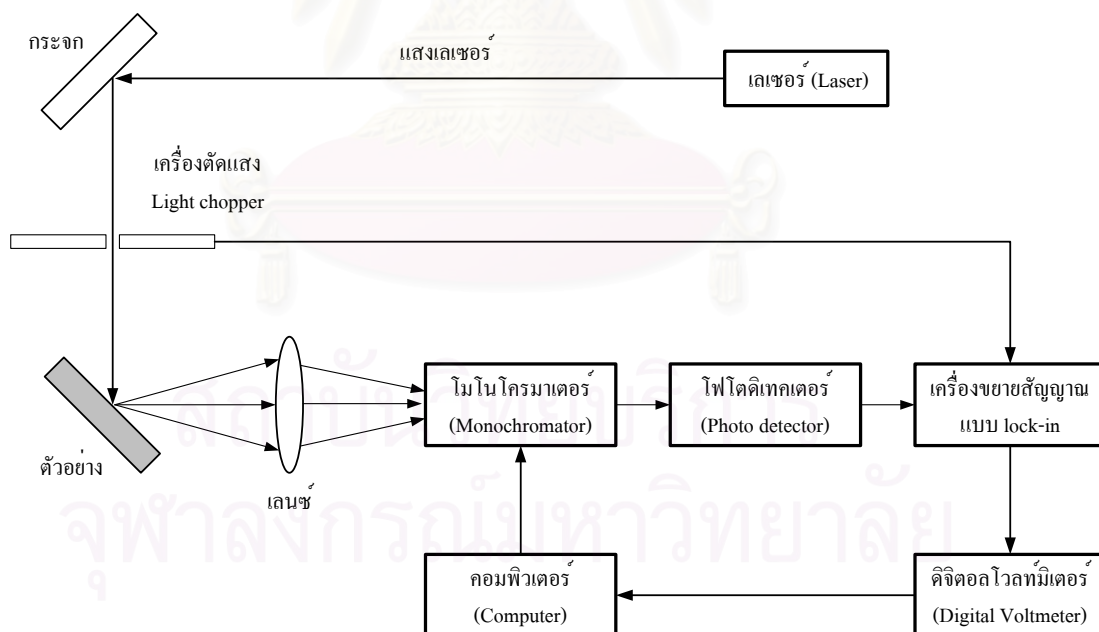


(ก) การดูดกลืนแสง

(จ) การเปล่งแสงที่เกิดจากการรวมตัว

รูปที่ 2.22 แผนภาพจำลองการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงที่เกิดจากการรวมตัว

สำหรับรายละเอียดของระบบการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ มีการจัดระบบตามแผนภาพรูปที่ 2.23 เลเซอร์ชนิด Ar-ion เป็นแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 488 nm ซึ่งเทียบเท่ากับโฟตอนที่มีค่าพลังงาน 2.54 eV โดยทำหน้าที่กระตุ้นตัวอย่างในการทดลอง ตัวอย่างจะถูกทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง และวัดที่อุณหภูมิต่ำ 77 K ซึ่งใช้ในโตรเจนเหลวในการหล่อเย็น แสงที่ได้จากตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นถูกรวบรวมด้วยเลนส์ เพื่อให้แสงที่ได้มีค่าความเข้มสูงขึ้นและผ่านเข้าไปยังโมโนโครมาเตอร์ (Monochromator) โมโนโครมาเตอร์ทำหน้าที่ในการแยกสเปกตรัมของแสงที่ได้จากตัวอย่าง ซึ่งแสงที่ได้จะผ่านได้เฉพาะแสงที่มีค่าตามที่มีโมโนโครมาเตอร์ได้ตั้งค่าไว้ จากนั้นแสงที่ผ่านโมโนโครมาเตอร์จะไปยังโฟโตดีเทคเตอร์ (Photodetector) เพื่อแปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งสัญญาณนี้อยู่ในรูปของกระแสที่มีขนาดเล็กมาก ดังนั้นจึงต้องให้สัญญาณผ่านเครื่องขยายสัญญาณชนิดล็อกอินแอมพลิไฟเออร์ (Lock-in Amplifier) ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ได้จากโฟโตดีเทคเตอร์ และแปลงสัญญาณให้เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้นี้ผ่านมัลติมิเตอร์แบบเชิงเลข (Digital Multimeter) และส่งข้อมูลดิจิทัลไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อทำการสร้างกราฟสเปกตรัมความสัมพันธ์ระหว่างค่าขนาดสัญญาณแสงที่ได้และค่าความยาวคลื่นหรือค่าพลังงานโฟตอนของตัวอย่างแต่ละตัวอย่าง



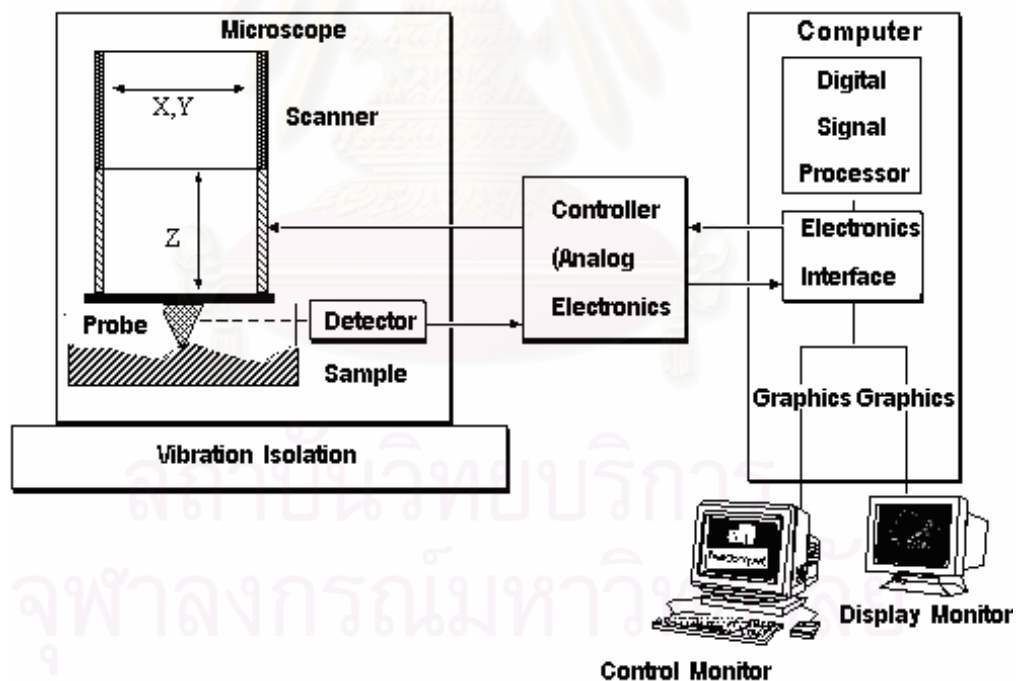
รูปที่ 2.23 แผนภาพระบบการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์

2.9 เทคนิค Atomic Force Microscopy (AFM)

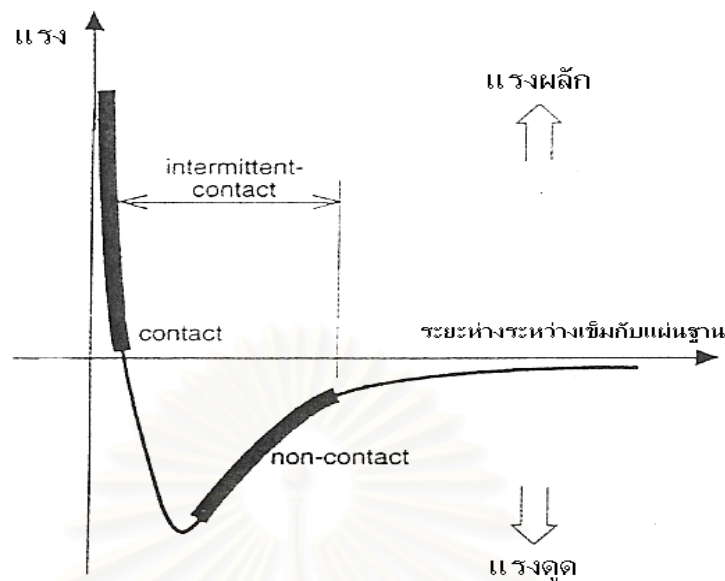
AFM เป็นเทคนิคหนึ่งในของ Scanning Probe Microscopy (SPM) ซึ่งเทคนิคที่สามารถใช้ในการศึกษาสภาพผิวของวัสดุประเภทต่างๆ ได้ หลักการพื้นฐานคือ ใช้เข็มตรวจวัดขนาดเล็กที่ทำจากซิลิคอน (Silicon) หรือซิลิคอนไนไตรด์ (Silicon nitride, Si_3N_4) เคลื่อนที่กวาด (Scan) ไปทั่วบริเวณต่างๆ ของผิววัสดุ โดยมีเพียโซอิเล็กทริกสแกนเนอร์ (Piezoelectric scanner) เป็นตัวควบคุมสภาพผิวของวัสดุที่สูง-ต่ำแตกต่างกันนั้นมีผลให้ตัวคานที่มีเข็มเกาะติดอยู่เกิดการโค้งงอ (Bending) โดยปริมาณการโค้งงอนี้จะถูกตรวจวัดได้โดยโฟโตดีเทคเตอร์ (Photodetector) ดังในรูปที่ 2.24 ภาพที่ได้จะสอดคล้องตามสภาพพื้นผิวในแต่ละบริเวณที่ทำการตรวจสอบ

สาเหตุที่ทำให้คานที่มีเข็มเกาะอยู่เกิดการโค้งงอคือ แรงกระทำระหว่างอะตอม ซึ่งอาจจะเป็นแรงดึงดูดหรือแรงผลักก็ได้ขึ้นอยู่กับระยะระหว่างเข็มปลายแหลมกับพื้นผิว ดังในรูปที่ 2.25

เทคนิค AFM สามารถแบ่งออกได้หลายวิธีตามลักษณะการเก็บข้อมูล ซึ่งจะกล่าวได้ถึงในหัวข้อต่อไป อย่างไรก็ตามไม่ว่าจะเป็นการใช้ AFM ในวิธีใดก็ตาม แรงกระทำที่เกิดขึ้นนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพพื้นผิว (topography) ของชิ้นงานตัวอย่าง



รูปที่ 2.24 องค์ประกอบหลักของเครื่องมือ Scanning Probe Microscope [16]

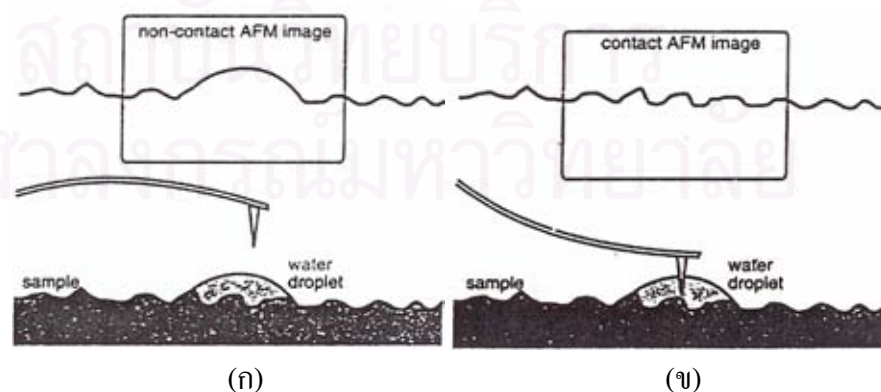


รูปที่ 2.25 ลักษณะของแรงกระทำระหว่างอะตอมที่เกิดขึ้นในระยะห่างวัตถุต่างๆ กัน [16]

2.9.1 กลไกการเก็บข้อมูล

เทคนิค AFM จะสามารถใช้เก็บข้อมูลได้ 4 ลักษณะ (mode) ที่สำคัญคือ

2.9.1.1 Contact mode เป็นการวิเคราะห์สภาพผิวชิ้นงาน โดยการขยับให้เข็มไถล (Slide) ไปบนผิวงาน ซึ่งทำให้เกิดแรงผลักเกิดขึ้น เนื่องจากเข็มและผิวงานมีระยะอยู่ใกล้กันมาก (ประมาณ 1-2 Angstrom) ทำให้แรงผลัสดังกล่าวนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพผิว (ดูรูปที่ 2.26 (ข)) ซึ่งจะทำให้มีการโก่งงอ (Deflection) ของคานยื่น (Cantilever) ที่มีเข็มยึดเกาะอยู่ที่ปลาย โดยปริมาณการโก่งงอจะเปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับความสูง-ต่ำของผิวงาน



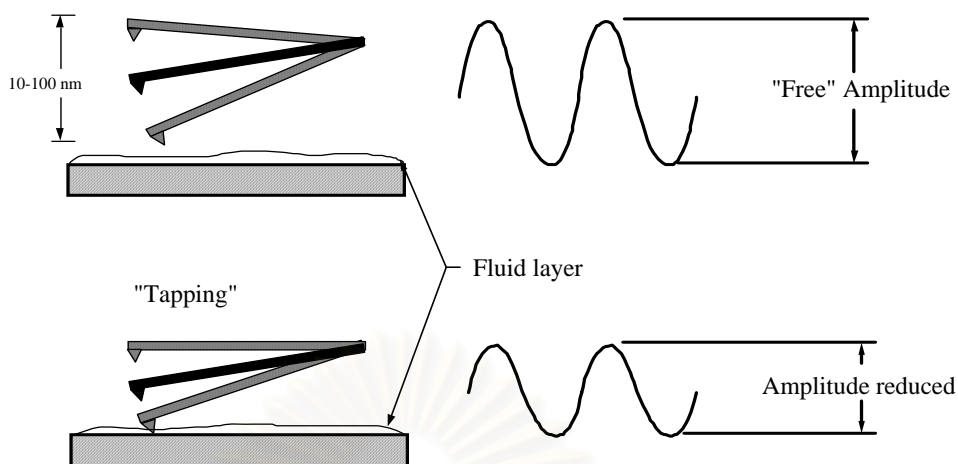
รูปที่ 2.26 การเคลื่อนที่ของเข็มปลายแหลมไปบนผิวงาน ในเทคนิคแบบ Non-contact mode (ก) และ Contact mode (ข) [16]

อย่างไรก็ตาม เทคนิคแบบ Contact mode นี้จะมีข้อเสียคือ ในการลากเข็มในการตรวจวัด นั้น ในขณะที่เข็มเคลื่อนที่ไถลข้ามไปยังบริเวณต่างๆ บนผิวชิ้นงานอาจจะทำให้พื้นผิววัสดุที่กำลังศึกษาต่างไปจากสภาพเดิมที่แท้จริง หรือ อาจเกิดความเสียหายขึ้นแก่ผิวงานได้ ยกตัวอย่างเช่น ภายใต้อากาศบรรยากาศปกติ ซึ่งมีอากาศและความชื้นในอากาศอาจจะเกิดหยดน้ำหรือสิ่งสกปรกบนผิวงาน ซึ่งเมื่อเข็มวัดเคลื่อนที่ไปสัมผัสที่มีชั้นบางๆ ของหยดน้ำและสิ่งสกปรกดังกล่าว จะทำให้มีแรงดึงไฟฟ้าสถิตและแรงดึงผิวดึงให้ตัวคานที่มีเข็มยึดอยู่ที่ปลายเคลื่อนที่ลงมาสัมผัสกับชั้นดังกล่าวทำให้แรงระหว่างเข็มกับผิวงานที่เกิดขึ้น โดยรวมเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ยังอาจทำให้ผิวงานถูกทำลาย เช่น เกิดการฉีกขาดจากการลากเข็มไปบนผิวงาน

