

การประดิษฐ์ควอนตัมดอทโมเลกุลที่เรียงตัวกันด้านข้าง InAs
บน InGaAs แม่แบบนาโนโฮลที่เปลี่ยนรูปด้วยการปลูกผลึกอีพิแทกซีจากลำโมเลกุล



นางสาวณัฐภาส ประภาสวัตต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FABRICATION OF InAs LATERAL QUANTUM-DOT MOLECULES
ON InGaAs DEFORMED NANO HOLE TEMPLATES BY MOLECULAR BEAM EPITAXY

Miss Nattapa Prapasawad



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2014
Copyright of Chulalongkorn University

ณัฐภาส ประภาสวัตต์ : การประดิษฐ์ควอนตัมดอทโมเลกุลที่เรียงตัวกันด้านข้าง InAs บน InGaAs แม่แบบนาโนโฮลที่เปลี่ยนรูปด้วยการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล (FABRICATION OF InAs LATERAL QUANTUM-DOT MOLECULES ON InGaAs DEFORMED NANO HOLE TEMPLATES BY MOLECULAR BEAM EPITAXY) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์, 67 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการประดิษฐ์ควอนตัมดอทโมเลกุลที่เรียงตัวกันด้านข้างของ InAs บน InGaAs แม่แบบนาโนโฮลที่เปลี่ยนรูปด้วยการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล เริ่มต้นจากการประดิษฐ์แม่แบบนาโนโฮลได้จากวิธีการปลูกผลึกทรอปเล็ทอพิแทกซีและควอนตัมดอทโมเลกุล InAs ได้จากวิธี Stranski-Krastanov ซึ่งในกระบวนการประดิษฐ์แม่แบบนาโนโฮลได้ทำการการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะ InGa ($300-350^{\circ}\text{C}$) พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากขึ้นแม่แบบนาโนโฮลรูปร่างสี่เหลี่ยมมีแนวโน้มของขนาดที่ใหญ่ขึ้นและความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลง ที่ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐาน 350°C ได้รูปร่างแม่แบบนาโนโฮลเป็นวงแหวนสองชั้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานไปยังอุณหภูมิเป้าหมาย ($420-480^{\circ}\text{C}$) เพื่อทำการปลูกควอนตัมดอทโมเลกุลพบว่าแม่แบบนาโนโฮลได้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นเนินขนาดนาโน ซึ่งในขั้นตอนนี้ได้มีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการปลูกดังนี้ ค่าอุณหภูมิเป้าหมายที่ใช้ทำการปลูกควอนตัมดอทโมเลกุล พบว่าเมื่ออุณหภูมิเป้าหมายมากขึ้นทำให้เนินขนาดนาโนมีแนวโน้มของขนาดและความสูงเพิ่มขึ้น และแนวโน้มของความหนาแน่นลดลง ค่าอัตราการเพิ่มอุณหภูมิไปสู่อุณหภูมิเป้าหมาย ($5-20^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$) พบว่าเมื่อค่าอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้เนินขนาดนาโนมีแนวโน้มของขนาดและความสูงลดลง และแนวโน้มของความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และค่าระยะเวลาที่รอ ณ อุณหภูมิเป้าหมายก่อนทำการปลูกควอนตัมดอทโมเลกุล ($0-30$ วินาที) พบว่าเมื่อค่าระยะเวลาที่รอ ณ อุณหภูมิเป้าหมายก่อนทำการปลูกควอนตัมดอทโมเลกุลเพิ่มขึ้นทำให้ผิวหน้าของเนินขนาดนาโนมีควอนตัมดอทเกิดขึ้น หลังจากนั้นทำการปลูกควอนตัมดอทโมเลกุล โดยมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการปลูกดังนี้ ค่าระยะเวลาที่รอ ณ อุณหภูมิเป้าหมายก่อนทำการปลูกควอนตัมดอทโมเลกุล ค่าอัตราการปลูกอินเดียม ($0.05-0.15$ Monolayer/วินาที) และปริมาณอินเดียม ($0.45-0.75$ Monolayer) พบว่าเกิดโครงสร้างควอนตัมดอทและควอนตัมดอทโมเลกุลบนผิวหน้าเนินขนาดนาโนบริเวณตำแหน่งมุมของหลุมแม่แบบนาโนโฮลที่ถูกฝังอยู่ด้านล่างเป็นผลมาจากสนามความเครียดปริมาณมากบริเวณนั้น ซึ่งตัวแปรทั้งหมดมีผลต่อเปอร์เซ็นต์การเกิดควอนตัมดอทที่มีจำนวนดอทแตกต่างกัน ($1-4$ ดอท) และเมื่อปลูกควอนตัมดอทโมเลกุลที่อุณหภูมิต่ำ (150°C) พบว่าไม่เกิดควอนตัมดอทในหลุมแม่แบบนาโนโฮล

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5570573621 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: INDIUM ARSENIDE / INDIUM GALLIUM ARSENIDE / QUANTUM-DOT MOLECULE / DROPLET EPITAXY / STRANSKI-KRASTANOV / MOLECULAR BEAM EPITAXY

NATTAPA PRAPASAWAD: FABRICATION OF InAs LATERAL QUANTUM-DOT MOLECULES ON InGaAs DEFORMED NANOHOLE TEMPLATES BY MOLECULAR BEAM EPITAXY. ADVISOR: ASSOC. PROF. SOMCHAI RATANATHAMMAPHAN, D.Eng., 67 pp.

This thesis reported on the fabrication of InAs lateral quantum-dot molecules on InGaAs deformed nanohole template by molecular beam epitaxy. The lateral InAs quantum-dot molecules were grown on the InGaAs nanomounds via Stranski-Krastanov (SK) technique and InGaAs square-like nanohole templates were grown by Droplet epitaxy technique. The square-like nanohole templates were fabricated with various the droplet of InGa substrate temperature (300-350°C). With the droplet of InGa substrate temperature increasing, the size of square-like nanohole templates trend to increase and the density is decreased. The maximum value of the droplet of InGa substrate temperature (350°C) affects the shape of square-like nanohole templates changing to double rings. When the substrate temperature is increased to growth-quantum-dot molecules temperature, the square-like nanohole templates transfer into nanomounds. As increasing the substrate temperature to the growth-quantum-dot molecules temperature, the parameter of the growth-quantum-dot molecules temperature was varied (420-480°C). With the growth-quantum-dot molecules temperature increasing, the size and height of nanomounds trend to increase and the density is decrease. At ramp-up rate, increasing of the ramp-up rate (5-20°C/min) leads to decrease the size and height of nanomounds and increase the density. At halt times (0-30 s), increasing of the halt times leads to form quantum dots on nanomound surfaces. Afterward the quantum-dot molecules are grown by various the halt times, In growth rate (0.05-0.15 Monolayer (ML)/s), and In amount (0.45-0.75 ML), quantum dots and the quantum-dot molecules nucleate on the nanomound surfaces at the corner buried square-like nanohole because of high strain field. All of the quantum-dot molecules parameters lead to be different percentage of number of quantum dots per molecule (1-4 dots) on the nanomounds. When the quantum-dot molecules are grown at low temperature (150°C), the quantum-dot molecules do not occur in the nanohole template.

Department: Electrical Engineering

Student's Signature

Field of Study: Electrical Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาและวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งได้รับการสนับสนุนจาก

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้ความ
กรุณาให้คำแนะนำต่างๆ เกี่ยวกับความรู้และขั้นตอนตั้งแต่เริ่มทำวิทยานิพนธ์จนวิทยานิพนธ์
เสร็จสมบูรณ์

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ได้แก่ ศ.ดร.สมศักดิ์
ปัญญาแก้ว รศ.ดร.บรรยง โตประเสริฐพงศ์ และ รศ.ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณศุภโชค ไทยน้อย คุณพัฒนา พันธุ์วงศ์ คุณขวัญเรือน ไทย
น้อย คุณพรชัย ช่างม่วง และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านเทคนิคและงาน
ทางด้านธุรการต่างๆ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร.นราพร ปั้นเก่า ดร.เมธี คุณรักษา นางสาวพัชรีวรรณ โปรงจิต
นายสมัชชา วรธำรง นางสาวกมลชนก ขอกกลาง และนิสิตปริญญาเอก โท ตรี ทุกท่านใน
ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ได้ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆ ด้วยความเต็ม
ใจ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ กองทุนรัชดาภิเษกสมโภชจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
(RES560530079-EN) ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง และบุคคลรอบข้างทุก
ท่านที่ให้อำนาจใจและห่วงใยในการทำวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปได้
ด้วยดี คุณประโยชน์อันจะเกิดจากผลงานวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นเครื่องบูชาพระคุณ
บูรพาจารย์ตลอดจนคุณบิดามารดาที่ได้มีส่วนช่วยวางรากฐานการศึกษาแก่ผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์	3
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐาน	4
2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับโครงสร้าง Low-Dimension	4
2.2 ความหนาแน่นสถานะ (density of states: D.O.S.).....	6
2.2.1 วัสดุก้อนมวลสาร.....	7
2.2.2 ควอนตัมเวลล์.....	7
2.2.3 ควอนตัมไวร์.....	8
2.2.4 ควอนตัมดอต	8
2.3 การประดิษฐ์ควอนตัมดอต.....	9
2.3.1 แบบทำจากบนลงล่าง (top-down approach).....	9
2.3.2 แบบทำจากล่างขึ้นบน (Bottom-up) หรือ การก่อตัวขึ้นเอง (Self-assembled).....	10
2.4 โครงสร้างนาโนรูปร่างแหวน (Quantum ring).....	12
2.5 รูปแบบการเกิดผลึกอพิแทกซี (Growth modes).....	13
2.5.1 Frank van-der-Merwe (FM) หรือ การปลูกผลึกแบบชั้นต่อชั้น (layer-by-layer)..	14

2.5.2 Stranski-Krastanov (SK) หรือ การปลูกแบบผสมชั้นราบกับเกาะ 3 มิติ (Layer plus island)	14
2.5.3 Volmer–Weber (VW) หรือ การปลูกเกาะ 3 มิติ (island growth)	14
2.5.4 การปลูกผลึกโครงสร้างนาโนด้วยวิธีทรอปเล็ทอพิแทกซี (Droplet Epitaxy; DE)	16
2.6 การปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy: MBE)	18
2.6.1 ระบบการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล	19
2.7 ระบบสร้างภาพจากการสะท้อนของลำอิเล็กตรอนพลังงานสูง (RHEED)	20
2.7.1 การหาอัตราการปลูกผลึกด้วย RHEED oscillation	22
2.8 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM)	23
บทที่ 3 การทดลอง	25
3.1 การเตรียมแผ่นผลึกฐาน (sample preparation)	25
3.2 การเตรียมการในห้องปลูกผลึกก่อนการปลูกผลึก	25
3.3 การประดิษฐ์นาโนไฮลรูปร่างสี่เหลี่ยมของ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$	26
3.4 การประดิษฐ์เนินขนาดนาโน (Nanomound: NM) จาก InGaAs	27
3.4.1 อุณหภูมิเป้าหมายที่ใช้ในการปลูกผลึกควอนตัมดอทโมเลกุล	27
3.5 การประดิษฐ์ควอนตัมดอทโมเลกุลจาก InAs	27
3.5.1 การปลูกผลึกควอนตัมดอทโมเลกุลจาก InAs ที่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐาน 450°C	28
3.5.2 การปลูกผลึกควอนตัมดอทโมเลกุลจาก InAs ที่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐาน 150°C	28
บทที่ 4 ผลการทดลอง	30
4.1 การประดิษฐ์นาโนไฮลรูปร่างสี่เหลี่ยมของ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$	30
4.2 การประดิษฐ์เนินขนาดนาโนจาก InGaAs	35
4.2.1 อุณหภูมิที่กำหนดในการปลูกผลึกควอนตัมดอทโมเลกุล (T_d)	35
4.2.2 อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (R)	39

4.2.3 ระยะเวลาที่รอ ณ อุณหภูมิเป้าหมายก่อนทำการปลูกผลึกควอนตัมดอตโมเลกุล (t_h).....	42
4.3 การประดิษฐ์ควอนตัมดอตโมเลกุลจาก InAs.....	44
4.3.1 การปลูกผลึกควอนตัมดอตโมเลกุลจาก InAs ที่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐาน 450°C	44
4.3.1.1 ระยะเวลาที่รอ ณ อุณหภูมิเป้าหมายก่อนทำการปลูกผลึกควอนตัมดอต โมเลกุล (t_h).....	44
4.3.1.2 อัตราการปลูกอินเดียม (GR).....	47
4.3.1.3 ปริมาณอินเดียม.....	52
4.3.2 การปลูกผลึกควอนตัมดอตโมเลกุลจาก InAs ที่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐาน 150°C	56
บทที่ 5 สรุป.....	58
รายการอ้างอิง.....	61
ภาคผนวก.....	63
ผลงานตีพิมพ์.....	64
ผลงานนำเสนอ.....	65
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	67

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของวิทยานิพนธ์

โครงสร้างขนาดนาโน (nanostructure) ตัวอย่างเช่น ควอนตัมดอต (Quantum dot: QD) ควอนตัมดอตโมเลกุล (Quantum-dot molecule: QDM) และควอนตัมริงค์ (Quantum ring: QR) เป็นต้น โดยโครงสร้างขนาดนาโนส่วนใหญ่ขึ้นประดิษฐ์ขึ้นจากวัสดุสารกึ่งตัวนำ และเป็นโครงสร้างแบบ Low-dimension ซึ่งเป็นผลทำให้พาหะถูกกักเก็บ (Carrier confinement) อยู่ภายในด้วยโครงสร้างของแถบพลังงาน ดังนั้นโครงสร้างขนาดนาโนจึงเป็นที่สนใจอย่างมากในปัจจุบัน สำหรับโครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุลที่เรียงตัวกันด้านข้างแบบ 2 ดอตสามารถนำมาประยุกต์ทำเป็น cryptography [1] แบบ 4 ดอต (Quadra-quantum dots: QQDs) [2] สามารถนำมาประยุกต์ทำเป็น Quantum dot Cellular Automata (QCA) [3] เมื่อนำแต่ละเซลล์มาต่อเรียงกันสามารถส่งรับข้อมูลและทำเป็นสิ่งประดิษฐ์ลอจิกเกต (Logic gate) ได้ โดยอาศัยหลักการทำงานจากการวางตำแหน่งของอิเล็กตรอน 2 ตัวที่วางตัวในแนวทแยงมุมกันและสามารถกำหนดลอจิก (Logic) เป็น “0” หรือ “1” ได้ การรับส่งข้อมูลของอิเล็กตรอนจากเซลล์หนึ่งไปยังอีกเซลล์หนึ่ง โดยใช้แรงผลึกในระดับคูลอมบ์ (Coulomb repulsion force) ซึ่งทำให้การส่งข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและใช้พลังงานน้อย ด้วยเหตุผลดังกล่าว QCA จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ทางคอมพิวเตอร์ [4]

วิธีการประดิษฐ์โครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุล (QDMs) นั้นสามารถทำได้ 2 ลักษณะ ได้แก่ ลักษณะที่ทำจากบนลงล่าง (Top-down approach) เป็นวิธีที่ทำด้วยกระบวนการลิโธกราฟีและการกัดขึ้นรูปทางเคมี ทำให้ได้โครงสร้าง QDMs ที่มีขนาดและการจัดเรียงตัวตามต้องการ แต่มีข้อเสียคือบริเวณผิวโดยรอบของ QDMs เกิดความเสียหายหรือบป่องจากกระบวนการกัดทางเคมี และการปนเปื้อนที่ผิวที่สัมผัสกับสารเคมี สำหรับอีกลักษณะคือ การทำจากล่างขึ้นบน (Bottom-up) หรือการก่อตัวขึ้นเอง (Self-assembled) ที่จะได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งเป็นการใช้วิธีการปลูกผลึก 2 วิธี ได้แก่ เทคนิคดรอปเล็ทอิพิแทกซี (Droplet Epitaxy: DE) [5] และเทคนิค Stranski-Krastanov (SK) [6] โดยเริ่มต้นจากการประดิษฐ์นาโนโฮลสำหรับเป็นแม่แบบด้วยวิธี DE จากนั้นทำการปลูก QDMs ด้วยวิธี SK แต่อย่างไรก็ดีการปลูกผลึกวิธี DE นั้นตามปกติดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำและการปลูกผลึกวิธี SK นั้นดำเนินการที่อุณหภูมิสูง ด้วยความแตกต่างของค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการ

ปลูกผลึกระหว่างกระบวนการปลูกผลึกทั้งสองมีผลอย่างไรต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างนาโนโฮลที่เป็นแม่แบบที่เกิดขึ้นในกระบวนการประดิษฐ์ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความเข้าใจในปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการดังกล่าวจึงมีความสำคัญต่อการพัฒนาสิ่งประดิษฐ์โครงสร้าง QDMs และความต้องการทราบว่า การปลูกโครงสร้าง QDMs ที่อุณหภูมิต่ำ (150°C) มีผลอย่างไรกับโครงสร้าง QDMs อันเป็นที่มาของวิทยานิพนธ์นี้

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิในการขึ้นรูปหยดโลหะ ฯลฯ ที่ใช้ในกระบวนการปลูกผลึกทรอปเล็ทอพิแทกซีในการประดิษฐ์แม่แบบนาโนโฮล $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ การศึกษาอิทธิพลของอัตราการเพิ่มอุณหภูมิไปสู่อุณหภูมิเป้าหมาย และระยะเวลาที่รอ ณ อุณหภูมิเป้าหมายก่อนทำการปลูกผลึกควอนตัมดอตโมเลกุล ที่มีผลต่อรูปร่างของแม่แบบนาโนโฮล การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรระยะเวลาที่รอ ณ อุณหภูมิเป้าหมายก่อนทำการปลูกผลึกควอนตัมดอตโมเลกุล อัตราการปลูกและปริมาณอินเดียมที่มีผลต่อโครงสร้าง InAs QDMs สุดท้ายการศึกษาการปลูกโครงสร้าง InAs QDMs ที่อุณหภูมิต่ำ (150°C) ด้วยการวิเคราะห์ผ่านกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM)

เนื้อหาวิทยานิพนธ์ประกอบด้วยบทที่ 2 ความรู้พื้นฐานของโครงสร้าง Low-dimension วิธีการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล (MBE) ในบทที่ 3 กล่าวถึงกระบวนการทดลอง บทที่ 4 เป็นผลการทดลองที่ได้และการวิเคราะห์ผล และในบทที่ 5 เป็นสรุปสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

1.2 วัตถุประสงค์

- เพื่อศึกษาการประดิษฐ์โครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุลที่เรียงตัวกันด้านข้างจากอินเดียมอาร์เซไนด์ (InAs) ด้วยวิธี Stranski-Krastanov และวิธีการปลูกผลึกบนผิวโครงสร้างนาโนโฮลที่แม่แบบ (Template) ที่ได้จากการปลูกผลึกทรอปเล็ทอพิแทกซี
- ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะอินเดียมแกลเลียม (InGa) ในการประดิษฐ์อินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ (InGaAs) แม่แบบนาโนโฮล
- ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปของแม่แบบนาโนโฮลก่อนการปลูกผลึกควอนตัมดอตโมเลกุล ได้แก่ ค่าอุณหภูมิเป้าหมายที่ใช้ทำการปลูกผลึกควอนตัมดอตโมเลกุล

อัตราการเพิ่มอุณหภูมิไปสู่อุณหภูมิเป้าหมาย และระยะเวลาที่รอ ณ อุณหภูมิเป้าหมายก่อนทำการปลูกผลึกควอนตัมดอตโมเลกุล

- ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรระยะเวลาที่รอ ณ อุณหภูมิเป้าหมายก่อนทำการปลูกผลึกควอนตัมดอตโมเลกุล ตัวแปรอัตราการปลูกและปริมาณอินเดียมที่มีผลต่อโครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุล
- ศึกษาวิธีการปลูกผลึกควอนตัมดอตโมเลกุลที่อุณหภูมิต่ำ (150°C)

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

วิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปหยดโลหะเพื่อประดิษฐ์โครงสร้างนาโนไฮดรูปร่างสี่เหลี่ยมอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ ($\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$) และศึกษาอิทธิพลของตัวแปรอุณหภูมิเป้าหมายที่ใช้ในการปลูกผลึกควอนตัมดอตโมเลกุล อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ และระยะเวลาที่รอก่อนทำการปลูกโครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุลที่มีต่อโครงสร้างเนินขนาดนาโน InGaAs และศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาที่รอก่อนการปลูกโครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุล ตัวแปรอัตราการปลูกและปริมาณอินเดียมที่มีต่อโครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุล InAs และเปอร์เซ็นต์การเกิดโครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุลชนิดต่าง ๆ บนโครงสร้างเนินขนาดนาโน InGaAs และศึกษาการปลูกโครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุลที่อุณหภูมิต่ำ (150°C) จากนั้นวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างระดับนาโนที่เกิดบนแผ่นผลึกฐาน GaAs (001)

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์

องค์ความรู้ของการประดิษฐ์โครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุลที่เรียงตัวกันด้านข้าง InAs ที่มีรูปแบบ 2 ดอตโมเลกุลสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการคำนวณในระดับควอนตัมและใช้ในการถอดรหัส (cryptography) ได้ ส่วนที่เป็นควอนตัมดอตโมเลกุล 4 ดอต สามารถนำไปประยุกต์ใช้ทำเป็น Quantum dot Cellular Automata (QCA) ได้ และเมื่อนำเซลล์ QCA แต่ละเซลล์มาเรียงต่อกันจะสามารถส่งข้อมูลและทำเป็นเกตโลจิกได้

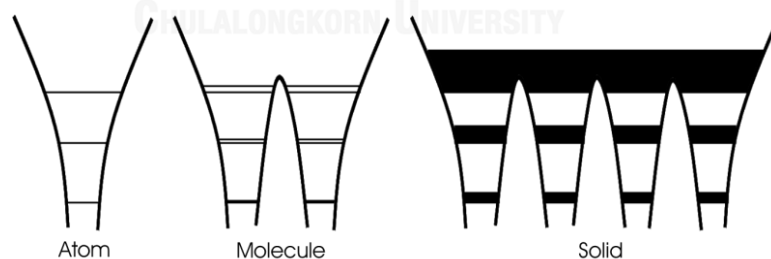
บทที่ 2

ความรู้พื้นฐาน

เนื้อหาบทนี้กล่าวถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับโครงสร้าง Low-Dimension ความหนาแน่นสถานะของควอนตัมเวลล์ ควอนตัมไวร์ และควอนตัมดอต การประดิษฐ์ควอนตัมดอต ได้แก่ แบบทำจากบนลงล่างและแบบทำจากล่างขึ้นบน รวมถึงรูปแบบการเกิดผลึกอพิแทกซีบนแผ่นผลึกฐานมีวิธีการปลูกหลายวิธี ได้แก่ Frank van-der-Merwe (FM), Stranski-Krastanov (SK), และ Volmer-Weber (VW) การปลูกผลึกโครงสร้างนาโนด้วยวิธีดรอปลีทอพิแทกซี และความรู้พื้นฐานการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล (MBE) ระบบสร้างภาพจากการสะท้อนของลำอิเล็กตรอนพลังงานสูง (RHEED) และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM)

2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับโครงสร้าง Low-Dimension

เมื่อพิจารณาอะตอมจำนวน 1 อะตอมนั้นมี 1 บ่อพลังงานศักย์ (Potential well) ที่มีระดับพลังงานแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete energy levels) ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนสามารถอยู่ได้ เมื่อนำ 2 อะตอมมารวมกันเป็นโมเลกุลทำให้ที่ระดับพลังงานที่เท่ากันเกิดการแยก (Split) ออกจากกัน และเมื่ออะตอมจำนวนมากทำพันธะระหว่างกันทำให้ที่ระดับพลังงานเดียวกันมีการแยกออกจากกัน แต่เนื่องจากมีจำนวนอะตอมที่มากทำให้เกิดเป็นแถบพลังงานขึ้น ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ระดับพลังงานไม่ต่อเนื่องของอะตอม, ระดับพลังงานแยกออกจากกันของโมเลกุล, ระดับพลังงานมีลักษณะเป็นแถบพลังงานของวัสดุ

แถบพลังงานที่สำคัญในสารกึ่งตัวนำได้แก่ แถบวาเลนซ์ (Valence band) แถบพลังงานต้องห้ามหรือช่องว่างแถบพลังงาน (Energy gap) และแถบนำไฟฟ้า (Conduction band) ที่อุณหภูมิ 0 K แถบวาเลนซ์มีอิเล็กตรอนอยู่เต็ม แต่แถบนำไฟฟ้าไม่มีอิเล็กตรอนอยู่ เมื่อสารกึ่งตัวนำได้รับพลังงานจากภายนอก เช่น พลังงานความร้อน แสง หรือยิงด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง เป็นต้น

อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ได้รับพลังงานกระตุ้นให้ข้ามแถบพลังงานต้องห้ามไปยังแถบนำไฟฟ้า ในกรณีที่พลังงานกระตุ้นมีค่าไม่น้อยกว่าพลังงานแถบต้องห้าม ทำให้มีอิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้ามากขึ้นและเกิดโฮล (Hole) ในแถบวาเลนซ์หรือสเททที่อิเล็กตรอนหลุดออกไป อิเล็กตรอนและโฮลสามารถเคลื่อนที่ได้โดยอิสระในแถบพลังงานทำให้สารกึ่งตัวนำสามารถนำไฟฟ้าได้ หากเราต้องการการควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะ เราสามารถใช้โครงสร้าง Low-dimension ในการจำกัดมิติการเคลื่อนที่ของพาหะได้ ด้วยการลดขนาดของวัสดุให้เล็กลงในระดับนาโนเมตร ซึ่งทำให้เกิดการจำกัดทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะและการกักเก็บพาหะ ส่งผลให้เกิดระดับพลังงานย่อยที่มีลักษณะไม่ต่อเนื่อง [7]

โครงสร้าง Low-dimension นั้นพาหะจะถูกจำกัดบริเวณในทิศทางใดทิศทางหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งทิศทาง ซึ่งค่าช่วงความยาวของการกักเก็บพาหะเป็นอัตราส่วนของความยาวคลื่นเดอบรอกลี (de Broglie wavelength) แปรผกผันกับค่ามวลประสิทธิผลของพาหะ (carrier effective mass, m^*) และค่าอุณหภูมิ (T) ดังสมการ (2.1) [8]

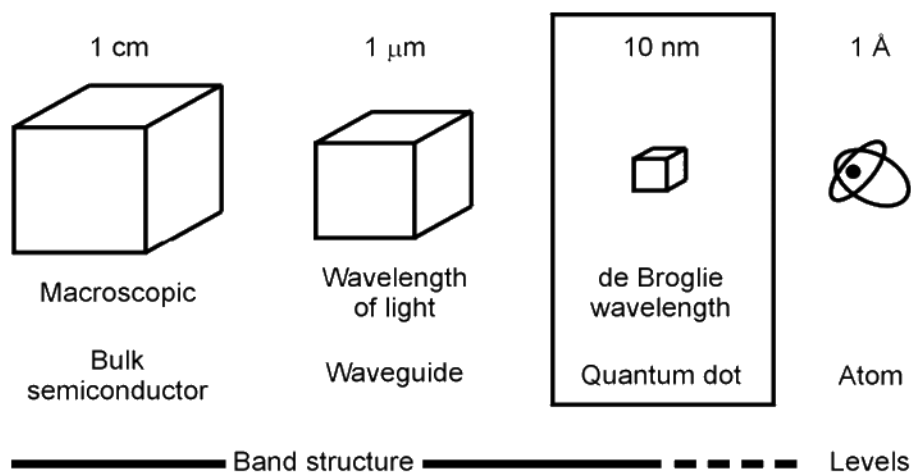
$$\lambda_{deBroglie} = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{3m^* k_B T}} \quad (2.1)$$

โดย h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant)

p คือ โมเมนตัมของพาหะ (carrier momentum)

k_B คือ ค่าคงตัวของโบลท์ซแมน (Boltzmann's constant)

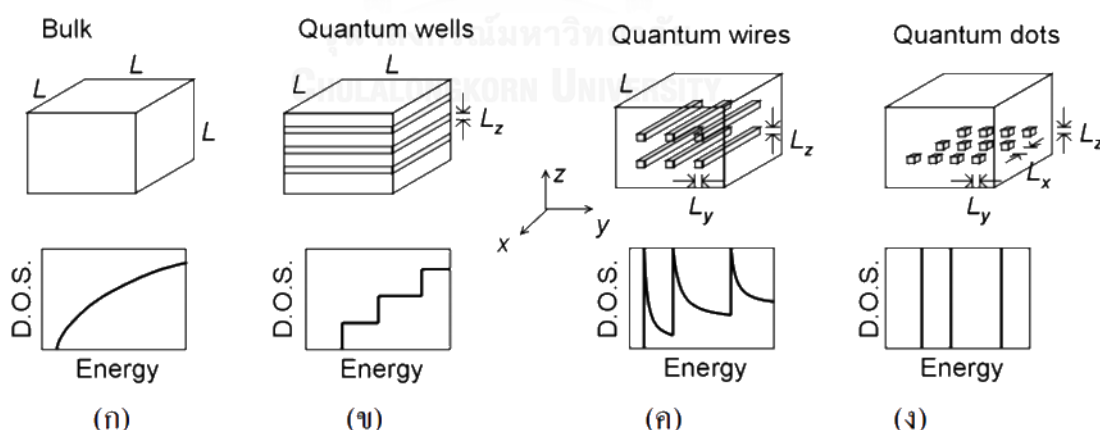
เมื่อเปรียบเทียบวัสดุที่มีขนาดใหญ่เป็นก้อนมวลสาร (Bulk) ตัวอย่างเช่น ท่อนำคลื่น (Waveguide) ที่มีขนาดระดับไมโครเมตร ควอนตัมดอต (quantum dot) ซึ่งขนาดอยู่ในระดับความยาวคลื่นเดอบรอกลี และอะตอม การเปรียบเทียบนี้สามารถอธิบายได้โดยใช้แถบพลังงาน ปรากฏว่าวัสดุที่มีขนาดใหญ่มีแถบพลังงานแบบต่อเนื่อง เมื่อวัสดุนั้นมีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรและอะตอมจะมีแถบพลังงานแบบไม่ต่อเนื่อง ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบขนาดของวัสดุก้อนมวลสาร ท่อนำคลื่น ควอนตัมดอต และอะตอม [9]

2.2 ความหนาแน่นสถานะ (density of states: D.O.S.)

โครงสร้าง Low-dimension เป็นโครงสร้างที่เกิดจากการใช้วัสดุต่างชนิดกัน โดยวัสดุที่มีแถบพลังงานต้องห้ามแคบถูกล้อมรอบด้วยวัสดุที่มีแถบพลังงานต้องห้ามที่กว้างกว่า เพื่อจำกัดทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะและกักเก็บพาหะในมิติใดมิติหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งมิติก็ได้ ตัวอย่างโครงสร้าง Low-dimension ได้แก่ ควอนตัมเวลล์ (Quantum wells) ควอนตัมไวร์ (Quantum wires) และควอนตัมดอต (Quantum dot) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างและความหนาแน่นสถานะ (D.O.S.) ได้แก่ (ก) ก้อนมวลสาร (ข) ควอนตัมเวลล์ (ค) ควอนตัมไวร์ และ (ง) ควอนตัมดอต โดยที่ L มีค่าอยู่ในระดับไมโครเมตร ขณะที่ L_x , L_y และ L_z อยู่ในระดับนาโนเมตร [10]

2.2.1 วัสดุก้อนมวลสาร

วัสดุก้อนมวลสารเป็นโครงสร้างที่ไม่มีการจำกัดทิศทางการเคลื่อนที่อันเป็นผลทำให้พาหะสามารถเคลื่อนที่ได้ทุกทิศทางภายในเนื้อของก้อนมวลสาร ค่าความหนาแน่นสถานะ ดังรูปที่ 2.3 (ก) มีสมการพลังงานและสมการความหนาแน่นสถานะ ดังนี้

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

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

โดย $\mathbf{k} = (k_x, k_y, k_z)$ คือเวกเตอร์คลื่น (Wave vector) ของพาหะ

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

2.2.2 ควอนตัมเวลล์

ควอนตัมเวลล์เป็นโครงสร้างที่จำกัดทิศทางการเคลื่อนที่เพียงหนึ่งทิศทางทำให้พาหะเคลื่อนที่ในแนวระนาบ เช่น จำกัดทิศทางตามแกน z โดยการจำกัดความหนาของชั้นให้หนาเท่ากับ L_z ทำให้พาหะเคลื่อนที่ในระนาบ x และระนาบ y จึงมีความหนาแน่นสถานะดังรูปที่ 2.3 (ข) มีสมการพลังงานและสมการความหนาแน่นสถานะดังนี้

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

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

โดย $k_{//}^2 = k_x^2 + k_y^2$

Θ คือ Heaviside's unit step function

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

L_{QW} คือ ผลรวมความหนาของเวลล์และ barrier regime

2.2.3 ควอนตัมไวร์

ควอนตัมไวร์เป็นโครงสร้างที่จำกัดทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะเคลื่อนที่ได้เพียงทิศทางเดียว เช่น จำกัดทิศทางการเคลื่อนที่ตามแกน z และ แกน y โดยการจำกัดความหนาและความกว้างของควอนตัมไวร์เท่ากับ L_z และ L_y ตามลำดับ ทำให้พาหะเคลื่อนที่ในแนวแกน x จึงมีความหนาแน่นสถานะ ดังรูปที่ 2.3 (ค) มีสมการพลังงานและสมการความหนาแน่นสถานะ ดังนี้

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

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

โดย $k_{\perp}^2 = k_x^2$

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

N_{wi} คือ ความหนาแน่นพื้นที่ของควอนตัมไวร์

2.2.4 ควอนตัมดอต

ควอนตัมดอตเป็นโครงสร้างที่จำกัดการเคลื่อนที่ของพาหะทั้งสามทิศทางโดยการจำกัดขนาดเท่ากับ L_x, L_y , และ L_z ให้อยู่ในระดับนาโนเมตร ทำให้พาหะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ทุกทิศทางเป็นการกักเก็บพาหะ จึงมีความหนาแน่นสถานะดังรูปที่ 2.3 (ง) มีสมการพลังงานและสมการความหนาแน่นสถานะ ดังนี้

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

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

โดย δ คือ เดลต้าฟังก์ชัน (delta function)

N_D คือ ปริมาตรความหนาแน่นของควอนตัมดอต

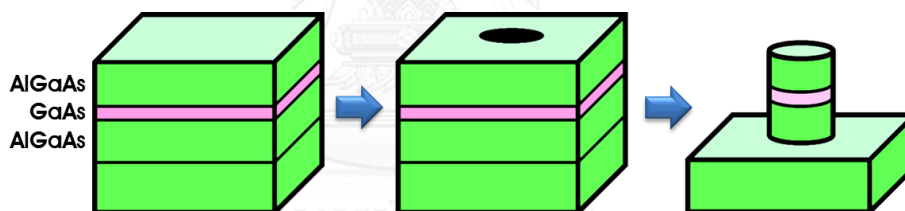
E_{n_x} , E_{n_y} และ E_{n_z} คือ พลังงานที่เป็นฟังก์ชันของตัวเลขควอนตัม

2.3 การประดิษฐ์ควอนตัมดอท

วิธีการประดิษฐ์โครงสร้างควอนตัมดอทนั้นสามารถทำได้ 2 แบบ ได้แก่ แบบทำจากบนลงล่าง (Top-down approach) และ แบบทำจากล่างขึ้นบน (Bottom-up) หรือ การก่อตัวขึ้นเอง (Self-assembled)

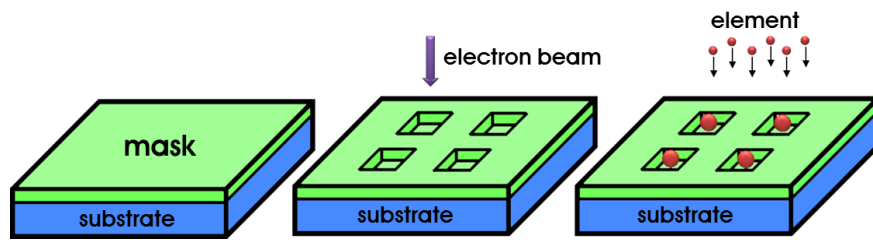
2.3.1 แบบทำจากบนลงล่าง (top-down approach)

เริ่มจากการปลูกชั้นผลึกบางลงบนแผ่นผลึกฐานที่เป็นโครงสร้างควอนตัมเวลล์ จากนั้นนำไปสร้างสลายด้วยกระบวนการลิโทกราฟีด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron beam lithography) หรือกระบวนการลิโทกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ (x-ray lithography) ที่ให้ความละเอียดสูง (High resolution) เพื่อให้ได้รูปแบบขนาดเล็ก จากนั้นทำการกัดขึ้นรูปทางเคมีให้ได้โครงสร้างควอนตัมดอทตามต้องการ สำหรับขั้นตอนของกระบวนการประดิษฐ์ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การประดิษฐ์โครงสร้างควอนตัมดอทด้วยการทำลิโทกราฟีและการกัดด้วยเคมี [11]

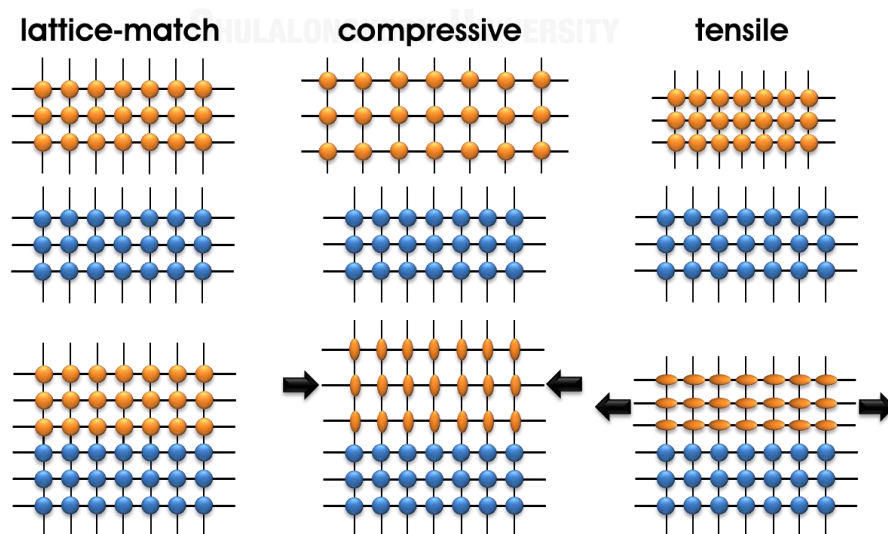
อีกวิธีการหนึ่งคือ ควบคุมพื้นที่การปลูกหรือการเตรียมรูปแบบบนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน โดยทำหน้ากาก (Mask) ตามรูปแบบที่ได้กำหนดไว้ด้วยกระบวนการลิโทกราฟีด้วยลำอิเล็กตรอน จากนั้นนำไปใช้ในการปลูกผลึก ดังรูปที่ 2.5 วิธีนี้มีข้อดี คือ สามารถควบคุมขนาดและตำแหน่งของควอนตัมดอทได้อย่างแน่นอน ข้อเสีย คือ บริเวณโดยรอบของควอนตัมดอทเกิดความเสียหายหรือบกพร่องและการปนเปื้อนจากกระบวนการกัดทางเคมี และขนาดของควอนตัมดอทขึ้นอยู่กับขนาดของลำอิเล็กตรอนหรือรังสีเอ็กซ์ในการทำลิโทกราฟี จึงไม่สามารถประดิษฐ์ควอนตัมดอทให้เล็กลงมากกว่านี้ได้



รูปที่ 2.5 การประดิษฐ์โครงสร้างควอนตัมดอทด้วยการเตรียมรูปแบบผิวหน้าก่อนการปลูก [12]

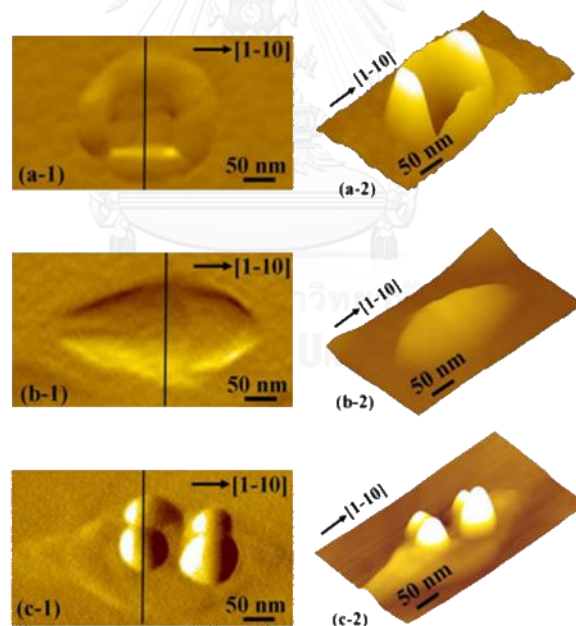
2.3.2 แบบทำจากล่างขึ้นบน (Bottom-up) หรือ การก่อตัวขึ้นเอง (Self-assembled)

ควอนตัมดอทที่เกิดจากการก่อตัวขึ้นเองได้จากการปลูกผลึกบนแผ่นผลึกฐานที่มีค่าคงตัวโครงผลึก (Lattice constant) แตกต่างกัน (Lattice mismatch) ส่งผลให้เกิดความเครียดเกิดขึ้นเมื่อปลูกชั้นผลึกที่มีความหนาพอจนทำให้เกิดกระบวนการผ่อนคลายความเครียด (Strain relaxation) ทำให้โครงสร้างควอนตัมดอทเกิดขึ้นบนแผ่นผลึกฐาน ซึ่งความเครียด (Strain) แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ แบบบีบอัด (Compressive) เกิดจากแผ่นผลึกฐานมีค่าคงตัวโครงผลึกน้อยกว่าชั้นผลึกที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐานเป็นความเครียดที่ทำให้เกิดควอนตัมดอท และแบบดึง (Tensile) เกิดจากแผ่นผลึกฐานมีค่าคงตัวโครงผลึกมากกว่าชั้นสารที่ปลูกข้างบน แต่เมื่อปลูกผลึกบนแผ่นผลึกฐานมีค่าคงตัวโครงผลึกเท่ากัน (Lattice match) ทำให้ได้ชั้นฟิล์มบางบนแผ่นผลึกฐาน ดังในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แบบจำลองการจัดเรียงอะตอมของการปลูกผลึกอิติทเทกซี ได้แก่ Lattice-match และ Lattice-mismatch มีความเครียดแบบบีบอัด และแบบดึง

ควอนตัมดอตโมเลกุล (Quantum dot Molecule: QDM) คือ กลุ่มของควอนตัมดอตที่อยู่ใกล้ ๆ กันนั้นมีรูปแบบเป็นลักษณะต่าง ๆ เช่น ควอนตัมดอตโมเลกุลที่ประกอบด้วย ควอนตัมดอต 2 ดอต (quantum dot pairs) [1] ควอนตัมดอต 4 ดอต (Quadra-quantum dots: QQDs) จากที่ผ่านมามีงานวิจัยเกี่ยวกับ QQDs โดยการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการประดิษฐ์ InAs QQDs โดย P. Boonpeng [2] โดยเริ่มต้นจากการปลูกโครงสร้าง $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ นาโนโฮลรูปร่างสี่เหลี่ยม (square-shaped holes) ด้วยวิธีทรอปเล็ทอพิแทกซี (Droplet Epitaxy: DE) เพื่อทำเป็นแม่แบบ (Template) จากนั้นทำการเปลี่ยนรูป (Transform) โครงสร้าง $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ นาโนโฮลรูปร่างสี่เหลี่ยมให้กลายเป็นโครงสร้างเนินขนาดนาโน (Nanomounds: NMs) ขั้นสุดท้ายทำการปลูก InAs QQDs ลงบนแม่แบบด้วยเทคนิค Stranski-Krastanov (SK) ทำให้ได้ InAs QQDs ซึ่งแต่ละดอตเกิดที่มุมที่เคยเป็นหลุมรูปสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 2.7



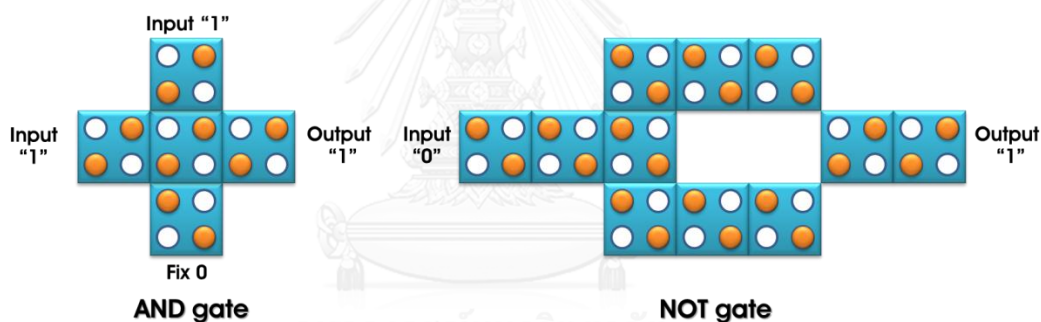
รูปที่ 2.7 โครงสร้างนาโนรูปร่างแหวงที่มีหลุมตรงกลางเป็นรูปสี่เหลี่ยม (บน) โครงสร้างเนินขนาดนาโน (กลาง) Quadra-quantum dots: QQDMs (ล่าง) [2]

อย่างไรก็ตามงานวิจัยดังกล่าวนี้ยังไม่ได้ศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อแม่แบบและตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการปลูก QDMs บนแม่แบบ จึงเป็นแรงจูงใจให้ผู้ทำวิจัยต้องการศึกษาผลของตัวแปรเหล่านั้นที่มีผลต่อการเกิด QDMs ด้วยลักษณะการวางตัวของ QQDs เป็นดังรูปที่ 2.7 (ล่าง) ทำให้

สามารถนำไปใช้เป็นในด้าน Quantum dot cellular automata (QCA) โดยหลักการทำงานของ QCA เมื่อใส่อิเล็กตรอนเข้าไปในควอนตัมดอต 2 ดอตที่วางตัวในแนวทแยงมุมและสามารถกำหนด โลจิก (Logic) เป็น “0” หรือ “1” ขึ้นอยู่กับการกำหนด ดังรูปที่ 2.8 การส่งข้อมูลของอิเล็กตรอน จากเซลล์หนึ่งไปเซลล์หนึ่งที่ใช้แรงผลึกในระดับคูลอมบ์ (Coulomb repulsion force) ซึ่งทำให้ ส่งข้อมูลได้เร็วและใช้พลังงานน้อย เมื่อนำ QCA หลายเซลล์มาต่อกันสามารถทำเป็นโลจิกเกต (logic gate) ได้ดังรูปที่ 2.9



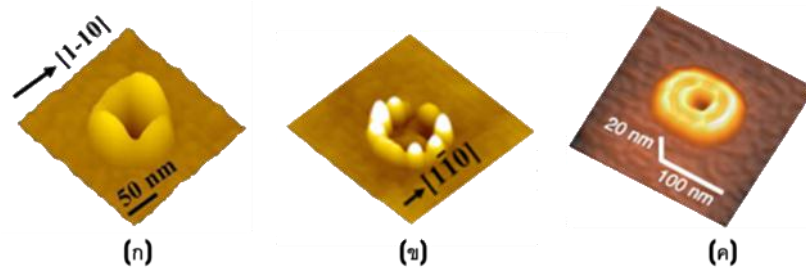
รูปที่ 2.8 แบบจำลองการกำหนดโลจิกเป็น “0” และ “1” [13]



รูปที่ 2.9 แบบจำลองการใช้เซลล์ QCA ทำเป็นเกตโลจิก เช่น AND gate และ NOT gate [13]

2.4 โครงสร้างนาโนรูปร่างแหวน (Quantum ring)

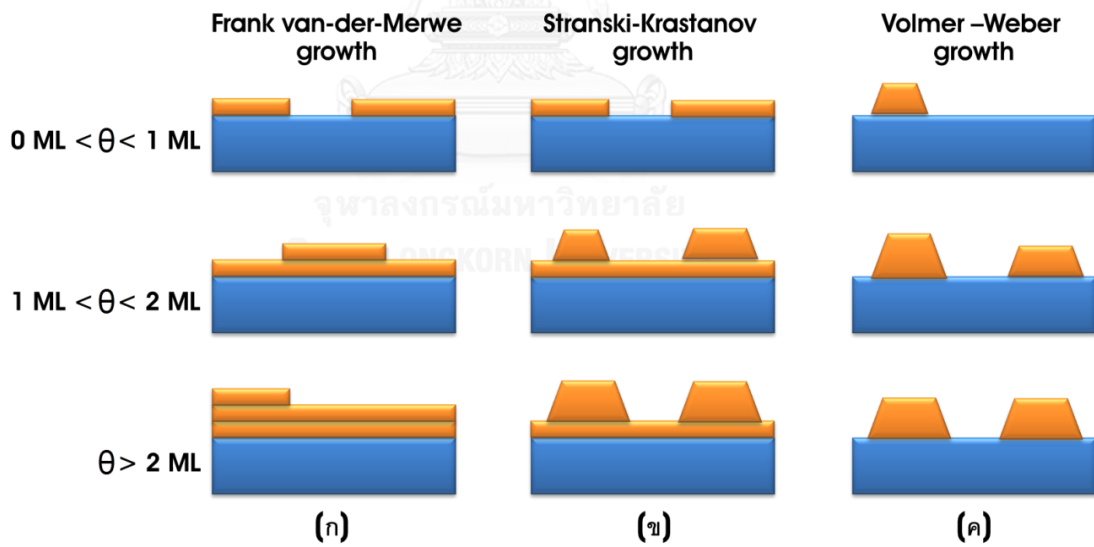
โครงสร้างนาโนรูปร่างแหวนเป็นโครงสร้างระดับนาโนเมตรที่มีคุณสมบัติคล้ายควอนตัมดอต แต่โครงสร้างนาโนรูปร่างแหวนถูกล้อมรอบด้วยสารที่มีแถบพลังงานต้องห้ามมากกว่าทำให้เกิดการ กักเก็บพาหะไว้ภายในโครงสร้างนาโนรูปร่างแหวนทำให้ระดับชั้นพลังงานที่ได้เป็นแบบไม่ต่อเนื่อง เช่นเดียวกัน และถ้าโครงสร้างนี้ไปถูกด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กจะสามารถแสดงคุณสมบัติ ทางแม่เหล็กเรียกว่า Aharonov-Bohm effect [14] โครงสร้างนาโนรูปร่างแหวนมีหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับสารที่ใช้ปลูกและเงื่อนไขในการปลูก ตัวอย่างโครงสร้างนาโนรูปร่างแหวน ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 (ก) โครงสร้างรูปร่างแหวนมีหลุมเป็นรูปสี่เหลี่ยม [2] (ข) โครงสร้างนาโนรูปร่างแหวน [15] (ค) โครงสร้างนาโนวงแหวนสองวง [5]

2.5 รูปแบบการเกิดผลึกอีพิแทกซี (Growth modes)

รูปแบบการเกิดผลึกอีพิแทกซีบนแผ่นผลึกฐานสามารถจำแนกได้ 3 รูปแบบ ได้แก่ Frank van-der-Merwe (FM), Stranski-Krastanov (SK), Volmer-Weber (VW) ดังรูปที่ 2.11 และ Droplet Epitaxy (DE) วิธีการปลูกเหล่านี้ทำให้เกิดชั้นอีพิแทกซีที่มีโครงสร้างนาโนที่แตกต่างกัน ดังจะอธิบายดังนี้



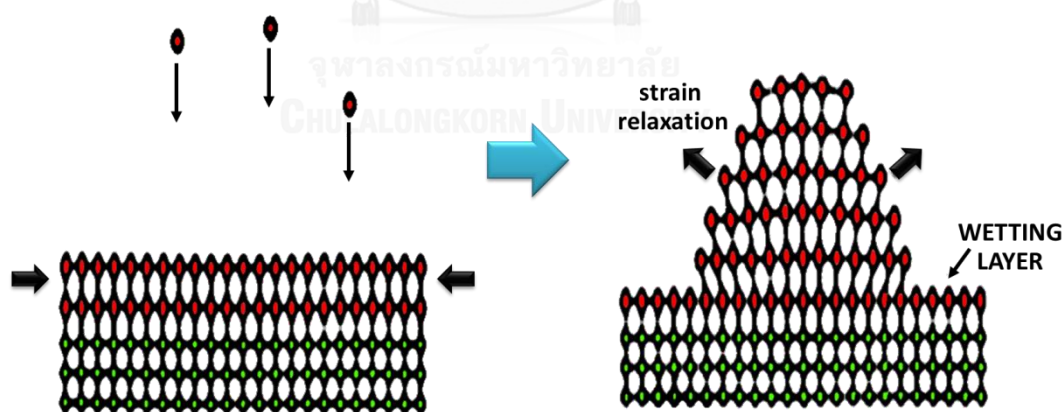
รูปที่ 2.11 วิธีการปลูกผลึกอีพิแทกซีแบบ (ก) Frank van-der-Merwe (ข) Stranski-Krastanov (ค) Volmer-Weber [16]

2.5.1 Frank van-der-Merwe (FM) หรือ การปลูกผลึกแบบชั้นต่อชั้น (layer-by-layer)

เป็นกลไกการเกิดผลึกอันเนื่องมาจากค่าคงตัวโครงสร้างผลึกของวัสดุที่ปลูกและแผ่นผลึกฐานมีความแตกต่างกันน้อยมาก ทำให้ปฏิสัมพันธ์ระหว่างอะตอมของสารที่ปลูกกับแผ่นฐานมีมากกว่าอะตอมที่ปลูกโดยรอบ ทำให้โครงสร้างที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นแบบชั้นราบ 2 มิติ โดยที่อะตอมไม่มีการสะสมที่ชั้นถัดไปถ้าหากชั้นล่างยังเป็นระนาบไม่สมบูรณ์