2.9.1.2 Non-Contact mode เพื่อที่หลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวข้างต้นใน Contact mode จึงได้มีการพัฒนาเทคนิค Non-Contact mode ขึ้นมา ในกรณีนี้ตัวเข็มปลายแหลมจะถูกยกขึ้นมาให้มีระยะห่างเหนือผิวงานสูงมากขึ้นคือประมาณ 10-100 angstrom จึงไม่มีปัญหาเรื่องการทำลายโครงสร้างผิวงาน โดยในกรณีนี้ แรงกระทำระหว่างตัวคานที่มีเข็มปลายแหลมยึดเกาะอยู่และผิวงานจะเป็นลักษณะแรงดึงดูด (ดูรูปที่ 2.25) ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามภาพทางของสภาพผิว เช่นเดียวกัน (ดูรูปที่ 2.25 ก))

อย่างไรก็ตาม วิธีนี้มีข้อจำกัดเกี่ยวกับความละเอียดของภาพที่เกิดขึ้น นั่นคือ แรงดึงดูดประเภทแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ที่เกิดขึ้นในกรณีนี้จะเป็นแรงที่อ่อนกว่าเมื่อเทียบกับแรงผลักที่เกิดขึ้นในกรณีของ Contact mode ดังนั้นการตรวจสอบอาจจะไว (Sensitive) ต่อสิ่งแปลกปลอมที่อยู่บนผิวงาน เช่น หยดน้ำที่เกาะอยู่บนผิวชิ้นงาน

2.9.1.3 Tapping mode เทคนิค Tapping mode เป็นเทคนิคที่รวมเอาลักษณะของการวัดทั้งในแบบของ Contact mode และ Non-Contact mode เข้าด้วยกัน กล่าวคือ ยังคงให้มีการสัมผัสกันระหว่างเข็มและผิวงานในระยะที่ใกล้กันมากเหมือนกับกรณีของ Contact mode เพื่อให้เกิดภาพที่ชัดเจน ในขณะที่เดียวกันก็ยังมี การสั่นหรือขยับเข็มปลายแหลมให้เคลื่อนที่ขึ้นลงไปพร้อมๆ กับการเคลื่อนที่สแกนไปยังบริเวณต่างๆ บนผิวงาน ดังนั้นจึงเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาการลากไถลเข็มปลายแหลม ซึ่งจะทำให้เกิดการทำลายสภาพของผิวชิ้นงานได้ดังที่เกิดขึ้นใน Contact mode



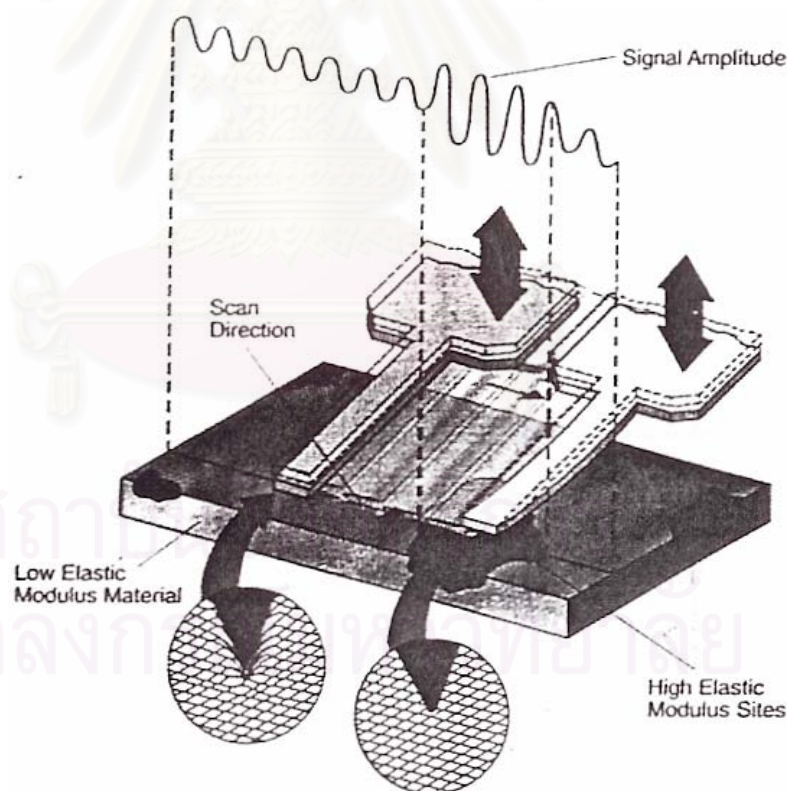
รูปที่ 2.27 ลักษณะการสั่น (Oscillation) คานที่มีเข็มติดอยู่ [16]

จากรูปที่ 2.27 ด้านบนแสดงการสั่นของคานในสภาวะอิสระหรือตอนเริ่มต้นที่ยังไม่เกิดการสัมผัสและขยับเคลื่อนที่ไปบนผิวชิ้นงาน จะเห็นได้ว่าค่าแอมพลิจูดของการสั่นมีค่าสูงอยู่เมื่อเทียบกับแอมพลิจูดที่เกิดจากการสั่นของคานเมื่อมีการแตะสัมผัส (Tapping) ลงบนผิวงาน เนื่องจากว่าในการสัมผัสกันนั้นจะมีการสูญเสียพลังงานของการสั่นทำให้แอมพลิจูดสั่น (Oscillation amplitude) ลดลง ซึ่งค่าที่ลดลงนี้จะใช้เป็นตัวชี้วัดหรือบ่งบอกลักษณะของสภาพพื้นผิวที่มีความสูงต่ำแตกต่างกันไป ยกตัวอย่างเช่น เมื่อเข็มตรวจวัดเคลื่อนที่ผ่านบริเวณผิวงานที่มีความสูงชันขึ้นมา ตัวคานก็จะช่วงการสั่นหรือแอมพลิจูดในการสั่นลดลง ในทางตรงกันข้ามเมื่อเข็มปลายแหลมเคลื่อนที่ผ่านบริเวณผิวที่มีการยุบตัวลงหรือมีความลึกลงไป ตัวคานก็จะมีช่วงการสั่นเพิ่มขึ้น และมีแอมพลิจูดสูงขึ้น (เข้าใจคือแอมพลิจูดสูงสุดในสภาพที่ยังไม่มีการทำการสแกน) แอมพลิจูดของการสั่นที่เปลี่ยนแปลงไปก็จะถูกวัดด้วยแอมพลิจูดดีเทคเตอร์ (Amplitude detector) แล้วส่งผลเข้าไปยังตัวควบคุม ซึ่งจะทำการวัดสัญญาณพร้อมทั้งปรับระยะระหว่างเข็มกับผิวงาน เพื่อรักษาให้ค่าแอมพลิจูดของการสั่นให้คงที่ต่อไป จนกว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดของการสั่นตามสภาพพื้นผิวในบริเวณถัดไป

2.9.1.4 Force Modulation mode สำหรับพื้นผิวของวัสดุที่มีองค์ประกอบหลายเฟส เช่น โพลีเมอร์คอมโพสิต (Polymer composite) และโพลีเมอร์ผสม (Polymer blends) พบว่าเทคนิค AFM ในวิธีแบบ Force Modulation mode จะเป็นที่ยอมรับใช้มาก โดยเทคนิคนี้จะเป็นการวัดและสร้างภาพของพื้นผิวชิ้นงานที่มีความแตกต่างของความแข็งแรง (Stiffness) ในแต่ละเฟสสูง โดยในกรณีนี้ตัวเข็มจะสแกนไปในลักษณะที่มีการสั่นในแนวตั้งฉากกับผิววัสดุด้วยแอมพลิจูดเล็กน้อย แต่จะมีความเร็วในการสั่นที่สูงกว่าการเคลื่อนที่สแกนของเข็ม และเมื่อตัวเข็มถูกนำเข้ามาแตะ

สัมผัสกับผิววัสดุก็จะเกิดแรงต่อต้านจากผิวของวัสดุที่เกิดจากการสั่นและทำให้ตัวคานงอ และถ้าหากว่าเราให้แรงที่ทำให้ตัวคานสั่นคงที่ พื้นผิวบริเวณที่แข็งกว่าจะทำให้เกิดการต่อต้านต่อการสั่นในแนวตั้งของตัวคานมากกว่า และจึงทำให้ตัวคานงอมากกว่า ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดที่เกิดจากการโก่งงอ (Deflection) ของตัวคานจึงนำมาใช้วัดเปรียบเทียบความแข็งที่บริเวณต่างๆ ของผิวงาน

หลักการของวิธี Tapping Mode กับ Force Modulation mode นั้นคล้ายๆ กันตรงที่มีการสั่นของตัวเข็มในแนวตั้งพร้อมๆ กับมีการสแกนไปบนผิวชิ้นงาน อย่างไรก็ตามทั้งสองเทคนิคมีความแตกต่างกัน ในกรณีของ Force Modulation mode นั้นมีการสั่นด้วยความถี่สูงกว่า (สูงกว่าความถี่ในการสแกน) และการวัดแอมพลิจูดที่เกิดจากการบิดงอของคาน โดยเป็นการวัดอันเนื่องมาจากผลของแรงต้านของการสั่น เมื่อมีการสัมผัสของเข็มกับผิวงาน ในขณะที่ Tapping mode จะเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของการสั่นของคานที่เปลี่ยนแปลง (ลดลง) เนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานไปเมื่อมีการสัมผัสผิวงานที่มีระดับความสูงต่ำแตกต่างกัน



รูปที่ 2.28 หลักการทำงานของ AFM ในแบบ Force Modulation [16]

รูปที่ 2.28 จะเห็นว่า มีตัวเข้มวัดที่กำลังเคลื่อนที่กวาดไปบนผิวของวัสดุ จากทางด้านซ้าย ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความแข็งสูงกว่า จะทำให้ขนาดของแอมพลิจูดที่เกิดขึ้นจากการโค้งงอของคานสูงกว่า ดังนั้นภาพที่เกิดขึ้นจึงเกิดเป็นเฟสคอนทราสต์ (Phase contrast) แปรไปตามความแข็งของวัสดุที่บริเวณต่างๆ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การทดลอง

สำหรับในบทนี้เป็นรายละเอียดของขั้นตอนการทดลองในการศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขต่างๆ ที่มีต่อค่าความหนาแน่นและผลการกระจายเชิงขนาดของควอนตัมดอทที่ได้จากการสร้างโครงสร้างอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอทจากกลไกการก่อตัวขึ้นเองบนแผ่นผลึกฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์ด้วยเทคนิคการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุล ซึ่งได้มีการแทรกชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ได้ชั้นควอนตัมดอท รวมถึงปลูกกลบด้วยชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่มีความหนา 5 นาโนเมตร โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ได้แก่ ค่าสัดส่วนของอินเดียมในชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์และค่าความหนาของชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ในส่วนค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ของโครงสร้างอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอทจากกลไกการก่อตัวขึ้นเอง ในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานในขณะที่ปลูกโครงสร้างควอนตัมดอทเท่ากับ 500°C ค่าอัตราการปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์เท่ากับ 0.05 ML/s ค่าปริมาณของอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอทเท่ากับ 1.9 ML และค่าเวลาการขัดจังหวะในระหว่างการปลูก (Growth interruption) ควอนตัมดอทเท่ากับ 30 วินาที

3.1 การเตรียมแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น

แผ่นผลึกฐาน (Substrate) เริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองนี้คือแผ่นผลึกเดี่ยว (Single Crystal Wafer) แกลเลียมอาร์เซไนด์ที่มีผิวหน้าผลึก (Orientation) อยู่ในระนาบ (100) แผ่นผลึกฐานเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองนี้มีคุณสมบัติแบบกึ่งฉนวน (Semi-insulator) และมีผิวหน้าแผ่นผลึกฐานที่พร้อมใช้งาน (Epi-ready) ซึ่งมีรูปร่างเป็นวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว โดยตัวอย่างแต่ละตัวอย่างเป็นส่วน 1 ส่วนที่ได้จากการตัดแบ่งแผ่นผลึกเดี่ยวแกลเลียมอาร์เซไนด์ข้างต้นออกเป็น 12 ชิ้น ทำการนำแผ่นผลึกฐานที่ตัดแล้วไปติดตั้งบนตัวรองแผ่นฐานที่เป็น โมลิตินัม โดยการติดด้วยอินเดียมที่หลอมเหลวด้วยความร้อน จากนั้นทิ้งไว้รอให้ตัวรองแผ่นฐานที่มีแผ่นผลึกฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์ติดอยู่เย็นลงเพื่อจะนำตัวรองแผ่นฐานที่มีแผ่นผลึกฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์ติดอยู่ไปบรรจุใส่ในระบบ MBE ต่อไป

หลังจากนั้นนำตัวรองแผ่นฐานที่มีแผ่นผลึกฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์ติดอยู่ทำการบรรจุใส่ในตัวพาหะใส่แผ่นผลึกฐาน (Cassette) เพื่อใช้เป็นตัวในการลำเรียงตัวรองแผ่นฐานเข้าสู่ระบบ MBE นั้น โดยเริ่มกระทำผ่านห้องบรรจุแผ่นผลึกฐาน (Load lock Chamber) และนำเข้าสู่ส่วนห้อง

เตรียมผิวหน้าแผ่นผลึกฐานด้วยความร้อน (Thermal cleaning) จากนั้นทำการไล่ความชื้นและสิ่งสกปรกที่ผิว (Outgassing) ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อไปทำการลำเรียงตัวรองแผ่นฐานที่มีแผ่นผลึกฐานแกเลียมอาร์เซไนด์ติดอยู่เข้าสู่ห้องปลูกผลึก (Growth Chamber) ซึ่งก่อนการนำตัวรองแผ่นฐานที่มีแผ่นผลึกฐานแกเลียมอาร์เซไนด์ติดอยู่เข้าห้องปลูกผลึกได้มีการปรับค่าอุณหภูมิของ Effusion cell ที่บรรจุแกเลียม อินเดียม และอาร์เซนิกให้มีความดันตามที่ใช้งาน ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิของเซลล์แกเลียมและอินเดียมใช้อัตรา 30°C/นาที่ ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิของเซลล์อาร์เซนิกใช้อัตรา 5°C/นาที่ การเพิ่มอุณหภูมิของเซลล์แกเลียมและอินเดียมนั้นในตอนแรกต้องเพิ่มอุณหภูมิให้อยู่สูงกว่าที่จะใช้งานประมาณ 50°C นานประมาณ 10 นาที เพื่อทำความสะอาดเซลล์ (Degas cell) หลังจากนั้นจึงลดอุณหภูมิของเซลล์ไปยังอุณหภูมิใช้งาน