2.5.2 Stranski-Krastanov (SK) หรือ การปลูกแบบผสมชั้นราบกับเกาะ 3 มิติ (Layer plus island)

เป็นกลไกการเกิดผลึกอันเนื่องมาจากค่าคงตัวโครงสร้างผลึกของวัสดุที่ปลูกกับแผ่นผลึกฐานมีความแตกต่างกัน โดยทำให้ผลึกที่เกิดขึ้นมีลักษณะแบบผสมระหว่างการเกิดแบบ FM และแบบ VW โดยเกิดจากการปลูกชั้นผลึกที่มีความหนาเท่ากับความหนาวิกฤติ (critical thickness) ซึ่งความหนาขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่ใช้ปลูก ส่งผลให้ชั้นผลึกมีความเครียดมากขึ้น ระบบจึงทำการคลายความเครียดเหล่านั้นเกิดเป็นโครงสร้างเกาะ 3 มิติอยู่บนชั้นระนาบ 2 มิติที่เรียกว่า Wetting layer (WL) ดังรูปที่ 2.12



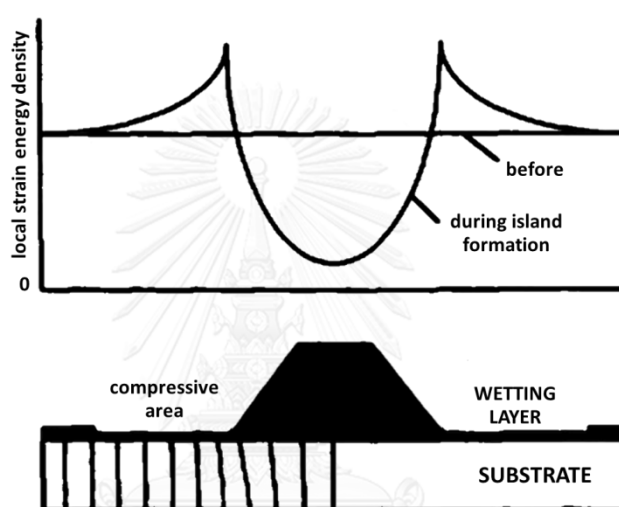
รูปที่ 2.12 การเกิดเกาะ 3 มิติในกระบวนการปลูกแบบ SK [17]

2.5.3 Volmer-Weber (VW) หรือ การปลูกเกาะ 3 มิติ (island growth)

เกิดจากค่าคงตัวโครงสร้างผลึกของสารที่ใช้ปลูกกับแผ่นผลึกฐานแตกต่างกันสูงมาก ทำให้ปฏิสัมพันธ์ของอะตอมของวัสดุที่ปลูกมีมากกว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างอะตอมของวัสดุที่ปลูกและอะตอม

ของแผ่นผลึกฐาน ทำให้รูปร่างของผลึกเกิดขึ้นมีลักษณะเป็นเกาะหรือมีลักษณะเป็นแบบ 3 มิติทันทีที่เริ่มปลูกและไม่มีชั้น WL เกิดขึ้น

ขีดจำกัดเชิงขนาดของควอนตัมดอตสามารถอธิบายด้วย Self-limiting growth โดยการศึกษาลังงานความเครียด (strain energy) รอบ ๆ เกาะ 3 มิติระหว่างการก่อตัวของเกาะ ดังในรูปที่ 2.13

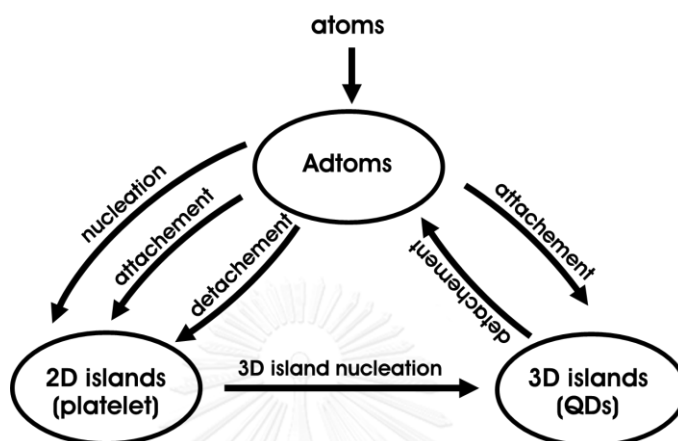


รูปที่ 2.13 ความหนาแน่นพลังงาน ณ ตำแหน่งต่างๆในโครงสร้างควอนตัมดอต [18]

ความหนาแน่นพลังงานที่เกิดขึ้นจากการก่อตัวของควอนตัมดอตส่งผลต่อศักย์เชิงเคมีที่ผิว (Surface chemical potential) โดยค่าพลังงานต่ำสุดอยู่ที่ยอดของเกาะ 3 มิติ เนื่องจากมีความเครียดน้อยที่สุด และมีค่ามากที่สุดที่ขอบของเกาะ 3 มิติเพราะมีความเครียดแบบบีบอัดสูง ซึ่งแรงบีบอัดถูกส่งต่อไปยังแผ่นผลึกฐานทำให้เกิดการ misfit ระหว่างแผ่นผลึกฐานและชั้น WL รอบ ๆ เกาะ 3 มิติ จึงเกิดเป็นกำแพงศักย์รอบควอนตัมดอตและเกิดเป็นอาณาบริเวณที่ไม่เหมาะสมสำหรับการก่อตัวของ adatoms

จากทฤษฎี Mean-field สามารถอธิบายกลไกการเกิดโครงสร้างต่าง ๆ ได้ ดังนี้ เริ่มต้นจากอะตอมแพร่มาถึงผิวหน้าแผ่นผลึกฐานกลายเป็น adatoms เมื่อจำนวนของ adatoms เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงต้นทำให้เกิดการก่อตัวเป็นเกาะ 2 มิติขึ้น อะตอมบางส่วนภายในเกาะแบบ 2 มิติสามารถหลุดออกมาเป็น adatoms ได้อีกครั้ง ถ้าขนาดเกาะน้อยกว่าค่าวิกฤต แต่เมื่อปลูกผลึก

เพิ่มมากขึ้น เกาะแบบ 2 มิติมีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากมี adatoms มาเกาะเพิ่มขึ้น ถ้าขนาดของเกาะ 2 มิติมีขนาดเกินกว่าค่าลิมิต การปลูกจะเปลี่ยนจาก 2 มิติเป็น 3 มิติซึ่ง adatoms สามารถเกาะเพิ่มหรือหลุดออกในอัตราที่สอดคล้องกับการกระจายพลังงานของระบบ ดังในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 กระบวนการเกิดควอนตัมดอตตามทฤษฎี mean-field [18]

2.5.4 การปลูกผลึกโครงสร้างนาโนด้วยวิธีทรอปเล็ทอพิแทกซี (Droplet Epitaxy; DE)

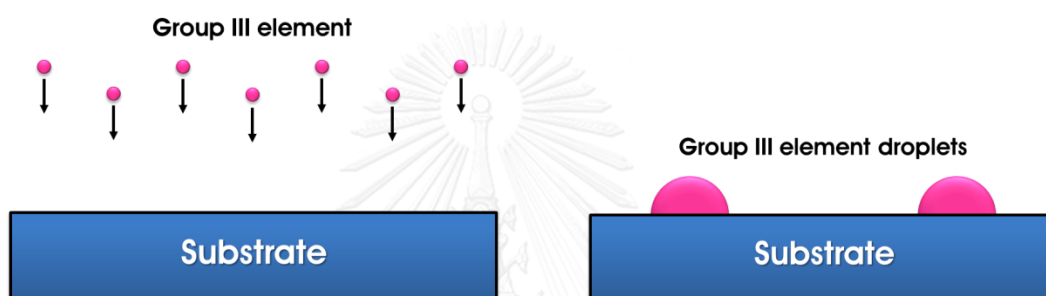
ทรอปเล็ทอพิแทกซีเป็นกระบวนการปลูกผลึกวิธีการหนึ่งที่มีพื้นฐานกระบวนการเริ่มต้นจากการขึ้นรูปหยดโลหะของธาตุหมู่ 3 และจากนั้นทำการเปลี่ยนรูปหยดโลหะให้เป็นผลึกสารประกอบด้วยการพ่นด้วยธาตุหมู่ 5 [5] ซึ่งข้อดีของเทคนิคคือการปลูกผลึกดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำ (50-350°C) และวิธีนี้ไม่มีขีดจำกัดด้านความค้ำคงตัวโครงผลึก (Lattice constant) (เข้าคู่กัน (Lattice match) และไม่เข้าคู่กัน (Lattice mismatch)) นอกจากนี้วิธีการนี้ทำให้เราสามารถประดิษฐ์โครงสร้างขนาดนาโน (Nanostructure) ที่ก่อตัวขึ้นเอง (Self-assembly) รวมถึงโครงสร้างขนาดนาโนที่มีความซับซ้อน (Complex Nanostructure) ได้ เช่น ควอนตัมดอตโมเลกุล, ควอนตัมริงค์ ฯลฯ เป็นต้น

สำหรับขั้นตอนการปลูกผลึกวิธีทรอปเล็ทอพิแทกซีมีรายละเอียดดังนี้

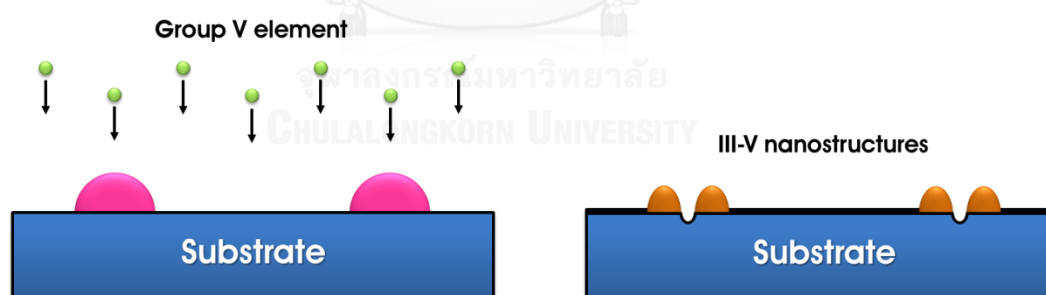
ขั้นตอนที่ 1 การขึ้นรูปหยดโลหะโดยการพ่นธาตุหมู่ 3 ลงบนแผ่นผลึกฐาน ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่ไม่มีธาตุหมู่ 5 ทำให้ได้หยดโลหะเหลว (Molten หรือ liquid phase droplet) ของธาตุหมู่ 3 ที่มีรูปร่างเป็นครึ่งทรงกลมกระจายแบบไม่เป็นระเบียบอยู่บนผิวหน้าแผ่นผลึกฐาน ตัวแปร (Parameter) ที่สามารถควบคุมขนาด (Size) และความหนาแน่น (Density) ของหยดโลหะเหลว

ได้แก่ อุณหภูมิของแผ่นผลึกฐาน (substrate temperature), ฟลักซ์ (flux) หมู่ 3, และ ปริมาณ (amount) ของหมู่ 3 ดังรูปที่ 2.15

ขั้นตอนที่ 2 การเปลี่ยนรูปหยดโลหะให้เป็นผลึกสารประกอบโดยการพ่นธาตุหมู่ 5 ลงบนแผ่นผลึกฐานทำให้หยดโลหะเหลวหมู่ 3 ทำปฏิกิริยากับธาตุหมู่ 5 เกิดกระบวนการขึ้นรูปผลึก (Crystallization) ทำให้ได้โครงสร้างนาโนของสารประกอบกลุ่ม III-V ตัวแปรที่สามารถควบคุมทำให้เกิดโครงสร้างขนาดนาโนที่มีลักษณะที่แตกต่างกันในขั้นตอนนี้ ได้แก่ อุณหภูมิแผ่นผลึกฐาน และ ฟลักซ์หรือค่าความดันไอของธาตุหมู่ 5 ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.15 การพ่นธาตุหมู่ 3 ลงบนแผ่นผลึกฐานภายใต้สภาวะแวดล้อมที่ไม่มีธาตุหมู่ 5 ทำให้ได้หยดโลหะเหลวธาตุหมู่ 3



รูปที่ 2.16 การพ่นธาตุหมู่ 5 ลงบนแผ่นฐานผลึกทำให้ได้โครงสร้างนาโนของสารประกอบหมู่ 3 และหมู่ 5

ข้อดีของวิธีทรอปเล็ทอพิแทกซีเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Stranski-Krastanov (SK) [5]

1. คู่ของธาตุหรือสารประกอบที่มีค่าคงตัวโครงสร้างผลึกที่เข้าคู่กันหรือไม่เข้าคู่กันสามารถใช้วิธีการนี้ปลูกผลึกได้
2. ขนาดและความหนาแน่นของโครงสร้างนาโนสามารถควบคุมได้อย่างอิสระ

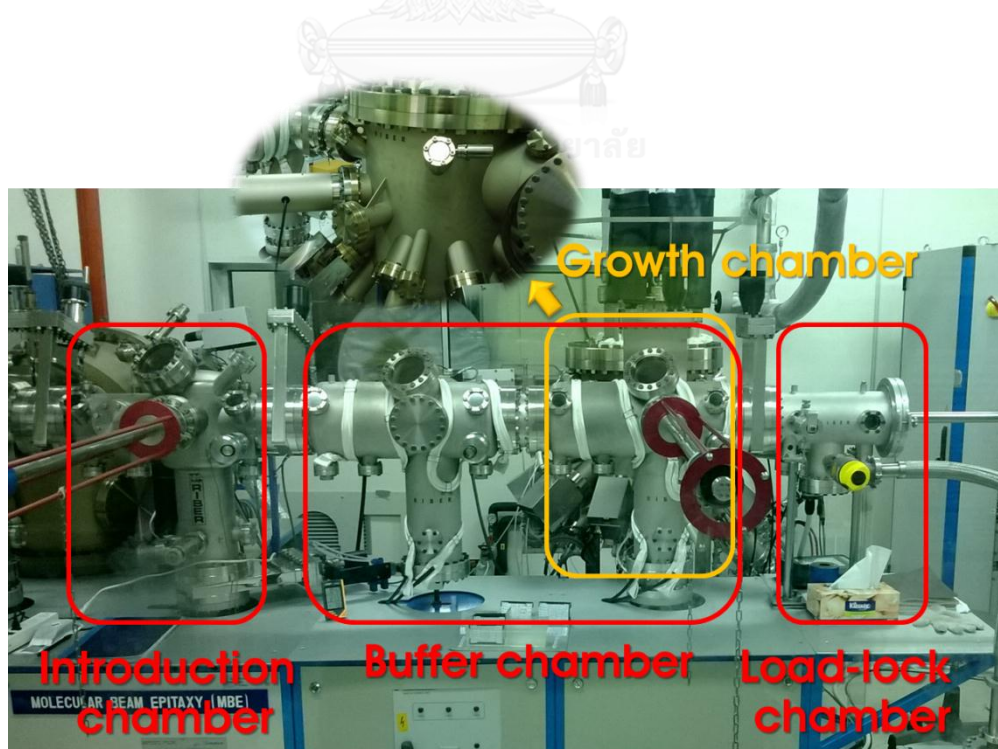
3. ความหนาแน่นของโครงสร้างขนาดนาโนที่ได้จากวิธีนี้มีค่าตั้งแต่ 10^6 ถึง 10^{11} ต่อตารางเซนติเมตร
4. โครงสร้างนาโนที่ได้มีรูปร่างที่หลากหลายสามารถกำหนดได้จากขั้นตอนการเปลี่ยนรูปหยดโลหะให้เป็นผลึก
5. การประดิษฐ์โครงสร้างนาโนกระทำที่อุณหภูมิต่ำทำให้หัวต่อเฮตเทอโรที่ได้มีความใกล้เคียง Abrupt junction ในอุดมคติ
6. โครงสร้างขนาดนาโนจากวิธีการนี้สามารถกำหนดให้มีหรือไม่มีชั้น WL ก็ได้

2.6 การปลูกผลึกอีพิแทกซีจากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy: MBE)

การปลูกผลึกอีพิแทกซีจากลำโมเลกุลเป็นการปลูกชั้นผลึกอีพิแทกซีหรือชั้นผลึกบนผิวของแผ่นผลึกฐาน ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของลำโมเลกุล (Molecular beam) ของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผลึกที่ตกกระทบบนแผ่นฐานผลึกเดี่ยว (Single crystal substrate) ที่ทำให้ร้อน เทคนิคนี้กระทำภายใต้ระบบสุญญากาศที่สูงมาก (Ultra-high vacuum: UHV) ที่มีค่าความดันบรรยากาศ 10^{-10} - 10^{-12} Torr คุณสมบัติของชั้นผลึกอีพิแทกซีที่ได้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้ในการปลูกผลึก เช่น ค่าความดันไอของลำโมเลกุล ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะปลูก เป็นต้น ข้อดีของการปลูกผลึกอีพิแทกซีด้วยวิธี MBE ได้แก่ การเตรียมผิวแผ่นผลึกฐานด้วยความร้อนเพื่อทำความสะอาดผิวหน้า (Thermal cleaning) ซึ่งสะดวกในการเตรียมผิวแผ่นผลึกฐาน อัตราการเกิดชั้นผลึกอีพิแทกซีช้ามากประมาณ 1 ไมโครเมตรต่อชั่วโมงหรือ 1 ชั้นโมนोटอวินาที (monolayer/s: ML/s) หรือน้อยกว่าซึ่งสามารถควบคุมความหนาได้อย่างแม่นยำ ระหว่างกระบวนการปลูกชั้นผลึกอีพิแทกซีตั้งแต่เริ่มต้นจนจบกระบวนการปลูกสามารถตรวจสอบผิวหน้าได้ตลอดเวลา และเนื่องจากอยู่ภายใต้ระบบสุญญากาศที่สูงมากทำให้ผลึกที่ปลูกได้มีความบริสุทธิ์สูงกว่าวิธีการอื่น ๆ เนื่องจากก๊าซต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อคุณภาพผลึก ได้แก่ H_2O , O_2 , CO และ CO_2 เป็นต้น มีปริมาณที่ต่ำมาก ๆ ในระบบสุญญากาศที่สูงมากทำให้สามารถควบคุมคุณภาพของผลึกที่ปลูกได้

2.6.1 ระบบการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล

ระบบการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุลที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นระบบของบริษัท RIBER รุ่น COMPACT 21 ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้ ห้องบรรจุแผ่นผลึกฐาน (Load-lock chamber) ห้องเตรียมแผ่นผลึกฐาน (Introduction chamber) ห้องคั่นกลาง และ ห้องปลูกผลึก (Growth chamber) แต่ละห้องมีประตู (Gate valve) กั้นแยกออกจากกันเพื่อให้แต่ละห้องสามารถรักษา ระบบสุญญากาศที่สูงมากและเป็นอิสระต่อกัน ดังรูปที่ 2.17 ห้องบรรจุแผ่นผลึกฐานเป็นห้องที่สามารถนำคาสเสต (Cassette) หรือตัวลำเลียงสำหรับใส่ตัวรองรับแผ่นผลึกฐาน (Substrate holder) ที่มีแผ่นผลึกฐาน (Substrate) เข้าและออกจากระบบการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล ห้องนี้มีเทอร์โบปั๊ม (Turbo pump) ที่ช่วยทำให้ระบบเป็นสุญญากาศก่อนที่ทำการเปิดประตูเพื่อเคลื่อนย้ายแผ่นผลึกฐานไปยังห้องถัดไป ห้องเตรียมแผ่นผลึกฐานเป็นห้องที่ใช้ในการทำ ความสะอาดผิวหน้าและกำจัดความชื้นของแผ่นผลึกฐาน โดยการให้ความร้อนแก่แผ่นผลึกฐานที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนนำเข้าไปในห้องปลูกผลึก ห้องคั่นกลางเป็นห้องที่ใช้ในการนำตัวรองรับแผ่นผลึกฐานเข้าและออกจากห้องปลูกผลึกโดยใช้แขนแม่เหล็ก (Magnetic arm) และห้องปลูกผลึกเป็นห้องที่ใช้ทำการปลูกชั้นผลึกอพิแทกซี วัสดุติบหรือสารที่ใช้ในการปลูกผลึกอยู่ด้านล่าง ได้แก่ แกลเลียม

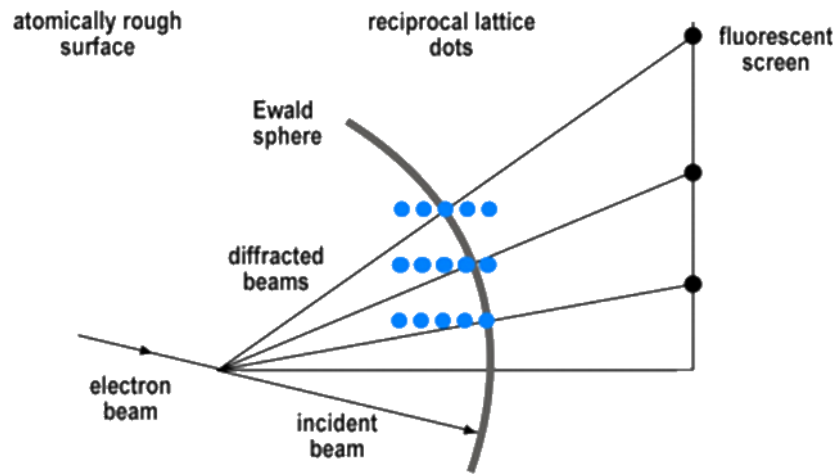


รูปที่ 2.17 โครงสร้างของระบบปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล RIBER รุ่น Compact 21

(Gallium: Ga), อะลูมิเนียม (Aluminium: Al), อินเดียม (Indium: In), สารหนูหรืออาร์เซนิก (Arsenic: As), ซิลิคอน (Silicon: Si) วัสดุดิบแต่ละชนิดถูกบรรจุอยู่ในเซลล์สำหรับการทำสารให้เป็นไอหรืออีฟฟิวชันเซลล์ (Effusion cell) โดยแต่ละเซลล์มีเบ้าหลอม (Crucible) อยู่ภายในทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่วัสดุจนระเหิดหรือระเหยกกลายเป็นไอหรือล่ำโมเลกุล และมีชัตเตอร์ (shutter) เปิด/ปิดควบคุมการพ่นล่ำโมเลกุลจากแต่ละเซลล์ มี As และพลวงหรือแอนติโมนี (Antimony: Sb) อยู่ใน Cracker ของ As และ Sb ตามลำดับ สำหรับผนังของห้องปลูกผลึกมีช่องรับไนโตรเจนเหลวเพื่อช่วยระบายความร้อนที่ได้จากเซลล์บรรจุสาร เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเซลล์ขณะทำการปลูกผลึก และช่วยทำให้สถานะภายในห้องปลูกผลึกเป็นสุญญากาศเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเย็นจากผนังโดยรอบทำให้มวลของบรรยากาศภายในมีความหนาแน่นมาก ระบบปั๊มสามารถดูดอากาศได้ดีขึ้น ระบบการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากล่ำโมเลกุลมีข้อดีที่เหนือกว่าวิธีการปลูกผลึกอิพิแทกซีวิธีอื่น ๆ ในเชิงเทคนิคคือสามารถติดตั้งอุปกรณ์วิเคราะห์ต่าง ๆ เข้ากับระบบได้ทำให้สะดวกในการตรวจสอบและวิเคราะห์ผลได้อย่างต่อเนื่องในขณะดำเนินการปลูกผลึก ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกับระบบปลูกผลึกอิพิแทกซีจากล่ำโมเลกุลในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ระบบสร้างภาพจากการสะท้อนของล่ำอิเล็กตรอนพลังงานสูง (Reflection High Energy Electron Diffraction: RHEED) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และตรวจสอบโครงสร้างผิวหน้าของแผ่นฐานผลึกในขณะปลูกผลึก

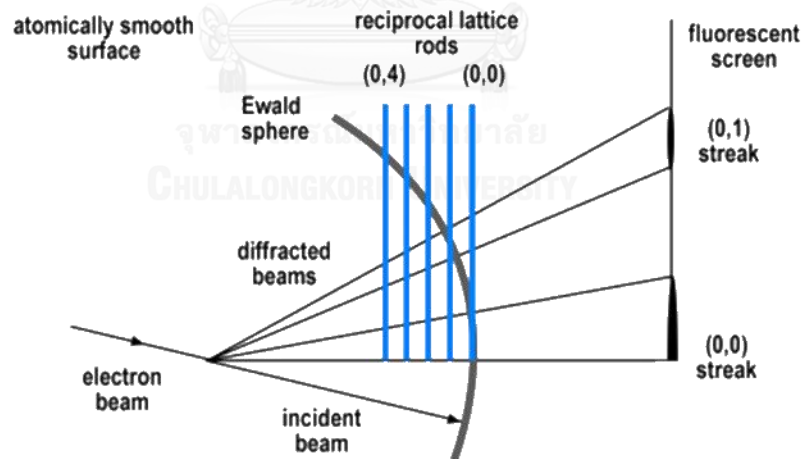
2.7 ระบบสร้างภาพจากการสะท้อนของล่ำอิเล็กตรอนพลังงานสูง (RHEED)

RHEED เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการวิเคราะห์และตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงบนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานในขณะดำเนินการปลูกผลึกตั้งแต่เริ่มต้นจนจบกระบวนการปลูกผลึก โดยการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบ RHEED ที่ปรากฏบนจอคอมพิวเตอร์ที่รับข้อมูลมาจากกล้องวีดีโอที่ติดตั้งจับภาพจากจอเรืองแสงหรือฉากฟอสเฟออร์ (Phosphor screen) กลไกการทำงานของระบบ RHEED มีดังนี้ เริ่มต้นจากปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) ผลิตล่ำอิเล็กตรอน (Electron beam) ที่มีพลังงานสูง (10-50 keV) ยิงไปบนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานทำมุม 0.5-2 องศา [5] จากนั้นล่ำอิเล็กตรอนจะเลี้ยวเบนและสะท้อนออกจากผิวหน้าไปตกกระทบบนฉากฟอสเฟออร์เกิดการเปล่งแสงบนฉาก รูปแบบของ RHEED มีดังนี้



รูปที่ 2.18 แสดงการเกิดรูปแบบของ RHEED แบบจุด [5]

- การเกิดเป็นจุดบนฉากฟอสเฟอร์นั้น ลำอิเล็กตรอนตกกระทบบนผิวหน้าแผ่นผลึกฐานที่มีสภาพไม่เรียบทำให้ลำอิเล็กตรอนเกิดการเลี้ยวเบน จุดที่เกิดขึ้นบนฉากเป็นตำแหน่งของ reciprocal Lattice dots ตัดกับเส้นขอบของ Ewald sphere ที่มีรัศมีเท่ากับความเข้มของลำอิเล็กตรอน ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.19 แสดงการเกิดรูปแบบของ RHEED แบบเส้น [5]

- การเกิดเป็นเส้น (streak) บนฉากฟอสเฟอร์ ลำอิเล็กตรอนตกกระทบบนผิวหน้าแผ่นผลึกฐานที่มีสภาพเรียบทำให้ลำอิเล็กตรอนเกิดการเลี้ยวเบน เส้นที่เกิดขึ้นบนฉากเป็นตำแหน่งของ reciprocal Lattice rods ตัดกับเส้นขอบของ Ewald sphere ดังรูปที่ 2.19

2.7.1 การหาอัตราการปลูกผลึกด้วย RHEED oscillation

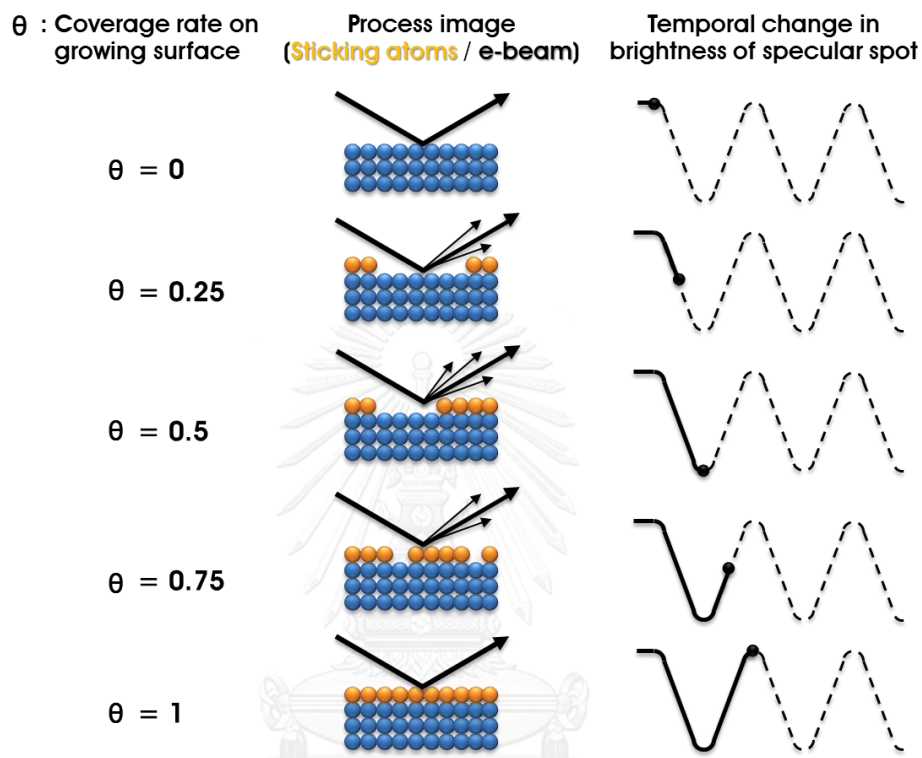
RHEED สามารถนำมาใช้ในการหาอัตราการปลูกผลึก (Growth rate calibration) โดยการสังเกตการเปลี่ยนแปลงความเข้ม Specular Beam ของ RHEED ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.20 เริ่มต้นผิวหน้าแผ่นผลึกฐานเป็นผิวเรียบทำให้ลำอิเล็กตรอนสะท้อนไปในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากการเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบ ส่งผลให้ความเข้มของลำอิเล็กตรอนมีค่ามากที่สุด เมื่อเริ่มกระบวนการปลูกผลึก ($\theta = 0.25$) ผิวหน้าเริ่มมีก้อนผลึกขนาดเล็ก (Cluster) กระจัดกระจายไม่เป็นระเบียบ ทำให้การกระเจิง (Scattering) ของลำอิเล็กตรอนมากขึ้น ความเข้มของลำอิเล็กตรอนที่สะท้อนออกมาเกิดการแทรกสอดในทางหักล้างกัน ส่งผลให้ความเข้มของลำอิเล็กตรอนลดลง เมื่อปลูกผลึกเพิ่มขึ้น ($\theta = 0.5$) ก้อนผลึกบนผิวหน้าเกิดมากขึ้นมีลักษณะกระจัดกระจายไม่เป็นระเบียบมากขึ้น ทำให้ความเข้มของลำอิเล็กตรอนที่สะท้อนออกมาเกิดการแทรกสอดในทางหักล้างกันมากยิ่งขึ้น ทำให้ความเข้มของลำอิเล็กตรอนมีค่าน้อยที่สุด เมื่อปลูกผลึกเพิ่มขึ้นอีก ($\theta = 0.75$) ก้อนผลึกปกคลุมผิวหน้ามากกว่าครึ่ง การกระเจิงของลำอิเล็กตรอนลดลงทำให้ลำอิเล็กตรอนเข้มมากขึ้นจนกระทั่งปลูกผลึกอะตอมเรียงเป็นระเบียบจนเต็มผิวหน้า ทำให้ชั้นนั้นมีความหนา 1 monolayer (ML) ลำอิเล็กตรอนกลับมามีความเข้มมากที่สุดอีกครั้ง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้ม Specular Beam ของ RHEED มีความสัมพันธ์กับค่าความหนาของชั้นผลึกที่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นถ้าเรารู้ความถี่ของการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้ม เราสามารถเทียบค่าอัตราการปลูกผลึกได้

ค่าความเข้มของลำอิเล็กตรอนที่เปลี่ยนแปลงสามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาอัตราการปลูกผลึกของแกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) ได้ โดยการจับเวลากับจำนวนรอบการแกว่งความเข้มของลำอิเล็กตรอนมากที่สุด คำนวณได้จากสมการ (2.10)

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

ส่วนการหาอัตราการปลูกผลึกของอินเดียมอาร์เซไนด์ (InAs) สามารถหาได้จากการจับเวลาการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบ RHEED จากที่เป็นแบบเส้นกลายเป็นจุด โดยปริมาณของอินเดียมอาร์เซไนด์ที่เกิดเป็นดอตของอินเดียมมีค่าความหนา 1.7 ML จากนั้นใช้สมการ (2.10) คำนวณหาอัตราการปลูกผลึกของอินเดียมอาร์เซไนด์

นอกจากนี้รูปแบบของ RHEED สามารถบ่งบอกถึงช่วงค่าอุณหภูมิของผิวหน้าผลึกได้ ซึ่งปัจจุบันนิยมใช้วิธีนี้ในการตรวจสอบอุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานในการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล แต่วิธีการนี้มีความคลาดเคลื่อนมากกว่า 10°C



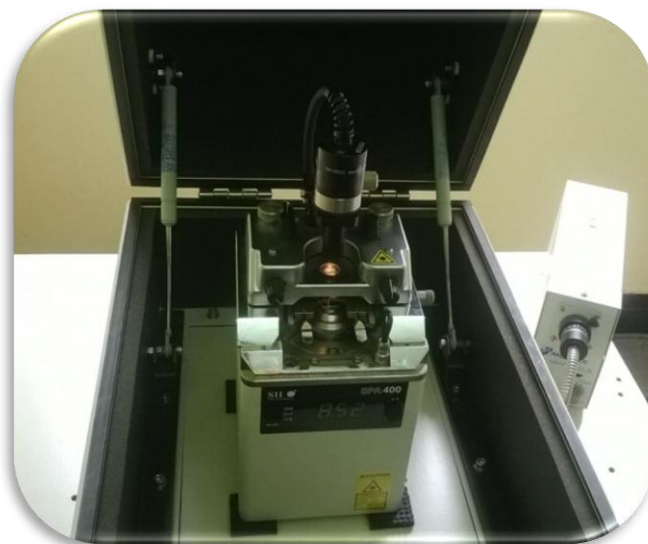
รูปที่ 2.20 อธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลงความเข้มของลำอิเล็กตรอนในขณะทำการปลูกผลึก [19]

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.8 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM)

กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผิวหน้าของชิ้นงานที่ให้ความละเอียดในระดับนาโนเมตร เพื่อศึกษาโครงสร้างผิวหน้าของชิ้นงาน เช่น รูปร่างและขนาดของโครงสร้างนาโน เป็นต้น หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม คือ ใช้เข็มตรวจวัดขนาดเล็กที่ทำจากซิลิคอน (Silicon) หรือ ซิลิคอนไนไตรด์ (Silicon nitride, Si_3N_4) สแกน (Scan) ไปทั่วบริเวณต่าง ๆ บนผิวหน้าวัสดุ โดยมีเพียโซอิเล็กทริกสแกนเนอร์ (Piezoelectric scanner) เป็นตัวควบคุมสภาพผิวหน้าของวัสดุที่ระดับสูงต่ำแตกต่างกันนั้น มีผลให้ตัวคานที่มีเข็มเกาะติดอยู่เกิดการโค้งงอ (Bending) ซึ่งความโค้งงอนี้สามารถตรวจวัดได้จากลำแสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากปลายเข็มเข้าโฟโตดีเทคเตอร์ (Photo detector) ภาพที่ได้จะสอดคล้องตามสภาพพื้นผิวในแต่ละบริเวณที่ทำ

การตรวจสอบ ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้ใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมยี่ห้อ SEIKO SPA 400-AFM
ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมยี่ห้อ SEIKO SPA 400-AFM

บทที่ 3 การทดลอง

บทนี้กล่าวถึงรายละเอียดของการทดลองของวิทยานิพนธ์ ได้แก่ การเตรียมแผ่นผลึกฐาน การเตรียมการในห้องปลูกผลึกก่อนการปลูกผลึก การประดิษฐ์นาโนโฮลรูปร่างสี่เหลี่ยมของ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะ การประดิษฐ์เนินขนาดนาโนจาก InGaAs โดยการเปลี่ยนตัวแปรเงื่อนไขการปลูกตั้งนี้ อุณหภูมิเป้าหมายที่ใช้ในการปลูกผลึกควอนตัมดอท อัตราการเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาที่รอ ณ อุณหภูมิเป้าหมายก่อนทำการปลูกผลึกควอนตัมดอทโมเลกุล และการประดิษฐ์ควอนตัมดอทโมเลกุลจาก InAs มีการเปลี่ยนเงื่อนไขการปลูกตั้งนี้ ระยะเวลาที่รอ ณ อุณหภูมิเป้าหมายก่อนทำการปลูกผลึกควอนตัมดอทโมเลกุล อัตราการปลูกและปริมาณอินเดียม รวมทั้งการประดิษฐ์ควอนตัมดอทโมเลกุลจาก InAs ที่อุณหภูมิต่ำ (150°C) จากนั้นนำไปวิเคราะห์ผิวหน้าด้วยเครื่อง AFM

3.1 การเตรียมแผ่นผลึกฐาน (sample preparation)

แผ่นผลึกฐานที่ใช้ในการปลูกผลึก คือ GaAs (001) ขนาด $1 \times 1 \text{ cm}^2$ (โดยประมาณ) ที่ถูกตัดจากแผ่นวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 76 mm จากนั้นนำแผ่นผลึกฐานไปติดลงบริเวณศูนย์กลางของแวนผลึกซิลิกอนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 76 mm ซึ่งใช้เป็นตัวรองแผ่นผลึกฐาน ด้วยอินเดียมหลอมเหลวเป็นตัวยึด จากนั้นนำตัวรองแผ่นผลึกฐานบรรจุใส่กล่องใส่แผ่นผลึกฐานแล้วนำเข้าระบบ MBE จากนั้นก็นำตัวรองแผ่นผลึกฐานที่มีแผ่นผลึกฐานติดอยู่เข้าห้องเตรียมแผ่นผลึกฐานเพื่อทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นผลึกฐานและกำจัดความชื้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนนำแผ่นผลึกฐานเข้าสู่ปลูกผลึกในห้องปลูกผลึกและทำการปลูกผลึกต่อไป

3.2 การเตรียมการในห้องปลูกผลึกก่อนการปลูกผลึก

ก่อนการปลูกผลึกทำการป้อนก๊าซไนโตรเจนเหลวให้กับห้องปลูกผลึกเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 40 นาที เพื่อให้ระบบมีสถานะเป็นสุญญากาศที่ดีขึ้น จากนั้นทำความสะอาดวัตถุดิบเริ่มต้น (Degas cell) ที่จะใช้ปลูก (ธาตุหมู่ 3 ได้แก่ อินเดียม (In) และ แกลเลียม (Ga)) โดยการตั้งอุณหภูมิของเซลล์ของแต่ละสารให้มีค่าสูงกว่าค่าอุณหภูมิใช้งาน 30°C เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 5 นาที และเปิดชุดเตอร์

ทิ้งไว้เพื่อให้สิ่งสกปรกหลุดออกมาจากเซลล์ ระหว่างกระบวนการข้างต้นที่กล่าวมา ชัตเตอร์หลัก (Main shutter) ยังคงปิดอยู่เพื่อป้องกันไม่ให้ไอของสารที่พ่นออกมาไปตกกระทบบนแผ่นผลึกฐาน โดยแทนควบคุมปรับให้อยู่ตำแหน่งวัดฟลักซ์ จากนั้นเปิดชัตเตอร์หลักและลดอุณหภูมิของเซลล์ลงไป ที่อุณหภูมิที่ต้องการและทำการวัดฟลักซ์และปรับอุณหภูมิของแต่ละเซลล์ให้ได้ค่าฟลักซ์ที่ต้องการ หลังจากนั้นทำการปรับตั้งอุณหภูมิเซลล์ As และเปิดชัตเตอร์ของเซลล์ As จนค่าความดันไอของเซลล์ มีค่าประมาณ 8×10^{-6} Torr จากนั้นปรับตำแหน่งให้แผ่นผลึกฐานอยู่ในตำแหน่งปลูก แล้วทำการเพิ่ม อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานให้ผิวหน้ามีอุณหภูมิประมาณ 580°C โดยสังเกตจากรูปแบบ RHEED ที่ปรากฏ เพื่อกำจัดออกไซด์บนผิวหน้า (De-oxidation) จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิขึ้นอีก 30°C และคงไว้ 10 นาที จากนั้นทำการลดอุณหภูมิลงไปที่ 580°C จากนั้นเริ่มต้นทำการปลูกชั้นบัพเฟอร์ GaAs หนา 300 nm ด้วยค่าอัตราการปลูกผลึก 0.5 ML/s ดังรูปที่ 3.1 (ก)

3.3 การประดิษฐ์นาโนไฮดรอปรางส์เหลี่ยมของ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$

สำหรับการประดิษฐ์นาโนไฮดรอปรางส์เหลี่ยมของ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ ด้วยวิธีทรอปเล็ทอพิแทกซี ซึ่งกระบวนการประดิษฐ์มีรายละเอียดดังนี้

หลังจากการปลูกชั้นบัพเฟอร์ GaAs แล้วตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น (ดูหัวข้อที่ 3.2) ทำการลดอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานลงเพื่อทำการขึ้นรูปหยดโลหะ โดยอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะ (T_{droplet}) มีค่าดังนี้ 300°C , 330°C , และ 350°C ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิแผ่นผลึกฐานลดลงจนถึงค่าอุณหภูมิที่กำหนด ทำการปิดชัตเตอร์ As และลดอุณหภูมิของ As ลง 50°C เพื่อให้ภายในบรรยากาศห้องปลูกผลึกไม่มี As_4 โดยรอให้ค่าความดันภายในห้องปลูกผลึกให้น้อยกว่า 5×10^{-9} Torr จากนั้นพ่น In และ Ga ด้วยอัตรา 0.15 ML/s และ 0.85 ML/s ตามลำดับ เป็นเวลา 15 วินาที โดยปริมาณของ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}$ เท่ากับ 15 ML จากนั้นลดอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานลงไปที่ 200°C ซึ่งอุณหภูมินี้เป็นค่าอุณหภูมิสำหรับการเปลี่ยนรูปหยดโลหะให้เป็นผลึก (crystallization temperature: T_{cryst}) ในขณะเดียวกันทำการเพิ่มอุณหภูมิเซลล์ As ไปที่ 283°C ก่อนพ่น As_4 รอเป็นเวลา (interruption time) 5 นาที จากนั้นเปิดชัตเตอร์เซลล์ As เป็นเวลา 5 นาที เพื่อเปลี่ยนรูปหยดโลหะให้เป็นโครงสร้างนาโน $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ ดังรูปที่ 3.1 (ข) และ (ค) เมื่อสิ้นสุดกระบวนการปลูกทำการลดอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานลงเท่ากับ 100°C และนำชิ้นงานออกจากระบบ MBE แล้วนำไปวิเคราะห์ผิวหน้าโดยใช้เครื่อง AFM ต่อไป

3.4 การประดิษฐ์เนินขนาดนาโน (Nanomound: NM) จาก InGaAs

ในกระบวนการนี้เริ่มต้นจากการประดิษฐ์นาโนโฮลรูปร่างสี่เหลี่ยม $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ โดยกำหนดให้อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะที่ 330°C หลังจากสิ้นกระบวนการเปลี่ยนหยดโลหะเป็นนาโนโฮลรูปร่างสี่เหลี่ยม $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ จากนั้นเป็นขั้นตอนการเพิ่มอุณหภูมิ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับนาโนโฮลรูปร่างสี่เหลี่ยม $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ ที่เกิดขึ้นก่อนกระบวนการปลูกผลึกควอนตัมดอตโมเลกุล ดังรูปที่ 3.1 (ง) โดยขั้นตอนนี้ได้ศึกษาตัวแปลที่มีผลต่อโครงสร้างเนินขนาดนาโนจาก InGaAs มีดังนี้

3.4.1 อุณหภูมิเป้าหมายที่ใช้ในการปลูกผลึกควอนตัมดอตโมเลกุล (T_a) = 420°C , 450°C และ 480°C กำหนดให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $R = 10^{\circ}\text{C}/\text{นาที่}$ และ เวลาการรอก่อนการปลูกควอนตัมดอตโมเลกุล $t_h = 0$ วินาที

3.4.2 อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (ramp-up rate: R) = 5, 10, และ $20^{\circ}\text{C}/\text{นาที่}$ โดยกำหนดให้ $T_a = 450^{\circ}\text{C}$ และ $t_h = 0$ วินาที

3.4.3 ระยะเวลาที่รอ ณ อุณหภูมิเป้าหมายก่อนทำการปลูกผลึกควอนตัมดอตโมเลกุล (Halt time: t_h) = 0, 15 และ 30 วินาที กำหนดให้ $T_a = 450^{\circ}\text{C}$ และ $R = 10^{\circ}\text{C}/\text{นาที่}$ จากนั้นลดอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานลงเท่ากับ 100°C เสร็จสิ้นกระบวนการปลูกเอาชิ้นงานออกจากระบบ MBE แล้วนำตัวอย่างชิ้นงานไปวิเคราะห์ผิวหน้าด้วยเครื่อง AFM

3.5 การประดิษฐ์ควอนตัมดอตโมเลกุลจาก InAs

ในกระบวนการนี้เริ่มต้นจากการประดิษฐ์นาโนโฮลรูปร่างสี่เหลี่ยม $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ โดยกำหนดให้อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะที่ 330°C หลังจากสิ้นกระบวนการเปลี่ยนหยดโลหะเป็นนาโนโฮลรูปร่างสี่เหลี่ยม $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ แล้วตามที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ 3.4 จากนั้นเป็นกระบวนการประดิษฐ์ควอนตัมดอตโมเลกุลซึ่งมีกระบวนการ ดังนี้

3.5.1 การปลูกผลึกควอนตัมดอทโมเลกุลจาก InAs ที่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐาน 450°C

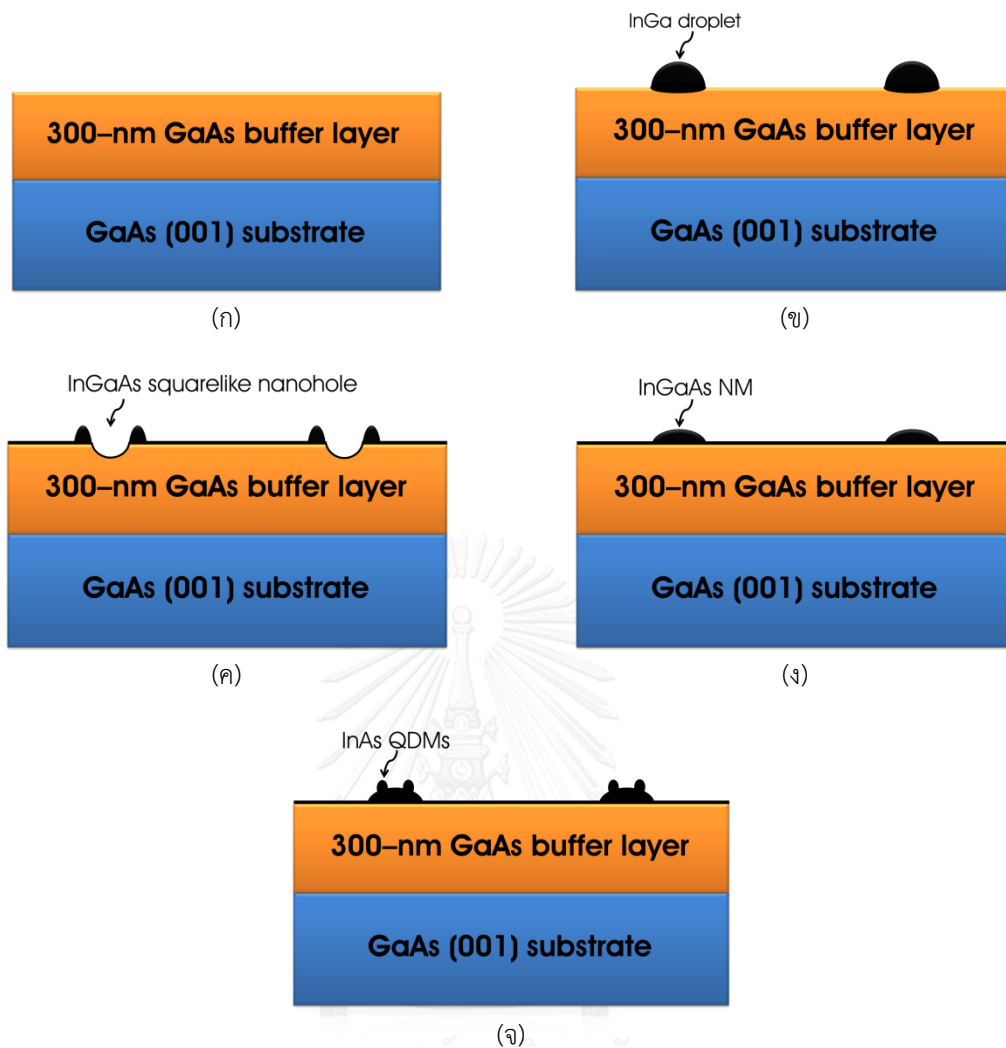
หลังจากสิ้นสุดกระบวนการประดิษฐ์โครงสร้างนาโนโฮลแล้วทำการเพิ่มอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานด้วย $R = 10^{\circ}\text{C}/\text{นาที่}$ ไปที่อุณหภูมิเท่ากับ 450°C เพื่อปลูกผลึกควอนตัมดอทโมเลกุล ดังรูปที่ 3.1 (จ) โดยขั้นตอนนี้ได้ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อโครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุลมีดังนี้

- ก) ระยะเวลาที่รอ ณ อุณหภูมิเป้าหมายก่อนทำการปลูกผลึกควอนตัมดอทโมเลกุล (Halt time: t_h) = 0, 15 และ 30 วินาที กำหนดให้ $GR = 0.15 \text{ ML/s}$ และ ปริมาณอินเดียมเท่ากับ 0.6 ML
- ข) อัตราการปลูกอินเดียม (Growth rate: GR) = 0.05, 0.10, และ 0.15 ML/s กำหนดให้ $t_h = 15$ วินาที และ ปริมาณอินเดียม = 0.6 ML
- ค) ปริมาณอินเดียม = 0.45, 0.60, และ 0.75 ML กำหนดให้ $GR = 0.15 \text{ ML/s}$ และ $t_h = 15$ วินาที

3.5.2 การปลูกผลึกควอนตัมดอทโมเลกุลจาก InAs ที่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐาน 150°C

หลังจากสิ้นสุดกระบวนการประดิษฐ์โครงสร้างนาโนโฮลแล้วทำการลดอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานด้วย $R = 10^{\circ}\text{C}/\text{นาที่}$ ไปที่อุณหภูมิเท่ากับ 150°C เพื่อปลูกควอนตัมดอทโมเลกุล InAs ด้วย $GR = 0.15 \text{ ML/s}$ และ 1.30 ML/s

จากนั้นลดอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานลงเท่ากับ 100°C เสร็จสิ้นกระบวนการเอาชิ้นงานออกจากระบบ MBE แล้วนำชิ้นงานไปวิเคราะห์ผิวหน้าโดยใช้ AFM



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการปลูกผลึก (ก) การปลูกชั้นบัฟเฟอร์ GaAs หนา 300 นาโนเมตร (ข) การพ่นหมู่ 3 ทำให้ได้หยดโลหะเหลว $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}$ (ค) การพ่น As_4 เพื่อให้ได้โครงสร้างนาโนโฮลรูปร่างสี่เหลี่ยม $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ (ง) การประดิษฐ์โครงสร้างเนินขนาดนาโน InGaAs (จ) การปลูกโครงสร้าง ควอนตัมดอตโมเลกุลจาก InAs

บทที่ 4

ผลการทดลอง

เนื้อหาบทนี้นำเสนอผลการทดลองตามการทดลองในบทที่ 3 ที่ได้ดำเนินการแล้วรวมทั้งการอภิปรายและวิเคราะห์ผลผิวหน้าที่ได้จาก AFM ของการทดลองการประดิษฐ์นาโนโฮลรูปร่างสี่เหลี่ยมของ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะ การประดิษฐ์เน็ชขนาดนาโนจาก InGaAs โดยการเปลี่ยนตัวแปรเงื่อนไขการปลูกดังนี้ อุณหภูมิเป้าหมายที่ใช้ในการปลูกผลึกควอนตัมดอทโมเลกุล อัตราการเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาที่รอ อนุกรมเป้าหมายก่อนทำการปลูกผลึกควอนตัมดอทโมเลกุล และการประดิษฐ์ควอนตัมดอทโมเลกุลจาก InAs มีการเปลี่ยนเงื่อนไขการปลูกดังนี้ ระยะเวลาที่รอ อนุกรมเป้าหมายก่อนทำการปลูกผลึกควอนตัมดอทโมเลกุล อัตราการปลูกและปริมาณอินเดียม รวมทั้งการประดิษฐ์ควอนตัมดอทโมเลกุลจาก InAs ที่อุณหภูมิต่ำ (150°C)