3.2 การเตรียมการในห้องปลูกผลึกก่อนการปลูกผลึก

หลังจากที่ได้นำแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นที่ได้ผ่านกระบวนการตามในหัวข้อ 3.1 ทำการลำเรียงต่อไปเข้าสู่ Growth Chamber ทำการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานในอัตรา 30°C/นาที่ (ในช่วงอุณหภูมิ 100°C ถึง 300°C) 10°C/นาที่ (ในช่วงอุณหภูมิ 300°C ถึง 500°C) และ 5°C/นาที่ (ในช่วงอุณหภูมิ 500°C ถึง 650°C) จากสภาวะปกติที่ 100°C เมื่ออุณหภูมิมีค่าถึง 300°C ทำการเปิด Shutter ของ As_4 เพื่อเป็นการชดเชยการสูญเสียอาร์เซนิกของแผ่นผลึกฐานในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงในขณะเดียวกันมีการตรวจสอบผิวหน้าแผ่นผลึกฐานด้วย RHEED ซึ่งตามปกติในขั้นเริ่มต้นของกระบวนการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานแกเลียมอาร์เซไนด์นั้นจะมีออกไซด์ (Ga_2O_3) ที่ผิวแต่ออกไซด์นี้จะสลายตัวเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 580°C ซึ่งในกรณีนี้มีผลทำให้รูปแบบของ RHEED ที่ปรากฏมีความสว่างและชัดเจนขึ้น และจะปรากฏชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีความสะอาด ในขั้นตอนนี้ตั้งให้อุณหภูมิมีค่าคงที่ประมาณ 630°C เป็นเวลานาน 20-30 นาที เพื่อให้ผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานสะอาด ซึ่งรูปแบบของ RHEED ที่ได้จากผิวหน้าสะอาดของแผ่นผลึกฐานแกเลียมอาร์เซไนด์ดังในรูปที่ 2.16 รูปแบบของ RHEED ที่อุณหภูมิดังกล่าวเป็นแบบ 2×4 ในขั้นนี้เป็นการเริ่มต้นของการเตรียมการทดลองทั้งหมดในวิทยานิพนธ์นี้

3.3 การศึกษาอิทธิพลของชั้นแทรกอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์

สำหรับการทดลองนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของค่าความหนาและค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นผลึกบางอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ที่แทรกใต้ชั้นอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอตที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นและค่าการกระจายเชิงขนาดของควอนตัมดอต โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของชั้นผลึกบางเท่ากับ 1 ถึง 4 ML และค่าสัดส่วนของอินเดียมในชั้นผลึกบางเท่ากับ 10% 20% และ 30% ในส่วนค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ของโครงสร้างอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอตจากกลไกการก่อตัวขึ้นเองในวิทยานิพนธ์นี้ โดยกำหนดให้ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานที่ใช้ในการปลูกโครงสร้างอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอตเท่ากับ 500°C ค่าอัตราการปลูกผลึกสำหรับอินเดียมอาร์เซไนด์เท่ากับ 0.05 ML/s ค่าปริมาณในการปลูกอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอตเท่ากับ 1.9 ML ค่าเวลาการขัดจังหวะในระหว่างการปลูกควอนตัมดอตเท่ากับ 30 วินาที และค่าความดันไออาร์เซนิก (A_{S_2}) ประมาณ $7 \times 10^{-6}\text{ Torr}$ ซึ่งโครงสร้างของตัวอย่างในการทดลองนี้ดังในรูปที่ 3.1 โดยแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นนั้นได้ผ่านการเตรียมการตามหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 มาแล้วตามลำดับจากนั้นทำการปลูกผลึกตามลำดับขั้นตอนดังนี้

(ก) ทำการปลูกชั้นบัฟเฟอร์แกเลียมอาร์เซไนด์หนา 200 nm ที่อุณหภูมิผิวหน้าแผ่นผลึกฐานประมาณ 600°C และทำการเทียบวัดค่าอุณหภูมิของแผ่นฐานด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงการเรียงตัวของอะตอมบนผิวหน้าตามหัวข้อที่ 2.5 เพื่อหาอุณหภูมิในการปลูกอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอต (ที่ 500°C) จากนั้นจะมาทำการปลูกบัฟเฟอร์แกเลียมอาร์เซไนด์หนา 100 nm ที่อุณหภูมิผิวหน้าแผ่นผลึกฐานประมาณ 600°C

(ข) ปรับค่าอุณหภูมิผิวหน้าแผ่นผลึกฐานไปยัง 500°C ทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้อุณหภูมิลดลงที่ จากนั้นทำการปลูกชั้นผลึกบางอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ที่มีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของตัวอย่างคือ ค่าความหนาเท่ากับ 1 ถึง 4 ML และค่าสัดส่วนของอินเดียมเท่ากับ 10% 20% และ 30% เวลาในการปลูกชั้นผลึกบางอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ตามค่าสัดส่วนของอินเดียมต่างๆ ดังในตารางที่ 3.1

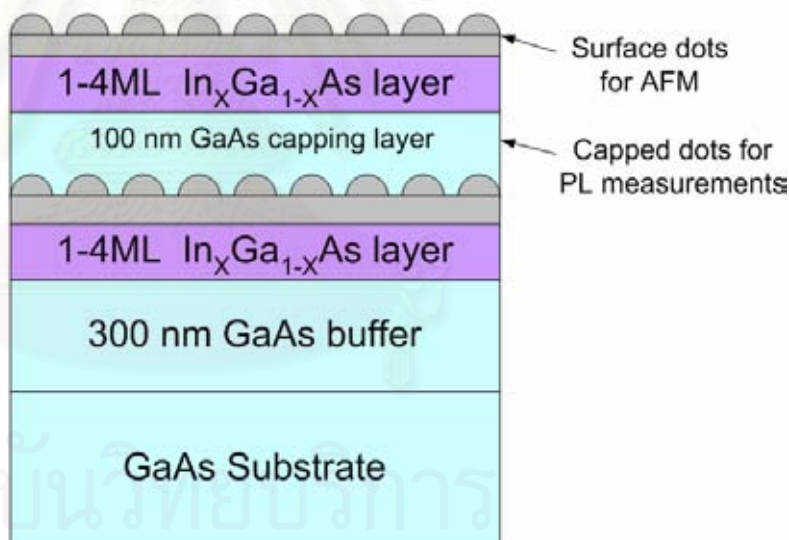
(ค) ทำการปลูกอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอตที่มีค่าปริมาณของอินเดียมอาร์เซไนด์ในการปลูกเท่ากับ 1.9 ML โดยการสังเกตรูปแบบของ RHEED ตามหัวข้อที่ 2.7 (เนื่องจากต้องการค่าปริมาณของควอนตัมดอตในการปลูกเท่ากับ 1.9 ML และค่าอัตราการปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์เท่ากับ 0.05 ML/s เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของ RHEED จาก Streaky ไปเป็นลักษณะ Spotty (1.7 ML) ให้รออีก 4 วินาที) จากนั้นทำการปิดชุดเตอร์ของอินเดียม เพื่อทำการขัดจังหวะในระหว่างการปลูกเป็นเวลา 30 วินาที

(ง) ทำการปลูกกลับด้วยชั้นแกเลียมอาร์เซไนด์หนา 100 nm เพื่อใช้ในวัดผลทางโพโตลูมิเนสเซนซ์

(จ) ดำเนินการปลูกซ้ำตามข้อ (ข) และ (ค) เพื่อนำตัวอย่างมาใช้ในการวิเคราะห์ผิวหน้าด้วยเครื่อง AFM จากนั้นทำการลดอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานไปยัง 100°C โดยทันที (ปิดชุดเทอร์อาร์เซนิกที่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานเท่ากับ 300°C)

ตารางที่ 3.1 ค่าอัตราการปลูกของแกลเลียมและอินเดียมตามค่าสัดส่วนของอินเดียมในชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนต์และเวลาที่ใช้ปลูกชั้นผลึกบางที่มีค่าความหนา 1 ถึง 4 ML

ค่าสัดส่วนของอินเดียม	อัตราการปลูก (ML/s)		อัตราการปลูกชั้นผลึกบาง	เวลาที่ใช้ปลูกชั้นผลึกบาง (s)			
	แกลเลียม	อินเดียม		1 ML	2 ML	3 ML	4 ML
0.1	0.45	0.05	0.5	2	4	6	8
0.2	0.2	0.05	0.25	4	8	12	16
0.3	0.12	0.05	0.17	6	12	18	24



รูปที่ 3.1 แผนภาพโครงสร้างอินเดียมอาร์เซไนต์ควอนตัมดอตที่มีการแทรกชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนต์ได้ชั้นควอนตัมดอต ซึ่งมีการปลูกกลับด้วยชั้นแกลเลียมอาร์เซไนต์หนา 100 nm สำหรับการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์และมีการปลูกอินเดียมอาร์เซไนต์ควอนตัมดอตบนผิวหน้าของแผ่นฐานสำหรับการวัด AFM

3.4 การศึกษาอิทธิพลของชั้นกลบอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์

สำหรับการทดลองเป็นการศึกษาอิทธิพลของชั้นกลบอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่มีผลต่อคุณลักษณะทางแสงของโครงสร้างอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอตที่มีการแทรกชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ได้ชั้นควอนตัมดอต โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของชั้นผลึกบางเท่ากับ 1 ถึง 4 ML และค่าสัดส่วนของอินเดียมในชั้นผลึกบางเท่ากับ 10% 20% และ 30% ในส่วนค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ของโครงสร้างอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอตจากกลไกการก่อตัวขึ้นเองในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานที่ใช้ในการปลูกโครงสร้างอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอตเท่ากับ 500°C อัตราเร็วในการปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์เท่ากับ 0.05 ML/s ค่าปริมาณในการปลูกอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอตเท่ากับ 1.9 ML ค่าเวลาการขัดจังหวะในระหว่างการปลูกควอนตัมดอตเท่ากับ 30 วินาที และค่าความดันไออาร์เซนิก (A_{S_4}) ประมาณ $7 \times 10^{-6} \text{ Torr}$ ซึ่งโครงสร้างของตัวอย่างในการทดลองนี้มีแผนภาพดังในรูปที่ 3.2 โดยแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นนั้นได้ผ่านการเตรียมการตามหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 มาแล้วตามลำดับจากนั้นทำการปลูกผลึกตามลำดับขั้นตอนดังนี้

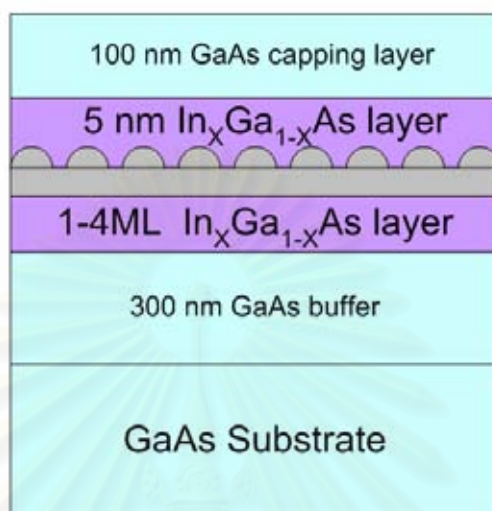
(ก) ทำการปลูกชั้นบัฟเฟอร์แกลเลียมอาร์เซไนด์หนา 200 nm ที่อุณหภูมิผิวหน้าแผ่นผลึกฐานประมาณ 600°C และทำการเทียบวัดค่าอุณหภูมิของแผ่นฐานด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงการเรียงตัวของอะตอมบนผิวหน้าตามหัวข้อที่ 2.5 เพื่อหาอุณหภูมิในการปลูกอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอต จากนั้นจะทำการปลูกบัฟเฟอร์แกลเลียมอาร์เซไนด์หนา 100 nm ที่อุณหภูมิผิวหน้าแผ่นผลึกฐานประมาณ 600°C

(ข) ปรับค่าอุณหภูมิผิวหน้าแผ่นผลึกฐานไปยัง 500°C ทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้อุณหภูมิลดลงที่ จากนั้นทำการปลูกชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่มีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของตัวอย่างคือ ค่าความหนาเท่ากับ 1 ถึง 4 ML และค่าสัดส่วนของอินเดียมเท่ากับ 10% 20% และ 30%

(ค) ทำการปลูกอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอตที่มีค่าปริมาณของอินเดียมอาร์เซไนด์ในการปลูกเท่ากับ 1.9 ML โดยการตั้งเกตุรูปแบบของ RHEED ตามหัวข้อที่ 2.7 (เนื่องจากต้องการค่าปริมาณของควอนตัมดอตในการปลูกเท่ากับ 1.9 ML และค่าอัตราการปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์เท่ากับ 0.05 ML/s เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของ RHEED จาก Streaky ไปเป็นลักษณะ Spotty (1.7 ML) ให้รออีก 4 วินาที) จากนั้นทำการปิดชัตเตอร์ของอินเดียม เพื่อทำการขัดจังหวะในระหว่างการปลูกเป็นเวลา 30 วินาที

(ง) ทำการปลูกกลบด้วยชั้นอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์หนา 5 nm และปลูกต่อด้วยชั้นแกลเลียมอาร์เซไนด์หนา 100 nm เพื่อนำไปวัดผลทางโฟโตลูมิเนสเซนซ์

(จ) จากนั้นทำการลดอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานไปยัง 100°C (ปิดชุดเตอร์อาร์เซนิกที่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานเท่ากับ 300°C)



รูปที่ 3.2 แผนภาพโครงสร้างอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอตที่มีการแทรกชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ใต้ชั้นควอนตัมดอต และปลูกกลับด้วยอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ มีความหนา 5 nm และแกเลียมอาร์เซไนด์หนา 100 nm สำหรับการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

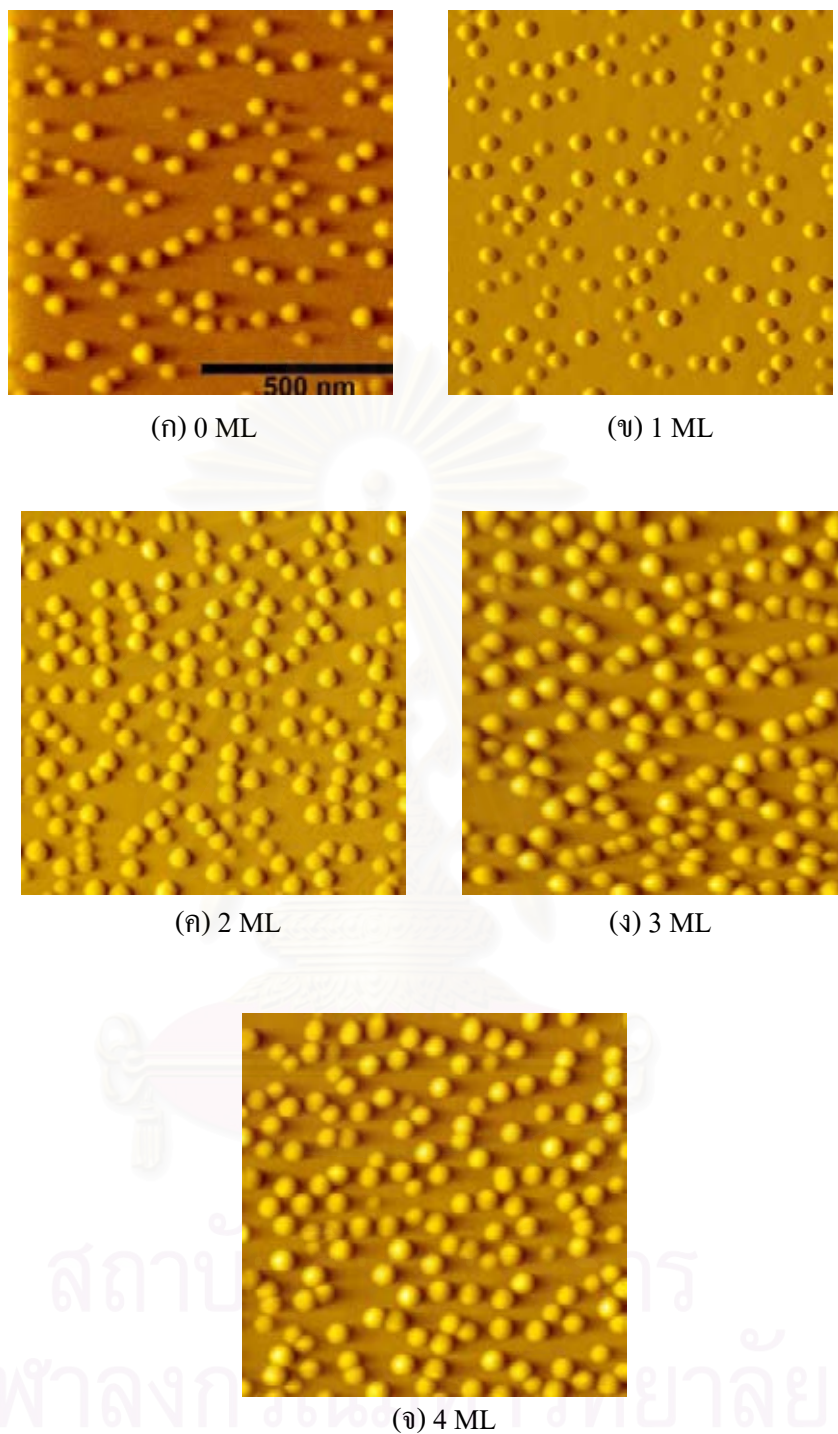
ในบทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดลองตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 และการอภิปรายผลการทดลอง จากการศึกษาอิทธิพลของชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่แทรกได้ชั้นอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอตที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นและค่าการกระจายเชิงขนาดของควอนตัมดอต และการศึกษาอิทธิพลของชั้นกลบอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่มีผลต่อคุณลักษณะทางแสงของโครงสร้างอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอตที่มีการแทรกชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ได้ชั้นควอนตัมดอต โดยทั้งสองการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ คือ ค่าความหนาของชั้นผลึกบางและค่าสัดส่วนของอินเดียมในชั้นผลึกบาง