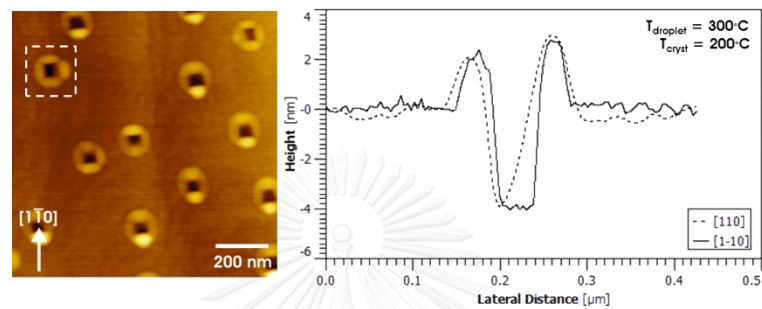
4.1 การประดิษฐ์นาโนโฮลรูปร่างสี่เหลี่ยมของ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$

หลังจากเสร็จสิ้นจากการปลูกผลึกด้วยวิธีกล่าวมาข้างต้นตามในหัวข้อที่ 3.3 เมื่อนำชิ้นงานไปตรวจสอบผิวหน้าด้วยเครื่อง AFM ปรากฏว่าโครงสร้างขนาดนาโนที่ได้เป็นโครงสร้างนาโนโฮลรูปร่างสี่เหลี่ยม (Squarelike nanohole) ที่ประกอบด้วยหลุมรูปสี่เหลี่ยม (hole) และมีวงแหวนล้อมรอบหลุมสี่เหลี่ยม โดยโพรไฟล์ (profile) ของหลุมสี่เหลี่ยมเป็นตัว V ในทิศทาง $[110]$ และ U ในทิศทาง $[1-10]$ ดังรูปที่ 4.1 สำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะที่มีต่อขนาดมิติและค่าความหนาแน่นของนาโนโฮลรูปร่างสี่เหลี่ยมสามารถสรุปดังรูปที่ 4.3 และตำแหน่งในการวัดขนาดความกว้าง ความสูง และความลึกของนาโนโฮลรูปร่างสี่เหลี่ยมของ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ ดังรูปที่ 4.2 (ค) เมื่ออุณหภูมิแผ่นผลึกขณะขึ้นรูปหยดโลหะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ความหนาแน่นมีค่าลดลงดังรูปที่ 4.3 (ก) จากตัวอย่างที่ $T_{\text{droplet}} = 300^{\circ}\text{C}$, 330°C , และ 350°C มีค่าความหนาแน่นมีค่า $9.0 \times 10^8/\text{cm}^2$, $8.0 \times 10^8/\text{cm}^2$, และ $3.5 \times 10^8/\text{cm}^2$ ตามลำดับ เนื่องจาก T_{droplet} เพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้หยดโลหะเหลวเกิดการเคลื่อนที่และหลอมรวมกันเป็นหยดโลหะเหลวขนาดใหญ่ขึ้นทำให้มีความหนาแน่นลดลงสำหรับ ขนาด ความสูงและรูปร่างของโครงสร้างนาโนเปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 4.3 (ข) และ (ค) ที่ $T_{\text{droplet}} = 300^{\circ}\text{C}$, 330°C , และ 350°C โครงสร้างนาโนโฮลรูปร่างสี่เหลี่ยมมีขนาดเฉลี่ย 143.10 nm , 159.13 nm , และ 316.10 nm ในทิศทาง $[110]$ และ 144.12 nm , 163.18 nm , และ 306.65 nm

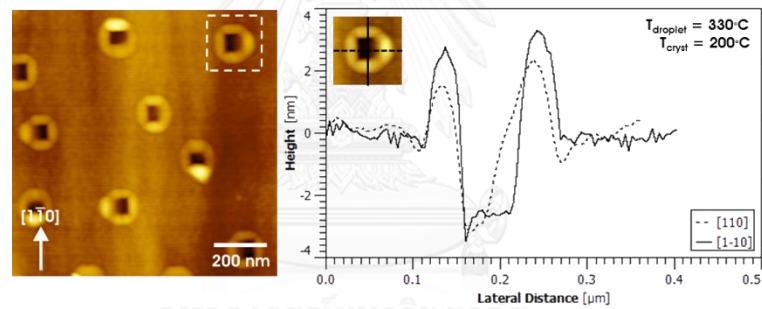
ในทิศทาง [1-10] ซึ่งสอดคล้องกับจำนวนความหนาแน่นที่ลดลง สำหรับขนาดมิติภายในของหลุมของโครงสร้างนาโนไฮดรอปรางส์เหลี่ยมมีขนาดเฉลี่ย 49.46 nm, 54.28 nm, และ 34.47 nm ในทิศทาง [110] และ 43.11 nm, 56.54 nm, และ 62.82 nm ในทิศทาง [1-10] ความลึกของหลุมมีแนวโน้มลดลงเมื่อ T_{droplet} เพิ่มขึ้น ดังในรูปที่ 4.3 (ข) ความลึกของหลุมเฉลี่ย 3.01 nm, 3.19 nm, และ 1.40 nm ในทิศทาง [110] สำหรับรูปที่ 4.4 แสดงการกระจายความสูงของกลีบ (lobe) ที่ล้อมรอบหลุมสี่เหลี่ยม เมื่อ T_{droplet} เพิ่มขึ้นความสูงของกลีบเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งมีความสูงเฉลี่ยดังนี้ 1.81 nm, 2.68 nm, และ 4.32 nm ในทิศทาง [110] และ 3.68 nm, 4.24 nm, และ 5.37 nm ในทิศทาง [1-10] เมื่อพิจารณารูปร่างของโครงสร้างนาโนไฮดรอปรางส์เหลี่ยมพบว่าที่ $T_{\text{droplet}} = 380^{\circ}\text{C}$ มีรูปร่างที่แตกต่างเนื่องจากมีรูปร่างคล้ายวงแหวนเกิดขึ้นล้อมรอบโครงสร้างนาโนไฮดรอปรางส์เหลี่ยม ดังรูปที่ 4.1 (ค)

กลไกการเกิดโครงสร้างนาโนไฮดรอปรางส์เหลี่ยม เริ่มต้นจากเมื่อทำการดรอปลีท In และ Ga ลงบนแผ่นผลึกฐานภายใต้สภาวะที่ไม่มี As_4 อะตอมของธาตุทั้งสอง (In และ Ga) มารวมตัวกันเกิดเป็นหยดโลหะรูปร่างครึ่งทรงกลมบนผิวหน้าแผ่นผลึกฐานเพื่อทำให้ระบบมีพลังงานน้อยที่สุด การใช้ T_{droplet} เพิ่มขึ้นส่งผลให้อะตอมของธาตุมารวมตัวกันมากขึ้นเป็นหยดโลหะเหลวขนาดใหญ่ ระหว่างที่รอก่อนการพ่น As_4 เพื่อขึ้นรูปผลึก บริเวณผิวสัมผัสระหว่างหยดโลหะกับแผ่นผลึกฐานมีการแลกเปลี่ยนอะตอม In และ Ga ของหยดโลหะกับอะตอม Ga และ As ของแผ่นผลึกฐาน [20] ในระหว่างนี้เกิด 2 กระบวนการคือ กระบวนการเกาะเกิดจากการแลกเปลี่ยนอะตอมของ In และ Ga และกระบวนการขึ้นรูปผลึกเนื่องจาก As จากแผ่นผลึกฐานได้แพร่เข้าไปในหยดโลหะเหลวแล้วทำปฏิกิริยากับอะตอม In และ Ga ได้ผลึก InGaAs เกิดขึ้นที่บริเวณขอบรอบหยดโลหะเหลว กลายเป็นกลีบ ซึ่งกระบวนการนี้เกิดยังไม่สมบูรณ์เนื่องจาก As ไม่เพียงพอในการเกิดผลึก และเมื่อพ่น As_4 กระบวนการขึ้นรูปผลึกจึงเกิดอย่างสมบูรณ์ทำให้ได้โครงสร้างนาโนไฮดรอปรางส์เหลี่ยม เนื่องจากคุณสมบัติ Anisotropic ของการกัด้วยโลหะหลอมเหลว โครงสร้างนาโนไฮดรอปรางส์เหลี่ยมมีขนาดและความสูงของกลีบไม่เท่ากัน และโปรไฟล์ของหลุมสี่เหลี่ยมที่มีรูปร่างแตกต่างกันในทิศทาง [110] และ [1-10] เป็นผลมาจากการแพร่หรือการเคลื่อนย้ายของอะตอมที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันในทิศทางที่แตกต่างกัน (Anisotropic migration atom) บนแผ่นผลึกฐาน ความลึกของหลุมสี่เหลี่ยมลดลงเมื่อ T_{droplet} เพิ่มขึ้น อันเป็นผลจากอัตราการขึ้นรูปผลึกในส่วนต่าง ๆ ของหยดโลหะที่แตกต่างกันเนื่องจากสภาวะอุณหภูมิต่างกันและค่าความดันไอของ As_4 ที่ใช้มีค่าต่ำ

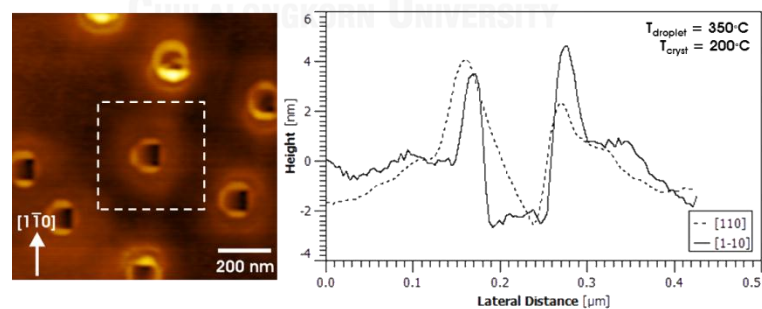
ส่วนการเกิดรูปร่างคล้ายวงแหวนเกิดขึ้นล้อมรอบโครงสร้างนาโนโฮโลรูปร่างสี่เหลี่ยม เนื่องจากกระบวนการ 2 ขั้นตอน เริ่มจากการเกิดผลึกบริเวณขอบรอบหยดโลหะและการกัดผลึกใต้หยดโลหะที่ขึ้นกับขนาดของผลึก (Anisotropic etching) ทำให้ได้โครงสร้างนาโนโฮโลรูปร่างสี่เหลี่ยม และขั้นตอนที่สองเกิดจากการเคลื่อนย้ายของอะตอมจากศูนย์กลางหยดโลหะไปรอบ ๆ หยดโลหะเกิดเป็นรูปร่างคล้ายวงแหวนเกิดขึ้นล้อมรอบโครงสร้างนาโนโฮโลรูปร่างสี่เหลี่ยม [21]



(ก)

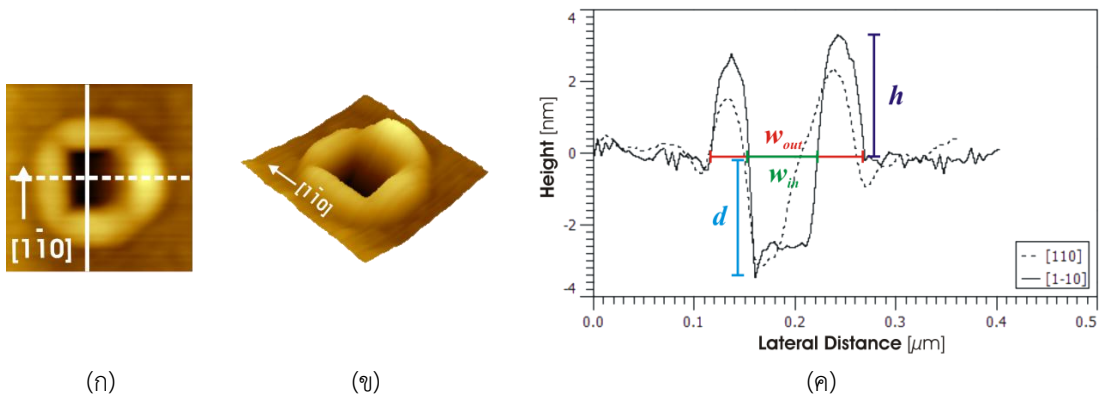


(ข)

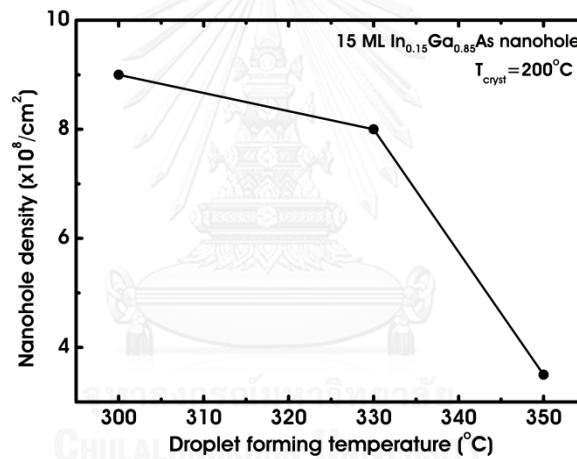


(ค)

รูปที่ 4.1 ภาพตัดขวางของโครงสร้างนาโนโฮโลรูปร่างสี่เหลี่ยมของ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ ในทิศทาง [110] และ [1-10] ซึ่งใช้อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะ (ก) $T_{\text{droplet}} = 300^\circ\text{C}$ (ข) $T_{\text{droplet}} = 330^\circ\text{C}$ (ค) $T_{\text{droplet}} = 350^\circ\text{C}$

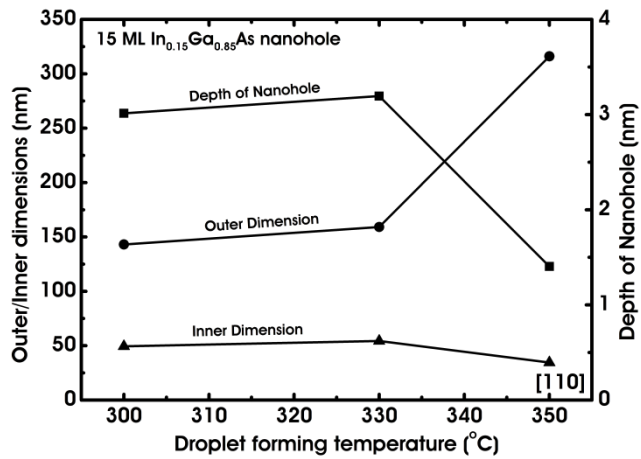


รูปที่ 4.2 ภาพ AFM ของโครงสร้างนาโนโฮลรูปร่างสี่เหลี่ยมของ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ (ค) ภาพตัดขวางของโครงสร้างนาโนโฮลรูปร่างสี่เหลี่ยมในทิศทาง $[110]$ และ $[1-10]$ ซึ่งใช้อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะเท่ากับ 330°C ที่มีเส้นบอกความลึกของหลุม (d), ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางวงรอบใน (w_{in}), ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของวงรอบนอก (w_{out}), และความสูงของกليب (h)

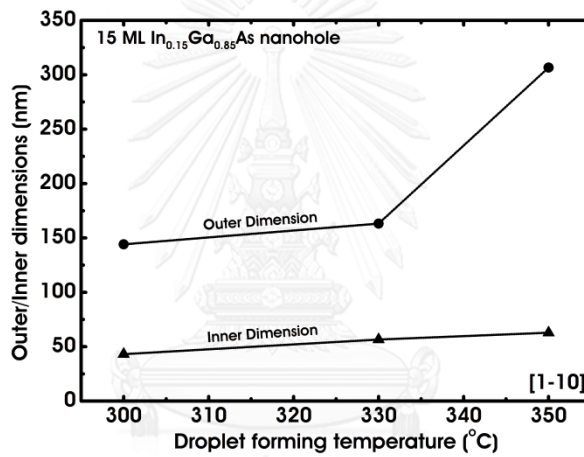


(ก)

รูปที่ 4.3 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น, (ข) และ (ค) กราฟขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของวงรอบนอก, ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางวงรอบใน ความลึก และค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปหยดโลหะ โดยปริมาตร $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85} = 15$ ML ในทิศทาง $[110]$ และ $[1-10]$

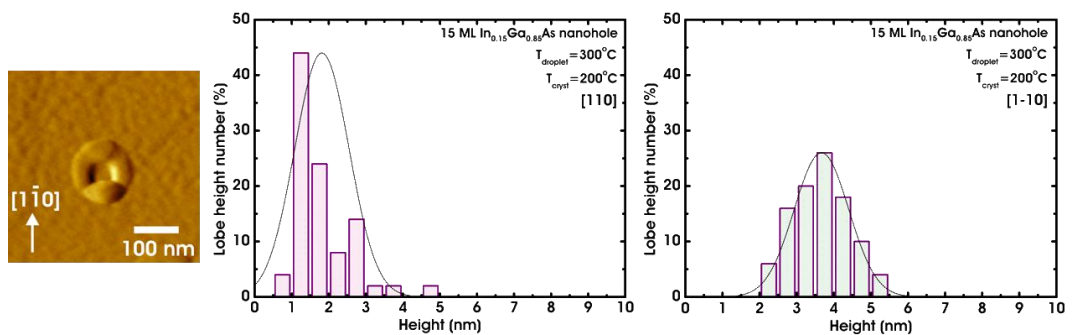


(ข)



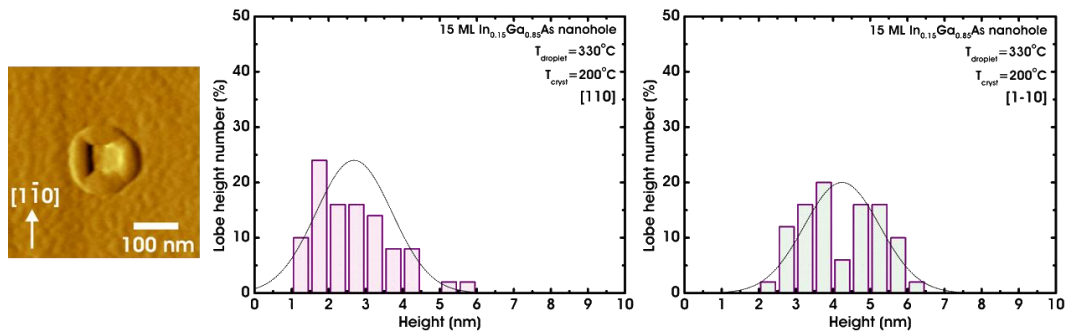
(ค)

รูปที่ 4.3 (ต่อ)

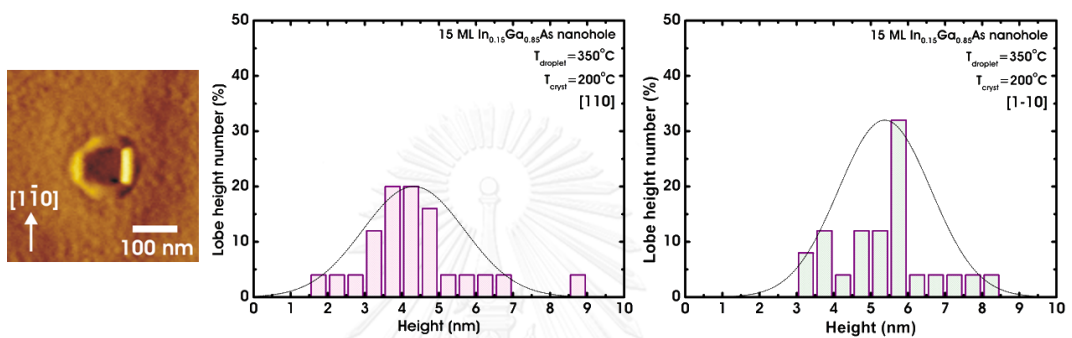


(ก)

รูปที่ 4.4 ภาพ AFM ของโครงสร้างนาโนโฮลจาก $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ และกราฟฮิสโตแกรมการกระจายความสูงของกลีบ (Lobe) ที่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะ (ก) 300°C (ข) 330°C และ (ค) 350°C



(จ)



(ค)

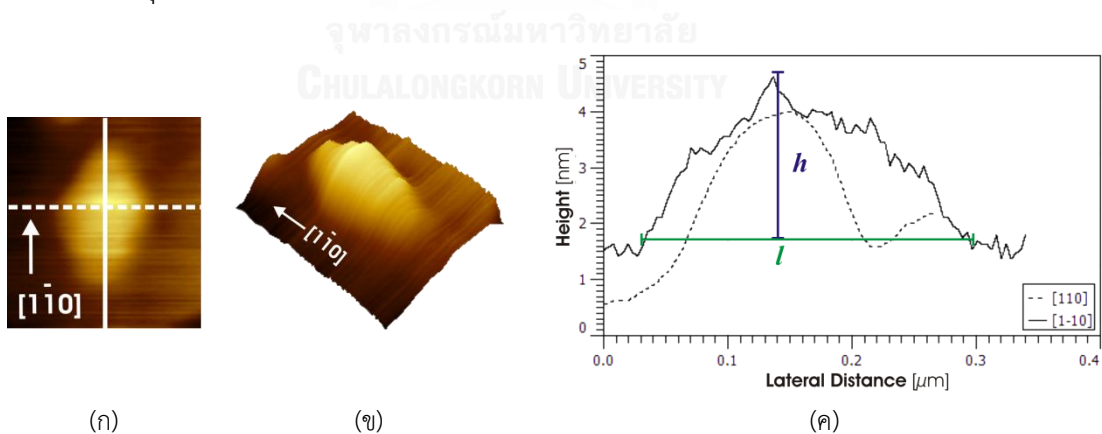
รูปที่ 4.4 (ต่อ)

4.2 การประดิษฐ์เนินขนาดนาโนจาก InGaAs

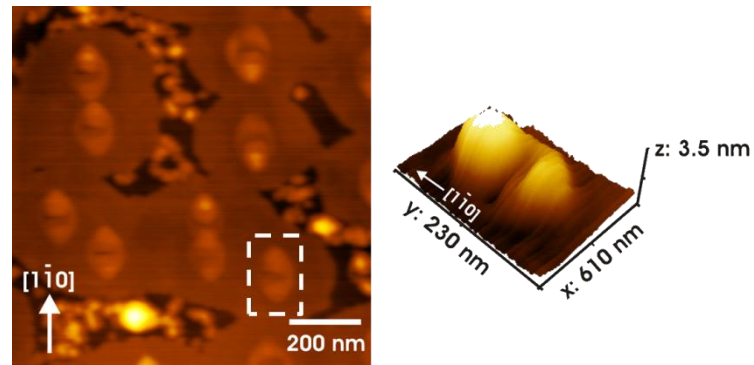
4.2.1 อุณหภูมิที่กำหนดในการปลูกผลึกควอนตัมดอทโมเลกุล (T_a)

เมื่อนำชิ้นงานไปตรวจสอบผิวหน้าด้วยเครื่อง AFM ปรากฏว่าโครงสร้างนาโนโฮลรูปร่างสี่เหลี่ยมได้เปลี่ยนแปลงไปเป็นโครงสร้างเนินขนาดนาโน ดังในรูปที่ 4.6 ตำแหน่งในการวัดขนาดและความสูงของเนินขนาดนาโน InGaAs ดังรูปที่ 4.5 (ค) ค่า T_a ที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อขนาดและความสูงของโครงสร้างเนินขนาดนาโนที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.7 (ข) และ (ค) เป็นผลให้ความหนาแน่นของโครงสร้างเนินขนาดนาโนมีแนวโน้มลดลงดังรูปที่ 4.7 (ง) ที่ $T_a = 420^\circ\text{C}$, $T_a = 450^\circ\text{C}$, และ $T_a = 480^\circ\text{C}$ มีความหนาแน่น $9 \times 10^8/\text{cm}^2$, $8.62 \times 10^8/\text{cm}^2$, และ $5.12 \times 10^8/\text{cm}^2$ มีขนาดเฉลี่ย 144.17 nm, 143.43 nm, และ 232.25 nm ในทิศทาง [110] และ 179.59 nm, 257.45 nm, และ 397.44 nm ในทิศทาง [1-10] มีความสูงเฉลี่ย 1.78 nm, 2.66 nm, และ 7.25 nm ในทิศทาง [110] และ 3.61 nm, 3.11 nm, และ 6.22 nm ในทิศทาง [1-10]

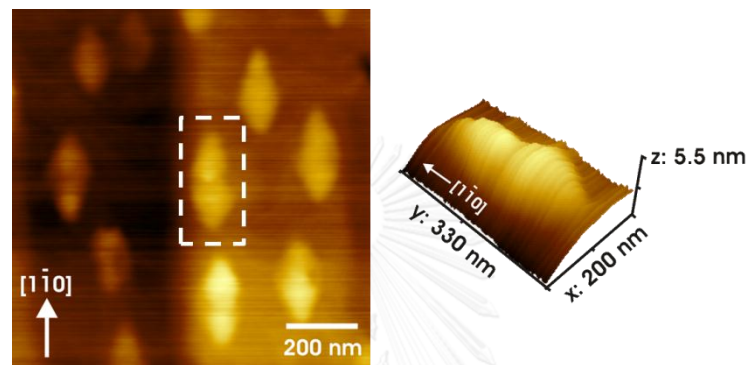
กระบวนการเกิดโครงสร้างเนินขนาดนาโนเกิดจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานสูงขึ้น ทำให้โครงสร้างนาโนไฮดรอปรางส์เปลี่ยน $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ เกิดการเปลี่ยนรูปกลายเป็นเนินขนาดนาโน อันเนื่องจากการเคลื่อนย้ายของอะตอม In และ Ga จากกลีบที่ล้อมรอบหลุมสี่เหลี่ยม อะตอมบางส่วนมีการเคลื่อนย้ายลงไปหลุมและเติมจำนวนจนเต็มหลุมแบบ layer by layer [22] จนกระทั่งถึงความหนาวิกฤติจะเกิดการคลายความเครียดทำให้นูนเป็นเนินขนาดนาโน และมีอะตอมบางส่วนเคลื่อนย้ายออกไปด้านข้างบนผิวบัพเฟอร์เช่นกัน ส่วนรูปร่างของโครงสร้างเนินขนาดนาโนวางตัวยาวได้ดีในทิศ ทาง [1-10] เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ได้ดีของอะตอมเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและคุณสมบัติในทิศทางที่แตกต่างกันของการเคลื่อนย้ายของอะตอมเกิดขึ้นได้ดีในทิศทาง [1-10] บนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน GaAs จากรูปที่ 4.6 (ก) $T_a = 420^\circ\text{C}$ โครงสร้างเนินขนาดนาโนมีการขึ้นรูปยังไม่สมบูรณ์ ผิวรอบข้างเกิดเป็นก้อนผลึกขนาดเล็ก ๆ บริเวณผิวหน้าที่ยังเติมไม่เต็มจนเป็นเนิน เนื่องจาก T_a มีค่าไม่เพียงพอในการเคลื่อนย้ายของอะตอม รูปที่ 4.6 (ข) $T_a = 450^\circ\text{C}$ โครงสร้างเนินขนาดนาโนมีการขึ้นรูปสมบูรณ์ผิวรอบข้างเรียบไม่มีก้อนผลึก เนื่องจาก T_a มีค่าเพียงพอในการเคลื่อนย้ายของอะตอม ส่วนรูปที่ 4.6 (ค) $T_a = 480^\circ\text{C}$ โครงสร้างเนินขนาดนาโนมีการขึ้นรูปที่มีรูปร่างใหญ่เป็นผลจาก T_a มีค่าสูงขึ้นทำให้การเคลื่อนย้ายของอะตอมเกิดขึ้นได้ดีมากโครงสร้างเนินขนาดนาโนเกิดการรวมตัวกันทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและรูปร่างที่ได้เป็นรูปร่างที่ทำให้พลังงานรวมของระบบน้อยที่สุด



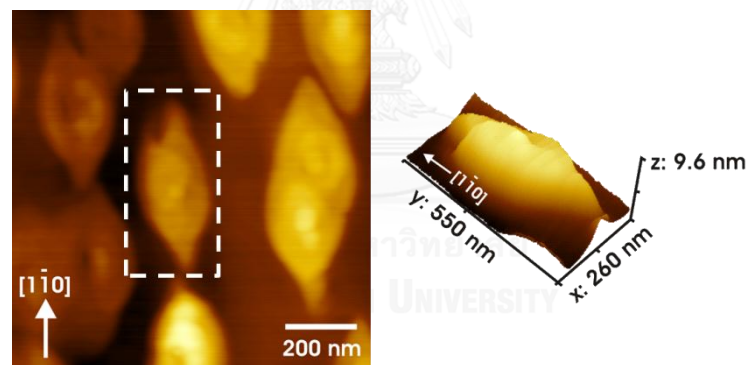
รูปที่ 4.5 ภาพ AFM ของโครงสร้างเนินขนาดนาโนของ InGaAs (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ (ค) ภาพตัดขวางของโครงสร้างเนินขนาดนาโนในทิศทาง [110] และ [1-10] ซึ่ง $T_a = 450^\circ\text{C}$, $R = 10^\circ\text{C}/\text{min}$, และ $t_h = 15\text{ s}$ ที่มีเส้นบอกขนาดความกว้างของฐาน (l) และความสูง (h)



(ก)

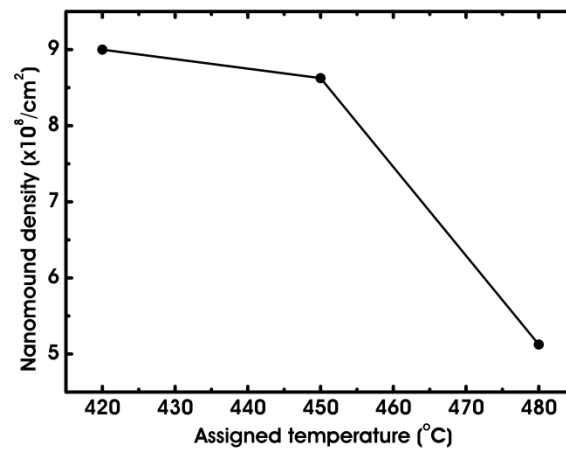


(ข)

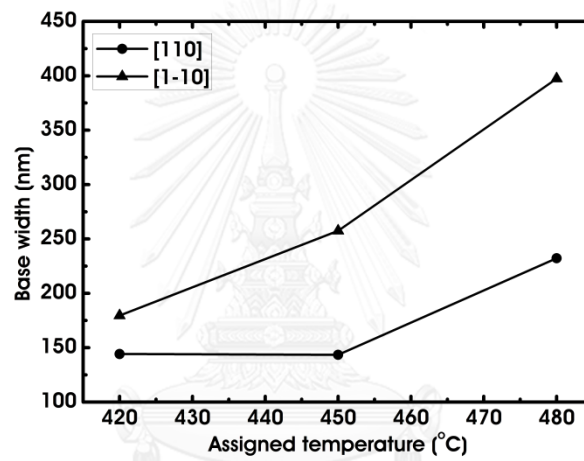


(ค)

รูปที่ 4.6 ภาพ AFM ของผิวหน้าของชิ้นงานขนาด $1000 \times 1000 \text{ nm}^2$ และรูป 3 มิติของโครงสร้างเนินขนาดนาโนของ InGaAs ที่ค่าอุณหภูมิเป้าหมายที่ใช้ในการปลูกผลึกควอนตัมดอทโมเลกุล (ก) $T_a = 420^\circ\text{C}$ (ข) $T_a = 450^\circ\text{C}$ (ค) $T_a = 480^\circ\text{C}$

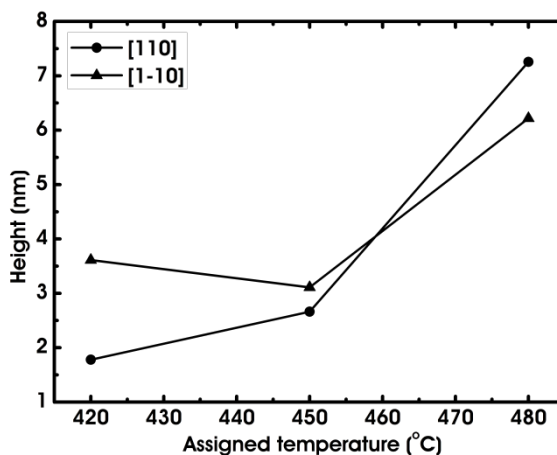


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น (ก), ขนาดความกว้างของฐาน (ข) และความสูง (ค) กับ อุณหภูมิที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปนาโนโซลให้เป็นโครงสร้าง InGaAs เนิบขนาดนาโนในทิศทาง [110] และ [1-10]



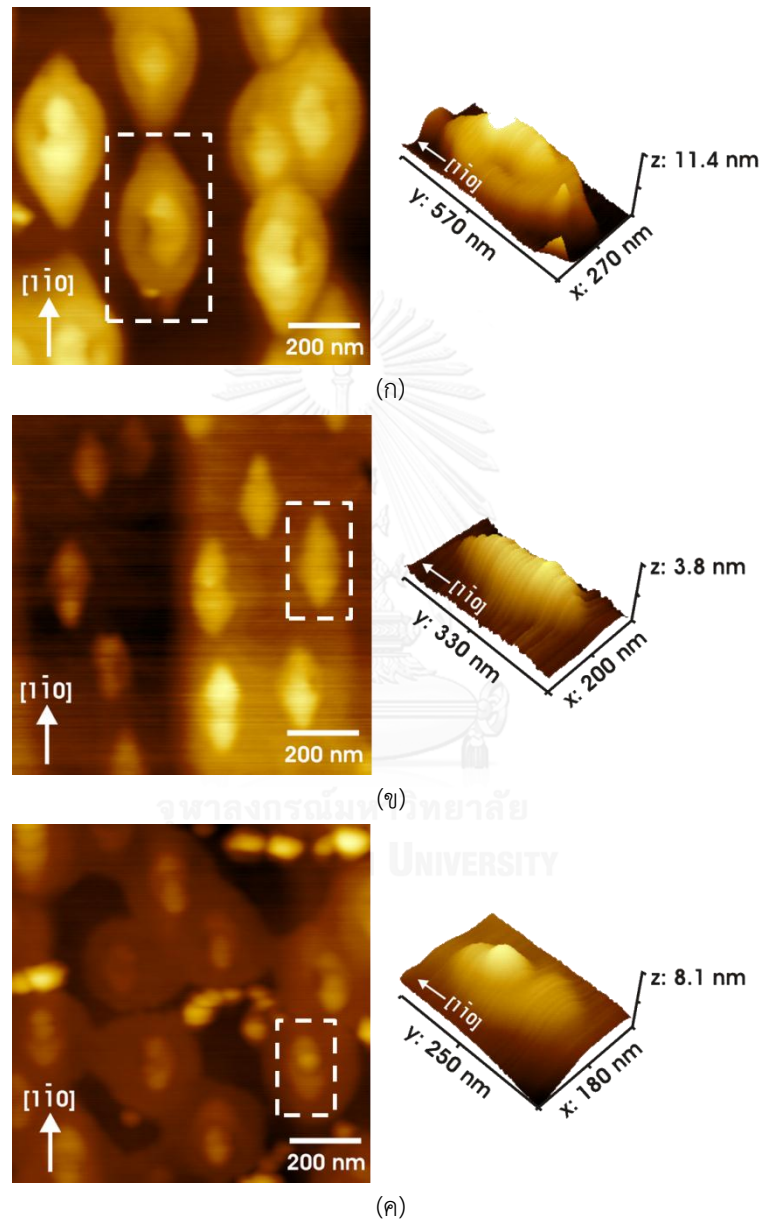
(ค)

รูปที่ 4.7 (ต่อ)

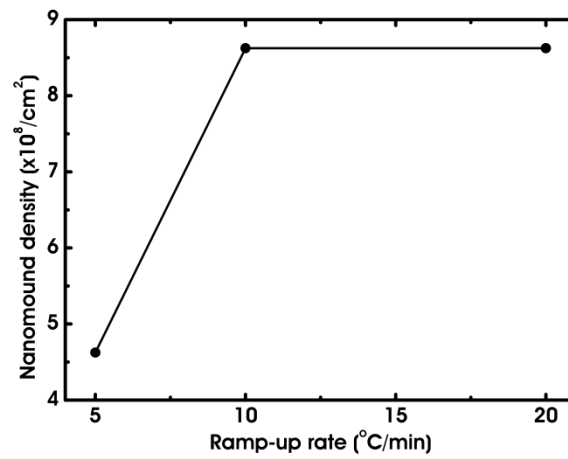
4.2.2 อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (R)

เมื่อนำชิ้นงานไปตรวจสอบผิวหน้าด้วยเครื่อง AFM ปรากฏว่าโครงสร้างนาโนไฮลรูปร่างสี่เหลี่ยมได้เปลี่ยนแปลงไปเป็นโครงสร้างเนินขนาดนาโนดังรูปที่ 4.8 ซึ่งเมื่อ R มีค่าเพิ่มขึ้นมีผลต่อขนาดและความสูงของโครงสร้างเนินขนาดนาโนมีขนาดลดลงดังรูปที่ 4.9 (ข) และ (ค) โดยมีผลทำให้ค่าความหนาแน่นของโครงสร้างเนินขนาดนาโนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.9 (ก) ที่ $R = 5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, $R = 10^{\circ}\text{C}/\text{min}$, และ $R = 20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ มีความหนาแน่น $4.62 \times 10^8/\text{cm}^2$, $8.62 \times 10^8/\text{cm}^2$, และ $8.62 \times 10^8/\text{cm}^2$ มีขนาดเฉลี่ย 261.98 nm, 143.43 nm, และ 152.44 nm ในทิศทาง [110] และ 444.50 nm, 257.45 nm, และ 195.01 nm ในทิศทาง [1-10] มีความสูงเฉลี่ย 5.83 nm, 2.66 nm, และ 2.75 nm ในทิศทาง [110] และ 6.15 nm, 3.11 nm, และ 2.86 nm ในทิศทาง [1-10] จากรูปที่ 4.8 (ก) $R = 5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ โครงสร้างเนินขนาดนาโนมีการขึ้นรูปที่มีรูปร่างใหญ่เป็นผลจาก R ที่มีค่าน้อยทำให้ระยะเวลาที่ชิ้นงานได้รับพลังงานความร้อนเป็นเวลานาน การเคลื่อนย้ายของอะตอมเกิดขึ้นได้มากขึ้น เป็นผลทำให้โครงสร้างเนินขนาดนาโนเกิดการหลอมรวมตัวกันทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและรูปร่างที่ได้เป็นรูปร่างที่ทำให้พลังงานรวมของระบบน้อยที่สุด ผิวหน้าของชิ้นงานมีลักษณะคล้ายกับการหลอมโครงสร้างนาโนไฮลรูปร่างสี่เหลี่ยมที่อุณหภูมิสูง รูปที่ 4.8 (ข) $R = 10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ โครงสร้างเนินขนาดนาโนมีการขึ้นรูปสมบูรณ์ผิวรอบข้างเรียบแต่มีระดับผิวไม่เท่ากัน โดยบางบริเวณเป็นแนวระดับสูงบางบริเวณเป็นแนวระดับต่ำและไม่มีก้อนผลึกขนาดเล็ก ส่วนรูปที่ 4.8 (ค) $R = 20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ โครงสร้างเนินขนาดนาโนมีการขึ้นรูปเกิดเป็นจุดตรงกลางเกิดจากการคลาย

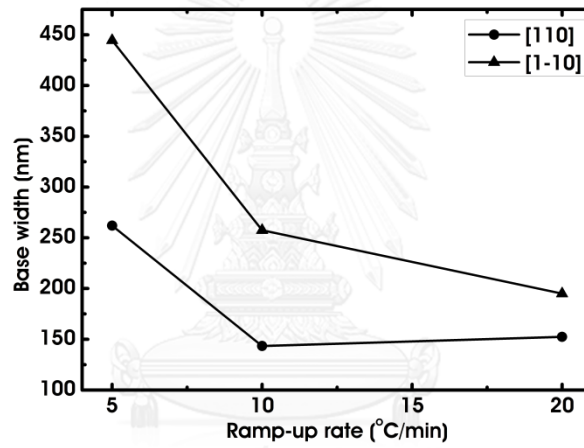
ความเครียดของโครงสร้างผิวยุบข้างเกิดก่อนผลึกและผิวหน้าเกิดขึ้นไม่เท่ากัน เนื่องจากอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่เร็วเกินไปทำให้การเคลื่อนย้ายของอะตอมเกิดไม่ทันโครงสร้างผิวหน้ามีลักษณะคล้ายกับการหลอมโครงสร้างนาโนไฮดรอปรางส์ที่เหลี่ยมที่อุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 4.8 ภาพ AFM ผิวหน้าของชิ้นงานขนาด $1000 \times 1000 \text{ nm}^2$ และรูป 3 มิติของโครงสร้าง LaGaAs เนินขนาดนาโนที่ใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิแตกต่างกัน (ก) $R = 5^\circ\text{C}/\text{min}$ (ข) $R = 10^\circ\text{C}/\text{min}$ (ค) $R = 20^\circ\text{C}/\text{min}$

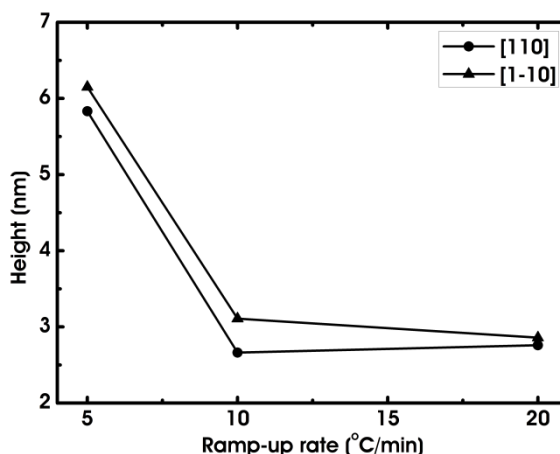


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น (ก), ขนาดความกว้างของฐาน (ข) และความสูง (ค) และค่าอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ จากตัวอย่างโครงสร้างเนินขนาดนาโน InGaAs ในทิศทาง [110] และ [1-10]

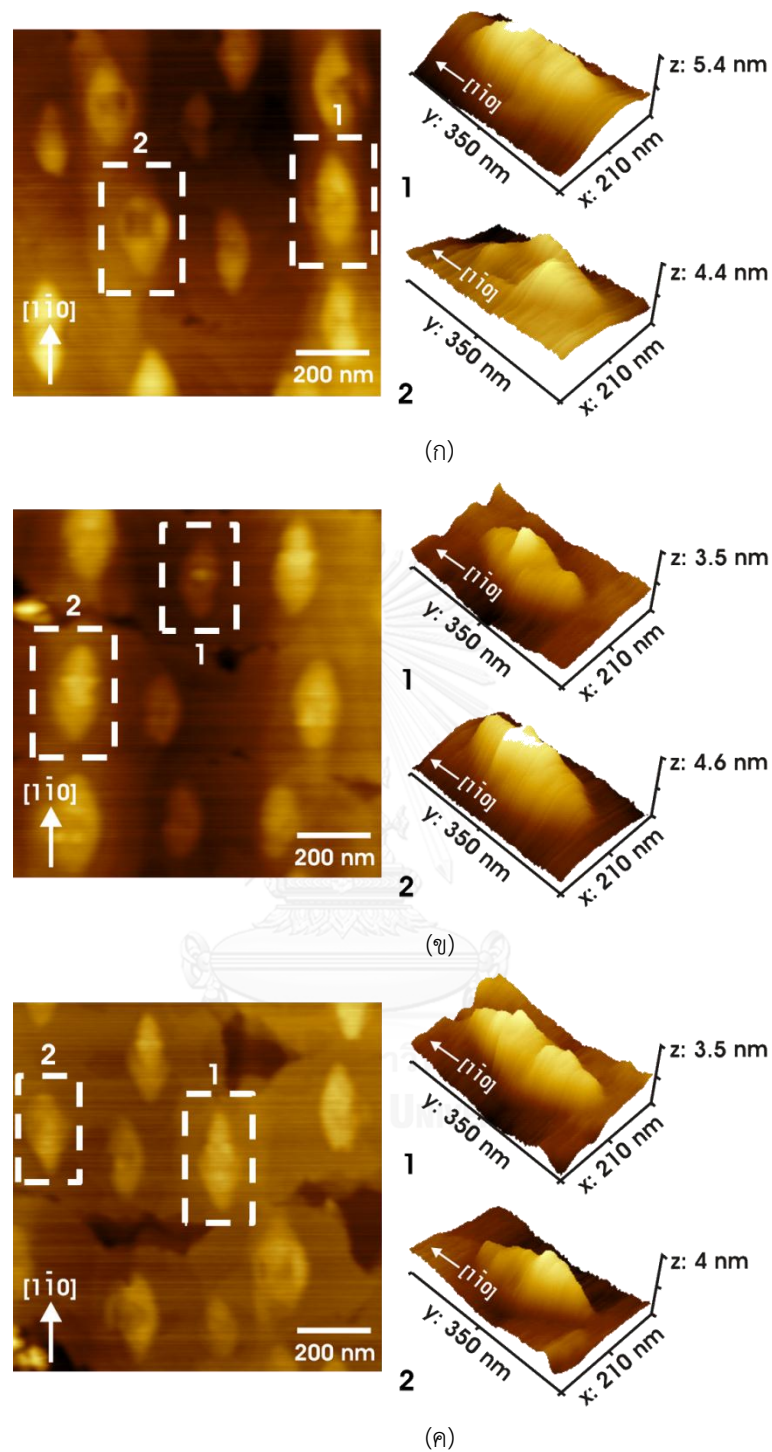


(ค)

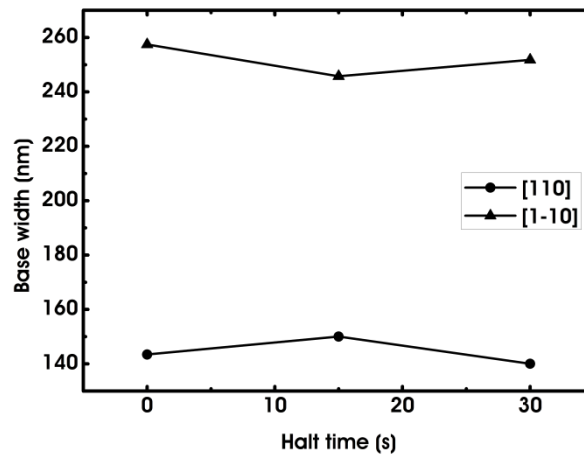
รูปที่ 4.9 (ต่อ)

4.2.3 ระยะเวลาที่รอ ณ อุณหภูมิเป้าหมายก่อนทำการปลูกผลึกควอนตัมดอทโมเลกุล (t_h)

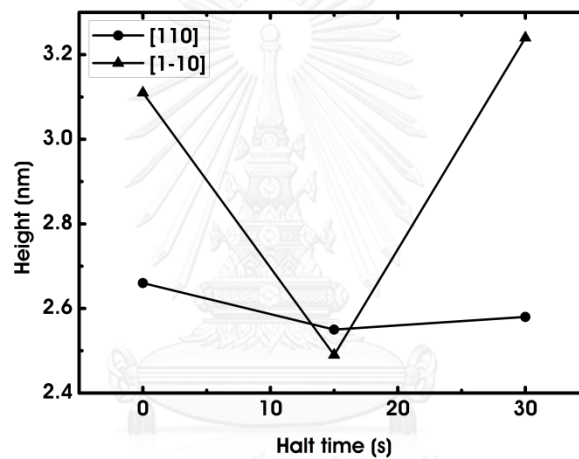
เมื่อนำชิ้นงานไปตรวจสอบผิวหน้าด้วยเครื่อง AFM ปรากฏว่าโครงสร้างนาโนโฮลรูปร่างสี่เหลี่ยมได้เปลี่ยนแปลงไปเป็นโครงสร้างเนินขนาดนาโนมีความหนาแน่น $8 \times 10^8 / \text{cm}^2$ เมื่อ $t_h = 0$ s, 15 s, และ 30 s โดยโครงสร้างเนินขนาดนาโนมีขนาดเฉลี่ย 143.43 nm, 150.03 nm, และ 140.03 nm ในทิศทาง [110] และ 257.45 nm, 245.74 nm, และ 251.78 nm ในทิศทาง [1-10] มีความสูงเฉลี่ย 2.66 nm, 2.55 nm, และ 2.58 nm ในทิศทาง [110] และ 3.11 nm, 2.49 nm, และ 3.24 nm ในทิศทาง [1-10] จากรูปที่ 4.11 (ก) แสดงแนวโน้มขนาดของโครงสร้างเนินขนาดนาโนที่ขนาดไม่แตกต่างกันมากเมื่อ t_h เพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นเฉลี่ยเปลี่ยนแปลงน้อยมาก รูปร่างของโครงสร้างเนินขนาดนาโนมีรูปร่างยาวในทิศทาง [1-10] เป็นผลมาจากการเคลื่อนย้ายของอะตอมเกิดขึ้นได้ง่ายในทิศทางนี้ ส่วนแนวโน้มความสูงของโครงสร้างเนินขนาดนาโนดังรูปที่ 4.11 (ข) เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างเนินขนาดนาโน พบว่า $t_h = 0$ s มีโครงสร้างเนินขนาดนาโนบางส่วนยังคงมีร่องรอยของหลุมสี่เหลี่ยม และบางส่วนก็เป็นเนินขนาดนาโนอย่างสมบูรณ์แสดงดังรูปที่ 4.10 (ก) ที่ $t_h = 15$ s พบว่ามีโครงสร้างเนินขนาดนาโนบางส่วนได้มีการเกิดดอทบนผิวหน้า ซึ่งดอทที่เกิดขึ้นมีผลต่อจำนวนของโครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุล InAs ที่เกิดบนโครงสร้างเนินขนาดนาโนดังรูปที่ 4.10 (ข) ที่ $t_h = 30$ s ผิวหน้าของโครงสร้างเนินขนาดนาโนบางส่วนเกิดดอทและพื้นผิวรอบข้างบางส่วนมีระดับไม่เท่ากันและมีก้อนผลึกขนาดเล็กปรากฏขึ้นมาดังรูปที่ 4.10 (ค)



รูปที่ 4.10 ภาพ AFM ผิวหน้าของชิ้นงานขนาด $1000 \times 1000 \text{ nm}^2$ และรูป 3 มิติของโครงสร้างเนินขนาดนาโน InGaAs หลังผ่านระยะเวลาการรอเมื่ออุณหภูมิถึงค่าที่ต้องการใช้ในการปลูกผลึกควอนตัมดอทโมเลกุล (ก) $t_h = 0 \text{ s}$ (ข) $t_h = 15 \text{ s}$ (ค) $t_h = 30 \text{ s}$



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (ก) และความสูง (ข) กับระยะเวลาที่รอหลังการรอเมื่ออุณหภูมิถึงค่าที่ต้องการใช้ในการปลูกผลึกควอนตัมดอทโมเลกุล จากโครงสร้างเนินขนาดนาโน InGaAs ในทิศทาง [110] และ [1-10]

4.3 การประดิษฐ์ควอนตัมดอทโมเลกุลจาก InAs

4.3.1 การปลูกผลึกควอนตัมดอทโมเลกุลจาก InAs ที่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐาน 450°C

4.3.1.1 ระยะเวลาที่รอ ณ อุณหภูมิเป้าหมายก่อนทำการปลูกผลึกควอนตัมดอทโมเลกุล

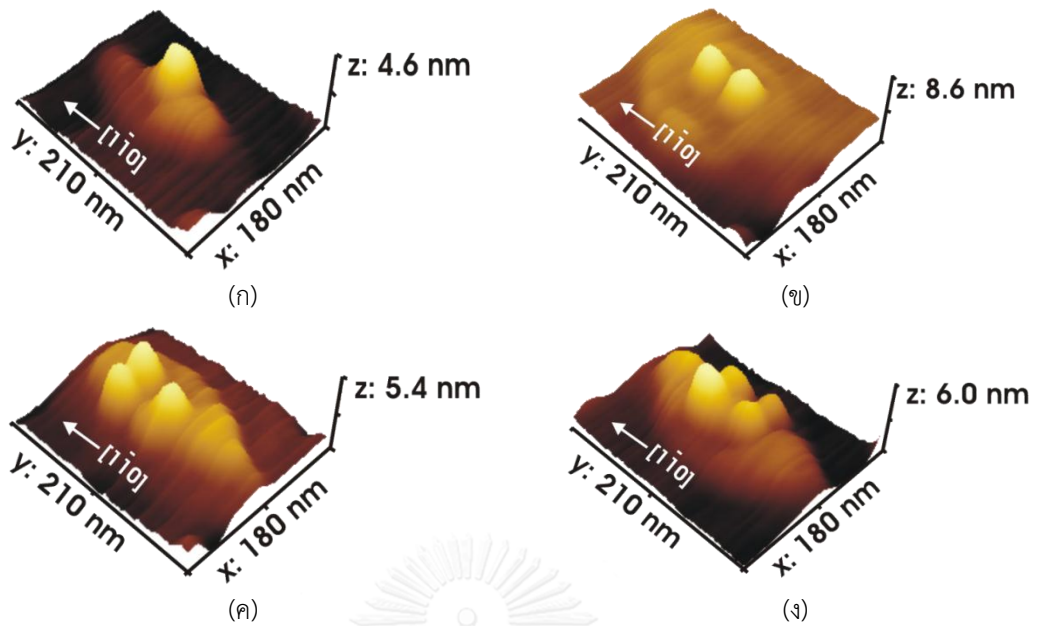
(t_h)

เมื่อนำชิ้นงานไปตรวจสอบผิวหน้าด้วยเครื่อง AFM ปรากฏว่าบนผิวหน้าชิ้นงานที่ได้มีโครงสร้างเป็นควอนตัมดอท InAs (single-dot) ดังรูปที่ 4.12 (ก) และควอนตัมดอทโมเลกุล InAs