4.1 การศึกษาอิทธิพลของชั้นแทรกอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์

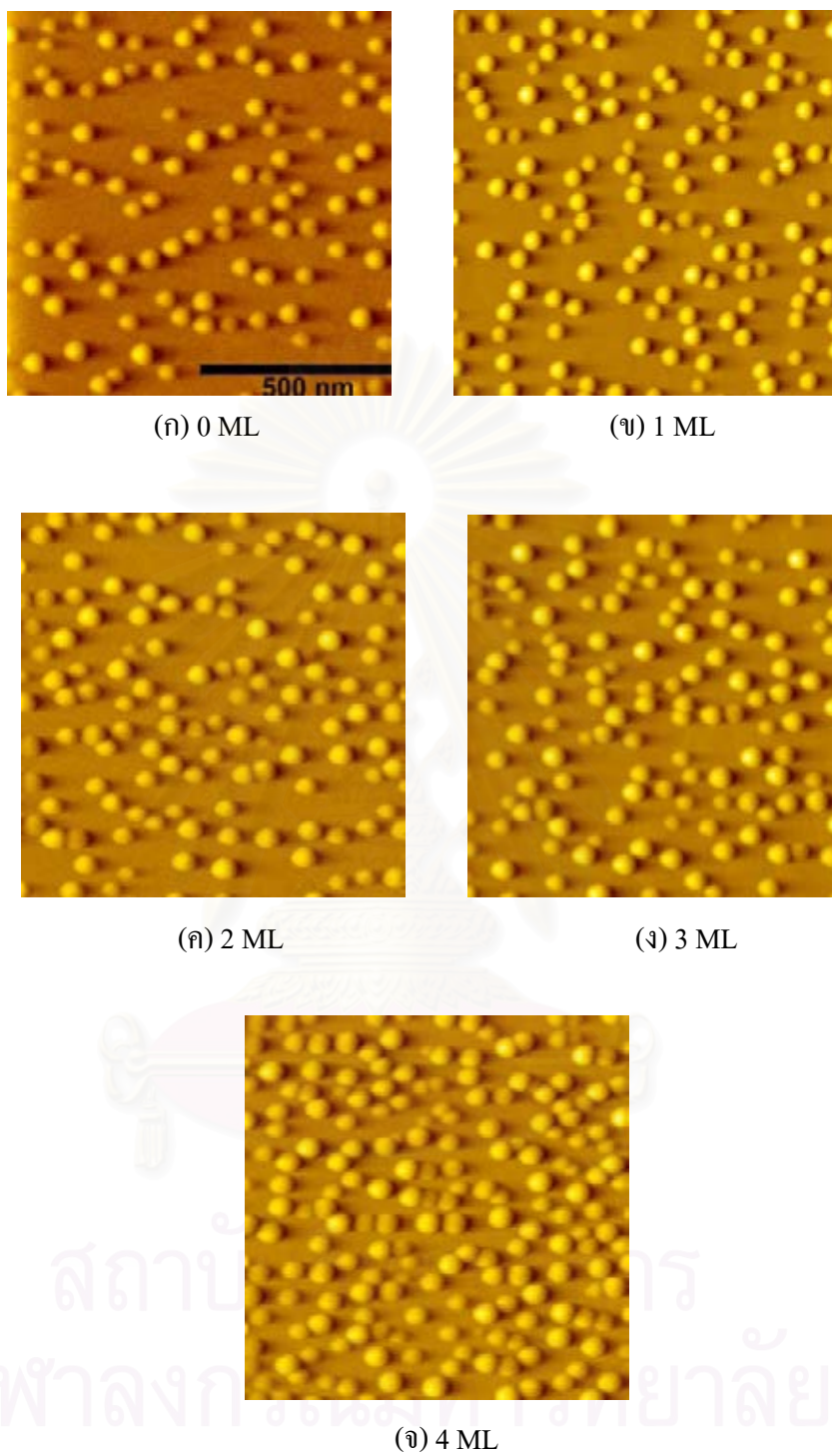
เมื่อได้ดำเนินการปลูกโครงสร้างอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอตจากกลไกการก่อตัวขึ้นเองที่มีการแทรกชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ได้ชั้นควอนตัมดอต โดยมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขค่าความหนาของชั้นผลึกบางและค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นผลึกบางตามหัวข้อที่ 3.3 ภาพผิวหน้าที่ได้จากเครื่อง AFM ของแต่ละตัวอย่าง ดังในรูปที่ 4.1 ถึง 4.3 และผลการวัดทางโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 77 K ของแต่ละตัวอย่าง ดังในรูปที่ 4.5 ถึง 4.7

จากผลการวัดผิวหน้าของโครงสร้างอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอตจากกลไกการก่อตัวขึ้นเองที่มีการแทรกชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ได้ชั้นควอนตัมดอต พบว่าเมื่อทำการปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์ลงบนชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ อะตอมของอินเดียมที่พ่นลงบนชั้นผลึกบางนี้มีการเคลื่อนที่บนผิวหน้าก่อนที่จะเกิดเป็นผลึกกลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์ลงบนผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์ ซึ่งเป็นผลมาจากมีค่าระยะทางการแพร่ (Diffusion length) บนผิวที่น้อยลง ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของควอนตัมดอตเพิ่มมากขึ้น ยกตัวอย่างในกรณีของโครงสร้างควอนตัมดอตที่ปลูกลงบนชั้นแกลเลียมอาร์เซไนด์ ค่าความหนาแน่นของควอนตัมดอตมีค่าเท่ากับ $1.02 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ และได้เพิ่มขึ้นเป็น $1.41 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ ในโครงสร้างควอนตัมดอตที่ปลูกลงบนชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ โดยมีค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นผลึกบางเท่ากับ 10% และมีค่าความหนาเท่ากับ 1 ML ดังในรูปที่ 4.4 (ซึ่งค่าความหนาแน่นของควอนตัมดอตที่ได้มากที่สุดในการทดลองนี้เท่ากับ $1.78 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ ได้จากโครงสร้างควอนตัมดอตที่ปลูกลงบนชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่มีค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นผลึกบางเท่ากับ 30% และมีค่าความหนาเท่ากับ 3 ML) และเมื่อได้ทำการเพิ่มค่าความหนาของ

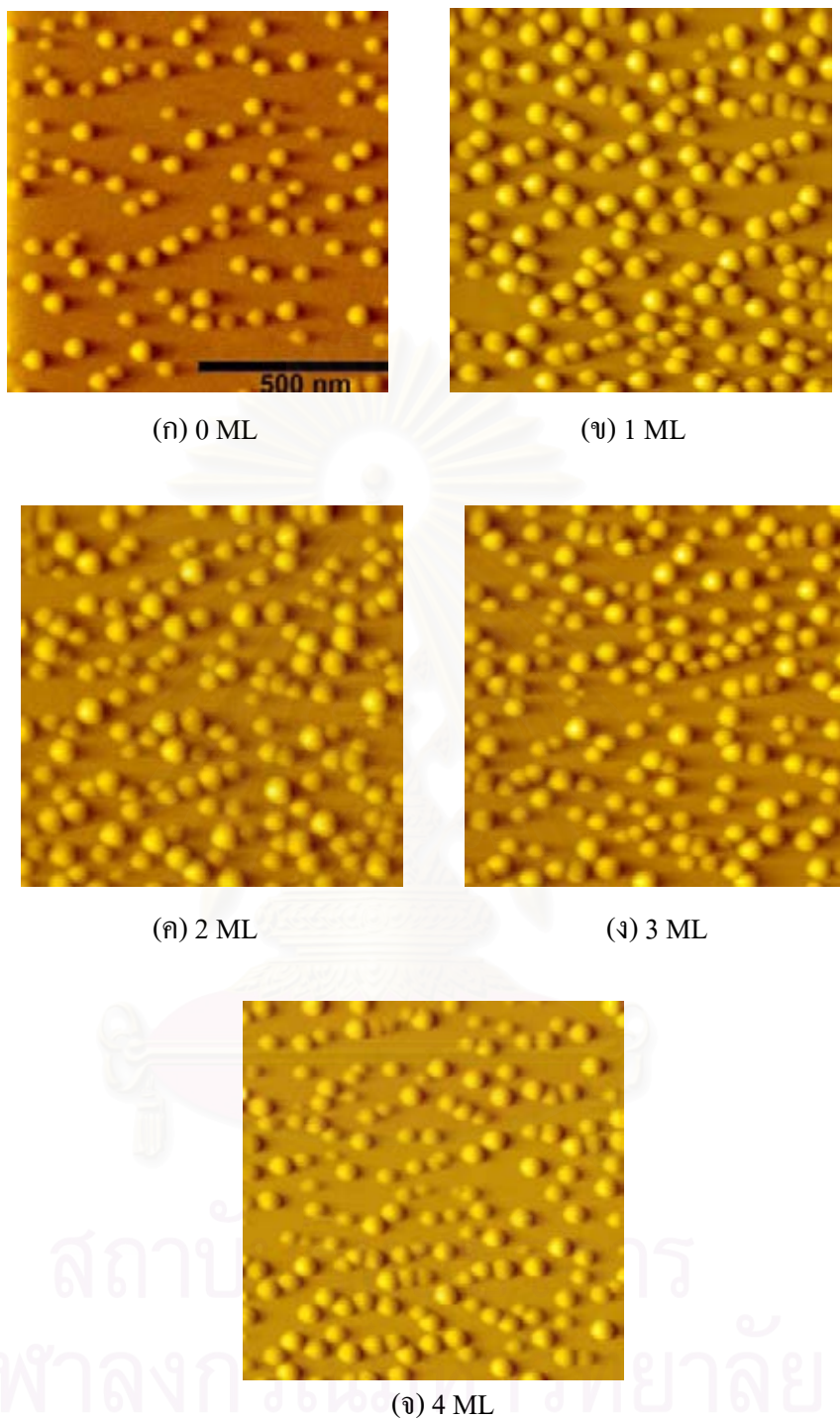
ชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์เป็นผลทำให้ค่าความหนาแน่นของควอนตัมดอตเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากมีค่าระยะทางการแพร่บนผิวของอะตอมอินเดียมที่น้อยลงอีก จะเห็นได้ชัดเจนดังในรูปที่ 4.4 กรณีโครงสร้างควอนตัมดอตที่ปลูกลงบนชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่มีค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นผลึกบางเท่ากับ 10% และ 30% แต่ในส่วนโครงสร้างควอนตัมดอตที่ปลูกลงบนชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่มีค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นผลึกบางเท่ากับ 20% เมื่อเพิ่มค่าความหนาของชั้นผลึกบางทำให้ค่าความหนาแน่นของควอนตัมดอตลดลง เป็นผลมาจากในโครงสร้างนี้มีค่าระยะทางการแพร่ใกล้เคียงกับโครงสร้างที่มีค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นผลึกบางเท่ากับ 10% แต่มีการแยกตัวออกจากกันของอะตอมอินเดียมที่ผิวหน้าที่มากกว่า (ขณะทำการปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอต) การแยกตัวของอะตอมอินเดียมที่ผิวหน้าที่เกิดขึ้นนี้เพิ่มขึ้นตามค่าสัดส่วนของอินเดียมในชั้นผลึกบางและค่าความหนาของชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ ส่วนค่าระยะทางการแพร่บนผิวของอะตอมอินเดียมในที่นี้มีค่าน้อยลงตามการเพิ่มขึ้นของค่าสัดส่วนของอินเดียมในชั้นผลึกบางและค่าความหนาของชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์



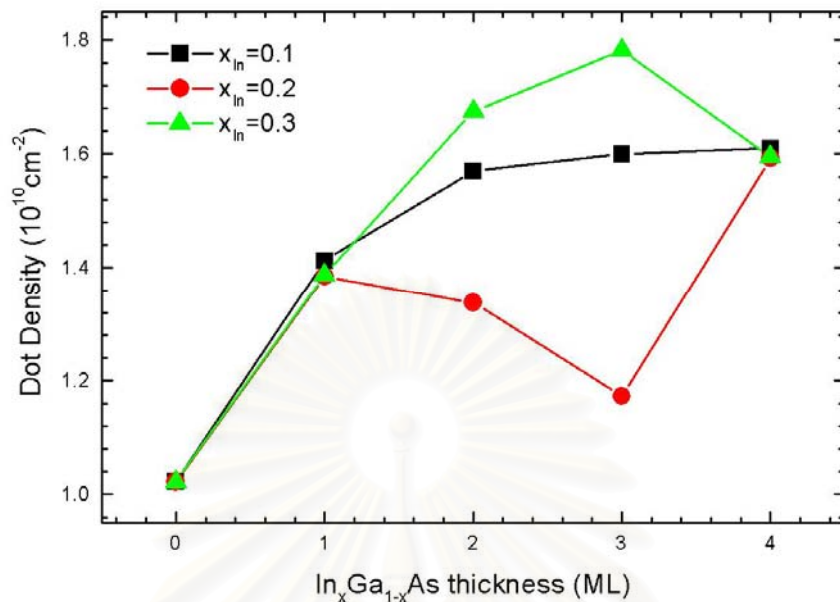
รูปที่ 4.1 ภาพ AFM ขนาด $1000 \times 1000 \text{ nm}^2$ ของโครงสร้าง InAs ควอนตัมดอตที่มีการแทรกชั้นผลึกบาง $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ ได้ชั้นควอนตัมดอต โดยมีค่าความหนาของชั้นผลึก $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ (ก) 0 ML (ข) 1 ML (ค) 2 ML (ง) 3 ML และ (จ) 4 ML



รูปที่ 4.2 ภาพ AFM ขนาด $1000 \times 1000 \text{ nm}^2$ ของโครงสร้าง InAs ควอนตัมดอตที่มีการแทรกชั้นผลึกบาง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ได้ชั้นควอนตัมดอต โดยมีค่าความหนาของชั้นผลึก $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ (ก) 0 ML (ข) 1ML (ค) 2ML (ง) 3ML และ (จ) 4ML



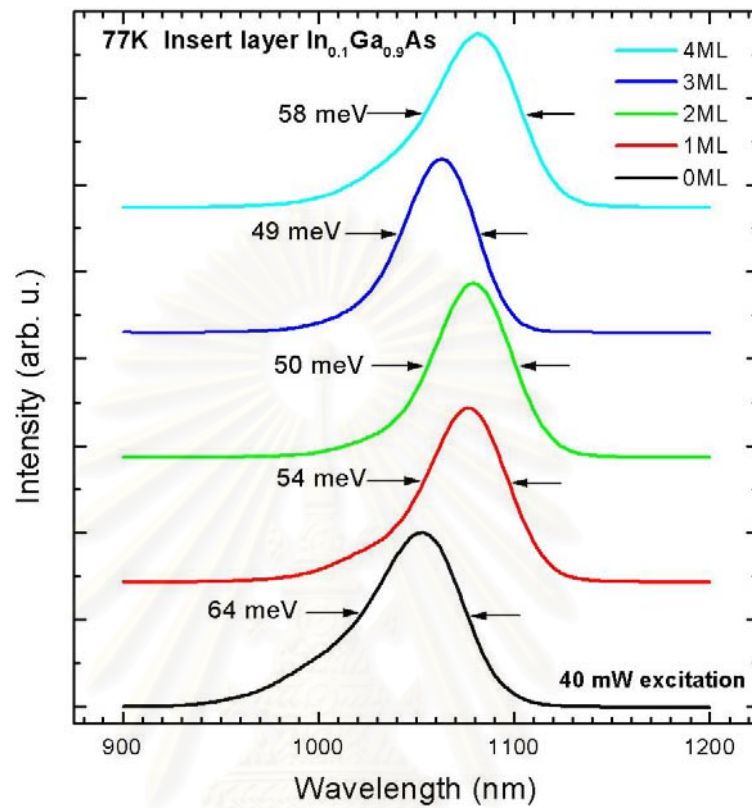
รูปที่ 4.3 ภาพ AFM ขนาด $1000 \times 1000 \text{ nm}^2$ ของโครงสร้าง InAs ควอนตัมดอตที่มีการแทรกชั้นผลึกบาง $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ ได้ชั้นควอนตัมดอต โดยมีค่าความหนาของชั้นผลึก $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ (ก) 0 ML (ข) 1ML (ค) 2ML (ง) 3ML (จ) 4ML



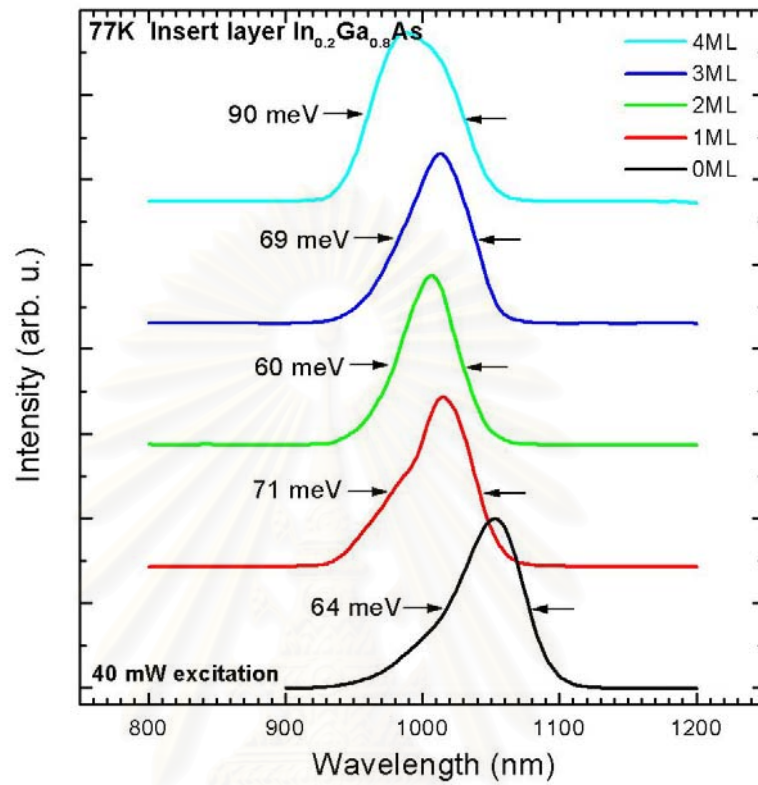
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นของอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอตที่ได้มีการแทรกชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ได้ชั้นควอนตัมดอต โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นและค่าสัดส่วนอินเดียมของชั้นผลึกบาง

จากผลการวัดทางโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 77 K ของโครงสร้างอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอตจากกลไกการก่อตัวขึ้นเองที่มีการแทรกชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ได้ชั้นควอนตัมดอต พบว่าค่ายอดแหลม (Peak) ของสเปกตรัมค่าความยาวคลื่นที่ได้จากโครงสร้างควอนตัมดอตที่ปลูกลงบนชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ โดยมีค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นผลึกบางเท่ากับ 10% ดังในรูปที่ 4.5 นั้นมีลักษณะการเลื่อนไปทางค่าความยาวคลื่นที่ยาวขึ้นหรือเลื่อนไปทางค่าพลังงานที่ต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบกับค่ายอดแหลมของสเปกตรัมค่าความยาวคลื่นที่ได้จากโครงสร้างควอนตัมดอตที่ปลูกลงบนชั้นผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์ เนื่องจากในโครงสร้างนี้มีค่าระยะทางการแพร่บนผิวของอะตอมอินเดียมที่น้อยลง ทำให้ขนาดของควอนตัมดอตที่ได้จากโครงสร้างนี้มีขนาดใหญ่ขึ้นจากเดิม ยกตัวอย่าง โครงสร้างควอนตัมดอตที่ปลูกลงบนชั้นผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์มีความสูงเฉลี่ยเท่ากับ 4.8 nm ดังในรูปที่ 4.9 โดยได้เพิ่มเป็น 6.17 nm ในโครงสร้างควอนตัมดอตที่ปลูกลงบนชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ โดยมีค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นผลึกบางเท่ากับ 10% และมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1 ML ดังในรูปที่ 4.10 แต่เมื่อได้ทำการเพิ่มค่าสัดส่วนของอินเดียมในชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์เป็น 20% และ 30% จะมีการแยกตัวออกจากกันของอะตอมอินเดียมที่ผิวหน้าที่มากขึ้น (ขณะทำการปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอต) ตามค่าสัดส่วนของอินเดียมในชั้นผลึกบางที่เพิ่มขึ้น ทำให้ขนาดของ

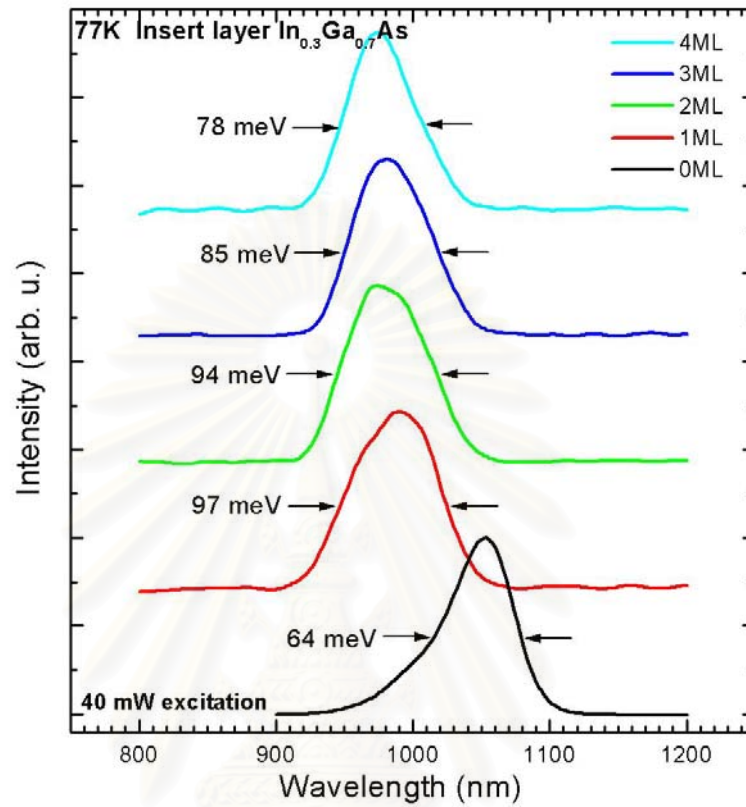
ควอนตัมคอตที่ได้จากโครงสร้างควอนตัมคอตที่ปลูกลงบนชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนต์ โดยมีค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นผลึกบางเท่ากับ 20% และ 30% มีขนาดเฉลี่ยมีค่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดเฉลี่ยของควอนตัมคอตที่ได้จากโครงสร้างที่ปลูกลงบนชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนต์ ที่มีค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นผลึกบางเท่ากับ 10% และชั้นผลึกแกลเลียมอาร์เซไนต์ ตามลำดับ ยกตัวอย่าง โครงสร้างควอนตัมคอตที่ปลูกลงบนชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนต์ โดยมีค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นผลึกบางเท่ากับ 20% และมีค่าความหนาเท่ากับ 1 ML มีค่าความสูงเฉลี่ยเท่ากับ 4.72 nm ดังในรูปที่ 4.11 และมีค่าความสูงเฉลี่ยลดลงเป็น 4.2 nm ในโครงสร้างควอนตัมคอตที่ปลูกลงบนชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนต์ โดยมีค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นผลึกบางเท่ากับ 30% และมีค่าความหนาเท่ากับ 1 ML ดังรูปที่ 4.12 ส่งผลให้ค่ายอดแหลม (Peak) ของสเปกตรัมค่าความยาวคลื่นที่ได้จากทั้งสองโครงสร้างมีลักษณะการเลื่อนไปทางค่าความยาวคลื่นสั้นหรือเลื่อนไปทางค่าพลังงานสูง ซึ่งสังเกตได้จากผลการวัดทางโฟโตลูมิเนสเซนซ์ดังในรูปที่ 4.6 และ 4.7 ซึ่งเมื่อได้ทำการเพิ่มค่าความหนาของชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนต์ของทั้งสามโครงสร้าง (แต่ละโครงสร้างมีความแตกต่างของค่าสัดส่วนของอินเดียมในชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนต์เท่ากับ 10% 20% และ 30%) พบว่าค่าการกระจายเชิงขนาดของโครงสร้างควอนตัมคอตมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไป สังเกตได้จากค่า FWHM จากผลการวัดทางโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (ใช้ค่าของ Full Width at Half Maximum (FWHM) เป็นค่าเปรียบเทียบ) ดังในรูปที่ 4.8 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ของเส้นกราฟรูประฆังคว่ำที่ได้จากการทำข้อมูลกราฟแท่งของค่าความสูงของควอนตัมคอตจำนวน 100 คอต ของทุกๆ โครงสร้าง แสดงในรูปที่ 4.9, 4.10, 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ ซึ่งค่าการกระจายเชิงขนาดของโครงสร้างควอนตัมคอตมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของค่าระยะทางการแพร่บนผิวของอะตอมอินเดียมและการแยกตัวออกของอะตอมอินเดียมที่ผิวหน้าตามค่าสัดส่วนของอินเดียมและค่าความหนาของชั้นผลึกบางที่มีการเปลี่ยนแปลงไป ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น ค่าการกระจายเชิงขนาดของควอนตัมคอตน้อยที่สุดที่ได้จากการทดลองนี้มีค่า FWHM เท่ากับ 49 meV และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.745 nm ซึ่งได้จากโครงควอนตัมคอตที่ปลูกลงบนชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนต์ โดยมีค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นผลึกบางเท่ากับ 10% และมีค่าความหนาเท่ากับ 3 ML



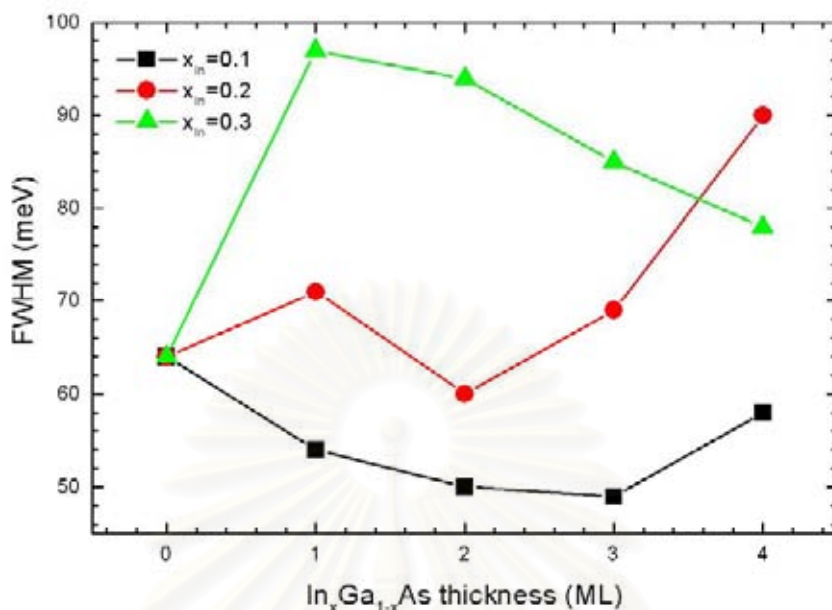
รูปที่ 4.5 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 77 K ของโครงสร้าง InAs ควอนตัมดอตที่มีการแทรกชั้นเปลือกบาง $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ ได้ชั้นควอนตัมดอต



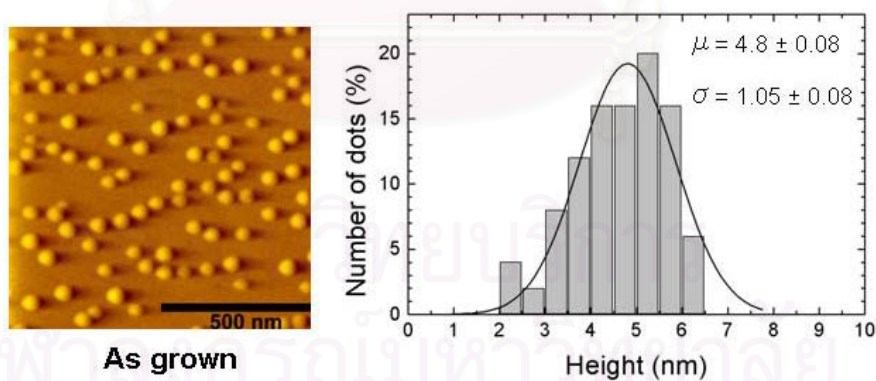
รูปที่ 4.6 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 77 K ของโครงสร้าง InAs ควอนตัมดอตที่มีการแทรกชั้นเปลือกบาง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ได้ชั้นควอนตัมดอต