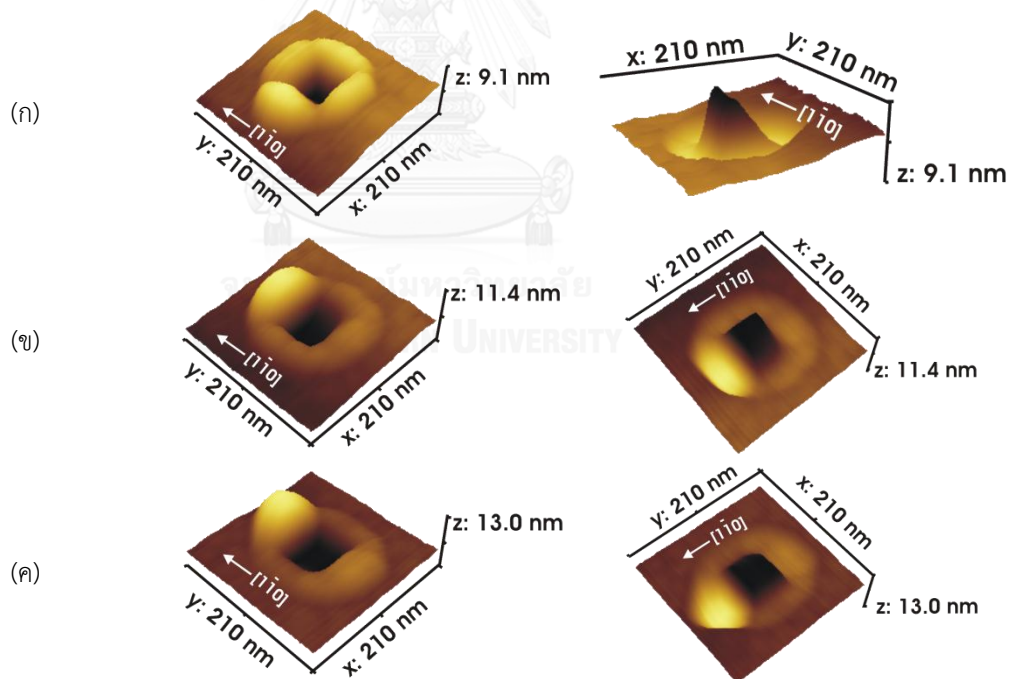
ชนิดต่าง ๆ ที่เกิดบนเนินขนาดนาโน InGaAs มีดังนี้ ควอนตัมดอตโมเลกุล 2 ดอต (bi-QDMs) ดังรูปที่ 4.12 (ข) ควอนตัมดอตโมเลกุล 3 ดอต (tri-QDMs) ดังรูปที่ 4.12 (ค) และ ควอนตัมดอตโมเลกุล 4 ดอต (quadra-QDMs) ดังรูปที่ 4.12 (ง) พบว่าตำแหน่งการเกิดของควอนตัมดอตโมเลกุลอยู่บนเนินขนาดนาโนและเกิดบริเวณมุมที่นาโนโฮลรูปร่างสี่เหลี่ยมถูกฝังอยู่ข้างล่างเนื่องจากตำแหน่งนั้น ๆ มีสนามความเครียด (strain field) สะสมอยู่มากส่งผลเร่งให้เกิดดอตได้เร็วกว่าบริเวณอื่น [2] ดังนั้นเมื่อพ่น In ในปริมาณไม่มากก็สามารถทำให้เกิดควอนตัมดอตโมเลกุลขึ้นได้ และปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผลให้เกิดโครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุลแตกต่างกันก็คือรูปร่างของหลุมนาโนโฮลดังรูปที่ 4.13 (ก) ความน่าจะเป็นที่ทำให้เกิดโครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุล 2 ดอต รูปที่ 4.13 (ข) ความน่าจะเป็นที่ทำให้เกิดโครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุล 3 ดอต และรูปที่ 4.13 (ค) ความน่าจะเป็นที่ทำให้เกิดโครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุล 4 ดอต เมื่อพิจารณาอิทธิพลของ t_h ต่อเปอร์เซ็นต์การเกิดควอนตัมดอตโมเลกุลชนิดต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.12 พบว่า $t_h = 0s$ และ $30s$ ทำให้เกิดโครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุล 2 ดอตมากที่สุด รองลงมาคือโครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุล 3 ดอต เมื่อ $t_h = 0s$ และ $15s$ รองลงมาคือโครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุล 4 ดอตเมื่อ $t_h = 15s$ และแต่ละควอนตัมดอตในโครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุลมีขนาดและความสูงที่แตกต่างกัน ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การเกิดของโครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุล ชนิดต่าง ๆ สามารถดูได้จากตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์การเกิดของโครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุลจากอิทธิพลระยะเวลาที่รอ ณ อุณหภูมิเป้าหมายก่อนทำการปลูกผลึกควอนตัมดอตโมเลกุล

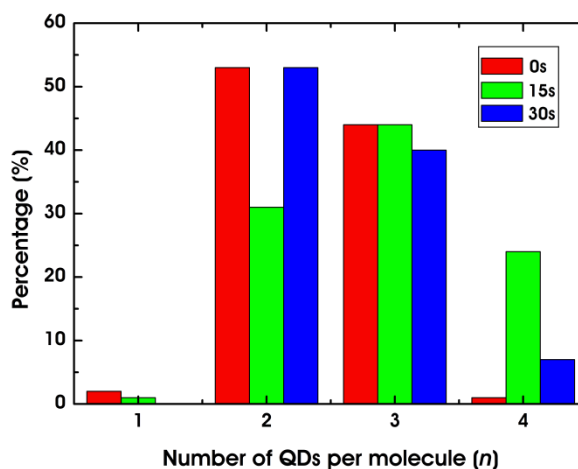
Halt time (s)	Number of QDs per molecule (n)			
	1	2	3	4
0	2%	53%	44%	1%
15	1%	31%	44%	24%
30	0%	53%	40%	7%



รูปที่ 4.12 ภาพ AFM 3 มิติของโครงสร้าง (ก) ควอนตัมดอตและควอนตัมดอตโมเลกุลชนิดต่างๆ (ข) ควอนตัมดอตโมเลกุล 2 ดอต (ค) ควอนตัมดอตโมเลกุล 3 ดอต (ง) ควอนตัมดอตโมเลกุล 4 ดอต



รูปที่ 4.13 ภาพ AFM 3 มิติของโครงสร้างนาโนไฮลรูปร่างสี่เหลี่ยมของ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ (ก) หลุมนาโนทำให้เกิด 2 ดอต (ข) หลุมนาโนทำให้เกิด 3 ดอต (ค) หลุมนาโนทำให้เกิด 4 ดอต



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของควอนตัมดอตโมเลกุลกับจำนวนควอนตัมดอตต่อควอนตัมดอตโมเลกุลจากอิทธิพลของ Halt time (t_h)

4.3.1.2 อัตราการปลูกอินเดียม (GR)

เมื่อนำชิ้นงานไปวิเคราะห์ผิวหน้าด้วยเครื่อง AFM ปรากฏว่าบนผิวหน้าชิ้นงานที่ได้มีโครงสร้างควอนตัมดอต InAs เกิดเพียงบนชิ้นงานของเงื่อนไข GR = 0.15 ML/s เท่านั้น ส่วนควอนตัมดอตโมเลกุล InAs ชนิดต่าง ๆ ที่เกิดบนเนินขนาดนาโน InGaAs มีดังนี้ ควอนตัมดอตโมเลกุล 2 ดอต, ควอนตัมดอตโมเลกุล 3 ดอต และ ควอนตัมดอตโมเลกุล 4 ดอต เมื่อพิจารณาอิทธิพลของ GR ต่อเปอร์เซ็นต์การเกิดควอนตัมดอตโมเลกุลชนิดต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.15 พบว่า GR = 0.10 ML/s ทำให้เกิดโครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุล 3 ดอตมากที่สุด รองลงมาคือโครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุล 4 ดอต เมื่อ GR = 0.05 ML/s รองลงมาคือโครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุล 2 ดอตเมื่อ GR = 0.15 ML/s และแต่ละควอนตัมดอตในโครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุลมีขนาดและความสูงที่แตกต่างกัน ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การเกิดของโครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุลชนิดต่าง ๆ สามารถสรุปไว้ในตารางที่ 4.2 เมื่อพิจารณารูปร่างของควอนตัมดอตโมเลกุล ดังรูปที่ 4.16 พบว่าเมื่อใช้อัตราการปลูกอินเดียมที่มีค่าน้อยที่สุดคือ 0.05 ML/s ทำให้ได้ควอนตัมดอตโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่และดอตที่เรียงด้านข้างตามทิศทาง [110] และอยู่ชิดกันมากจนเกิดการเหลื่อมล้ำกันและบริเวณที่เป็นขอบของเนินขนาดนาโนเกิดควอนตัมดอตขึ้น เมื่อใช้อัตราการปลูกอินเดียมที่มีค่ามากขึ้นพบว่าบริเวณขอบของเนินขนาดนาโนไม่มีควอนตัมดอตเกิดขึ้นและควอนตัมดอตโมเลกุลมีขนาดเล็กลง โดยสังเกตเห็นว่าดอตโมเลกุลแยกออกจากกัน จากรูปที่ 4.17 เป็นภาพตัวอย่างแสดงโปรไฟล์ของควอนตัมดอตโมเลกุล 4 ดอต เพื่อบอกการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของดอต (D) ความสูง (h) และ

ระยะห่างระหว่างยอดถึงยอด ($p-p$) เมื่อพิจารณาขนาดและความสูงจากรูปที่ 4.18 พบว่า เมื่ออัตราการปลูกอินเดียมมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.05 ML/s ถึง 0.15 ML/s ค่าความสูงเฉลี่ยและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของควอนตัมดอตโมเลกุลมีค่าลดลง และเมื่อเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของดอตโมเลกุลในทิศทาง [110] กับ [1-10] พบว่า ทิศทาง [110] มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของดอตมากกว่า สามารถดูค่าความสูง ค่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย และความสูงเฉลี่ยของดอตได้จากตารางที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

การเกิดควอนตัมดอตโมเลกุลบริเวณที่เป็นขอบของเนินขนาดนาโนเมื่ออัตราการปลูกอินเดียมมีค่าน้อยเกิดจากอะตอมของธาตุอินเดียมมีเวลาในการอพยพหรือเคลื่อนย้ายไปยังบริเวณขอบ และเมื่อมีปริมาณมากพอจนถึงค่าความหนาวิกฤติจึงทำการคลายความเครียดโดยการเกิดเป็นควอนตัมดอตเกิดขึ้นบริเวณขอบ ที่ขนาดควอนตัมดอตโมเลกุลมีขนาดใหญ่ที่สุดเป็นเพราะอะตอมของธาตุมีเวลาที่จะเคลื่อนย้ายไปรวมยังขอบดอตทำให้ดอตมีขนาดใหญ่ขึ้น และเหตุผลที่ขนาดของดอตในทิศทาง [110] มากกว่า [1-10] เป็นเพราะทิศทาง [110] อะตอมของธาตุสามารถก่อตัวเกิดเป็นผลึกได้ง่ายกว่า สำหรับอัตราการปลูกอินเดียมมีค่ามากส่งผลให้ควอนตัมดอตโมเลกุลมีขนาดเล็กลงเป็นเพราะอะตอมไม่มีเวลามากเพียงพอที่จะอพยพไปได้ไกลจึงถูกอะตอมอื่น ๆ ทับลงมาทำให้ได้ควอนตัมดอตโมเลกุลที่มีขนาดเล็กกว่าและไม่มีควอนตัมดอตเกินที่ขอบของเนินขนาดนาโน

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์การเกิดของโครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุลจากอิทธิพลอัตราการปลูกอินเดียม

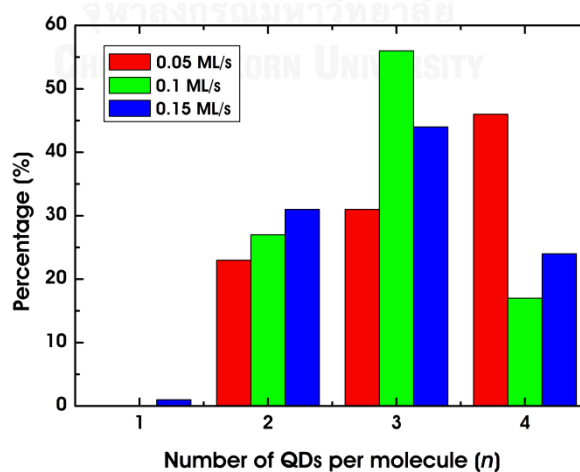
Growth rate (ML/s)	Number of QDs per molecule (n)			
	1	2	3	4
0.05	0%	23%	31%	46%
0.10	0%	27%	56%	17%
0.15	1%	31%	44%	24%

ตารางที่ 4.3 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของควอนตัมดอทโมเลกุลเนื่องจากอิทธิพลของอัตราการปลูกอินเดียมที่เปลี่ยนแปลงไป

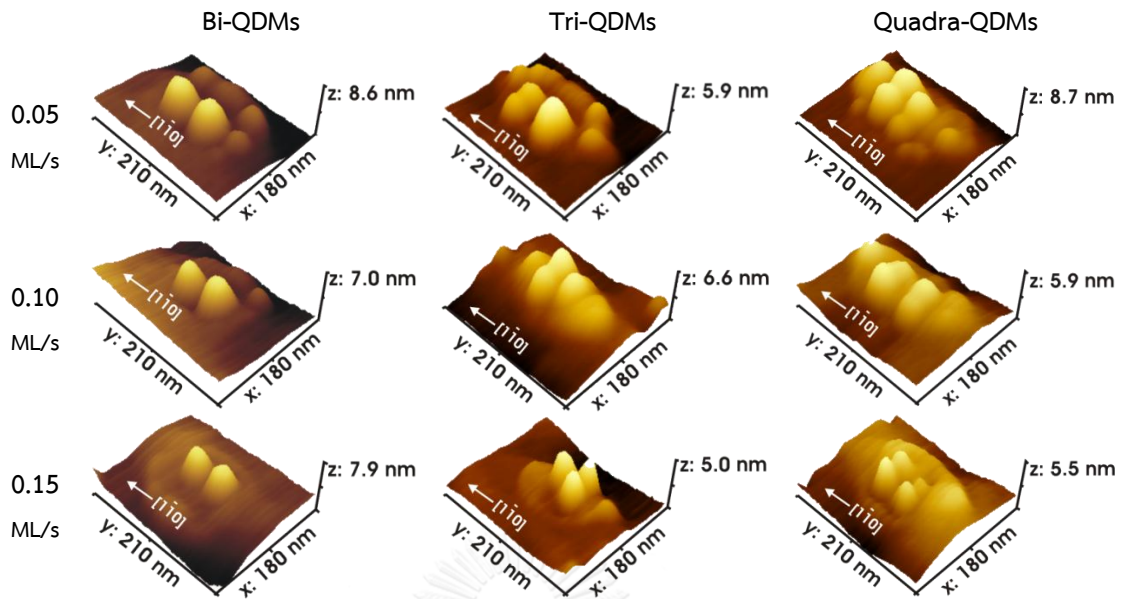
GR (ML/s)	Diameter (nm)					
	[110]			[1-10]		
	Bi-QDMs	Tri-QDMs	Quadra-QDMs	Bi-QDMs	Tri-QDMs	Quadra-QDMs
0.05	58.27	44.46	37.61	42.13	39.91	40.25
0.10	51.85	41.41	35.95	36.77	36.14	33.96
0.15	46.13	32.39	29.96	36.90	31.16	30.88

ตารางที่ 4.4 ขนาดความสูงเฉลี่ยของควอนตัมดอทโมเลกุลเนื่องจากอิทธิพลของอัตราการปลูกอินเดียมที่เปลี่ยนแปลงไป

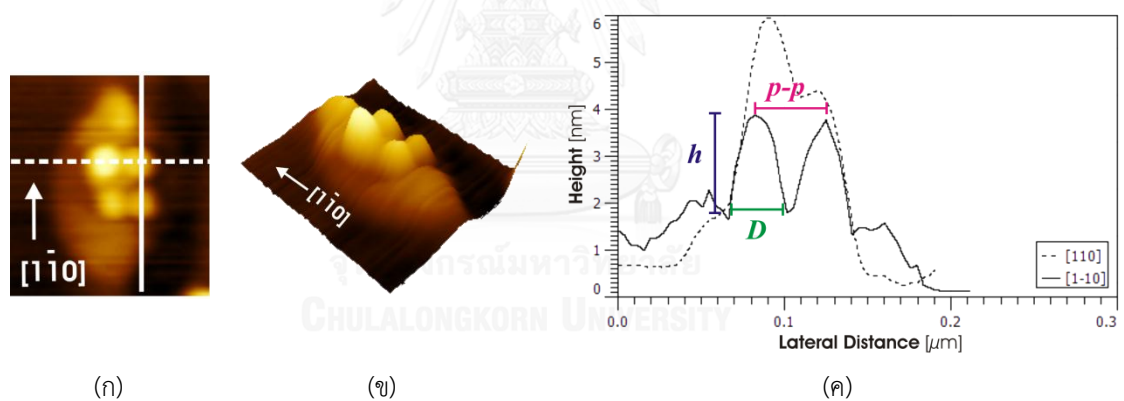
GR (ML/s)	Height (nm)		
	[110]		
	Bi-QDMs	Tri-QDMs	Quadra-QDMs
0.05	4.51	3.96	3.69
0.10	3.21	2.96	2.84
0.15	2.97	2.66	2.77



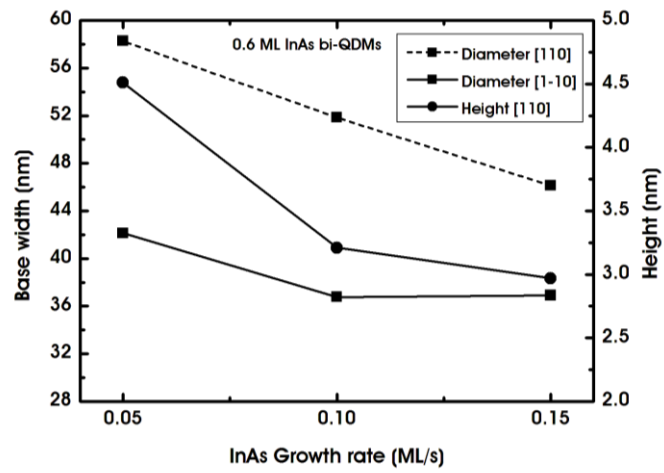
รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของควอนตัมดอทโมเลกุลกับจำนวนควอนตัมดอทต่อควอนตัมดอทโมเลกุลจากอิทธิพลของอัตราการปลูกอินเดียม



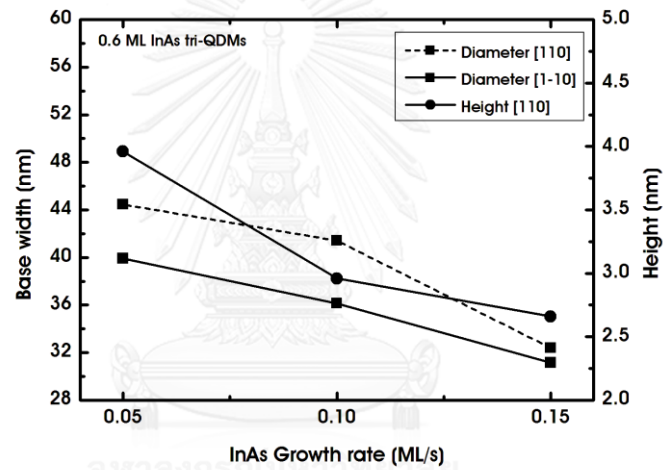
รูปที่ 4.16 ภาพเปรียบเทียบ AFM 3 มิติของโครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุล 2 ดอต, 3 ดอตและ 4 ดอตจากอิทธิพลของอัตราการปลูกอินเดียม



รูปที่ 4.17 ภาพ AFM ของโครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุล 4 ดอต (ก) 2 มิติ (ข) 3 มิติ (ค) ภาพตัดขวางของโครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุล 4 ดอตในทิศทาง $[110]$ และ $[1-10]$ GR = 0.15 ML/s, ปริมาณอินเดียมเท่ากับ 0.60 ML และ $t_h = 15$ s ที่มีเส้นบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของดอต (D) ความสูง (h) และ ระยะห่างระหว่างยอดถึงยอด ($p-p$)

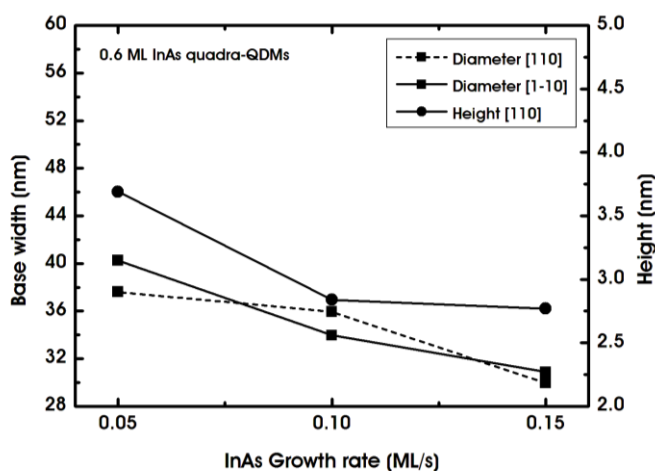


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงกับอัตราการปลูกอินเดียมของโครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุล (ก) 2 ดอต (ข) 3 ดอต และ (ค) 4 ดอต



(ค)

รูปที่ 4.18 (ต่อ)

4.3.1.3 ปริมาณอินเดียม

เมื่อนำชิ้นงานไปวิเคราะห์ผิวหน้าด้วยเครื่อง AFM ปรากฏว่าบนผิวหน้าชิ้นงานที่ได้มีโครงสร้างควอนตัมดอท InAs เกิดบนชั้นของเงื่อนไขปริมาณอินเดียมเท่ากับ 0.60 ML เท่านั้น ส่วนควอนตัมดอทโมเลกุล InAs ชนิดต่าง ๆ ที่เกิดบนเนินขนาดนาโน InGaAs มีดังนี้ ควอนตัมดอทโมเลกุล 2 ดอต, ควอนตัมดอทโมเลกุล 3 ดอต และ ควอนตัมดอทโมเลกุล 4 ดอต เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณอินเดียมต่อเปอร์เซ็นต์การเกิดควอนตัมดอทโมเลกุลชนิดต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.19 พบว่าปริมาณอินเดียม 0.60 ML ทำให้เกิดโครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุล 3 ดอตมากที่สุด รองลงมาคือโครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุล 4 ดอต เมื่อปริมาณอินเดียม 0.75 ML รองลงมาคือโครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุล 2 ดอตเมื่อปริมาณอินเดียม 0.45 ML และแต่ละควอนตัมดอทในโครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุลมีขนาดและความสูงที่แตกต่างกัน ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การเกิดของโครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุลชนิดต่าง ๆ สรุปไว้ในตารางที่ 4.5 เมื่อพิจารณารูปร่างควอนตัมดอทโมเลกุลดังรูปที่ 4.20 พบว่าที่ปริมาณอินเดียมเท่ากับ 0.45 ML ได้ควอนตัมดอทโมเลกุลที่เตี้ยและเส้นผ่าศูนย์กลางของดอตกว้างบริเวณที่เป็นขอบของเนินขนาดนาโนไม่มีดอตโมเลกุลเกิดขึ้น แต่การขึ้นรูปของควอนตัมดอทโมเลกุลยังไม่สมบูรณ์ และเมื่อปริมาณอินเดียมมีค่ามากขึ้นขนาดของควอนตัมดอทโมเลกุลเริ่มมีขนาดเล็กลงความสูงเพิ่มมากขึ้นแต่บริเวณขอบของเนินขนาดนาโนเกิดควอนตัมดอทเกิดขึ้นด้วย เมื่อพิจารณาดังรูปที่ 4.21 พบว่าเมื่อปริมาณอินเดียมเพิ่มมากขึ้นความสูงของดอตก็เพิ่มมากขึ้นด้วย ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของควอนตัมดอทโมเลกุลมีแนวโน้มลดลงเมื่อ

เพิ่มปริมาณอินเดียมเป็น 0.6 ML และเริ่มมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณอินเดียมเป็น 0.75 ML ขนาดในทิศทาง [110] มีค่ามากกว่าทิศทาง [1-10] สามารถดูข้อมูลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของควอนตัมดอทโมเลกุลและความสูงได้ ดังตารางที่ 4.6 และ 4.7

การเกิดควอนตัมดอทโมเลกุลขึ้นที่บริเวณขอบของเนินขนาดนาโนเมื่ออินเดียมมีปริมาณที่มากเกิดจากปริมาณอินเดียมที่มากเกินไป อะตอมของอินเดียมเคลื่อนที่ไปยังบริเวณนั้นทำให้เกิดการรวมตัวในปริมาณที่มากขึ้นจนถึงค่าความหนาวิกฤตทำให้บริเวณขอบของเนินขนาดนาโนคลายความเครียดกลายเป็นควอนตัมดอทเกิดขึ้น ส่วนปริมาณอินเดียมมากขึ้นทำให้ควอนตัมดอทโมเลกุลมีความสูงเพิ่มมากขึ้นเกิดจากอะตอมอินเดียมจำนวนมากไปรวมตัว ณ บริเวณที่เป็นขอบของนาโนไฮดรูปร่างสี่เหลี่ยมเดิมที่ถูกฝังอยู่ด้านใต้ทำให้เมื่อถึงค่าวิกฤตที่ต้องคลายความเครียดทำให้ได้ควอนตัมดอทโมเลกุลที่สูงขึ้น และทำให้ระบบนั้นมีพลังงานรวมน้อยที่สุด ส่วนขนาดที่ลดลงและเพิ่มมากขึ้นเป็นผลมาจากปริมาณอินเดียมที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ความเครียดเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้โครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุลต้องการคลายความเครียดโดยมีการดึงอะตอมรอบ ๆ ฐานของโครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุลทำให้ขนาดมีค่าลดลงและเมื่อปริมาณอินเดียมเพิ่มมากขึ้นอะตอมอินเดียมอพยพรวมกันที่ฐานของควอนตัมดอทโมเลกุลมากขึ้นทำให้ขนาดเพิ่มขึ้น ขนาดในทิศทาง [110] มีค่ามากกว่าทิศทาง [1-10] เป็นผลมาจากคุณสมบัติ Anisotropic ของการอพยพของอะตอมอินเดียม

ตารางที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์การเกิดของโครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุลจากอิทธิพลปริมาณอินเดียม

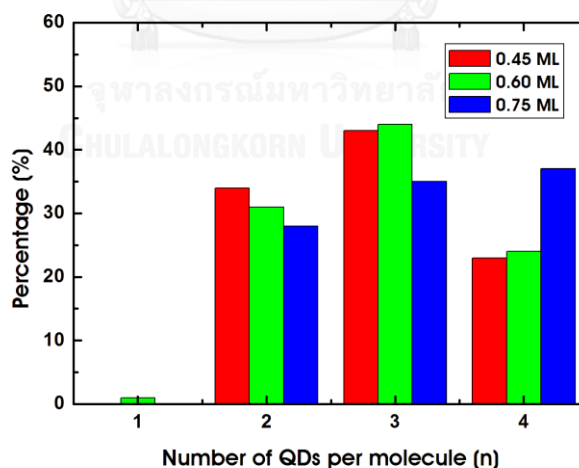
In amount (ML)	Number of QDs per molecule (n)			
	1	2	3	4
0.45	0%	34%	43%	23%
0.60	1%	31%	44%	24%
0.75	0%	28%	35%	37%