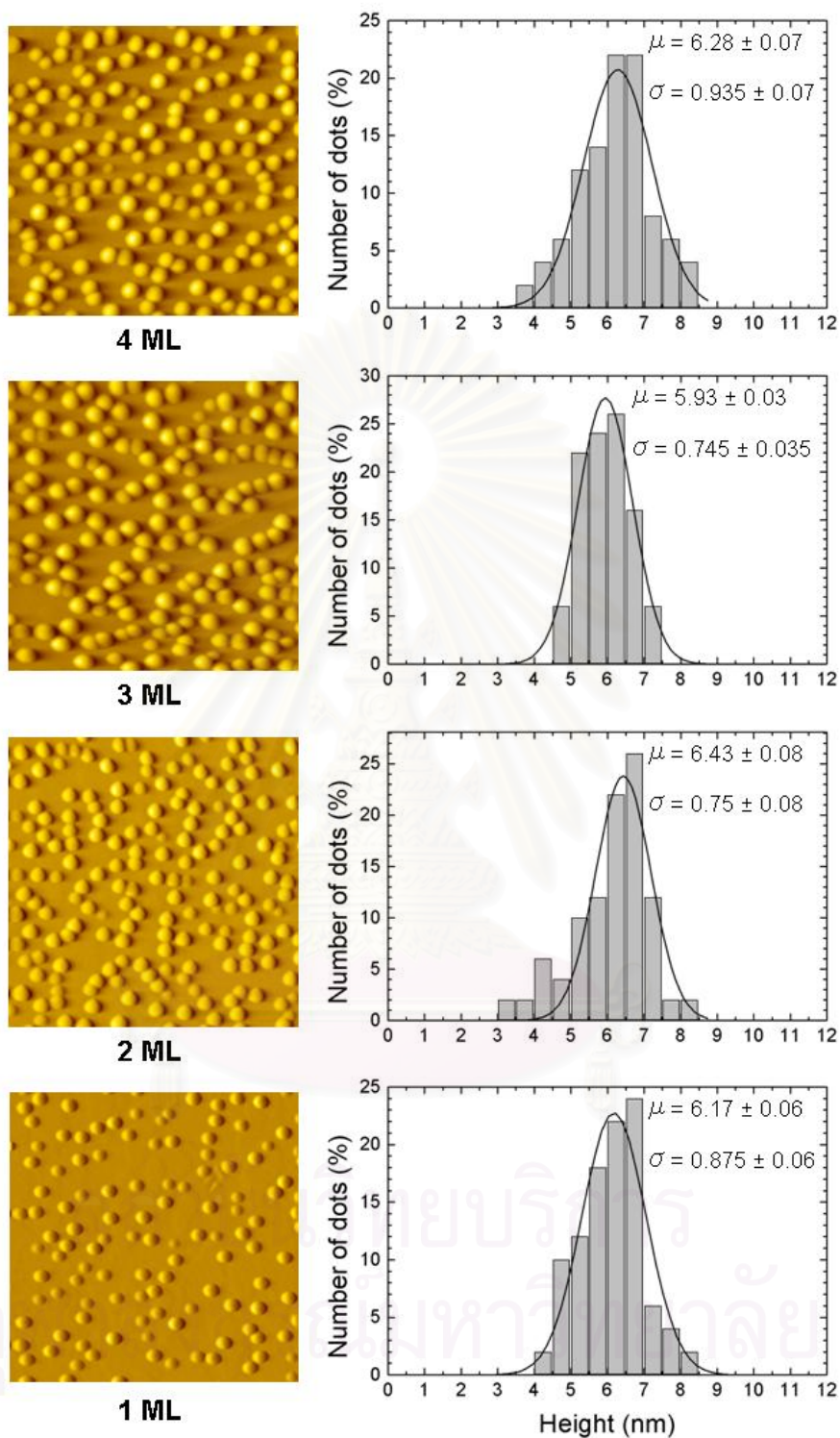
รูปที่ 4.7 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 77 K ของโครงสร้าง InAs ควอนตัมดอตที่มีการแทรกชั้นผลึกบาง $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ ได้ชั้นควอนตัมดอต



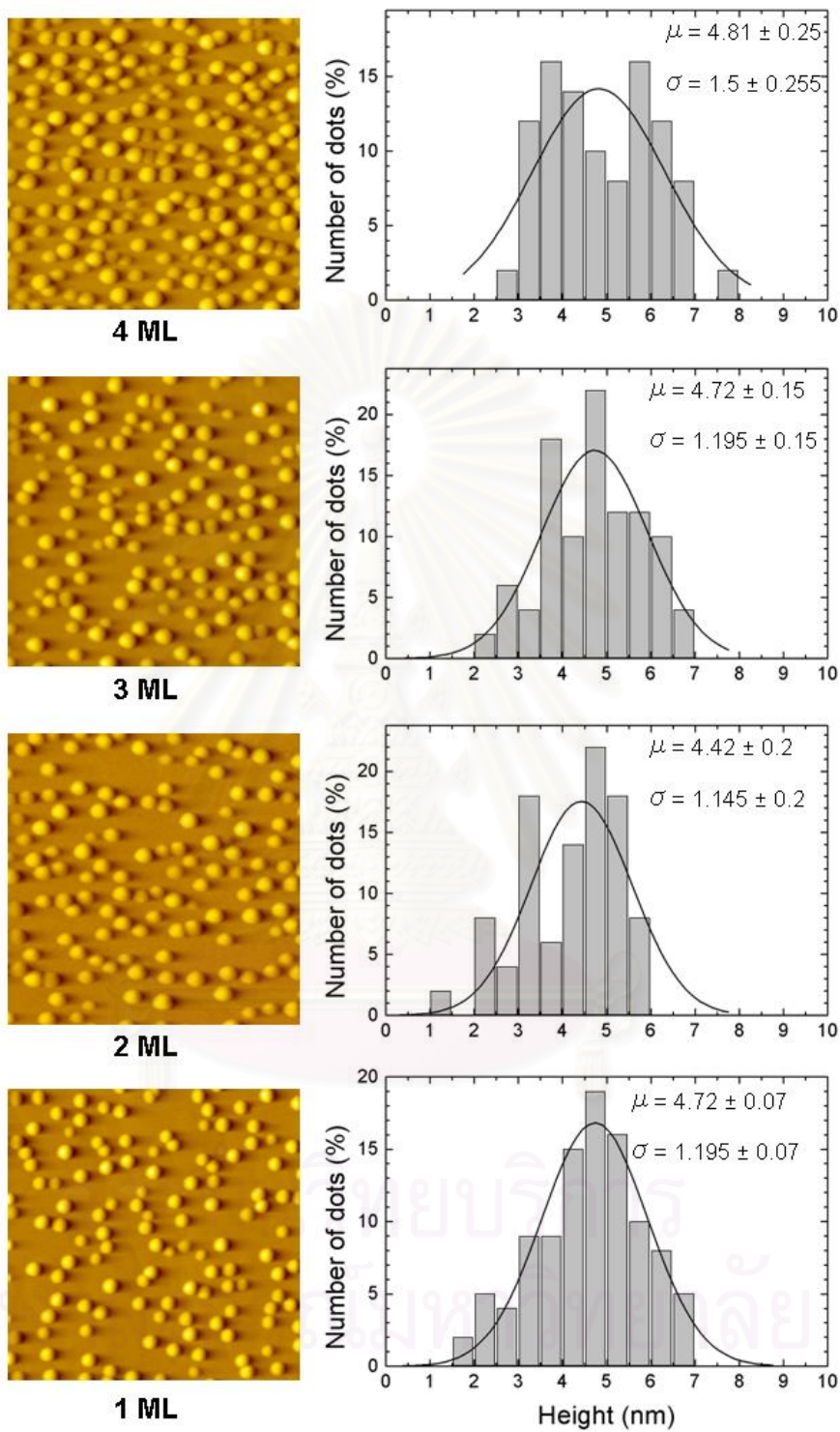
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า FWHM จากการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของโครงสร้างอินเดียมอาร์เซไนต์ควอนตัมดอตที่มีการแทรกชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนต์ได้ชั้นควอนตัมดอต และค่าความหนาของชั้นผลึกแทรกที่ค่าสัดส่วนอินเดียมของชั้นผลึกแทรกมีค่า 0.1, 0.2 และ 0.3



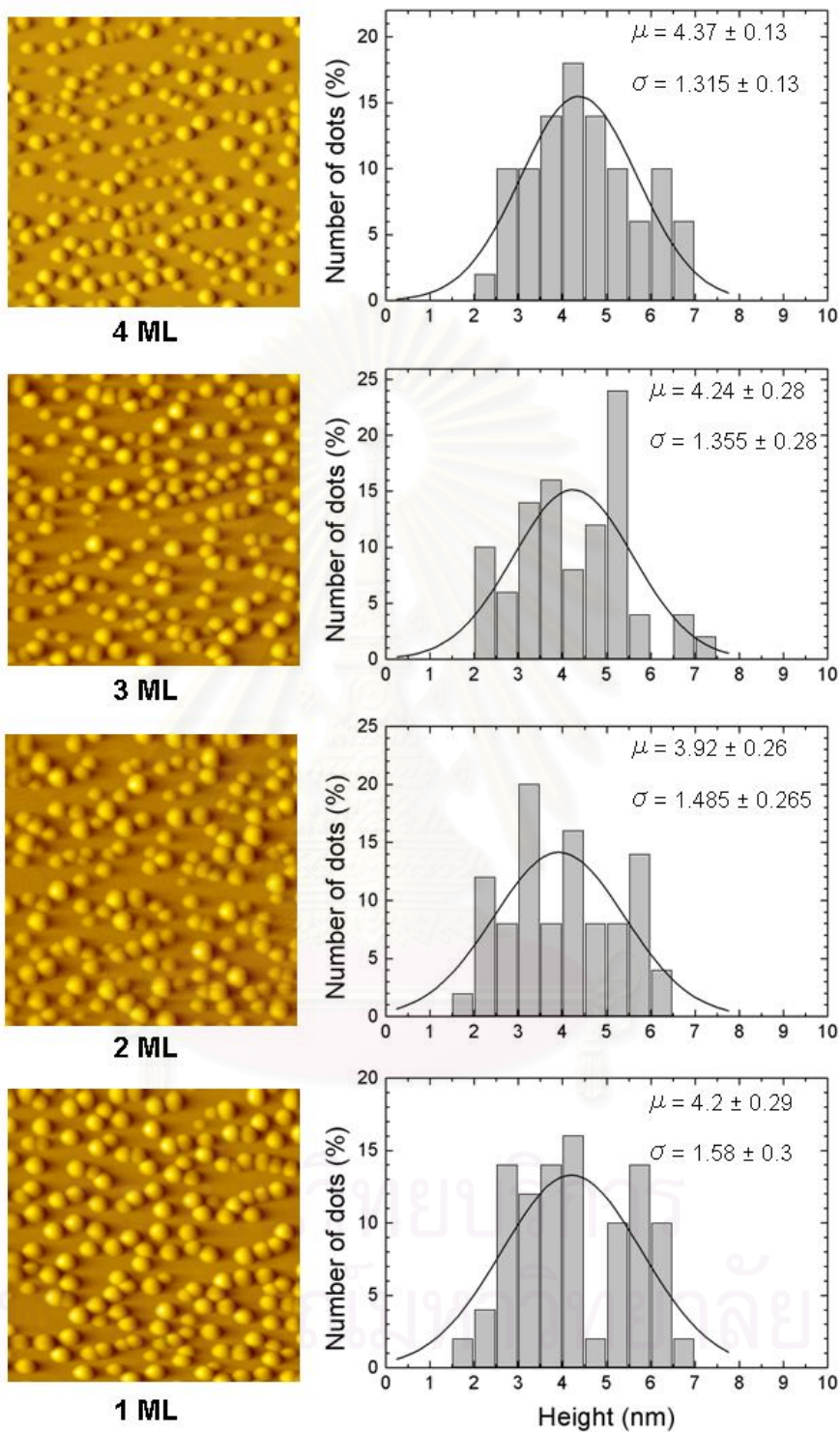
รูปที่ 4.9 กราฟการกระจายเชิงขนาดของโครงสร้าง InAs ควอนตัมดอตที่ไม่มีชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนต์แทรกได้ควอนตัมดอต



รูปที่ 4.10 กราฟการกระจายเชิงขนาดของโครงสร้าง InAs ควอนตัมดอตที่มีชั้นผลึกบาง $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ แทรกได้ชั้นควอนตัมดอต



รูปที่ 4.11 กราฟการกระจายเชิงขนาดของโครงสร้าง InAs ควอนตัมดอต ที่มีชั้นผลึกบาง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ แทรกได้ชั้นควอนตัมดอต



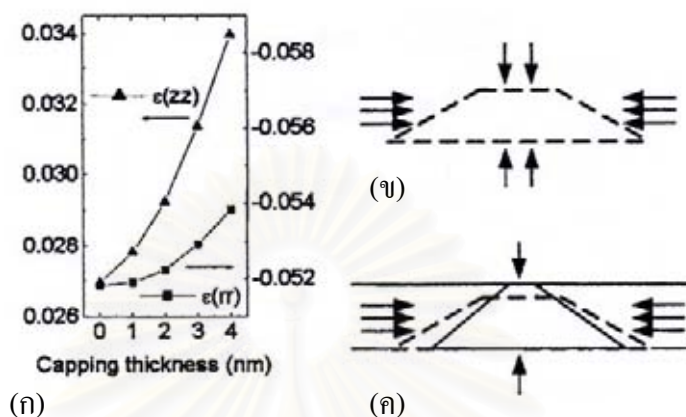
รูปที่ 4.12 กราฟการกระจายเชิงขนาดของโครงสร้าง InAs ควอนตัมดอตที่มีชั้นผลึกบาง $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ แทรกได้ชั้นควอนตัมดอต

4.2 การศึกษาอิทธิพลของชั้นกลบอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์

เมื่อได้ดำเนินการปลูกโครงสร้างอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมคอตจากกลไกการก่อตัวขึ้นเองที่มีการแทรกชั้นผลึกบางอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ได้ชั้นควอนตัมคอต และปลูกกลบด้วยชั้นผลึกอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ที่มีค่าความหนาเท่ากับ 5 nm โดยมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขค่าความหนาของชั้นผลึกบาง และค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นผลึกบางตามหัวข้อที่ 3.4 ซึ่งได้ผลการวัดทางโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 77 K ของแต่ละตัวอย่างดังในรูปที่ 4.14 ถึง 4.16

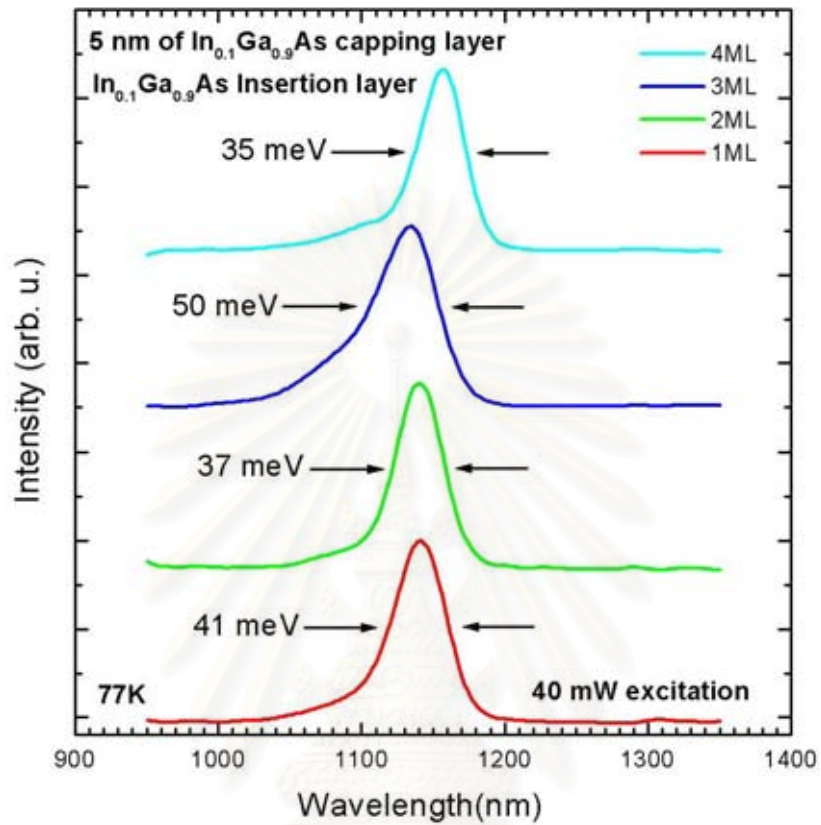
จากผลการวัดทางโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของโครงสร้างอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมคอตที่มีการแทรกชั้นผลึกบางอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ได้ชั้นควอนตัมคอตและปลูกกลบด้วยชั้นผลึกอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ที่มีค่าความหนาเท่ากับ 5 nm พบว่าค่ายอดแหลมของสเปกตรัมค่าความยาวคลื่นที่ได้จากโครงสร้างนี้มีลักษณะเลื่อนไปทางค่าความยาวคลื่นที่ยาวขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างที่มีการแทรกชั้นผลึกบางอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ได้ชั้นควอนตัมคอตเพียงอย่างเดียว ยกตัวอย่างกรณีโครงสร้างอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมคอตที่มีการแทรกชั้นผลึกบางอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์มีค่าความหนา 1 ML ได้ชั้นควอนตัมคอต และมีค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นผลึกบางเท่ากับ 10 % โดยในโครงสร้างนี้มีค่ายอดแหลมของสเปกตรัมค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 1,077 nm ดังในรูปที่ 4.5 ได้เลื่อนเป็น 1,141 nm ในโครงสร้างอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมคอตที่มีการแทรกชั้นผลึกบางอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ได้ชั้นควอนตัมคอตมีค่าความหนาเท่ากับ 1 ML และปลูกกลบด้วยชั้นผลึกอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ที่มีค่าความหนาเท่ากับ 5 nm โดยมีค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นผลึกบางเท่ากับ 10 % ดังในรูปที่ 4.14 (ซึ่งจากผลการทดลองโครงสร้างที่มีค่ายอดแหลมของสเปกตรัมค่าความยาวคลื่นที่เลื่อนไปทางค่าความยาวคลื่นยาวขึ้นมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างที่มีการแทรกชั้นผลึกบางอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ได้ชั้นควอนตัมคอตเพียงอย่างเดียวคือ โครงสร้างที่มีการแทรกชั้นผลึกบางอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ได้ชั้นควอนตัมคอต และปลูกกลบด้วยชั้นผลึกอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ โดยมีค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นผลึกบางเท่ากับ 30 % ยกตัวอย่างในกรณีที่มีการแทรกชั้นผลึกบางอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ได้ชั้นควอนตัมคอตที่ค่าความหนา 1 ML จากเดิมมีค่ายอดแหลมอยู่ที่ 990 nm ดังในรูปที่ 4.7 ได้เลื่อนเป็น 1,194 nm ในโครงสร้างที่มีการปลูกด้วยชั้นผลึกอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ ดังในรูปที่ 4.16) การที่ค่ายอดแหลมของสเปกตรัมค่าความยาวคลื่นได้มีลักษณะเลื่อนไปทางค่าความยาวคลื่นที่ยาวขึ้นนั้นเป็นผลมาจากการปลูกกลบชั้นอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมคอตด้วยชั้นผลึกอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ ซึ่งชั้นที่ปลูกกลบนี้จะทำให้ค่าความสูงของควอนตัมคอตเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากจะไปเพิ่มค่าความเครียดแบบดึง (Tensile) ในแนวตั้ง (Vertical strain) และค่าความเครียดแบบอัด (Compressive) ในแนวระนาบ (In-plane strain) ให้กับโครงสร้างควอนตัมคอต ทำให้สามารถลด

แรงบีบที่กระทำกับ โครงสร้างควอนตัมดอทในแนวตั้ง เมื่อเปรียบเทียบกับ การปลูกกลบด้วย ชั้นผลึกแกเลียมอาร์เซไนด์ [17] ดังในรูปที่ 4.13



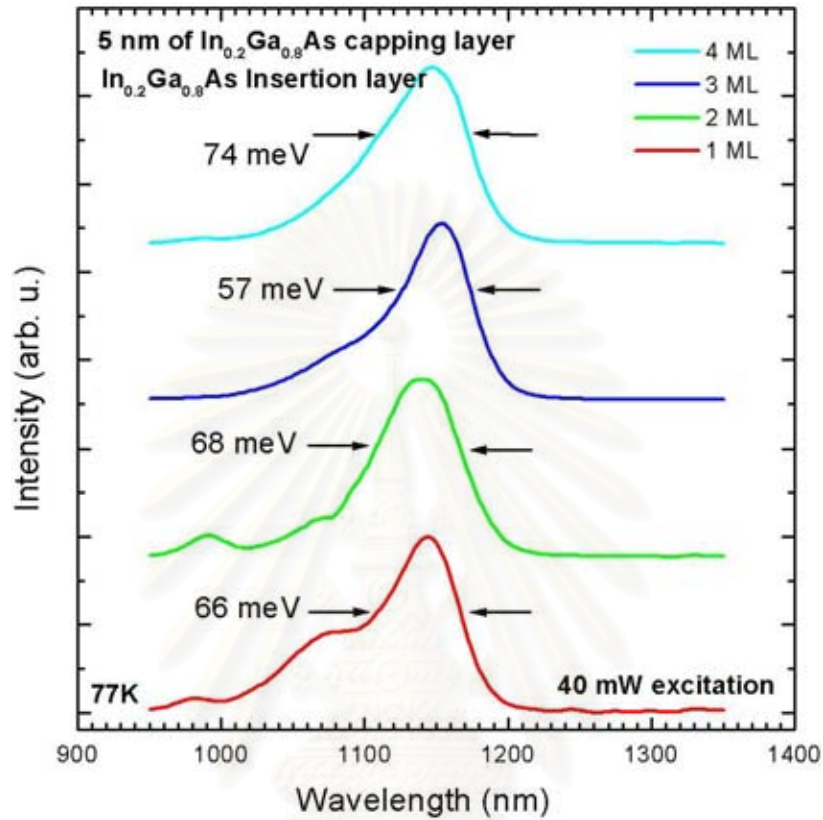
รูปที่ 4.13 (ก) กราฟค่าความเครียดแบบดึงในแนวตั้ง (ϵ_{zz}) และค่าความเครียดแบบอัด (ϵ_{rr}) ในแนวระนาบของ โครงสร้างควอนตัมดอทที่เพิ่มขึ้นจากการปลูกกลบด้วย (ข) ชั้นผลึกแกเลียมอาร์เซไนด์ เปลี่ยนเป็น (ค) ชั้นผลึกอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์

ส่งผลให้ค่าความสูงของควอนตัมดอทเพิ่มมากขึ้น และมีแนวโน้มในการลดค่าการกระจายเชิงขนาดของโครงสร้างควอนตัมดอทอีกด้วย ทำให้ค่า FWHM ที่ได้จากคุณสมบัติสเปกตรัมทางแสงมีแนวโน้มแคบลงในทุกๆ โครงสร้าง ซึ่งเมื่อทำการเพิ่มค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นกลบอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ ก็จะทำให้ค่าความสูงของควอนตัมดอทเพิ่มขึ้นตามค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นกลบ ดังที่ได้จากค่ายอดแหลมของสเปกตรัมค่าความยาวคลื่นที่มีลักษณะเลื่อนไปทางค่าความยาวคลื่นที่ยาวขึ้น เมื่อเพิ่มค่าสัดส่วนของอินเดียมในชั้นกลบ ดังในรูปที่ 4.15 และ 4.16 โดยในกรณีโครงสร้างควอนตัมดอทที่มีการปลูกกลบด้วยชั้นผลึกอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ โดยมีค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นผลึกเท่ากับ 30 % จะมีค่าความเข้มแสงของสเปกตรัมค่าความยาวคลื่นที่ได้จากโครงสร้างควอนตัมดอทนี้ต่ำ ดังในรูปที่ 4.16 เนื่องจากเกิดการรวมตัวผ่านศูนย์กลางการรวมตัวที่ไม่เปล่งแสง [18] (Nonradiative recombination centers) ได้เพิ่มขึ้นตามค่าสัดส่วนของอินเดียมในชั้นกลบที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสาเหตุของการรวมตัวที่ไม่เปล่งแสงนี้เกิดขึ้นจากความไม่เรียบของผิวที่เกิดขึ้นในการปลูกกลบด้วยชั้นผลึกอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ ที่มีค่าสัดส่วนอินเดียมสูง



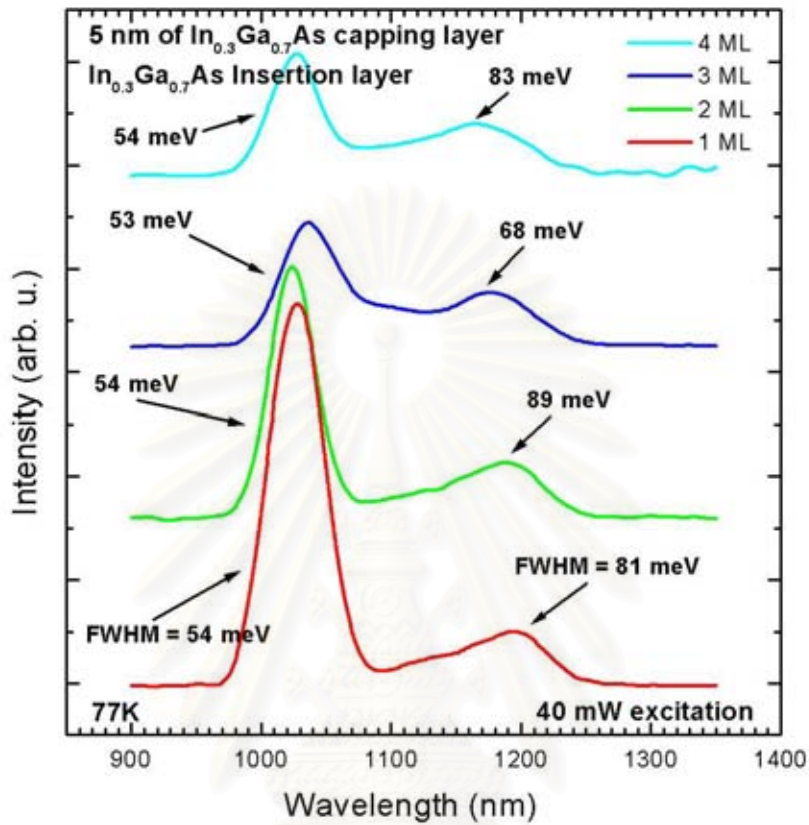
รูปที่ 4.14 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ที่อุณหภูมิ 77 K ของโครงสร้าง InAs ควอนตัมดอต ที่มีการแทรกชั้นผลึกบาง $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ ได้ชั้นควอนตัมดอต และมีการปลูกกลับด้วยชั้น $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ มีค่าความหนา 5 nm

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.15 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ที่อุณหภูมิ 77 K ของโครงสร้าง InAs ควอนตัมดอต ที่มีการแทรกชั้นผลึกบาง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ได้ชั้นควอนตัมดอต และมีการปลูกกลับด้วยชั้น $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ มีค่าความหนา 5 nm

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.16 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ที่อุณหภูมิ 77 K ของโครงสร้าง InAs ควอนตัมดอต ที่มีการแทรกชั้นผลึกบาง $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ ได้ชั้นควอนตัมดอต และมีการปลูกกลับด้วยชั้น $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ มีค่าความหนา 5 nm

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ในบทนี้เป็นการสรุปผลการทดลองที่ได้ดำเนินการอภิปรายผลการทดลอง ในเรื่อง การศึกษาอิทธิพลของชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่แทรกได้ชั้นอินเดียมอาร์เซไนด์ ความดันคอตที่มีผลต่อค่าความหนาแน่น และค่าการกระจายเชิงขนาดของความดันคอต และการศึกษาอิทธิพลของชั้นกลบอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่มีผลต่อคุณลักษณะทางแสงของ โครงสร้างอินเดียมอาร์เซไนด์ความดันคอตที่มีการแทรกชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ ได้ชั้นความดันคอต ตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 สามารถสรุปได้เป็นข้อๆ ดังนี้

5.1 การศึกษาอิทธิพลของชั้นแทรกอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์

จากการศึกษาอิทธิพลของชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่แทรกได้ชั้นอินเดียม อาร์เซไนด์ความดันคอต พบว่าชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ทำให้ค่าระยะทางการ เคลื่อนที่บนผิวของอะตอมอินเดียมก่อนที่จะเกิดเป็นผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์ลดลง ส่งผลให้ สามารถเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของความดันคอต และค่าการกระจายเชิงขนาดของความดัน คอตได้ ค่าระยะทางการเคลื่อนที่บนผิวของอะตอมอินเดียมก่อนที่จะเกิดเป็นผลึกอินเดียม อาร์เซไนด์นี้ลดลงตามค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นผลึกบางที่เพิ่มมากขึ้น (ในกรณีค่าสัดส่วนอินเดียม เท่ากับ 10 % และ 20% มีค่าระยะทางการเคลื่อนที่บนผิวของอะตอมอินเดียมใกล้เคียงกัน) และค่า ความหนาแน่นของชั้นผลึกบางที่เพิ่มขึ้น และเมื่อค่าสัดส่วนของอินเดียมในชั้นผลึกบางอินเดียม แกลเลียมอาร์เซไนด์เพิ่มมากขึ้น (ในกรณีค่าสัดส่วนอินเดียมเท่ากับ 20 % และ 30%) จะทำให้เกิด การแยกตัวออกจากกันของอะตอมอินเดียมผิวหน้าเมื่อทำการปลูกอินเดียมอาร์เซไนด์ความดันคอต ส่งผลให้ขนาดของความดันคอตมีขนาดเล็กลง และมีผลทำให้ค่าความหนาแน่นของความดัน คอตมีค่าลดลง (เห็นได้ชัดเจนในกรณีค่าสัดส่วนอินเดียมในชั้นผลึกบางเท่ากับ 20 %)

5.2 การศึกษาอิทธิพลของชั้นกลบอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์

จากการศึกษาอิทธิพลของชั้นกลบอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ ที่มีผลต่อโครงสร้าง อินเดียมอาร์เซไนด์ความดันคอต ที่มีการแทรกชั้นผลึกบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ได้ชั้น ความดันคอต พบว่าค่ายอดแหลมของสเปกตรัมค่าความยาวคลื่นที่ได้จากโครงสร้างอินเดียม อาร์เซไนด์ความดันคอต มีลักษณะเลื่อนไปทางค่าความยาวคลื่นที่ยาวขึ้นตามค่าสัดส่วนของ อินเดียมในชั้นกลบอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากชั้นที่ปลูกกลบนี้จะไปเพิ่มค่า