ตารางที่ 4.6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของควอนตัมดอทโมเลกุลเนื่องจากอิทธิพลของปริมาณอินเดียมที่เปลี่ยนแปลงไป

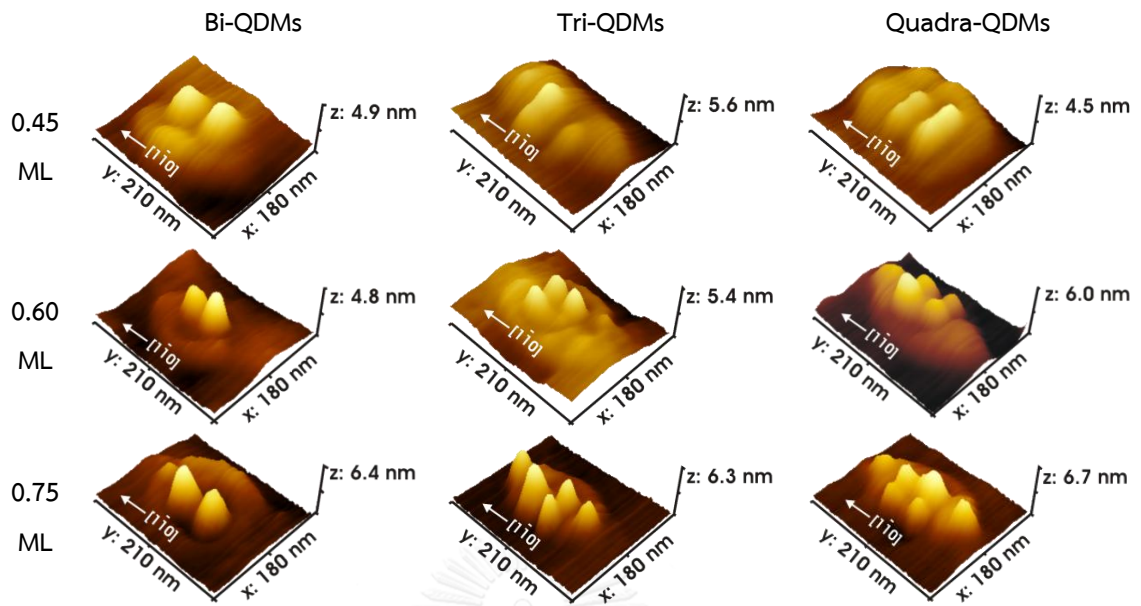
In amount (ML)	Diameter (nm)					
	[110]			[1-10]		
	Bi-QDMs	Tri-QDMs	Quadra-QDMs	Bi-QDMs	Tri-QDMs	Quadra-QDMs
0.45	55.39	49.9	42.42	36.55	36.48	35.5
0.60	46.13	32.39	29.96	36.9	31.16	30.88
0.75	54.77	38.09	34.13	37.34	34.43	33.49

ตารางที่ 4.7 ขนาดความสูงเฉลี่ยของควอนตัมดอทโมเลกุลเนื่องจากอิทธิพลของปริมาณอินเดียมที่เปลี่ยนแปลงไป

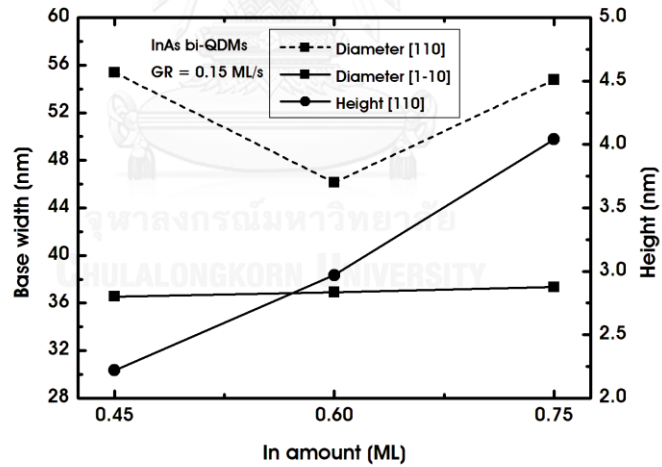
In amount (ML)	Height (nm)		
	[110]		
	Bi-QDMs	Tri-QDMs	Quadra-QDMs
0.45	2.22	2.67	2.25
0.60	2.97	2.66	2.77
0.75	4.04	3.87	3.3



รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของควอนตัมดอทโมเลกุลกับจำนวนควอนตัมดอทต่อควอนตัมดอทโมเลกุลจากอิทธิพลของปริมาณอินเดียม

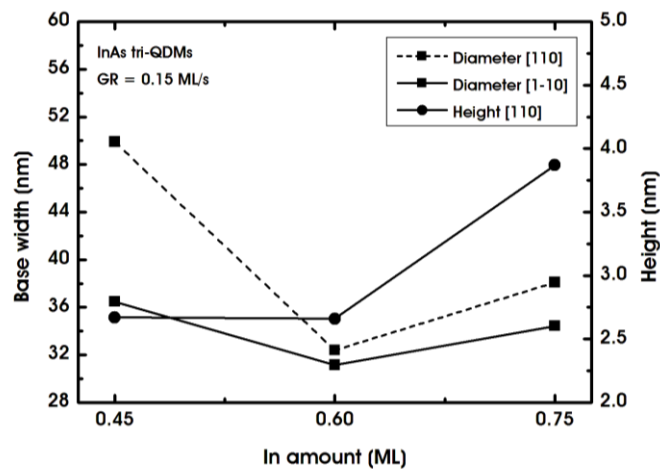


รูปที่ 4.20 ภาพเปรียบเทียบ AFM 3 มิติของโครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุล 2 ดอต, 3 ดอตและ 4 ดอตจากอิทธิพลของปริมาณอินเดียม

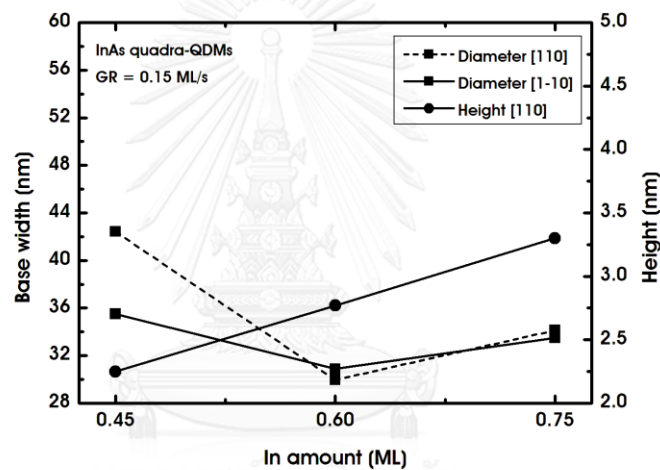


(ก)

รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงกับปริมาณอินเดียมของโครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุล (ก) 2 ดอต (ข) 3 ดอต และ (ค) 4 ดอต



(ข)



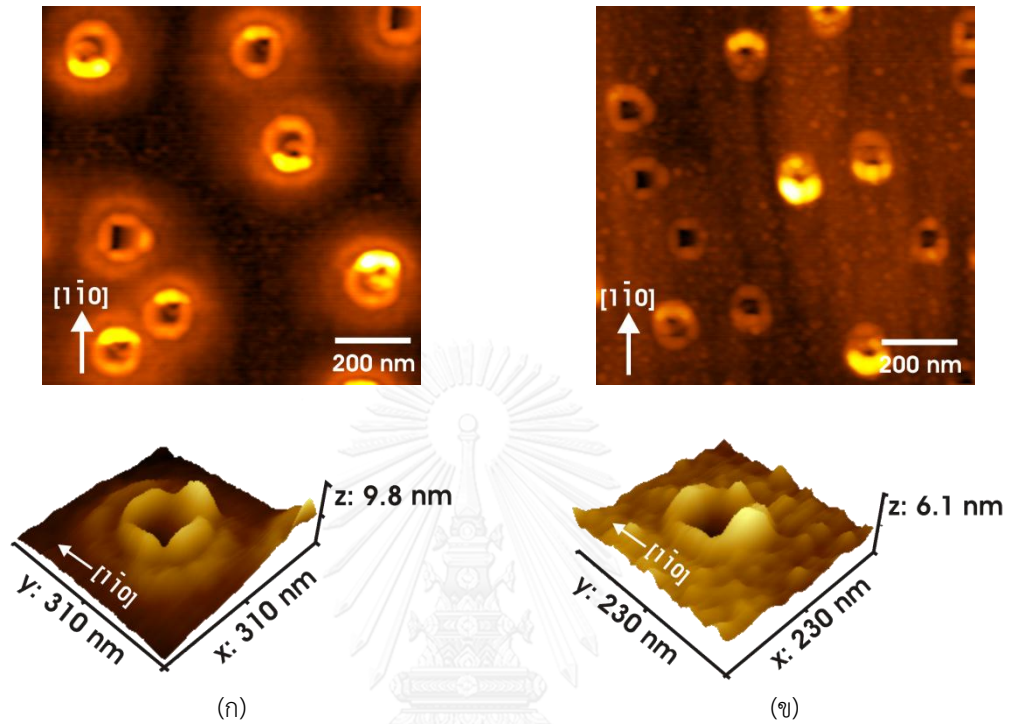
(ค)

รูปที่ 4.21 (ต่อ)

4.3.2 การปลูกผลึกควอนตัมดอทโมเลกุลจาก InAs ที่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐาน 150°C

เมื่อนำชิ้นงานไปวิเคราะห์หิวหน้าด้วยเครื่อง AFM จากรูปที่ 4.22 พบว่าเมื่อทำการปลูกควอนตัมดอทโมเลกุลโดยการลดอุณหภูมิลงไปที่ 150°C ได้โครงสร้างนาโนโฮลรูปร่างสี่เหลี่ยมและที่บริเวณกึ่งกลางของนาโนโฮลรูปร่างสี่เหลี่ยมเกิดเป็นควอนตัมดอทขึ้น เป็นผลมาจากอะตอมของอินเดียมมารวมตัวที่บริเวณกึ่งกลางให้ต้องคลายความเครียดเกิดดอทขึ้น และในหลุมไม่มีควอนตัมดอทเกิดขึ้นควอนตัมดอทส่วนใหญ่เกิดบริเวณพื้นที่รอบนอก เมื่อปลูกอินเดียมด้วยอัตราการปลูกอินเดียม 1.3 ML/s ดอทที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กกว่าอัตราการปลูกอินเดียมที่น้อยกว่าคือ 0.15 ML/s การปลูกควอนตัมดอท ดังนั้นกระบวนการเพิ่มอุณหภูมิไปยังอุณหภูมิเป้าหมายเพื่อปลูกควอนตัมดอทโมเลกุล

ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างนาโนโฮโลรูปร่างสี่เหลี่ยมได้เปลี่ยนแปลงไปเป็นโครงสร้างเนินขนาดนาโน จึงมีความสำคัญต่อการประดิษฐ์โครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุล



รูปที่ 4.22 ภาพ AFM 2 มิติ ขนาด $1000 \times 1000 \text{ nm}$ และ 3 มิติจากกระบวนการปลูกควอนตัมดอทโมเลกุลที่อุณหภูมิ 150°C (ก) อัตราการปลูกอินเดียมเท่ากับ 0.15 ML/s (ข) อัตราการปลูกอินเดียมเท่ากับ 1.30 ML/s

บทที่ 5

สรุป

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการประดิษฐ์โครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุล InAs บนโครงสร้างเนินขนาดนาโน InGaAs ที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมาจากนาโนโฮลรูปร่างสี่เหลี่ยม $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ บนแผ่นผลึกฐาน GaAs (001) จากกลไกการก่อตัวขึ้นเองด้วยวิธีทรอปเล็ทอพีแทกซีและวิธี Stranski-Krastanov รวมถึงผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพผิวหน้าของโครงสร้างนาโนโฮลรูปร่างสี่เหลี่ยม $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ โครงสร้างเนินนาโน InGaAs บนแผ่นผลึกฐาน GaAs (001) และโครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุล InAs ซึ่งขึ้นรูปภายใต้เงื่อนไขในการประดิษฐ์ที่แตกต่างกัน

การประดิษฐ์โครงสร้างนาโนโฮลรูปร่างสี่เหลี่ยม $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ บนแผ่นผลึกฐาน GaAs (001) เริ่มต้นจากปลูกชั้นบัฟเฟอร์ GaAs จากนั้นทำการขึ้นรูปหอยดโลหะ InGa ในขั้นตอนนี้มีการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหอยดโลหะ จากนั้นทำการขึ้นรูปผลึกเป็นโครงสร้างนาโนโฮลรูปร่างสี่เหลี่ยม $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ โดยลำโมเลกุล As_4 จากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานไปยังอุณหภูมิเป้าหมายที่ใช้ในการปลูกผลึกควอนตัมดอทโมเลกุลส่งผลให้นาโนโฮลรูปร่างสี่เหลี่ยม $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ เปลี่ยนรูปร่างไปเป็นเนินขนาดนาโน InGaAs ในขั้นตอนนี้ได้มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิเป้าหมายที่ใช้ในการปลูกผลึกควอนตัมดอทโมเลกุล อัตราการเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาที่รอ ณ อุณหภูมิเป้าหมายก่อนทำการปลูกผลึกควอนตัมดอทโมเลกุล จากนั้นทำการประดิษฐ์โครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุลด้วยลำโมเลกุล In และ As_4 โดยการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปร ดังนี้ ระยะเวลาที่รอ ณ อุณหภูมิเป้าหมายก่อนทำการปลูกผลึกควอนตัมดอทโมเลกุล อัตราการปลูกอินเดียม และปริมาณอินเดียม การประดิษฐ์โครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุลอีกวิธีที่กระทำคือการประดิษฐ์ที่อุณหภูมิต่ำ (150°C) โดยมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการปลูกของอินเดียม

เมื่อทำการศึกษาผลกระทบของตัวแปรค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหอยดโลหะ InGa ในการประดิษฐ์โครงสร้างนาโนโฮลรูปร่างสี่เหลี่ยม $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ บนแผ่นผลึกฐาน GaAs (001) พบว่าเมื่ออุณหภูมิแผ่นผลึกฐานเพิ่มขึ้นความหนาแน่นมีค่าลดลงสอดคล้องกับขนาดของโครงสร้างนาโนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและที่อุณหภูมิสูงสุดรูปร่างของนาโนโฮลรูปร่างสี่เหลี่ยม $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ มีการเปลี่ยนแปลงเป็นรูปร่างวงแหวนสองชั้น

เมื่อทำการศึกษาผลกระทบของการเพิ่มอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานไปยังอุณหภูมิเป้าหมายที่ใช้ในการปลูกผลึกควอนตัมดอทโมเลกุลส่งผลให้นาโนโครงสร้างรูปร่างสี่เหลี่ยม $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ เปลี่ยนรูปร่างไปเป็นเนินขนาดนาโน InGaAs ที่วางตัวยาวไปตามทิศทาง [1-10] ตัวแปรอุณหภูมิเป้าหมายที่ใช้ในการปลูกผลึกควอนตัมดอทโมเลกุล เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้เนินขนาดนาโนมีขนาดและความสูงที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ความหนาแน่นของโครงสร้างเนินขนาดนาโนมีแนวโน้มลดลง ที่อุณหภูมิต่ำโครงสร้างเนินขนาดนาโนมีการขึ้นรูปยังไม่สมบูรณ์ ตัวแปรอัตราการเพิ่มอุณหภูมิมียค่าเพิ่มขึ้นมีผลต่อขนาดและความสูงของโครงสร้างเนินขนาดนาโนมีขนาดลดลงโดยมีผลทำให้ค่าความหนาแน่นของโครงสร้างเนินขนาดนาโนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิมียค่าน้อยที่สุดโครงสร้างเนินขนาดนาโนมีการขึ้นรูปเกิดเป็นควอนตัมดอทตรงกลาง ตัวแปรระยะเวลาที่รอ ณ อุณหภูมิเป้าหมายก่อนทำการปลูกผลึกควอนตัมดอทโมเลกุลขนาดของโครงสร้างเนินขนาดนาโนมีขนาดไม่แตกต่างกันมากเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นเฉลี่ยเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ที่ระยะเวลารอมีค่าเป็น 0s ผิวหน้าของเนินขนาดนาโนบางโครงสร้างยังคงมีร่องรอยของหลุมนาโนโฮลและที่ระยะเวลารอมากขึ้นส่งผลให้เกิดโครงสร้างควอนตัมดอทเกิดบนผิวหน้าของเนินขนาดนาโน

เมื่อทำการปลูกโครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุลหลังจากกระบวนการเพิ่มอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานไปยังอุณหภูมิเป้าหมายแล้ว จากนั้นนำชิ้นงานไปวิเคราะห์ผิวหน้าด้วยเครื่อง AFM ปรากฏว่าเกิดโครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุลบนเนินขนาดนาโน ซึ่งแต่ละควอนตัมดอทโมเลกุลเกิดบนตำแหน่งที่มุมของหลุมนาโนโฮลรูปร่างสี่เหลี่ยมเดิมที่ถูกฝังอยู่ด้านล่างเนื่องจากตำแหน่งนั้น ๆ มีสนามความเครียด (strain field) มากส่งผลให้เกิดควอนตัมดอทโมเลกุลได้เร็ว และโครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุลมีรูปแบบดังนี้ โครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุล 2 ดอท (bi-QDMs) โครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุล 3 ดอท (tri-QDMs) และโครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุล 4 ดอท (tri-QDMs) ซึ่งแต่ละควอนตัมดอทโมเลกุลมีขนาดและความสูงแตกต่างกัน ได้มีการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อโครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุลดังนี้ ตัวแปรระยะเวลาที่รอ ณ อุณหภูมิเป้าหมายก่อนทำการปลูกผลึกควอนตัมดอทโมเลกุล พบว่า เปอร์เซ็นต์การเกิดควอนตัมดอทโมเลกุล 2 ดอทเกิดมากที่สุดเมื่อใช้ระยะเวลารอเท่ากับ 0s และ 30s รองลงมาควอนตัมดอทโมเลกุล 3 ดอทเมื่อใช้ระยะเวลารอเท่ากับ 0s และ 15s และรองลงมาควอนตัมดอทโมเลกุล 4 ดอทเมื่อใช้ระยะเวลารอเท่ากับ 15s ตัวแปรอัตราการปลูกอินเดียมพบว่า เปอร์เซ็นต์การเกิดควอนตัมดอทโมเลกุล 3 ดอทเกิดมากที่สุดเมื่อใช้อัตราการปลูกอินเดียมเท่ากับ 0.1 ML/s รองลงมาควอนตัมดอทโมเลกุล 4 ดอทเมื่อใช้อัตราการปลูก

อินเดียมเท่ากับ 0.05 ML/s และรองลงมาควอนตัมดอตโมเลกุล 2 ดอตเมื่อใช้ระยะเวลารอเท่ากับ 0.15 ML/s เมื่อใช้อัตราการปลูกอินเดียมที่มีค่าเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงของควอนตัมดอตโมเลกุลมีแนวโน้มลดลงและไม่เกิดโครงสร้างควอนตัมดอตบริเวณที่เป็นขอบของเนินขนาดนาโน ตัวแปรปริมาณอินเดียมพบว่า เปอร์เซ็นต์การเกิดควอนตัมดอตโมเลกุล 3 ดอตเกิดมากที่สุดเมื่อใช้ปริมาณอินเดียมเท่ากับ 0.60 ML รองลงมาควอนตัมดอตโมเลกุล 4 ดอตเมื่อใช้ปริมาณอินเดียมเท่ากับ 0.75 ML และรองลงมาควอนตัมดอตโมเลกุล 2 ดอตเมื่อใช้ระยะเวลารอเท่ากับ 0.45 ML เมื่อใช้ปริมาณอินเดียมที่มีค่าเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความสูงของควอนตัมดอตโมเลกุลมีแนวโน้มสูงขึ้นและเกิดโครงสร้างควอนตัมดอตบริเวณที่เป็นขอบของเนินขนาดนาโน ตัวแปรทุกตัวที่ใช้ในการประดิษฐ์ควอนตัมดอตโมเลกุลมีผลต่อเปอร์เซ็นต์การเกิดโครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุล แต่ละชนิดเมื่อทำการประดิษฐ์โครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุลที่อุณหภูมิ 150°C โดยมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการปลูกของอินเดียมพบว่าไม่มีควอนตัมดอตโมเลกุลเกิดในหลุมของนาโนโฮล รูปร่างสี่เหลี่ยมพบแต่เพียงดอตโมเลกุลที่เกิดบนผิวบัพเฟอร์

รายการอ้างอิง

1. Zallon, E., et al., *Controlling the formation of quantum dot pairs using nanohole templates*. *Crystal Growth* 2012. **338**: p. 232–238.
2. Boonpeng, P., et al., *Quadra-quantum dots grown on quantum rings having square-shaped holes: Basic nanostructure for quantum dot cellular automata application*. *Microelectronic Engineering*, 2009. **86**(4-6): p. 853-856.
3. Timler, J.a.L., C. S., *Power gain and dissipation in quantum-dot cellular automata*. *Applied Physics*, 2002. **91**: p. 823-831.
4. Panyakeow, S., *Quadra-quantum dots and related patterns of quantum dot molecules: Basic nanostructures for quantum dot cellular automata application*. *Engineering*, 2010. **14**(4): p. 41-56.
5. Henini, M., *Molecular Beam Epitaxy from research to mass production*. *Droplet epitaxy of nanostructures*. 2013, Oxford OX2 8DP.
6. Cullis, A.G., et al., *Stranski-Krastanow transition and epitaxial island growth*. *Physical Review B*, 2002. **66**(8).
7. Pedersen, K., *Quantum size effects in nanostructures*. 2006, Aalborg University. 33.
8. Cheng, K.Y., *Molecular beam epitaxy technology of III-V compound semiconductors for optoelectronic applications*. *Proceedings of the IEEE*, 1997. **85**(11): p. 1694 - 1714.
9. Bimberg, D., Grundmann, M. and Ledentsov, N. N. , *Quantum dot heterostructures*. 1999, Chichester: Wiley.
10. Sugawara, M., *Semiconductors and semimentals : Self-assembled InGaAs/GaAs quantum dots*. Vol. 60. 1999, San Diego: Academic Press.
11. Boonpeng, P., *Effect of the Indium composition and thickness of InGaAs insertion layer on InAs quantum dots*, in *Electrical Engineering*. 2006, Chulalongkorn University: Chulalongkorn University. p. 71.

12. Patanasemakul, N., *Optical emission from InAs quantum dot molecules*, in *Electrical Engineering 2011*, Chulalongkorn University: Chulalongkorn University. p. 92.
13. Dutta, P.a.M., D., *New architecture for flip flops using quantum-dot cellular automata*. ICT and Critical Infrastructure: Proceedings of the 48th Annual Convention of CSI - Volume II, 2014.
14. Aharonov, Y.a.B., D., *Significance of electromagnetic potentials in the quantum theory*. Physical Review B, 1959. **115**: p. 485-491.
15. Jevasuwann, W., et al., *InP ring-shaped quantum-dot molecules grown by droplet molecular beam epitaxy*. Crystal Growth, 2011. **323**: p. 275–278.
16. Herman, M.A.a.S., H., *Molecular beam epitaxy fundamentals and current status*. 1989, Berlin: Springer-Verlag.
17. Kiravittaya, S., *Homogeneity improvement of InAs/GaAs self-assembled quantum dots grown by molecular beam epitaxy*, in *Electrical engineering*.
18. Dobbs, H.T., Zangwill, A., and Vvedensky, D. D., Phys. Rev. Lett, 1997(79): p. 897-900.
19. *Elastic scattering model of RHEED intensity oscillation in 2-dim epitaxial growth*. 2014 7/01/2014; <http://www.pascal-co-ltd.co.jp/solutions/index.html>.
20. Wang, Z.M., et al., *Nanoholes fabricated by self-assembled gallium nanodrink on GaAs (100)*. Applied Physics, 2007. **90**.
21. Boonpeng, P., et al., *Transformation of concentric quantum double rings to single quantum rings with squarelike nanoholes on GaAs(0 0 1) by droplet epitaxy*. Crystal Growth, 2011. **323**: p. 271–274.
22. Sablon, K.A., et al., *Structural evolution during formation and filling of self-patterned nanoholes on GaAs (100) surfaces*. Nanoscale Res, 2008. **3**: p. 530–533.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ผลงานตีพิมพ์

1. Fabrication of Lateral InAs Quantum-dot-molecules on InGaAs Square-like Nanohole Templates by 2-step Growth Technique Using Molecular Beam Epitaxy (MBE), **N. Prapasawad**, P. Prongjit, S. Panyakeow and S. Ratanathamphan, In Proc. 12th international conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Thailand, 2015.



ผลงานนำเสนอ

การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

- *Poster Presentation*

1. Lateral quantum-dot molecules growth by droplet epitaxy, **N. Prapasawad**, P. Prongjit, S. Panyakeow and S. Ratanathamaphan, 32nd International Conference on The Physics of Semiconductors (ICPS), Austin, Texas, USA, 10 – 14 August, 2014.
2. The fabrication of lateral InAs quantum dot molecules on InGaAs nanomounds by molecular beam epitaxy (MBE), **N. Prapasawad**, M. Kunrugsa, P. Prongjit, S. Panyakeow and S. Ratanathamaphan, 4th Thailand International Nanotechnology Conference (NanoThailand), the Thailand Science Park Convention Center, Pathumthani, Thailand, 26-28 November, 2014.
3. Effect of In-amount in InAs Quantum-dot Growth Step on Lateral InAs Quantum-dot-molecules Grown by 2-step Growth Technique Using Molecular Beam Epitaxy, **N. Prapasawad**, P. Prongjit, S. Panyakeow and S. Ratanathamaphan, 8th International Conference on Materials for Advanced Technologies of the Materials Research Society of Singapore & 16th IUMRS - International Conference in Asia Together with the 4th Photonics Global Conference 2015 (ICMAT2015 & IUMRS-ICA2015 Together with PGC2015), Suntec Singapore, 28 June – 3 July, 2015.

- *Oral Presentation*

1. Fabrication of Lateral InAs Quantum-dot-molecules on InGaAs Square-like Nanohole Templates by 2-step Growth Technique Using Molecular Beam Epitaxy (MBE), **N. Prapasawad**, P. Prongjit, S. Panyakeow and S. Ratanathamphan, 12th international conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Thailand, 2015.



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวณัฐภาส ประภาสวัสดี เกิดวันที่ 7 มีนาคม พ.ศ. 2532 ที่อำเภอเมืองขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ปีการศึกษา 2554 ต่อมาได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2555 ระหว่างการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ได้รับทุนผู้ช่วยนักวิจัย