ความเครียดแบบตั้งในแนวตั้งและค่าความเครียดแบบอัดในแนวระนาบให้กับโครงสร้างควอนตัมดอต ทำให้สามารถลดแรงบีบที่กระทำกับโครงสร้างควอนตัมดอตในแนวตั้ง เมื่อเปรียบเทียบกับ การปลูกกลบด้วยชั้นผลึกแกเลียมอาร์เซไนด์ ส่งผลให้ค่าความสูงของควอนตัมดอตเพิ่มมากขึ้น รวมถึงสามารถเปลี่ยนแปลงลดค่าการกระจายเชิงขนาดของควอนตัมดอตทำให้ค่า FWHM ที่ได้จากคุณลักษณะสเปกตรัมทางแสงของโครงสร้างควอนตัมดอตมีลักษณะที่แคบลง แต่เมื่อทำการเพิ่มค่าสัดส่วนของอินเดียมในชั้นกลบเพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดการรวมตัวผ่านศูนย์กลางการรวมตัวที่ไม่เปล่งแสงเพิ่มขึ้นตาม ทำให้ค่าความเข้มแสงของสเปกตรัมค่าความยาวคลื่นที่ได้จากโครงสร้างควอนตัมดอตมีค่าต่ำลง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

ข้อเสนอแนะ

สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองเป็นค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบรูปแบบของ RHEED เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงการเรียงตัวของอะตอมบนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน ซึ่งเป็นวิธีที่อาจจะมีคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง โดยขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร ยกตัวอย่างเช่น ค่าความดันอาร์เซนิก และขึ้นกับความชำนาญของผู้อ่านเป็นอย่างมาก ซึ่งวิธีการที่ดีที่สุดคือการใช้ IR Pyrometer และใช้โลหะที่มีค่าจุดหลอมเหลวในช่วงที่ใช้ในการทดลอง เช่นอลูมิเนียมมีจุดหลอมเหลวที่ 660°C และ InSb ที่มีจุดหลอมเหลว 550°C ติดลงบนตัวรองแผ่นฐานที่เป็น โมลิบดีนัมที่มีแผ่นผลึกฐานติดอยู่ และทำการสอบเทียบค่าที่ได้จาก Pyrometer และค่าที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิ้ล เพื่อให้สามารถกำหนดค่าอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น นอกจากนี้ระบบ MBE ในขณะที่ได้ทำการทดลองมีเซลล์ของอินเดียมที่เป็นวัตถุขี้ผึ้งเซลล์เดียว จึงไม่อาจที่จะได้ค่าการกระจายเชิงขนาดของควอนตัมดอตที่ดีที่สุด เนื่องจากจำเป็นต้องใช้อัตราการปลูกอินเดียมอาร์เซไนด์เท่ากันตลอดทั้งโครงสร้าง ซึ่งใช้เท่ากับ 0.05 ML/s โดยในการปลูกโครงสร้างอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอตควรใช้อัตราการปลูกเท่ากับ 0.01 ML/s หรือต่ำกว่า จึงจะได้ค่าการกระจายเชิงขนาดของควอนตัมดอตที่ดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] Arakawa, Y., and Sakaki, H. 1982. Multidimensional Qw laser and temperature dependence of its threshold current. Applied Physics Letter 40(11): 939-942.
- [2] Wei-Sheng, L., Holin, C., Yu-Shen, L., and Jen-Inn, C. 2006. Pinholelike defects in multistack 1.3 μm InAs quantum dot laser. Journal of Applied Physics 99: 114514-9.
- [3] Chu, L., Arzberger, M., Böhm, G., and Abstreiter, G. 1999. Influence of growth conditions on the photoluminescence of self-assembled InAs/GaAs quantum dots. Journal of Applied Physics 85: 2354-2362.
- [4] Cheng, K.-Y. 1997. Molecular beam epitaxy technology of III-V compound semiconductors for optoelectronic applications. Proceeding of IEEE 85: 1694-1714.
- [5] Sugawara, M. 1999. Theoretical based of the optical properties of semiconductor quantum nano-structures. In M. Sugawara (ed.), Semiconductors and Semimentals: Self-assembled InGaAs/GaAs quantum dots, 60:1-116, San Diego: Academic Press.
- [6] Wolfe, C. M., Holonyak, N., Jr., and Stillman, G. E. 1989. Physical properties of semiconductors. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.
- [7] Alferov, Z. I. 2001. Nobel Lecture: the double heterostructure concept and its applications. Reviews of Modern Physics 73: 767-782.
- [8] Shchukin, V. A., et al. 1995. Spontaneous ordering of arrays of coherent strained islands. Physical Review Letters 75: 2968-2971.
- [9] Bimberg, D., Grundmann, M., and Ledentsov, N. N. 1999. Quantum dot heterostructures. Chichester: Wiley.
- [10] Daruka, I., and Barabási, A. L. 1997. Dislocation-free island formation in heteroepitaxial growth: a study at equilibrium. Physical Review Letters 79: 3708-3711.
- [11] Dobbs, H. T., and Vvedensky, D. D. 1997. Mean-field theory of quantum dot formation. Physical Review Letters 79: 897-900.
- [12] Junno, B., Jeppesen, S., Miller, M.S., and Samuelson, L. 1996. A comparison of RHEED reconstruction phases on (100) InAs, GaAs and InP. Journal of Crystal Growth 164: 66-70.
- [13] Pearsal, T.P. 1982. GaInAsP Alloy Semiconductors. New York: Wiley & Sons, pp.91.

- [14] Cheng, K.Y. 1997. Molecular beam epitaxy technology of III-V compound semiconductor for optoelectronic applications. IEEE Proc 85: 1694-1714.
- [15] Cho, A.Y. 1983. Growth of III-V semiconductor by molecular beam epitaxy and their properties. Thin Solid Film 100: 291-317.
- [16] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. 2542. การศึกษาสภาพพื้นผิวของโพลีเมอร์โดยใช้เทคนิค Atomic Force Microscopy. วารสาร Materials Characterization 6: 40-43.
- [17] Shin, H.,Kim, J.,Lee, W.,Yoon, E., and Yu,Y. 2006. Enhanced strain of InAs quantum dots by an InGaAs ternary layer in a GaAs matrix. Journal of Applied Physics 99: 023521-4.
- [18] Hsieh, T.,Chiu, P., and Chyi,J. 2005. 1.5 μ m emission from InAs quantum dots grown on GaAs. Applied Physics letters 87: 151903.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

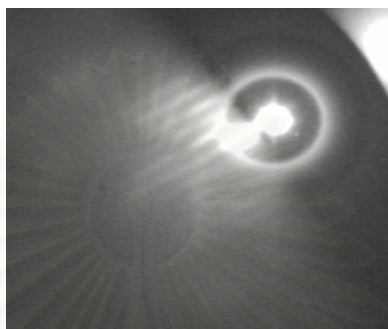


ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

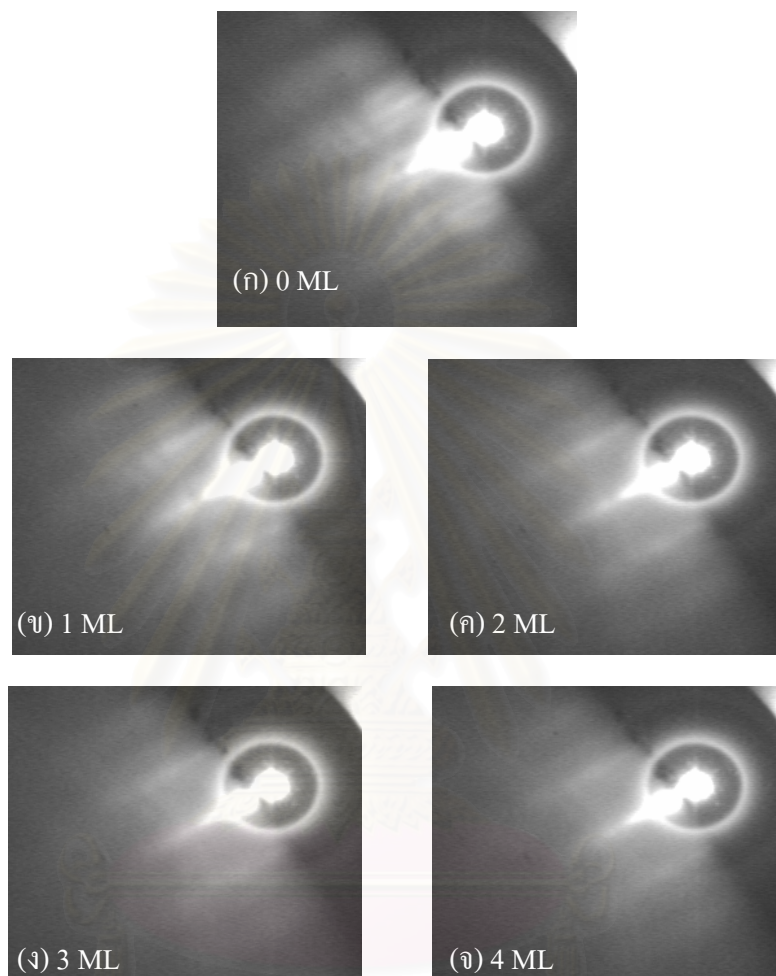
ภาคผนวก

รูปแบบ RHEED ที่ได้จากการทดลอง

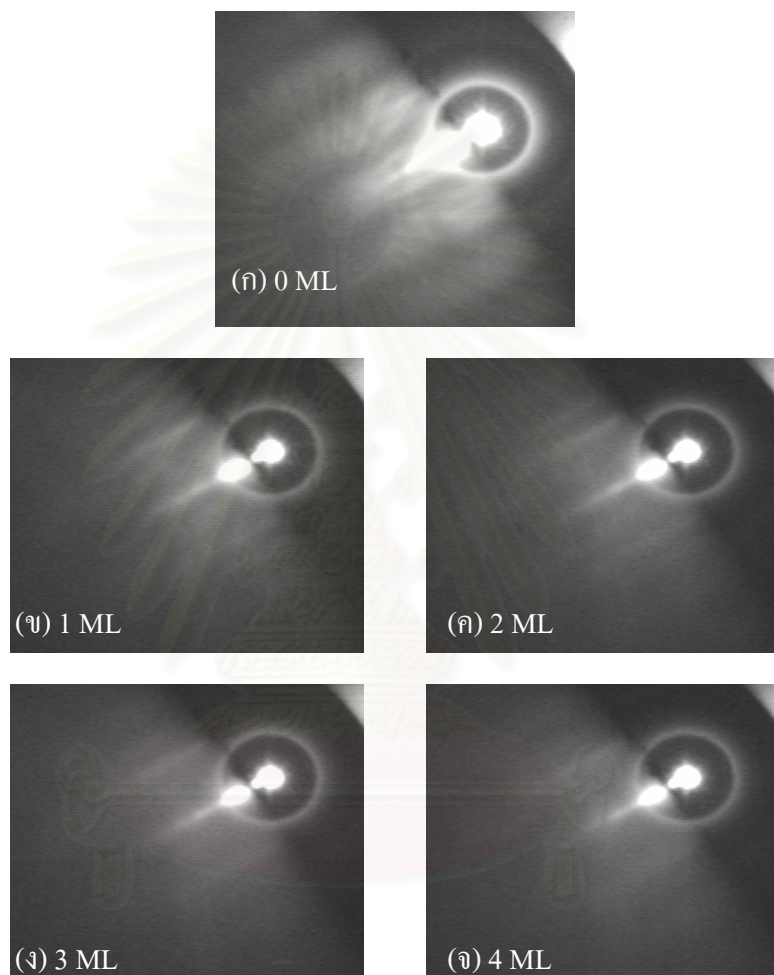


- รูปที่ 1 รูปแบบของ RHEED ชนิด (2×4) ในทิศทาง $[1\bar{1}0]$ ของแผ่นผลึกฐานแคลเดียมอาร์เซไนด์ เมื่อผ่านการปลูกชั้นผลึกแคลเดียมอาร์เซไนด์บัฟเฟอร์หนา 200 nm ที่อุณหภูมิเท่ากับ 600°C

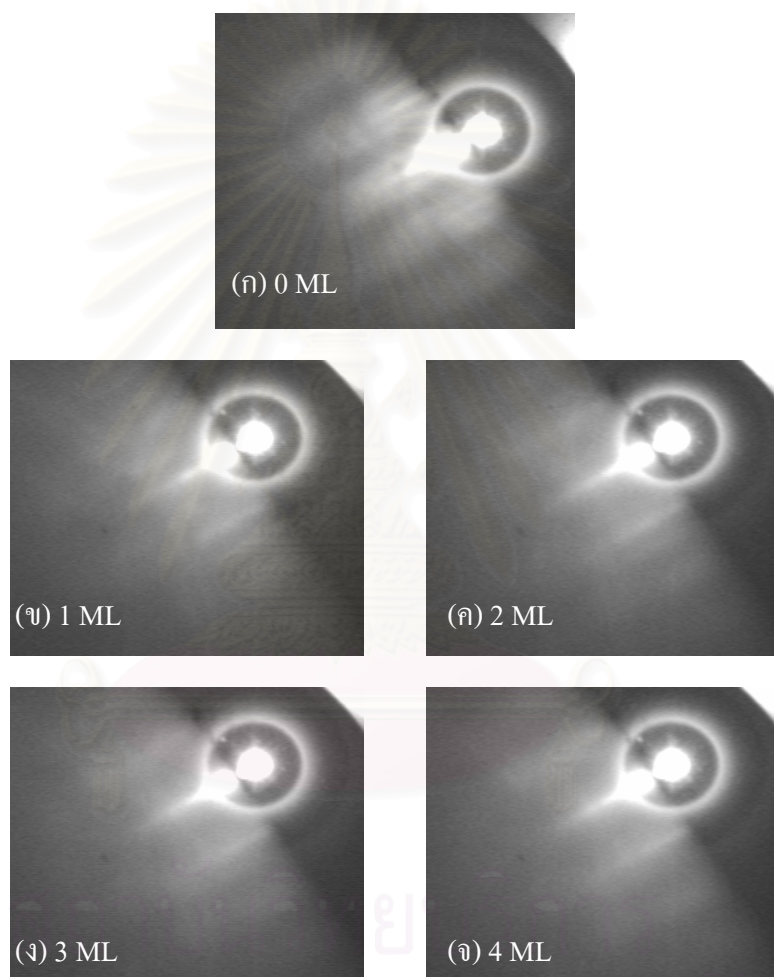
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2 รูปแบบของ RHEED ในทิศทาง [110] ของแผ่นผลึกฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์ เมื่อผ่านการปลูกชั้นผลึกบาง $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ มีค่าความหนาเท่ากับ (ก) 0 ML (ข) 1 ML (ค) 2 ML (ง) 3 ML และ (จ) 4 ML ที่อุณหภูมิเท่ากับ 500°C



รูปที่ 3 รูปแบบของ RHEED ในทิศทาง $[1\bar{1}0]$ ของแผ่นผลึกฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์ เมื่อผ่านการปลูกชั้นผลึกบาง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ มีค่าความหนาเท่ากับ (ก) 0 ML (ข) 1 ML (ค) 2 ML (ง) 3 ML และ (จ) 4 ML ที่อุณหภูมิเท่ากับ 500°C



รูปที่ 4 รูปแบบของ RHEED ในทิศทาง $[1\bar{1}0]$ ของแผ่นผลึกฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์ เมื่อผ่านการปลูกชั้นผลึกบาง $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ มีค่าความหนาเท่ากับ (ก) 0 ML (ข) 1 ML (ค) 2 ML (ง) 3 ML และ (จ) 4 ML ที่อุณหภูมิเท่ากับ 500°C

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายบุญศิริ บุญเป็ง เกิดเมื่อวันที่ 25 สิงหาคม พ.ศ. 2523 ที่อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ ได้รับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อปี พ.ศ. 2546



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย