



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การวิจัยพื้นฐานทาง Nanoelectronics (I)”

โดย ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว และคณะ

ธันวาคม 2545



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การวิจัยพื้นฐานทาง Nanoelectronics (I)”

โดย ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว และคณะ

วันที่.....	10 ก.ค. 2546
เลขทะเบียน.....	00158
เลขเรียกหนังสือ.....	BAC-66

๒๕๔๖

ธันวาคม 2545

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
ชั้น 14 อาคาร เอส เอ็ม เทวาเวอร์
เลขที่ 979/17-21 ถนนพหลโยธิน แขวงสามเสนใน
เขตพญาไท กรุงเทพฯ 10400
โทร 298-0455 โทรสาร 298-0476
Home page : <http://www.trf.or.th>
E-mail : trf-info@trf.or.th



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การวิจัยพื้นฐานทาง Nanoelectronics (I)”

คณะผู้วิจัย / สังกัด

- | | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| 1. ศ. ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว | 2. รศ. ดร. มนตรี สวัสดิ์ตฤณการ |
| 3. ผศ. ดร. สมชัย รัตนธรรมพันธ์ | 4. ผศ. ดร. ทรงพล กาญจนชูชัย |
| 5. นายสุภโชค ไทยน้อย | 6. นายพรชัย ช่างม่วง |
| 7. นายสุวิทย์ กิระวิทยา | 8. นางสาวฤดีสันต์ ส่องเมือง |

ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

9. ดร. สุวัฒน์ ไสภิตพันธ์

ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์

ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

สนับสนุนโดย สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยในการสนับสนุนทุนวิจัยหลักของโครงการนี้ และศูนย์โลหะและวัสดุแห่งชาติที่สนับสนุนเสริมต่อโครงการนี้ ในส่วนที่เน้นด้านวิจัยการประยุกต์ของ Nanostructure Materials ในการวิจัยพื้นฐานนี้ยังขาดเครื่องมืออุปกรณ์ด้าน Nanotechnology อีกมาก แต่อุปสรรคต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเครื่องมือวิจัยได้รับการแก้ไขไปได้ด้วยความร่วมมือจากต่างประเทศ คณะวิจัยจึงขอขอบคุณ Prof. T. Moriizumi แห่ง Tokyo Institute of Technology ประเทศญี่ปุ่นในการถ่ายภาพโครงสร้างควอนตัมด้วยเครื่อง Atomic Force Microscope (AFM) และเช่นเดียวกันกับ Dr. Karl Eberl และ Dr. Oliver G. Schmidt แห่ง Max Planck Institute Stuttgart ที่ให้ความร่วมมือในการวิจัยเป็นอย่างดี ในหลาย ๆ ด้าน ทั้งข้อมูลเกี่ยวกับการวัด AFM, Photoluminescence การถ่ายทอดเทคนิคการปลูกผลึกด้วย MBE และการรับนิสิตระดับปริญญาเอกจากจุฬาฯ ที่ได้รับทุนโครงการกาญจนาภิเษกของสกว. ไปทำวิจัยที่ Max Planck Institute Stuttgart ได้แก่ นายสุวิทย์ กิระวิทยา และ นางสาวฤดีสันต์ ต่อเมือง ทำให้การวิจัยนี้สามารถดำเนินการไปได้จนบรรลุวัตถุประสงค์ต่าง ๆ ตามข้อตกลงการรับทุนสนับสนุนครั้งนี้

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : BRG/03/2544

ชื่อโครงการ : การวิจัยพื้นฐานทาง Nanoelectronics (I)

ชื่อนักวิจัย : ศ. ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว รศ. ดร. มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร
 ผศ. ดร. สมชัย รัตนธรรมพันธ์ ผศ. ดร. ทรงพล กาญจนชูชัย
 นายศุภโชค ไทยน้อย นายพรชัย ช่างม่วง
 นายสุวิทย์ กิระวิทยา นางสาวฤดีสันต์ ต่อเมือง
 ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 ดร. สุวัฒน์ ไสยกิจพันธ์
 ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์
 ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

ระยะเวลาโครงการ : 2 ปี

เครื่องปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุลเป็นอุปกรณ์พื้นฐานในการเตรียมโครงสร้างควอนตัมเพื่อประยุกต์ในงานด้านนาโนอิเล็กทรอนิกส์ โครงสร้างควอนตัมเวลล์ GaAs/GaAlAs และ InGaAs/GaAs/GaAlAs ถูกนำมาศึกษาเพื่อเข้าใจถึงองค์ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับโครงสร้างระดับนาโนเมตร ซึ่งวัสดุที่มีโครงสร้างผลึกที่มีขนาดเท่า ๆ กัน มีการนำเสนอแนวคิดเกี่ยวกับโครงสร้างมัลติควอนตัมเวลล์แบบผสมเพื่อใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์ในการวิจัย ส่วนท้ายจะเน้นการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับโครงสร้างควอนตัมดอท โดยเฉพาะ InAs/GaAs ซึ่งเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างผลึกที่มีขนาดแตกต่างกัน โดยการเตรียมควอนตัมดอทชนิดจัดเรียงตัวเองด้วยวิธีการปลูกผลึกแบบ สเตรนสกี-คราสตานอฟ ได้มีการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการปลูกผลึก เช่น อุณหภูมิของแผ่นผลึกฐาน อัตราการปลูกผลึก อุณหภูมิของชั้นผลึกที่ปิดทับ ฯลฯ เพื่อศึกษาขนาดของควอนตัมดอท ความสม่ำเสมอของดอท ความหนาแน่นของดอท โดยใช้การวิเคราะห์ด้วย Atomic Force Microscopy และการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ตำแหน่งของสัญญาณโฟโตลูมิเนสเซนซ์จะบอกถึงขนาดของดอท และเรขาคณิตของดอทจะถูกยืนยันด้วยภาพ AFM ซึ่งให้ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางดอท อยู่ระหว่าง 30~50 นาโนเมตร และความสูงดอท 5~8 นาโนเมตร ค่าความกว้างของสัญญาณโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่ค่าความสูงครึ่งหนึ่งจะสะท้อนให้เห็นถึงความสม่ำเสมอของดอท ซึ่งมีค่าที่ต่ำสุดคือ 21 meV ที่อุณหภูมิห้อง ชิ้นงานที่มีโครงสร้างดอทขนาดใหญ่จะให้การเปล่งแสงที่ค่าความยาวคลื่น 1.3 ไมครอน ซึ่งเป็นที่ต้องการในงานประยุกต์ด้านสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสง

คำหลัก : นาโนอิเล็กทรอนิกส์ โครงสร้างควอนตัม การปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล

Abstract

Project Code : BRG/03/2544

Project Title : การวิจัยพื้นฐานทาง Nanoelectronics (I)

Investigator : Prof. Dr. Somsak Panyakeow

Assoc. Prof. Dr. Montri Sawadsaringkarn

Assist. Prof. Dr. Somchai Ratanathamphan

Assist. Prof. Dr. Songphol Kanjanachuchai

Mr. Supachok Thainoi

Mr. Pornchai Changmoang

Mr. Suwit Kiravittaya

Miss. Rudeesun Songmuang

Semiconductor Device Research Laboratory, Department of Electrical Engineering,

Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

Dr. Suwat Sopitpan

Thai Microelectronics Center

National Electronics and Computer Technology Center

Project Period : 2 years

Molecular beam epitaxy (MBE) is a basic equipment in the preparation of quantum structures for nanoelectronic applications. Quantum well structures, GaAs/GaAlAs and InGaAs/GaAs/GaAlAs, were studied in order to understand the basic principles of nanostructures using lattice-matched materials. Through these understandings, we have been able to propose a composite multi-quantum well for solar cell application. The later main part of research was devoted to quantum dot structures, especially to lattice-mismatched InAs/GaAs quantum dots through self-assembly via Stranski-Krastanow growth mode. Various growth parameters, e.g. substrate temperatures, growth rates, and capping temperatures, were varied in order to study the quantum dot size, the dot uniformity and the dot density by atomic force microscopy (AFM) and photoluminescence (PL) measurements. The PL peaks provide the information about dot sizes, while AFM provides the information about dot geometry. Typical dot diameter ranges between 30 and 50 nm and dot height 5~8 nm. The fullwidth at half maximum (FWHM) of PL peaks reflects the dot uniformity. The best value at room temperature was 21 meV. Large dot sample provides emission at 1.3 μm , a suitable candidate wavelength for optical communication systems.

Keywords : Nanoelectronics, Quantum Structures, Molecular Beam Epitaxy

Executive Summary

Quantum structures, quantum wells (QW) and quantum dots (QD), have been fabricated by molecular beam epitaxy (MBE) for nanoelectronic applications. Various III-V compound semiconductors, for example, GaAs/GaAlAs, InGaAs/GaAs, and InAs/GaAs, have been widely investigated. Composite quantum wells based on InGaAs/GaAs/GaAlAs were investigated both theoretically and experimentally. As a result, the composite has been proposed as a novel quantum well solar cell with improved performance due to confined wave functions in the composite quantum well structure. Growth of InAs on GaAs, with a 7 % lattice mismatch, leads to a strain field at the interface. Beyond a certain critical thickness of InAs, self-assembled InAs quantum dots are formed in order to release the strain energy. These self-assembled quantum dots are defect-free and applicable to nanoelectronic devices. Basic research on InAs self-assembled quantum dots was focussed in this project in order to improve their basic properties like dot size, dot uniformity, dot density and dot quality by controlling various growth parameters: substrate temperature, growth rate, capping temperature, etc. It is found in our experiment that high quality dots were obtained at optimal substrate temperature of around 500 °C. Slower growth rate (0.01 ML/sec) gives larger dot size but lower dot density. Lower capping temperature (450 °C) gives better dot uniformity and leads to a better FWHM (21 meV), from photoluminescence peak, and a stronger emission at room temperature. Emission at 1.3 μm was realized by quantum dot structure at room temperature. Quantum dot laser for optical communication systems is a candidate for future applications because of its expected low threshold current due to delta function density of states in this zero-dimensional structure. The quantum dot formation at different growth conditions and growth processes, including growth interruption, was confirmed by atomic force microscopy (AFM) through research collaborations with Max Planck Institute, in Germany, and Tokyo Institute of Technology, in Japan. AFM images give information about dot size, dot density, dot uniformity, and dot geometries like dot diameter and dot height. Typical dot size is 30~50 nm in diameter and 3~8 nm in height with dot density of $1\sim9\times10^{10}\text{ cm}^{-2}$. Multistacked quantum dots with vertical alignment were also prepared and evaluated for practical use in device fabrication in the future. As a result of our extensive efforts in the research for the last two years, our output includes several journal publications and conference presentations, both at the international and national levels.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	iii
บทคัดย่อ	iv
Abstract	v
Executive Summary	vi
1. บทนำ	1
2. ทฤษฎีพื้นฐาน	6
3. การปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล	11
4. การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย RHEED	19
5. การวิเคราะห์โครงสร้างควอนตัมด้วย AFM	25
6. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางโครงสร้างควอนตัมด้วย Photoluminescence	29
7. ผลการทดลอง และบทวิจารณ์	33
8. สรุป	45
9. เอกสารอ้างอิง	46
10. ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ที่สืบเนื่องจากโครงการวิจัย	48
11. บทความวิชาการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	50

1. บทนำ

Nanoelectronics เป็นศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างระดับ Nanometer ($\text{nm} = 10^{-9} \text{ m}$) เพื่อใช้งานด้านอิเล็กทรอนิกส์และออปโตอิเล็กทรอนิกส์สำหรับอนาคต Nanoelectronics จะเป็นคำตอบสำหรับการพัฒนางานด้านอิเล็กทรอนิกส์ให้ก้าวต่อไปได้ตามกฎของมัวร์ ที่ได้คาดการณ์ไว้ว่าขนาดของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์จะมีขนาดเล็กลง 10^{-2} เท่าทุก ๆ 10 ปี ทำให้จำนวนของสิ่งประดิษฐ์อยู่ใน VLSI chip มีจำนวนมากขึ้น จาก 1 K (10^3) เป็น 1 M (10^6) และ 1 G (10^9) ตามลำดับ ขนาดของสิ่งประดิษฐ์ลดจาก $10 \mu\text{m}$ เป็น $1 \mu\text{m}$ และ $0.1 \mu\text{m}$ (100 nm) ตามลำดับ ยุคของ Microelectronics เริ่มพบทางตัน หากสิ่งประดิษฐ์มีขนาดเล็กลงไปอีกเป็น 10 nm หรือ 1 nm จะเกิดปัญหาทางพื้นฐานได้แก่ ปรากฏการณ์ Quantum Effects ขึ้น ดังนั้นการพัฒนาศึกษาเรื่อง Nanoelectronics ซึ่งใช้พื้นฐานความรู้ด้าน Quantum Mechanics จึงเป็นสิ่งที่จำเป็น เพราะพลังงานของอิเล็กตรอนใน Quantum Structures ที่มีขนาดเป็น Nanometer เหล่านี้จะมีลักษณะเป็น Quantized Energy ทำให้ Degree of freedom ของอิเล็กตรอนในโครงสร้างเหล่านี้มีจำนวนน้อยลง⁽¹⁾ เช่นในโครงสร้างแบบ Quantum Wells อิเล็กตรอนจะมีอิสระเพียง 2 มิติ ในโครงสร้างแบบ Quantum Wires อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ได้เพียง 1 มิติ และในโครงสร้างแบบ Quantum Dots อิเล็กตรอนจะถูกจำกัดบริเวณ (0 มิติ) ทำให้กลไกของสิ่งประดิษฐ์ที่มี Quantum Structures เหล่านี้มีลักษณะพิเศษแตกต่างไปจากเดิม เช่นกินกระแสไฟฟ้าน้อยลง สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนได้เป็นตัวๆ (Single Electron Devices) จากปรากฏการณ์พื้นฐานที่เรียกว่า Coulomb Blockade⁽²⁾

งานวิจัยพื้นฐานด้าน Nanoelectronics นี้จึงเน้นที่จะศึกษาวิจัยการเตรียมโครงสร้างควอนตัม โดยเฉพาะโครงสร้างแบบ Quantum Well (QWs) และ Quantum Dots (QDs) ของสารประกอบกึ่งตัวนำชนิดกลุ่ม III-V เทคโนโลยีที่ใช้ได้แก่ Molecular Beam Epitaxy (MBE) ซึ่งเป็นการปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุลภายใต้สภาพสุญญากาศที่ต่ำเยี่ยม (10^{-11} Torr) เพื่อให้สามารถควบคุมชั้นผลึกได้ในระดับของอะตอม

ในงานวิจัยพื้นฐานนี้จะมุ่งศึกษา Self-Assembled Quantum Dots เป็นพิเศษ เพราะมีความเป็นไปได้ในการเตรียมโครงสร้างที่ไม่ยุ่งยาก ไม่ต้องอาศัยเทคนิคทางด้าน Photolithography มากนัก และไม่ติดปัญหาในด้านขีดจำกัดทาง Lithography เมื่อสเกลของสิ่งประดิษฐ์มีขนาดเล็กในระดับของอะตอม Self-Assembled Quantum Dot (SA-QDs) อาศัยปรากฏการณ์ทางธรรมชาติได้แก่ การเลือกใช้สารประกอบกึ่งตัวนำที่มี Lattice Mismatch มาปลูกร่วมกัน⁽³⁻⁵⁾ Strain ที่เกิดขึ้นจากขนาดอะตอมที่แตกต่างกันจะทำให้การเกิดผลึกสารประกอบกึ่งตัวนำเป็นหย่อมๆ จึงเกิดเป็น Quantum Dots ได้เอง ขนาดและจำนวนของ QDs จะกำหนดได้จากเงื่อนไขและเทคนิคการปลูกผลึกในเครื่อง MBE ดังนั้นการศึกษาวิจัยพื้นฐานการปลูกผลึก SA-QDs จึงเป็นกุญแจสำคัญในการพัฒนา Nanoelectronics ได้ เพราะโครงสร้าง QDs นั้นนอกจากจะมีจุดเด่นที่สามารถทำงานโดยการควบคุมอิเล็กตรอนเป็นตัวๆ ได้แล้ว⁽⁶⁾ หากสามารถ

เตรียม QDs ให้เป็นระเบียบทั้งในแนวตั้งและแนวระนาบแล้ว QDs อาจจะเป็นองค์ประกอบพื้นฐานที่สำคัญของ Computer Chips ในอนาคตได้ ดังเช่น แนวคิดของ Quantum Cellular Automata (QCA)⁽⁷⁾

ควอนตัมดอต (Quantum Dots :QDS) เป็นโครงสร้างระดับนาโนเมตรที่มี Confinement Potential สำหรับพาหะนำไฟฟ้า แบบ 3 มิติ ทำให้การเคลื่อนที่ของพาหะนำไฟฟ้า เช่น อิเล็กตรอนมีอิสระเป็น "0" มิติ ดังนั้นพลังงานของอิเล็กตรอนจึงมีลักษณะเป็น discrete energy ที่ชัดเจนเช่นเดียวกับอะตอมเดี่ยว และมี density of states แบบ δ -like ทำให้ได้ gain spectrum ที่แคบมาก ๆ (Ultranarrow) ได้ คุณสมบัติดังกล่าวมีความสำคัญอย่างยิ่งในการประยุกต์ในด้านอิเล็กทรอนิกส์และออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เช่น เลเซอร์ไดโอด^(8,9) ไดโอดเปล่งแสง^(10, 11, 12) ทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอนเดี่ยว⁽¹³⁾ แหล่งจ่ายโฟตอนเดี่ยว^(14, 15) ควอนตัมดอตยังเป็นโครงสร้างที่สามารถออกแบบให้เปล่งแสงที่ค่าความยาวคลื่นในช่วง 1.3~1.55 μm โดยใช้เทคโนโลยีของสารประกอบกึ่งตัวนำ GaAs ได้ ซึ่งเหมาะสมที่จะประยุกต์ในงานด้านสื่อสารผ่านเส้นใยแสง เพราะในปัจจุบันเลเซอร์ไดโอดที่ใช้งานในด้านสื่อสารผ่านเส้นใยแสงนั้นจะใช้เทคโนโลยีของสารประกอบกึ่งตัวนำ InP ซึ่งมีราคาแพง และมีปัญหาด้านเทคนิคหลายประการ เช่น ลักษณะสมบัติที่เปลี่ยนกับอุณหภูมิ กระบวนการผลิตที่ยุ่งยากและยังพัฒนาไม่อึดตัว ดังนั้นการใช้ควอนตัมดอตที่ใช้ GaAs เป็นฐานการผลิตจึงมีข้อดีกว่าทั้งในด้านราคาและสมรรถนะ

การปลูกควอนตัมดอตที่นิยมกันมากได้แก่ การใช้ Stranski-Krastanov (SK) growth mode ควอนตัมดอตจะถูกสร้างขึ้นจากแรงเครียด (Strain) ระหว่างการปลูก InAs บน GaAs Substrate เนื่องจากการมีค่า Lattice Mismatch และเมื่อชั้นผลึกที่ปลูกมีความหนาเกินค่าวิกฤตหนึ่ง ซึ่งการเกิดผลึกจะดับเปลี่ยนจาก 2 มิติ (ชั้นผลึก) มาเป็น 3 มิติ (ควอนตัมดอต) ได้เอง ความเครียดจะถูกปลดปล่อยทำให้ผลึกที่เป็นควอนตัมดอตมีความสมบูรณ์แบบปราศจาก Crystal Defects ซึ่งมีความสำคัญยิ่งในการประยุกต์เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ ขนาดของควอนตัมดอต ความหนาแน่นของควอนตัมดอตต่อพื้นที่ และคุณสมบัติทางแสงของควอนตัมดอตจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการปลูกผลึกหลายประการ เช่น อุณหภูมิในการปลูก หมายถึงอุณหภูมิของแผ่นฐาน อัตราการปลูกผลึก ซึ่งกำหนดจากอุณหภูมิของ Effusion Cells ของสารแต่ละชนิด และอัตราส่วนระหว่างธาตุกลุ่ม III และ V ซึ่งควบคุมโดยการเปิดปิดของชุดเตาที่ติดตั้งบริเวณปลายของ Effusion Cells การปลูกควอนตัมดอตส่วนใหญ่จะกระทำบนแผ่นฐานผลึกที่มีระนาบ (100) และควอนตัมดอตที่เกิดขึ้นจะมีตำแหน่งแบบ random ในบางกรณีโครงสร้างแบบ random อาจมีประโยชน์ในด้านประยุกต์ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ เลเซอร์ไดโอด แต่บางกรณีโครงสร้างแบบ random จะมีปัญหาในการออกแบบสิ่งประดิษฐ์ที่ต้องการความเป็นระเบียบของควอนตัมดอต เช่น ทรานซิสเตอร์อิเล็กตรอนเดี่ยวที่เชื่อมต่อกับเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ Inverters⁽¹⁶⁾, Mixers⁽¹⁷⁾ หรือองค์ประกอบของวงจรรวมในอนาคต นอกจากความเป็นระเบียบของควอนตัมดอตแล้ว การปลูกควอนตัมดอตเป็นกลุ่มก็อาจมีประโยชน์ในการประยุกต์เป็นเซลล์หนึ่งของคอมพิวเตอร์ยุคใหม่ เช่น Quantum Cellular Automata⁽¹⁸⁾ ดังนั้นในการปลูกผลึกควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเองโดยวิธี Stranski-Krastanov ที่มี

ระเบียบจึงเป็นกุญแจสำคัญในการประดิษฐ์สร้างประติสัมพันธ์ใหม่ ๆ สำหรับอนาคต การวิจัยพื้นฐานด้านควอนตัมดอทที่มีคุณภาพได้แก่ ดอทที่ไม่มีจุดบกพร่อง มีขนาดคงที่ ควบคุมขนาดได้ตามต้องการ และมีตำแหน่งดอทที่เป็นระเบียบ หรือมีตำแหน่งดอทในจุดที่กำหนดให้ จึงเป็นงานวิจัยที่ได้รับความสนใจ เช่น การศึกษาเงื่อนไขการปลูกผลึกควอนตัมดอท⁽¹⁹⁾ ผสมผสานกับเทคนิค In-situ Etching⁽²⁰⁾ การใช้เว่นผลึกฐานที่เป็น High Index ในการปลูกควอนตัมดอท⁽²¹⁾

ในงานวิจัยของโครงการ Nanoelectronics I นี้ จะมุ่งเน้นศึกษาการปลูกผลึกที่มีโครงสร้างควอนตัมทั้งแบบควอนตัมเวลล์ (Quantum Wells : QWs) และแบบควอนตัมดอท (Quantum Dots : QDs) ที่มีขนาดอยู่ในสเกลนาโนเมตร (Nanometer : nm) ในช่วงแรกของงานวิจัยจะเป็นการเรียนรู้เทคนิคการปลูกผลึกสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V ได้แก่ Gallium Arsenide (GaAs) Gallium Aluminium Arsenide (GaAlAs) ด้วยเครื่อง Molecular Beam Epitaxy (MBE) สารประกอบกึ่งตัวนำ GaAs/GaAlAs กลุ่มนี้จะมี Lattice constant ที่ใกล้เคียงกันมาก จึงเป็นกลุ่มที่เป็น Lattice Matching ชั้นผลึกที่ปลูกได้จึงมีคุณภาพดี และปลูกได้เป็นชั้นผลึกเรียบและบางในระดับนาโนเมตร จึงมีโครงสร้างแบบ Quantum Wells ซึ่งสามารถปลูกโครงสร้างซ้อนทับกันหลาย ๆ ชั้นเป็น Multiple Quantum Wells (MQWs) ได้ โครงสร้างนี้ถูกนำไปใช้ในการประยุกต์เป็น MQW Lasers⁽²²⁾ เพื่อลดกระแสขีดจำกัด (Threshold current) และเพิ่มประสิทธิภาพในการเปล่งแสงตลอดจนอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น จึงเป็นประโยชน์ทั้งทางด้าน Optical Fibre Communication และอุปกรณ์เครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์ เช่น เครื่องเล่นคอมแพคดิสก์ วีซีดีดีสก์ ในงานวิจัยนี้ได้มีการนำเสนอแนวคิดของการนำโครงสร้าง MQWs แบบ Composite Structure ของ GaAlAs/GaAs/InGaAs มาประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์⁽²³⁾ เพื่อควบคุมตำแหน่งของ Wave Functions ของพาหะในโครงสร้างให้มี distortion น้อยจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อโครงสร้างได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์ ทำให้ Transition Probability ของพาหะมีค่าสูง สามารถพัฒนาเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงได้

งานวิจัยหลักที่เป็นเนื้อหาส่วนใหญ่ของโครงการวิจัยนี้ได้แก่ การศึกษาเทคนิคการปลูกโครงสร้างควอนตัมดอท จากสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V เช่นเดียวกัน ได้แก่ Indium Arsenide (InAs) และ Gallium Arsenide (GaAs) ด้วยเครื่อง Molecular Beam Epitaxy (MBE) สารประกอบกึ่งตัวนำ InAs/GaAs นี้จะมี Lattice Constant ต่างกันประมาณ 7 % ทำให้เกิดแรงเครียดในโครงสร้าง เนื่องจาก Lattice Mismatching เมื่อปลูกชั้นผลึก InAs บน GaAs เกิดค่าความหนาวิกฤตค่าหนึ่ง ผลึก InAs จะมีลักษณะเป็นควอนตัมดอทเพื่อปลดปล่อยแรงเครียดในโครงสร้างผลึก การศึกษาเชิงพื้นฐานเกี่ยวกับควอนตัมดอทเพื่อหาข้อมูลเกี่ยวกับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการสร้างควอนตัมดอทที่มีคุณภาพดี ได้แก่ Defect Free มีขนาดคงที่ มีความหนาแน่นที่เหมาะสม และแนวคิดในการปลูกควอนตัมดอทที่เป็นระเบียบตลอดจนการควบคุมขนาดและการสร้างกลุ่มควอนตัมดอทที่เป็นคู่ (Twin) เป็นกลุ่ม 3 ดอท (Triplets) กลุ่ม 4 ดอท (Quadruplets) ฯลฯ⁽²⁴⁾

การวิเคราะห์คุณภาพของควอนตัมคือคในงานวิจัยนี้ส่วนใหญ่ได้แก่การศึกษาข้อมูลจาก RHEED (Reflected High Energy Electron Diffraction) ซึ่งเป็น In-situ Monitoring จึงสามารถตรวจสอบคุณภาพผลึกได้ในขณะปลูก โดยอาศัยเครื่องมือที่ติดตั้งอยู่กับเครื่อง MBE ได้แก่ Electron Gun และ RHEED Screen ข้อมูลที่ได้จาก RHEED oscillation จะบอกถึงอัตราการปลูกผลึกในระดับอะตอมเป็น Monolayers (ML) ได้⁽²⁵⁾ นอกจากนี้ RHEED patterns ที่เปลี่ยนแปลงรูปลักษณะจะบอกถึงการเกิดผลึกแบบ 2 มิติ (กรณี Quantum Wells) และแบบ 3 มิติ (กรณี Quantum Dots) ได้เช่นเดียวกัน การทำความเข้าใจเกี่ยวกับข้อมูลจาก RHEED Patterns จึงเปรียบเสมือนดวงตาในการเฝ้ามองการเกิดโครงสร้างควอนตัมที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรได้เป็นอย่างดี และยังเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในการควบคุมคุณภาพของโครงสร้างที่จะนำไปประยุกต์เป็น Nanoelectronic Devices ต่อไป

หลังจากการสร้างควอนตัมคือคด้วยเครื่อง MBE เสร็จเรียบร้อยแล้ว ตัวอย่างจะถูกนำมาตรวจสอบโครงสร้างด้วย Atomic Force Microscopy ซึ่งเป็นเทคนิคการสร้างภาพจากโครงสร้างระดับนาโนเมตร โดยอาศัยแรงกดเชิงอะตอม จึงสามารถเห็นภาพของควอนตัมคือคทั้งรูปร่าง ขนาด และความหนาแน่นได้โดยตรง เครื่อง Atomic Force Microscopy นี้ จึงเป็นเครื่องมือที่สำคัญที่ขาดไม่ได้ในการศึกษาวิจัยด้าน Nanostructure งานวิจัยในโครงการนี้ยังต้องอาศัยความร่วมมือจากต่างประเทศได้แก่ ห้องวิจัยที่ Tokyo Institute of Technology และกลุ่มวิจัยด้าน MBE ที่ Max Planck Institute Stuttgart ในการถ่ายรูปโครงสร้างควอนตัมคือค เพราะยังไม่มีเครื่อง Atomic Force Microscopy ไว้ใช้งานเองในขณะนี้ จึงต้องส่งตัวอย่างบางส่วนไปตรวจสอบที่ต่างประเทศ

การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของควอนตัมคือคที่สำคัญมากและใช้เป็นหลักในงานวิจัยนี้ได้แก่ การนำโครงสร้างควอนตัมคือคไปวัดด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence : PL) กล่าวคือ นำตัวอย่างไปกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์ที่มีค่าความยาวคลื่นสั้น ได้แก่ เลเซอร์อาร์กอนที่มีสีฟ้า ($\lambda = 4880 \text{ \AA}$) เพื่อให้โครงสร้างควอนตัมคือคเกิดการเรืองแสงที่ค่าความยาวคลื่นยาวกว่า เช่น ในกรณีของ InAs Quantum Dots จะให้แสงอินฟราเรดในช่วง 1.1~1.3 ไมครอน ตามระดับของ Quantized Energy States ในควอนตัมคือคที่มีขนาดต่าง ๆ ⁽²⁶⁾ ตามทฤษฎีแล้วสัญญาณโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่เกิดจากควอนตัมคือคควรมีสเปกตรัมที่แคบมากเนื่องจากการเปล่งแสงจาก Quantized Energy States และจากการมี Density of States เป็นแบบ δ -Function ประสิทธิภาพการเปล่งแสงจะดีกว่าโครงสร้างควอนตัมแบบอื่น ๆ แต่ในทางทฤษฎีแล้วสเปกตรัมของโฟโตลูมิเนสเซนซ์จะมีความกว้างกว่าทฤษฎีเนื่องจากควอนตัมคือคมีขนาดไม่คงที่ แต่จะมีการกระจายของขนาดคือคเป็นแบบ Gaussian สเปกตรัมของโฟโตลูมิเนสเซนซ์จึงเป็นแบบ Gaussian ด้วย ขนาดความกว้างของสเปกตรัมจะสื่อให้เห็นถึงความสม่ำเสมอของควอนตัมคือค และตำแหน่งของยอดสเปกตรัมจะบอกถึงขนาดของควอนตัมคือคที่ปลูกได้ เป้าหมายหนึ่งของงานวิจัยในโครงการนี้ จึงได้แก่การหาเงื่อนไขในการสร้างควอนตัมคือคที่มีขนาดตามต้องการและมีความสม่ำเสมอ การวัดสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ จึงเป็นการวิเคราะห์คุณภาพของควอนตัมคือคที่ปลูกได้

การทดลองโฟโตลูมิเนสเซนส์นี้ทำได้ทั้งที่อุณหภูมิห้อง (300 °K) หรืออุณหภูมิต่ำ โดยใช้ Cryostat เพื่อติดตั้งตัวอย่างให้มีอุณหภูมิต่ำตาม Coolants ที่ใช้ เช่นที่ 77 °K เมื่อใช้ในโตรเจนเหลว หรือที่ 9-10 °K เมื่อใช้ฮีเลียมเหลว การวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้เราสามารถได้ข้อมูลเกี่ยวกับ Intrinsic Properties ของควอนตัมดอท เช่น ระดับพลังงานที่เป็น Fine Structure ชนิดและส่วนผสมของธาตุต่าง ๆ ที่ใช้สร้างควอนตัมดอท

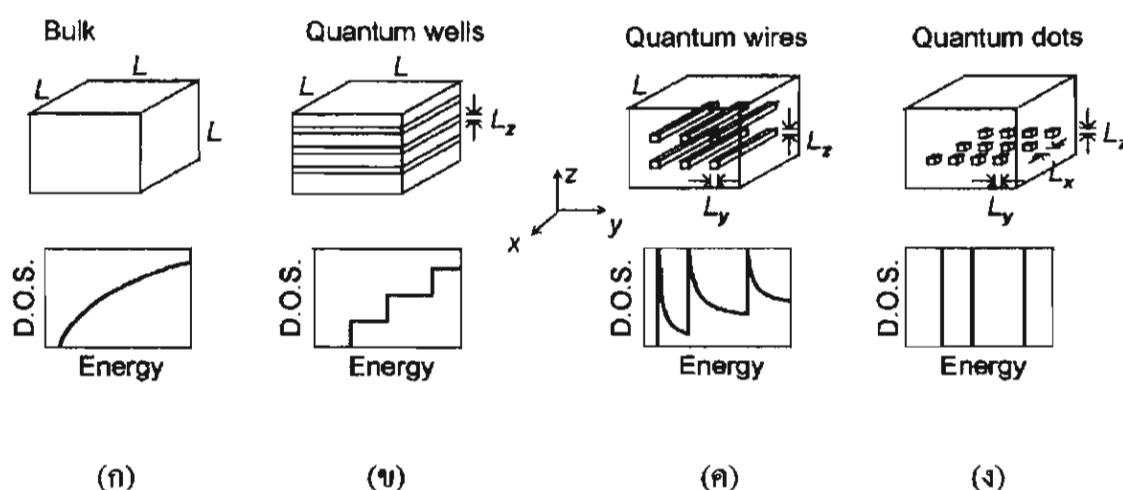
เป้าหมายสำคัญของโครงการวิจัยนี้ในระยะต่อไปได้แก่การนำโครงสร้างควอนตัม ทั้งควอนตัมเวลล์ และควอนตัมดอทมาประยุกต์ในทาง Nanoelectronics ดังนั้นการศึกษาคูณสมบัติพื้นฐานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ของโครงสร้างควอนตัมเหล่านี้จึงอยู่ในขอบเขตการทำวิจัยด้วย ตัวอย่างซึ่งมีโครงสร้างควอนตัมที่ได้จากการทดลองปลูกจากเครื่อง MBE จะถูกนำมาทำเป็นสิ่งประดิษฐ์พื้นฐานทางอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ Schottky Devices โดยทำผิวสัมผัสทางไฟฟ้าด้วยโลหะทองเพื่อให้เกิด Schottky Barrier ขึ้น ส่วนผิวสัมผัสอีกด้านหนึ่งจะเป็น Ohmic Contact ดังนั้นจะได้สิ่งประดิษฐ์ควอนตัมดอทที่เป็น Schottky Devices ขึ้น เพื่อนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้า-แสงได้ เช่น การวัด I-V characteristics เพื่อตรวจสอบการเป็น Diodes ที่สามารถตัดกระแสได้ และเมื่อฉายแสงกระทบหัวต่อดังกล่าวจะเกิดปรากฏการณ์ Photo-electrics ขึ้น ทำให้เราสามารถศึกษาปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เป็นจุดเด่นของควอนตัมดอทได้ เช่น การเกิด Coulomb Blockade ที่จะนำไปสู่การประยุกต์ในด้าน Single Electron Devices และการเป็น Solar Battery ที่มีค่าแคแพซิแตนซ์สำหรับเก็บประจุได้ด้วย

การวิจัยพื้นฐานด้าน Nanoelectronics I นี้จะเป็นบันไดก้าวแรกของการเรียนรู้ Know how ด้านวิศวกรรมเกี่ยวกับโครงสร้างควอนตัมที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร และเป็นฐานในการประยุกต์โครงสร้างควอนตัมในด้าน Nanoelectronics ต่อไป เพื่อให้ได้อุปกรณ์สิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่มีสมรรถนะสูงทั้งด้านพลังงานและความเร็ว

2. ทฤษฎีพื้นฐาน

ในยุคที่ผ่านมาถึงประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์จะผลิตสร้างจากสารกึ่งตัวนำที่เป็นก้อน (Bulk Semiconductors) ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์ตลอดจนกลไกการทำงานของสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้จะอาศัยทฤษฎีแถบพลังงาน (Band Theory) เพราะพลังงานของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำจะมีความต่อเนื่อง อิเล็กตรอนจึงเคลื่อนที่อย่างอิสระแบบ 3 มิติภายในแถบพลังงานที่เรียกว่า Conduction Band แต่เนื่องจากการนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอนมีเงื่อนไขที่ต้องมีพลังงานสูงกว่าแถบพลังงานต้องห้ามค่าหนึ่งที่เรียกว่าแถบพลังงานต้องห้าม (Forbidden Band Gap) ดังนั้นพลังงานอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นนี้อาจได้รับจากภายนอก เช่น แสง ความร้อน หรือการชนด้วยอนุภาคพลังงานสูง อิเล็กตรอนจะกระโดดข้ามแถบพลังงานต้องห้ามจากแถบพลังงานที่เรียกว่า Valence Band ไปยัง Conduction Band เพื่อนำไฟฟ้าตามอิทธิพลจากภายนอกที่เข้ามาควบคุม ทำให้สิ่งประดิษฐ์เหล่านั้นทำงานได้ เช่น เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นตัววัดอุณหภูมิ เป็นตัววัดอนุภาค เป็นไดโอด เป็นทรานซิสเตอร์ ฯลฯ การนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำที่เป็นก้อนนี้จะมีจำนวนอิเล็กตรอนเป็นล้าน ๆ ตัว ทำให้สิ่งประดิษฐ์เหล่านี้เกิดความร้อนเนื่องจาก Joule Heating กินกระแสไฟฟ้าจำนวนมากสิ้นเปลืองพลังงาน และทำให้สิ่งประดิษฐ์เหล่านี้มีอายุสั้นเมื่อใช้งานไประยะหนึ่ง เช่น การขยายตัวของ Line Defects ในบริเวณ Active region ของเลเซอร์ ไดโอด จะเพิ่มมากขึ้นจนเลเซอร์ไดโอดหยุดทำงาน จึงเป็นปัญหาทางวิศวกรรมที่จะพัฒนาสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ที่กินไฟฟ้าน้อย มีประสิทธิภาพสูง อายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น จึงเป็นที่มาของศาสตร์ด้าน Nanoelectronics ที่ใช้สารกึ่งตัวนำที่มีขนาดเล็กจิ๋ว และใช้ทฤษฎีพื้นฐานด้านควอนตัมมาอธิบาย

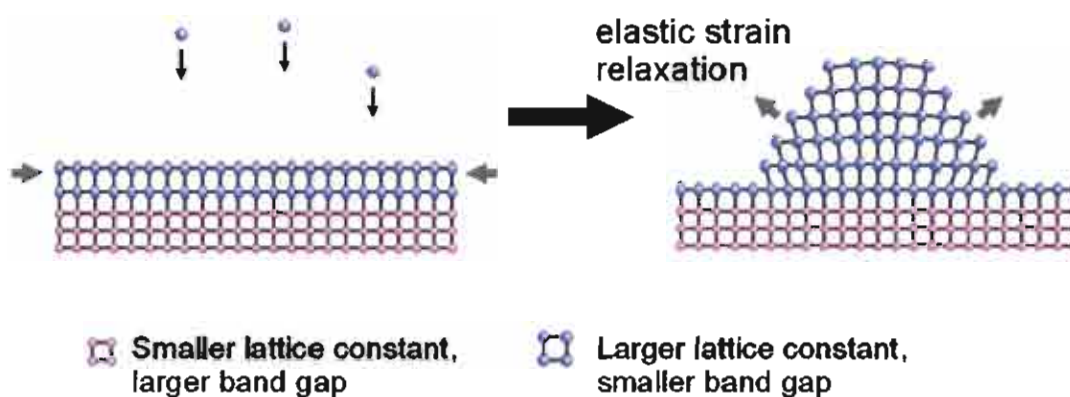
เมื่อสารกึ่งตัวนำมีขนาดเล็กลงจนมีขนาดในระดับนาโนเมตร ซึ่งเป็นชั้นอะตอมเดี่ยว (Monolayer : ML) ทฤษฎีที่ใช้จึงเปลี่ยนไปเป็นทฤษฎีควอนตัม ซึ่งอิเล็กตรอนจะมีสถานะควมเป็นได้ทั้งอนุภาคและคลื่น (Particle-Wave Duality) ในทางเทคนิค การปลูกผลึกสารกึ่งตัวนำที่มีขนาดในระดับนาโนเมตรเหล่านี้ อาจใช้วิธีปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy : MBE) ปลูกผลึกด้วยไอเคมีจากสารโลหะอินทรีย์ (Metal Organic Chemical Vapor Deposition : MOCVD) ซึ่งจะได้ชั้นผลึกที่บางมากในระดับนาโนเมตร เรียกว่า ควอนตัมเวลล์ (Quantum Wells : QWs) และสามารถพัฒนาไปสู่การปลูกควอนตัมไวร์ (Quantum Wires : QWr) และควอนตัมดอต (Quantum Dots : QDs) ได้ ทฤษฎีที่ใช้อธิบายโครงสร้างควอนตัมเหล่านี้ จึงเปลี่ยนจากทฤษฎีแถบพลังงานมาเป็นทฤษฎีควอนตัมซึ่งพลังงานอิเล็กตรอนในโครงสร้างควอนตัมเหล่านี้จะมีลักษณะเป็น Quantized Energy หรือเป็นระดับพลังงานเดี่ยว (Discrete Energy States) ที่ไม่ต่อเนื่อง ในกรณีของ Bulk Semiconductor อิเล็กตรอนจะมี Density of States ที่ต่อเนื่องเป็น Parabolic Function (ดูรูป 1(ก)) เมื่อสารกึ่งตัวนำมีโครงสร้างควอนตัม Density of States ของอิเล็กตรอนจะเปลี่ยนไปเป็น Step Function ในกรณีของควอนตัมเวลล์ เป็น Hyperbolic Function ในกรณีของควอนตัมไวร์ เป็น δ -Function ในกรณีของควอนตัมดอตตามลำดับ (ดูรูป 1 (ข) (ค) และ (ง))



รูปที่ 1 แผนภาพเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้าง และความหนาแน่นสถานะของสารกึ่งตัวนำแบบก้อน และโครงสร้างควอนตัม [2]

ความหมายทางทฤษฎีควอนตัมของโครงสร้างดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า โครงสร้างควอนตัมเวลล์ โครงสร้างควอนตัมไวร์ และโครงสร้างควอนตัมดอตจะสามารถเก็บกักอิเล็กตรอนได้ใน 1 มิติ 2 มิติ และ 3 มิติ ตามลำดับ หรือพูดอีกอย่างหนึ่งว่า อิเล็กตรอนมีความอิสระน้อยลงในเชิงมิติ เราเรียกอิเล็กตรอนในโครงสร้างเหล่านี้ว่าเป็นอิเล็กตรอนแบบ 2D 1D และ 0D ตามลำดับ กล่าวคือในโครงสร้างควอนตัมเวลล์ อิเล็กตรอนจะมีอิสระในการเคลื่อนที่ในระนาบ แต่จะมีอิสระเคลื่อนที่เป็นเส้นในโครงสร้างควอนตัมไวร์ และอิเล็กตรอนจะหมดอิสระภาพในการเคลื่อนที่ในโครงสร้างควอนตัมดอต เมื่อนำโครงสร้างควอนตัมเหล่านี้มาทำเป็นชั้นแอคทีฟ (Active layer) ของสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ หรือฮอปโตอิเล็กทรอนิกส์ จึงย่อมส่งผลต่อลักษณะสมบัติพื้นฐานของสิ่งประดิษฐ์เหล่านั้น เช่น การมีค่ากระแสเทอร์สโธลด์ (Threshold current) ต่ำมากในทั้งใน QW lasers และ QD lasers เนื่องจากการมี Density of states ที่สูงขึ้นและเป็น Discrete Energy States

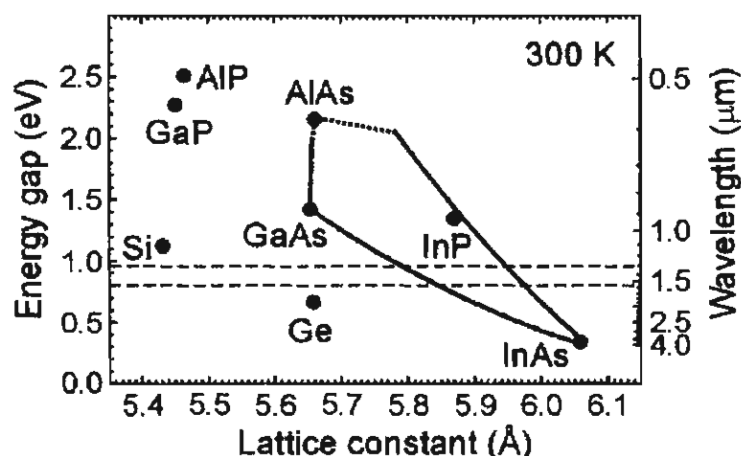
โครงสร้างควอนตัมเวลล์นั้นจะมุ่งใช้วัสดุสารประกอบกึ่งตัวนำที่มี Lattice Matching เช่น AlGaAs กับ GaAs ทำให้ชั้นผลึกที่ปลูกมีความเรียบและบางในระดับ nanometer ไร่จุบทุกพล่อง เพื่อให้อิเล็กตรอนวิ่งได้อิสระใน 2 มิติ ในระนาบผลึกที่บางมาก ส่วนโครงสร้างควอนตัมดอตนั้นจะใช้วัสดุสารประกอบกึ่งตัวนำที่มี Lattice Mismatching เช่น InAs กับ GaAs หรือ Si กับ Ge เพราะการปลูกผลึกที่มีขนาดไม่เท่ากัน จะนำไปสู่การเกิดแรงเครียดในโครงสร้าง เมื่อปลูกชั้นผลึกเกินค่าความหนาวิกฤติผลึกที่ปลูกได้จะมีลักษณะเป็นหย่อม ๆ เพื่อผ่อนคลายแรงเครียดในโครงสร้าง จึงเกิดเป็นควอนตัมดอตขึ้น และเป็นการเกิดควอนตัมดอตชนิดที่เรียกว่า Self-Assembled Quantum Dots (SAQDs) : ควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเองดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ภาพลักษณะการเกิดควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเองในระหว่างปลูกชั้นผลึกของสารกึ่งตัวนำที่มีขนาดค่าคงที่โครงสร้างผลึกมากลงบนสารกึ่งตัวนำอีกชนิดหนึ่งซึ่งมีขนาดค่าคงที่โครงสร้างผลึกน้อยกว่า เมื่อทำการปลูกผลึกจนมีความหนาเกินค่าความหนาวิกฤติ จะเกิดการผ่อนคลาย (relaxation) พลังงานความเครียดเกิดเป็น โครงสร้างควอนตัมดอต [7]

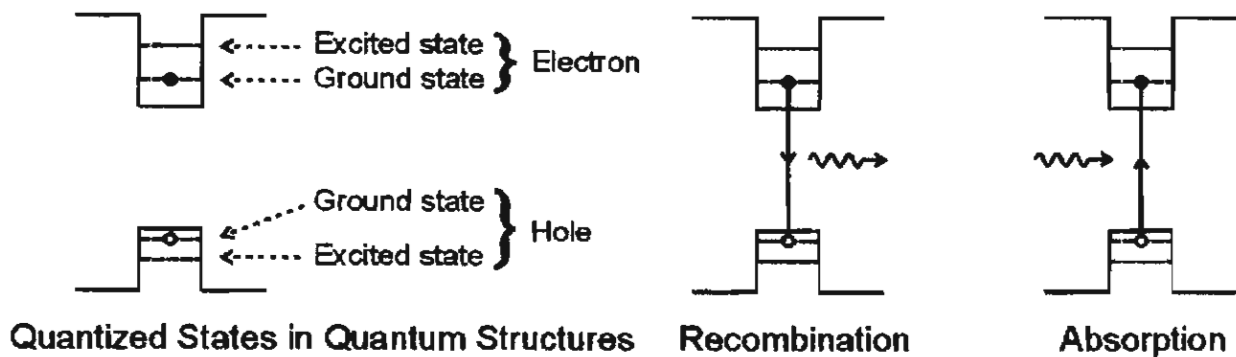
วิธีการสร้างควอนตัมดอตที่อาศัยกลไกข้างต้นเป็นวิธีการปลูกผลึกแบบ Stranski-Krastanov mode (SK mode) ซึ่งเป็นวิธีที่มีข้อดีหลายประการ โดยเฉพาะปัญหาเรื่องการมีจุดบกพร่องที่มักเกิดกับวิธีการปลูกผลึกแบบอื่น ๆ ควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเองนี้ เกิดขึ้นเองโดยอาศัยธรรมชาติของโครงสร้างที่ผ่อนคลายแรงเครียด จึงมีจุดบกพร่องน้อยมาก สามารถนำมาใช้เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ได้ดีทั้งในแง่อายุชีวิตของพาหะนำไฟฟ้า และความเร็วในการเคลื่อนที่ในโครงสร้างเหล่านี้ สิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ควอนตัมดอต จึงมีทั้งประสิทธิภาพและความเร็วในการทำงานที่สูงขึ้น แต่วิธีการปลูกควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเองนี้มีข้อจำกัดบางประการ ได้แก่ ความเป็นระเบียบของดอต ความไม่สม่ำเสมอของดอต ซึ่งเป็นประเด็นในการทำวิจัยพื้นฐานที่เป็นเนื้อหาส่วนใหญ่ของรายงานวิจัยชิ้นนี้

การเลือกวัสดุสารประกอบกึ่งตัวนำที่ใช้ทำโครงสร้างควอนตัมเวลล์และโครงสร้างควอนตัมดอตเป็น AlGaAs/GaAs และ InAs/GaAs นั้นอาศัยหลัก Lattice Matching และ Lattice Mismatching แล้วจะต้องคำนึงถึงลักษณะการเป็น Direct Bandgap ของวัสดุเหล่านั้นด้วย หากประสงค์จะนำมาใช้ประโยชน์ด้านออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ข้อมูลเกี่ยวกับ Lattice Constants และลักษณะของ Bandgaps มีแสดงในรูปที่ 3 การเลือกวัสดุที่อยู่ในกลุ่ม III-As เป็นเหตุผลเชิงวิศวกรรมศาสตร์ เพราะเป็นการปลูกผลึกที่ใช้ผลึกฐานเป็น GaAs ซึ่งมีราคาถูกกว่า InP และเทคโนโลยีเกี่ยวกับ GaAs ได้พัฒนามายาวนานไม่แพ้ Si การทำ GaAs IC Chips เพื่อการประยุกต์ในสิ่งประดิษฐ์ประเภทต่าง ๆ มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นการใช้โครงสร้างควอนตัมที่อยู่บนกลุ่ม III-As จึงมีศักยภาพสูงในเชิงประยุกต์ แรงจูงใจอีกส่วนหนึ่งได้แก่การนำโครงสร้างควอนตัมไปใช้เป็น Lasers ที่มีประสิทธิภาพสูงและกินไฟต่ำ ที่ให้แสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 1.3 และ 1.55 ไมครอน ที่ใช้งานกว้างขวางในระบบ Optical Fibre Communication ได้ เช่น โครงสร้างควอนตัมดอตที่ใช้ InGaAs ที่มีส่วนผสมของ In และ Ga ที่พอเหมาะ



รูปที่ 3 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างขนาดค่าคงที่โครงสร้างผลึกและค่าความกว้างแถบพลังงานของระบบสารกึ่งตัวนำหมู่ III-As ที่อุณหภูมิห้อง เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณอัลลอยในสารประกอบ กับค่าความกว้างแถบพลังงาน โดยเส้นทึบแทน สารประกอบชนิด direct bandgap และ เส้นจุดแทน สารประกอบชนิด indirect bandgap จากรูปจะเห็น ได้มีความเป็นไปได้ที่จะนำสารประกอบ InGaAs มาสร้างโครงสร้างควอนตัมคือทำให้มีค่าระดับพลังงานที่ทำให้แสงที่เปล่งออกมาจากโครงสร้างมีค่าความยาวคลื่น 1.3 หรือ 1.55 μm (เส้นประ)

ทั้งโครงสร้างควอนตัมเวลล์และโครงสร้างควอนตัมดอทใช้ทฤษฎีพื้นฐานด้านควอนตัมฟิสิกส์เหมือน ๆ กัน กล่าวคือ เมื่อโครงสร้างถูกบีบให้มีขนาดเล็กลงในระดับนาโนเมตร หรือใกล้เคียงขนาดของอะตอมเดี่ยว พลังงานของพาหะทั้งอิเล็กตรอนและโฮลในโครงสร้างจะถูก Quantized ดังแสดงในรูปที่ 4 ดังนั้นการเกิด Recombination ระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลในโครงสร้างควอนตัม จึงเกิดจาก Quantized States เหล่านี้ หากเป็น Radiative Recombination แสงที่เกิดจากการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนและโฮล จึงถูกกำหนดคุณสมบัติพื้นฐานตาม Quantized States ทั้งในด้านพลังงานของโฟตอน และสเปกตรัมของโฟตอนที่แคบ ตลอดจน Quantum Efficiency ในการเกิด Recombination ที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากลักษณะเด่นของ Density of States ที่เป็นขั้น ๆ หรือเป็น δ -function ในกลไกที่ตรงกันข้ามกัน การดูดกลืนแสงเพื่อสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮลก็ถูกกำหนดโดยตำแหน่งของ Quantized States เช่นกัน Photon Energy จึงต้องมีค่าที่พอเหมาะพอดีกับ Quantized States เหล่านี้ด้วย ซึ่งสามารถกำหนดได้โดยควบคุมขนาด Dimensions ของโครงสร้างควอนตัมที่สร้างขึ้น เช่น ความหนาของควอนตัมเวลล์ ขนาดของควอนตัมดอท และความสม่ำเสมอของโครงสร้างในระดับนาโนเมตรนั่นเอง



รูปที่ 4 Quantized States ของอิเล็กตรอนและโฮลใน โครงสร้างควอนตัม (ก) การเกิด Recombination (ข) และ Absorption (ค) ใน โครงสร้างควอนตัม

โครงสร้างควอนตัมที่มีขนาดนาโนเมตรนี้มีจุดเด่นที่สามารถ Confine พาหะให้มีการเคลื่อนที่จำกัด เช่น การเก็บกักอิเล็กตรอนในควอนตัมดอท และหากมีการใส่สนามไฟฟ้าหรือพลังงานที่เหมาะสม ก็ สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนได้เป็นตัว ๆ ปรากฏการณ์พื้นฐานที่สำคัญนี้ได้แก่ Coulomb Blockade ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการออกแบบให้โครงสร้างควอนตัมทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุ และ ปลดปล่อยประจุได้เป็นประจุเดี่ยว ๆ จึงเป็นแนวคิดของการประยุกต์โครงสร้างควอนตัมเป็นหน่วยความจำ และ Single Electron Devices ชนิดต่าง ๆ เช่น ตัวอย่างของ Tunneling ของอิเล็กตรอนใน Bulk Semiconductor มีจำนวนมาก เมื่อเทียบกับการ Tunneling ของอิเล็กตรอนเดี่ยวในโครงสร้างควอนตัม ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 Tunneling ใน Bulk และ Quantum Structure ที่มีความแตกต่างของจำนวนอิเล็กตรอน

การควบคุมอิเล็กตรอนเดี่ยวนี้มีความหมายทางวิศวกรรมศาสตร์มาก เพราะทำให้สิ่งประดิษฐ์กิน ไฟด่ำ ไม่สิ้นเปลืองพลังงาน ไม่มีการสูญเสียความร้อน (Joule Heating) ทำให้สิ่งประดิษฐ์ทำงานได้ ที่ ความเร็วสูง หรือที่ความถี่สูง ๆ จึงมีประโยชน์ทั้งในด้านการสื่อสารความเร็วสูง และคอมพิวเตอร์ที่ใช้ งานกับระบบขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นสิ่งที่ท้าทายมากในอนาคต อิเล็กตรอนเดี่ยวที่ควบคุมได้เช่นนี้ ยังนำไป สู่แนวคิดการใช้ Electron Spin ในสิ่งประดิษฐ์ ทำให้เกิดศาสตร์ใหม่ เช่น Spintronics ที่น่าสนใจด้วย⁽²⁷⁾

3. การปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล

เทคโนโลยีที่ใช้ในการปลูกผลึกที่มีขนาดนาโนเมตร ในงานวิจัยนี้ได้แก่ การปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy : MBE) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ติดตั้งใช้งานที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตั้งแต่ปี 2535 (รูปที่ 6) เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีใหม่ และยังไม่เคยมีมาก่อนในประเทศไทย

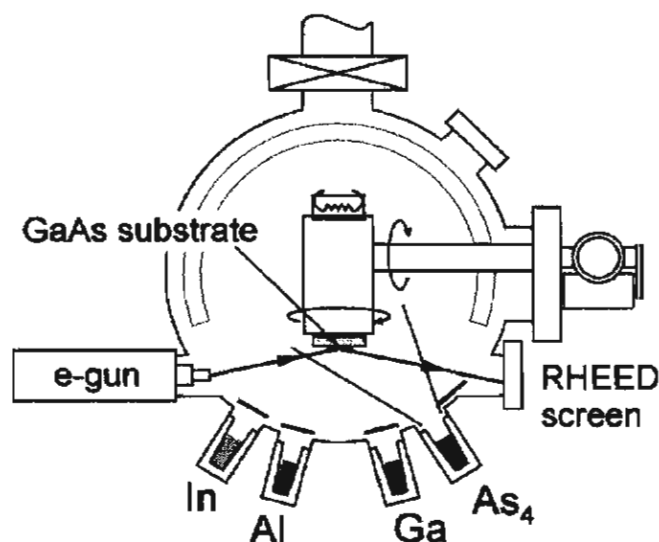


รูปที่ 6 เครื่อง MBE ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จึงต้องเรียนรู้ Know-how และศึกษาขั้นพื้นฐานในช่วงปีแรก ๆ ของการติดตั้ง เพื่อให้สามารถควบคุมเครื่องมือได้ตามที่กำหนดได้ เช่น อุณหภูมิ ณ จุดต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิของแผ่นผลึกฐาน อุณหภูมิของ Effusion Cells แต่ละตัวที่บรรจุธาตุแต่ละชนิด ได้แก่ Ga/As/Al/In/GaP/Si/Be โดยที่ธาตุ 4 ตัวแรก และสารประกอบ GaP จะเป็นวัสดุที่ใช้ทำสารประกอบกึ่งตัวนำ GaAs/GaAlAs/AlAs/InAs/GaP/InP ส่วนธาตุ 2 ตัวสุดท้ายจะใช้ทำเป็น dopants เพื่อทำให้สารประกอบกึ่งตัวนำเป็น n-type และ p-type ตามลำดับ อุณหภูมิต่าง ๆ เหล่านี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อคุณสมบัติและคุณภาพของผลึกที่ปลูก เพราะจะเป็นตัวกำหนดส่วนผสมของสารประกอบตลอดจนความสมบูรณ์ของผลึก

การปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุลนี้กระทำใน Growth Chamber ที่มีสภาพสุญญากาศดีเยี่ยมในระดับ 10^{-10} ~ 10^{-11} Torr จึงต้องใช้ปั๊มสุญญากาศขนาดใหญ่ ได้แก่ Ion Pump และ Ti Sublimation Pump ดังนั้น การเรียนรู้เทคนิคเกี่ยวกับ Ultra High Vacuum ก็เป็นงานพื้นฐานอีกด้านหนึ่งที่จะต้องดำเนินการให้ได้ มิฉะนั้นสารกึ่งตัวนำที่ปลูกจะมีคุณภาพไม่ดี มีจุดบกพร่องจำนวนมากได้

ลำโมเลกุลที่ประกอบขึ้นจากธาตุชนิดต่าง ๆ ที่พุ่งออกจาก Effusion Cells จะถูกควบคุมด้วย Back Pressure ทางไอโลหะ และปิดเปิดด้วย Shutters ที่ติดตั้งอยู่หน้า Effusion Cells (รูปที่ 7)

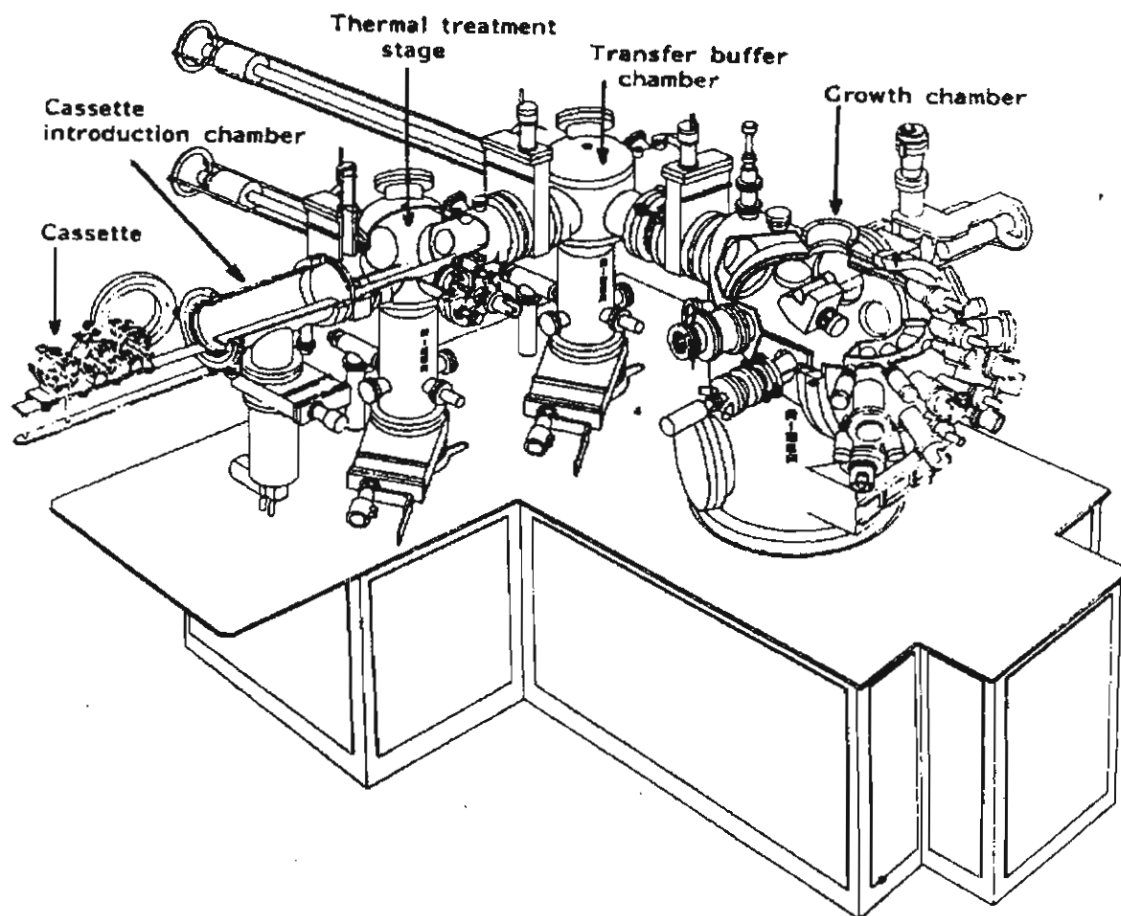


รูปที่ 7 แผนภาพภายใน growth chamber ของเครื่องปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล

Shutters เหล่านี้จะถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ด้วยเวลาที่เหมาะสม เพื่อให้อะตอมธาตุชนิดต่าง ๆ ถูกจัดวางตัวเองบนแผ่นผลึกฐานเป็นชั้น ๆ ในระดับอะตอม การกำหนดรายละเอียดต่าง ๆ ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จึงเป็น Know how ที่ต้องใช้เวลาในการเรียนรู้เพื่อให้สามารถปลูกผลึกที่มีขนาดโครงสร้างนาโนเมตรที่มีคุณภาพดี

ดังนั้นการวิจัยในช่วงหลังติดตั้งเครื่อง MBE จึงเน้นที่จะเรียนรู้พื้นฐานในการใช้เทคโนโลยีใหม่นี้ ตลอดจนการบำรุงรักษาระบบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการควบคุมลำอิเล็กตรอนที่ใช้งานด้าน Reflected High Energy Electron Diffraction (RHEED) ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในตอนต่อไป การติดตั้งกล้อง CCD เพื่ออ่าน RHEED pattern ผ่าน RHEED Screen เพื่ออ่าน RHEED Patterns และ RHEED Oscillations เพื่อดูโครงสร้างผลึก และอัตราความเร็วในการเกิดชั้นผลึก การใช้ Quadrupoles เพื่อวิเคราะห์ Residual Gas ใน Growth Chamber เพื่อตรวจสอบหากมีการรั่วไหลของสุญญากาศเกิดขึ้น ณ จุดหนึ่งจุดใด โดยใช้ He Leak Detection

เครื่อง MBE นี้มีโครงสร้างและกลไกที่สลับซับซ้อน นอกจาก Growth Chamber ที่มีขนาดใหญ่ที่สุดแล้ว ยังมี Transfer Chamber/Introduction Chamber/Loading Chamber เรียงต่อกันเป็นลำดับ โดยมี Vacuum Shutters ปิดเปิดเป็นช่วง ๆ (รูปที่ 8) แผ่นผลึกฐาน GaAs ที่ใช้เป็นวัสดุเริ่มต้นจะถูกติดตั้งบนชุดโมลิตินัม (Molybdenum Blocks) ที่วางเรียงกันบนรางเลื่อน เพื่อนำเข้าสู่ Chambers ต่าง ๆ โดยใช้ Magnetic Arms



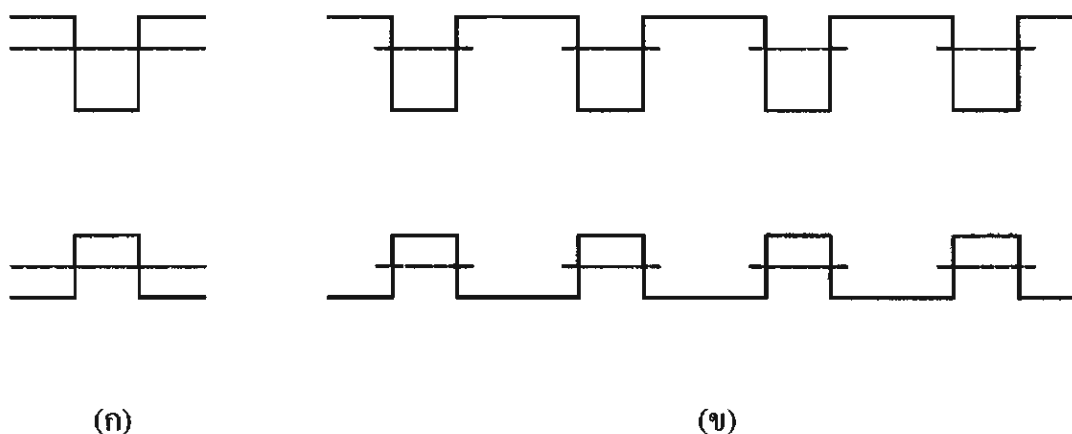
รูปที่ 8 Chambers ต่าง ๆ ของระบบ MBE

Growth Chamber จะมีลักษณะพิเศษ เพราะเป็น Chamber 2 ชั้น เพื่อหล่อเย็นด้วย Liquid N_2 ขณะปลูกผลึก และภายในจะมีแท่นยึดแวนผลึกฐานที่เคลื่อนไหวได้รอบตัวโดยใช้ Manipulators ที่ควบคุมทางแมคานิกส์อย่างละเอียดจากภายนอก

ที่อธิบายมาทั้งหมดนั้นเป็นงานด้านวิศวกรรมศาสตร์ขั้นพื้นฐานที่ต้องดำเนินการให้ถูกต้อง และต้องใช้เวลาเพื่อการเรียนรู้จากประสบการณ์อยู่หลายปีก่อนที่จะ Master เทคโนโลยี MBE นี้ได้

การปลูกชั้นผลึกในระยะเริ่มต้นจึงเริ่มจาก GaAs/GaAlAs ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีขนาด Lattice Constant เท่า ๆ กัน จึงเป็นระบบที่เป็น Lattice Match และนำไปสู่การศึกษาโครงสร้างควอนตัมเวลล์ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยของโครงการนี้ การผสม Al เข้าไปในโครงสร้างผลึก GaAlAs มีผลทำให้

สารประกอบกึ่งตัวนำผสม (Mixed Compound Semiconductor) ชนิดนี้มีขนาดแถบพลังงานต้องห้ามที่กว้างขึ้น เมื่อปลูกสลับกับผลึก GaAs ที่มีแถบพลังงานต้องห้ามที่แคบกว่า GaAlAs จึงทำหน้าที่เป็นชั้น Barrier ในขณะที่ GaAs จะทำหน้าที่เป็น Quantum Well เมื่อชั้นผลึกมีความบางมาก ๆ (น้อยกว่า 100 nm) โครงสร้างแถบพลังงานของควอนตัมเวลล์แบบเดี่ยว (Single Quantum Well : SQW) และควอนตัมเวลล์แบบซ้อน (Multiple Quantum Wells : MQW) มีแสดงดังรูปที่ 9

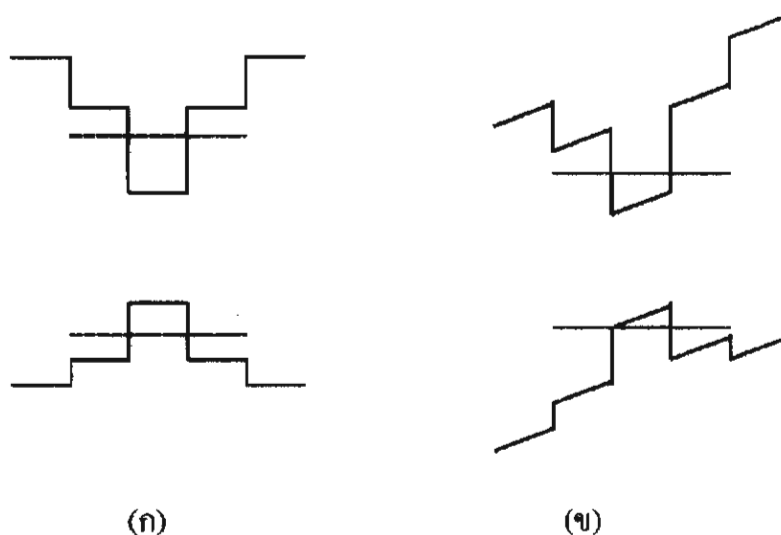


รูปที่ 9 โครงสร้างควอนตัมเวลล์แบบเดี่ยว (ก) และควอนตัมเวลล์แบบซ้อน (ข)

โดยปกติ GaAs จะมีค่าแถบพลังงานต้องห้ามที่ 1.43 eV และเป็น Direct Bandgap จึงสามารถเปล่งแสงได้ที่ความยาวคลื่น 0.87 ไมครอน เมื่อผลึก GaAs ชั้นบาง ๆ ถูกประกบด้วย GaAlAs Barriers ทั้งสองข้าง ชั้นผลึกดังกล่าวจะทำหน้าที่เป็นควอนตัมเวลล์ พลังงานของอิเล็กตรอนจะถูก Quantized เป็นระดับพลังงานแบบ Discrete Energy และถูกดันให้มีความสูงขึ้น ทำให้การเปล่งแสงจากชั้นควอนตัมเวลล์มีความยาวคลื่นที่สั้นกว่า 0.87 ไมครอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสูงของชั้น Barriers (หรือส่วนผสมของ Al) และความหนาบางของชั้นควอนตัมเวลล์

ได้มีการปลูกโครงสร้าง SQW และ MQW จาก GaAs/GaAlAs ด้วยเทคนิค MBE และนำโครงสร้างดังกล่าวไปศึกษาลักษณะการเปล่งแสงด้วยการทดลอง Photoluminescence⁽⁸⁾ คณะวิจัยได้นำเทคนิคการปลูกผลึกผ่าน Shadow Masks เพื่อสร้างโครงสร้างควอนตัมเวลล์ที่มีขนาดเล็กในตำแหน่งที่ต้องการ และนำมาศึกษาความสามารถในการเปล่งแสงด้วยเทคนิค Photoluminescence⁽²⁸⁾ นอกจากการเลือกใช้วัสดุสารกึ่งตัวนำ GaAs/GaAlAs แล้ว คณะวิจัยได้เลือกศึกษาโครงสร้างควอนตัมเวลล์ของ GaAs/InGaAs โดยให้ GaAs ทำหน้าที่เป็นชั้น Barrier ในขณะที่ InGaAs จะทำหน้าที่เป็นชั้นควอนตัมเวลล์ ซึ่งขนาดของแถบพลังงานต้องห้ามที่แคบกว่า ดังนั้นการเปล่งแสงจาก InGaAs Quantum Well จะมีค่าความยาวคลื่นที่ยาวขึ้น

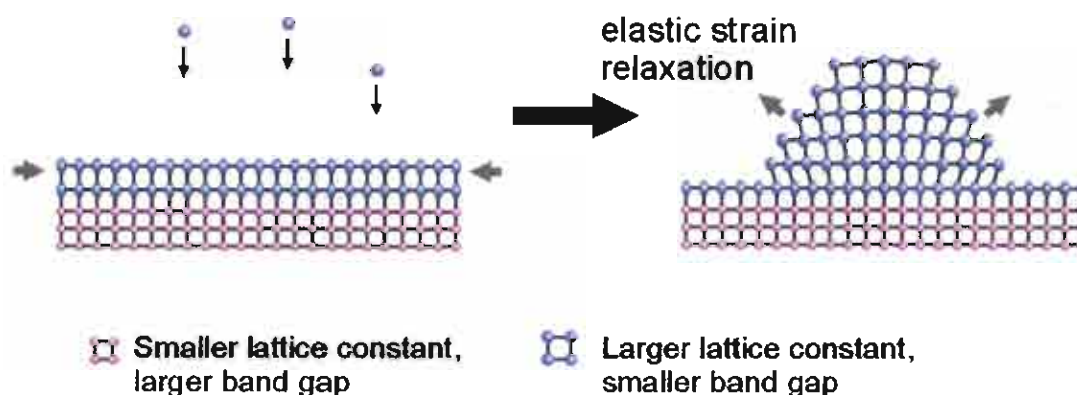
ในงานวิจัยนี้ได้เสนอแนวความคิดการสร้างโครงสร้างควอนตัมเวลล์แบบผสม (Composite Quantum Wells) โดยใช้ GaAlAs/GaAs/InGaAs ดังแสดงตามโครงสร้างแถบพลังงานในรูปที่ 10 เป้าหมายของการประยุกต์โครงสร้างดังกล่าวได้แก่ การดูดกลืนแสงที่มีประสิทธิภาพเพื่อใช้เป็น Absorber layers ของ เซลล์แสงอาทิตย์ ได้มีการทดลองสร้างโครงสร้าง Composite Quantum Wells เพื่อนำไปทดสอบทั้งทางด้านการเปล่งแสง เพื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของ Photocurrent ที่เกิดจากการดูดกลืนแสง⁽³⁰⁾ และการศึกษาเหตุผลทางทฤษฎีควอนตัมว่าโครงสร้างควอนตัมแบบผสมนี้มีส่วนควบคุมให้ลักษณะของ Wave function มีการบิดเบี้ยว (Distortion) น้อย ส่งผลให้ Transition Probability มีค่าสูง แม้จะเกิด Internal Electric Field เมื่อโครงสร้างทำงานเป็นเซลล์แสงอาทิตย์⁽³¹⁾



รูปที่ 10 โครงสร้าง Composite Quantum Wells ที่ทำจาก GaAlAs/GaAs/InGaAs ในสภาพไม่มี (ก) และมี (ข) อิทธิพลของสนามไฟฟ้า

การปลูกชั้นผลึก InGaAs ในโครงสร้างควอนตัมเวลล์นั้นจะใช้ส่วนผสมของ In น้อยมาก เพื่อให้มี Lattice Mismatch น้อยที่สุด ซึ่งจะตรงกันข้ามกับโครงสร้างควอนตัมดอทที่ใช้ประโยชน์ Lattice Mismatch อย่างเต็มที่ เพราะต้องการให้เกิด Strain ขึ้นในโครงสร้าง

งานวิจัยส่วนใหญ่ของโครงการนี้มุ่งศึกษาการปลูกผลึกเพื่อทำโครงสร้างควอนตัมดอท โดยใช้ InAs/GaAs ซึ่งเป็นวัสดุสารประกอบกึ่งตัวนำที่เป็น Direct Bandgap ทั้งคู่ แต่มี Lattice Constants สูงถึง 7 % การมี Lattice Mismatch นี้เองทำให้เกิดความเครียดในโครงสร้าง เมื่อปลูกชั้นผลึกเกินความหนาวิกฤติ ความเครียดนี้จะถูกปลดปล่อยทำให้เกิดโครงสร้างควอนตัมดอทขึ้นได้เอง (Self-Assembled Quantum Dots : SA-QD) กลไกการเกิดควอนตัมดอทนี้เรียกว่าการปลูกแบบ Stranski-Krastanov (SK) mode ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 การเกิดควอนตัมดอตโดยการปลูกผลึกแบบ Stranski-Krastanov Mode

การปลูกผลึกแบบ Stranski-Krastanov Mode นี้ เป็นการก่อตัวของผลึกแบบ 2 มิติในช่วงแรก เมื่อชั้นผลึกมีความหนาวิกฤติค่าหนึ่งแล้ว จะเกิดผลึกแบบ 3 มิติขึ้นเอง กลายเป็นควอนตัมดอต ซึ่งเป็นผลึกขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร การเกิดผลึกแบบ Stranski-Krastanov Mode นี้ จะเกิดขึ้นเมื่ออะตอมที่ใช้ปลูกมีค่า Lattice Constant ไม่เท่ากับอะตอมของผลึกฐาน ซึ่งมีค่าไม่เกิน 10 % ในกรณีของ InAs/GaAs นั้นมี Lattice Mismatch ที่ค่า 7 % จึงอาศัยกลไกการเกิดผลึกแบบ Stranski-Krastanov Mode ได้ดี

ในการปลูกผลึกทั้งแบบควอนตัมเวลล์จาก GaAs/GaAlAs และควอนตัมดอตจาก InAs/GaAs หรือ InGaAs/GaAs โดยใช้เครื่องปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy : MBE) นั้น จะใช้สารเริ่มต้นที่เป็นธาตุบริสุทธิ์ ได้แก่

แกเลียม (Gallium : Ga ที่บริสุทธิ์ 99.99999 %)

อาร์เซนิก (Arsenic : As ที่บริสุทธิ์ 99.99995 %)

อินเดียม (Indium : In ที่บริสุทธิ์ 99.9999 %)

อะลูมิเนียม (Aluminium : Al ที่บริสุทธิ์ 99.999 %)

ธาตุบริสุทธิ์เหล่านี้จะบรรจุใน Effusion Cells แต่ละตัวใน Growth Chamber ของเครื่อง MBE ธาตุบริสุทธิ์เหล่านี้จะถูก Heated ให้ร้อนเพื่อระเหยออกเป็นลำโมเลกุลพุ่งไปยังผลึกฐาน ลำโมเลกุลของธาตุบริสุทธิ์เหล่านี้จะถูกควบคุมปริมาณด้วยทั้งอุณหภูมิที่ใช้ Heat ตัว Effusion Cell และเวลาที่ใช้ในการเปิดเปิดชุดเตอร์ที่ติดตั้งอยู่บริเวณด้านหน้าของ Effusion Cell แต่ละตัว นอกจากสารที่ใช้เป็นองค์ประกอบของเนื้อผลึกแล้ว ในเครื่อง MBE ยังมีการติดตั้งระบบการเติมสารเจือปน เพื่อให้ผลึกสารกึ่งตัวนำเป็นแบบ n และแบบ p ได้ด้วยโดยใช้

ซิลิกอน (Silicon : Si ที่บริสุทธิ์ 99.9999999 %)

เบริลเลียม (Beryllium : Be ที่บริสุทธิ์ 99.999 %)

ตามลำดับ ในบรรดาธาตุบริสุทธิ์ที่ใช้งานในเครื่อง MBE เหล่านี้ อาร์เซนิกเป็นธาตุที่เป็นอันตรายที่สุด เพราะเป็นสารพิษ ดังนั้นการทำงานกับสารชนิดนี้ต้องระมัดระวังเป็นพิเศษโดยผู้ทำงานต้องใช้หน้ากาก ป้องกันไอพิษ และใส่ชุดทำงานและถุงมืออย่างมิดชิด เพื่อมิให้ได้รับสารอาร์เซนิกต่อร่างกาย เมื่อธาตุ ทั้งหมดถูกนำเข้าสู่ติดตั้งใน Growth Chamber และมีการดูดสุญญากาศแล้ว ทุกอย่างจะปลอดภัย เพราะจะ ไม่มีการรั่วไหลของสารต่าง ๆ ออกสู่ภายนอกเลย เนื่องจาก Background Pressure ก่อนการปลูกผลึกจะมีค่าต่ำถึง $10^{-10} \sim 10^{-11}$ Torr ซึ่งเป็นระดับ Ultra High Vacuum

ผลึกฐานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทั้งหมดได้แก่ GaAs ซึ่งเป็นแผ่นผลึกเดี่ยว ชนิดพร้อมปลูกได้ทันที (epi-ready) ผลึกฐานจะถูกติดตั้งบน Molybdenum Block ด้วยกาวอินเดียม แล้วจึงนำเข้าสู่ Loading Chamber เมื่อผลึกฐานถูกเคลื่อนเข้าสู่ Introduction Chamber ผลึกฐานจะถูกทำความสะอาดผิวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง ก่อนนำเข้าสู่ Transfer Chamber และ Growth Chamber ตามลำดับ ผลึกฐาน GaAs จะถูกติดตั้งบนฐานยึดที่ปรับตำแหน่งได้รอบตัวโดยใช้ Manipulator ได้ฐานยึดจะมี Heater เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ผลึกฐานตามต้องการ ในระหว่างการปลูกผลึก ผลึกฐาน GaAs จะถูกหมุนเพื่อให้ชั้นผลึกที่ปลูกมีความหนาสม่ำเสมอ

ในการปลูกผลึกด้วยเทคนิคลำโมเลกุลนั้นแตกต่างจากการปลูกผลึกจากสถานะของเหลวที่จะ ต้องมีการเตรียมผิวผลึกฐานที่ดีมาก ๆ โดยเฉพาะการกำจัด Native Oxide ให้หมดไปก่อนที่จะเริ่มทำการ ปลูกผลึก วิธีการใช้ในการเตรียมผิวผลึกฐานก่อนปลูกผลึกได้แก่ การเพิ่มอุณหภูมิของ Heater ได้ฐานยึด แผ่นผลึก ให้มีค่าสูงจนชั้น Oxide ที่มีอยู่หลุดออกไปหมด แต่ผิวผลึกฐานจะมีความขรุขระอยู่ จึงจำเป็นต้อง ปลูกชั้นผลึก GaAs เป็นชั้น Buffer ก่อนเสมอ โดยปกติชั้น GaAs Buffer นี้จะหนาประมาณ $0.5\ \mu\text{m}$ เพื่อใช้รองรับชั้นผลึกชนิดและโครงสร้างต่าง ๆ ที่จะออกแบบสร้างต่อไป

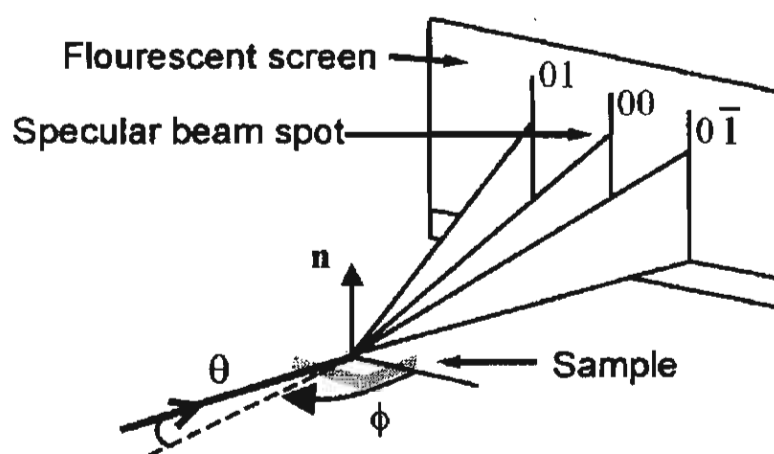
ชั้นผลึกที่ปลูกบน GaAs Buffer Layer ในงานวิจัยนี้มีหลายโครงสร้าง เช่น ในกรณีของโครงสร้างควอนตัมเวลล์ จะสร้างชั้นผลึก GaAs/GaAlAs สลับกัน ในบางกรณีจะปลูกควอนตัมเวลล์แบบผสม (Composite Quantum Wells) โดยใช้ InGaAs/GaAs/GaAlAs ซึ่ง In Content ในชั้นผลึก In GaAs จะมีค่าน้อยเพื่อไม่ให้เกิด Lattice Mismatch โครงสร้างควอนตัมเวลล์แบบผสมนี้จะถูกนำไปใช้ทำโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ได้⁽²³⁾ ส่วนในกรณีของโครงสร้างควอนตัมคือจะสร้างชั้นผลึก InAs/GaAs ซึ่งมี Lattice Mismatch สูง และหากใช้ InGaAs ก็จะกำหนดให้ In Content มีค่าสูงด้วย ทั้งโครงสร้าง ควอนตัมเวลล์ และควอนตัมคือคือนี้อาจมีชั้นผลึก GaAs ปิดทับเป็น Capped Layers ก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์ผล หรือนำไปทำเป็นสิ่งประดิษฐ์เพื่อใช้ในการประเมินด้านประยุกต์ของสิ่งประดิษฐ์ด้าน Nanoelectronics ต่อไป

คุณภาพของชั้นผลึกที่ปลูกให้เป็น Nanostructure เหล่านี้จะต้องดีมี Defects น้อย มีความสม่ำเสมอ มีสัดส่วนของธาตุต่าง ๆ ตามที่ออกแบบไว้ จึงจะนำไปใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้นการวิเคราะห์คุณภาพด้วยเทคนิค RHEED ระหว่างปลูกผลึกการวัด Photoluminescence หลังปลูกผลึก และการศึกษา

Morphology ของผิวผลึกด้วย Atomic Force Microscopy ตลอดจนการดูโครงสร้างชั้นผลึกด้วย Scanning Electron Microscopy ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในตอนต่อ ๆ ไป จึงเป็นส่วนหนึ่งของการวิจัยในโครงการวิจัยนี้ที่มีความสำคัญยิ่ง

4. การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย RHEED

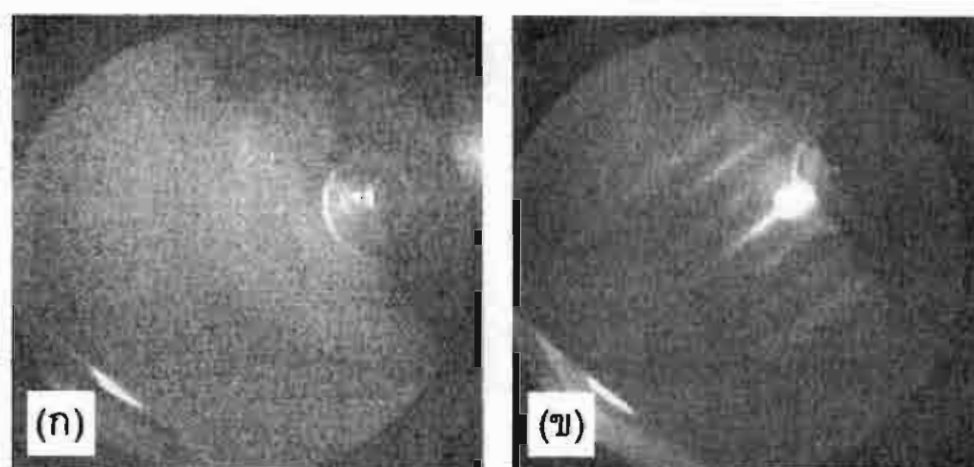
Reflected High Energy Electron Diffraction (RHEED) เป็นวิธีการหนึ่งในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกในขณะที่ปลูกผลึกในเครื่อง MBE ชุด RHEED นี้จะติดตั้งอยู่ภายในเครื่อง MBE ซึ่งประกอบด้วยปืนลำอิเล็กตรอน (Electron Beam Gun) ที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าแรงสูงที่แรงดัน 10-20 KV และจอเรืองแสง (Fluorescent Screen) เพื่อเก็บภาพ RHEED pattern เมื่อลำอิเล็กตรอนถูกยิงกระทบผิวของผลึกที่ปลูกโดยทำมุมรับผิวผลึกประมาณ $1-2^\circ$ และลำอิเล็กตรอนนี้จะสะท้อนและเกิดการสอดแทรกขึ้นตามลักษณะการเรียงตัวของอะตอมบนผิวผลึก ดังแสดงในรูปที่ 12



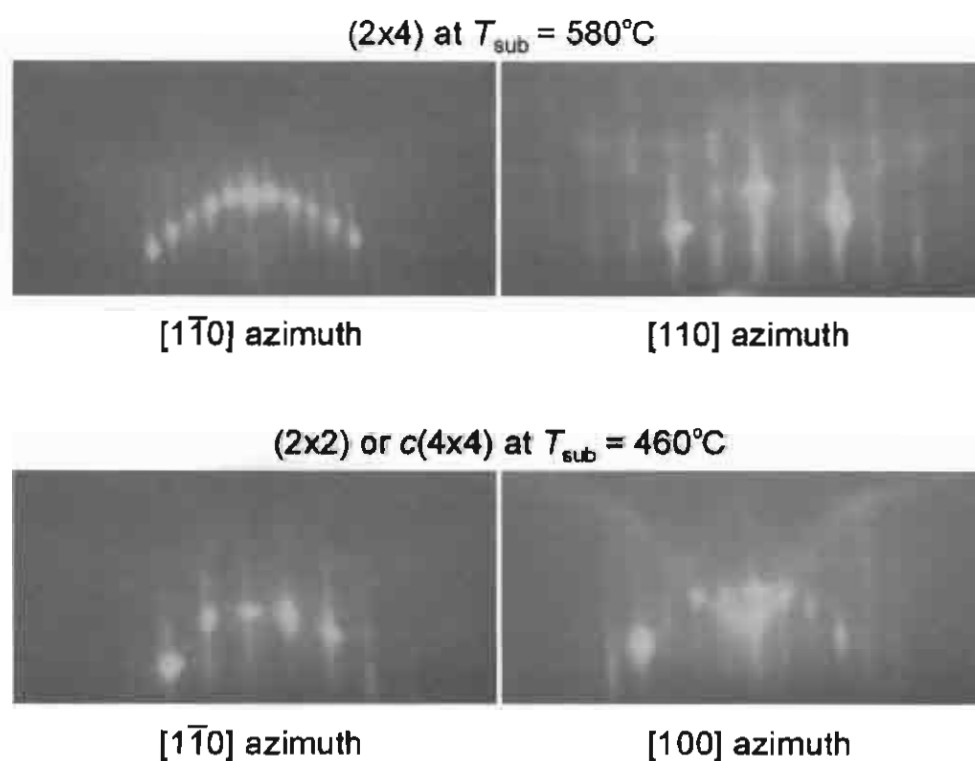
รูปที่ 12 แผนภาพลักษณะทางเรขาคณิตของระบบ RHEED

RHEED patterns จะสามารถบอกถึงสภาพของผิวผลึกทั้งก่อนและขณะปลูกผลึก ทำให้สามารถบอกชนิดของผลึกฐาน อุณหภูมิของผลึกฐาน และใช้เป็นมาตรฐานในการสอบเทียบอุณหภูมิของผิวผลึกได้ด้วย โดยปกติแผ่นผลึกฐานที่ใช้งานจะมีชั้นออกไซด์เกิดขึ้นโดยธรรมชาติ ดังนั้นก่อนการปลูกผลึกจะต้องขจัดผิวออกไซด์ออกให้หมดโดยการ Heating ผลึกฐานภายใต้สุญญากาศ ชั้นออกไซด์ของ GaAs จะระเหยกออกหมดที่อุณหภูมิ 580°C ดังนั้นการตรวจสอบ RHEED patterns ในขณะที่มีชั้นออกไซด์และชั้นออกไซด์ระเหยกออกหมด จึงเป็นวิธีการ Calibration อุณหภูมิที่แท้จริงของตัววัดอุณหภูมิ (Thermocouple) ที่ติดตั้งภายในเครื่อง MBE ได้ดังแสดงตัวอย่างของ RHEED patterns ในรูปที่ 13

เมื่อทำผิวผลึก GaAs ให้สะอาดแล้ว ผิวผลึกจะไม่เรียบ จึงต้องมีการปลูก GaAs Buffer layer ก่อนเสมอ การวิเคราะห์ RHEED patterns ในขณะปลูกชั้น GaAs นี้ จะทำให้เราทราบอุณหภูมิที่แท้จริงของผิวผลึก GaAs ได้เช่นกัน ดังตัวอย่าง RHEED patterns ในรูปที่ 14 ซึ่ง RHEED patterns จะเปลี่ยนจากรูปแบบ (2×4) เป็น (2×2) หรือ $C(4\times 4)$ ที่อุณหภูมิ 500°C

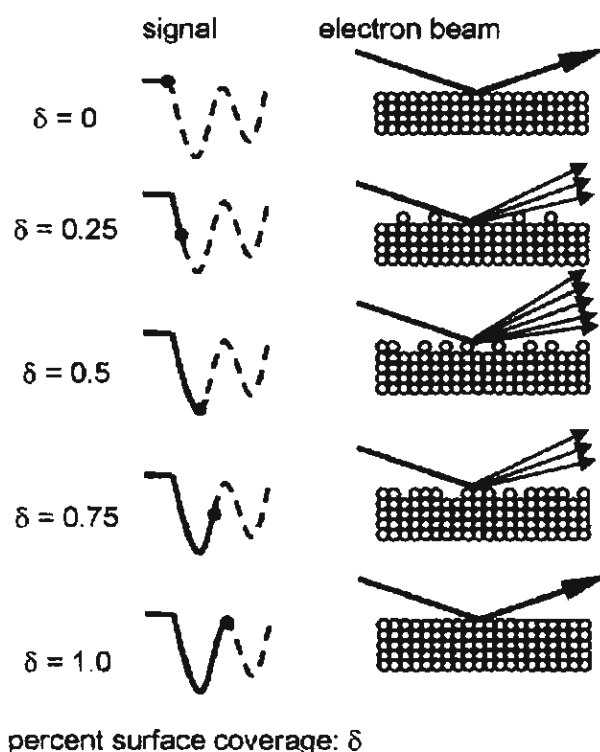


รูปที่ 13 ตัวอย่างภาพรูปแบบ RHEED ในทิศทาง $[1\ 1\ 0]$ (ก) ก่อน และ (ข) หลังการระเหยของชั้นออกไซด์บนผิวหน้าของแผ่นฐาน GaAs



รูปที่ 14 ตัวอย่างภาพรูปแบบ RHEED ชนิด (2×4) ในทิศทาง $[1\ -1\ 0]$ และ $[1\ 1\ 0]$ ของชั้น GaAs บัฟเฟอร์ที่ค่าอุณหภูมิ $580\ ^\circ\text{C}$ (รูปบน) และ รูปแบบ RHEED ชนิด (2×2) หรือ $c(4\times 4)$ ในทิศทาง $[1\ -1\ 0]$ และ $[1\ 0\ 0]$ ของชั้น GaAs บัฟเฟอร์ที่ค่าอุณหภูมิ $460\ ^\circ\text{C}$ (รูปล่าง)

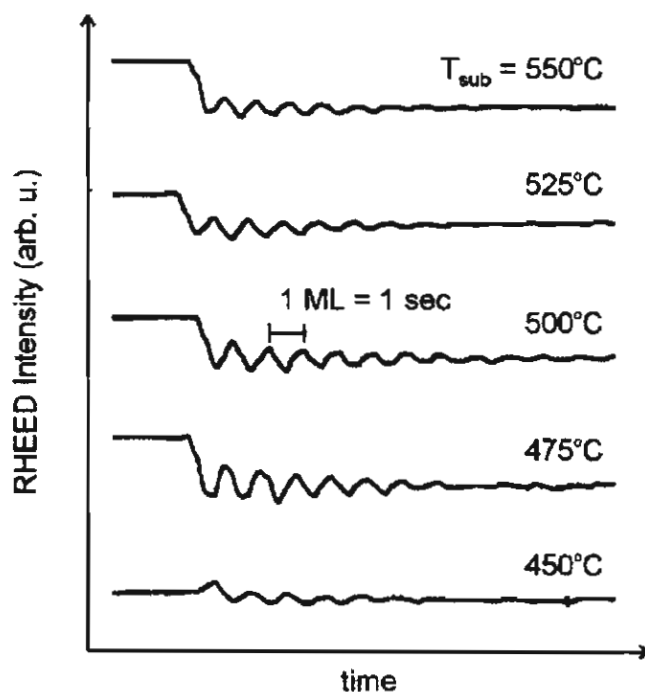
นอกจากการวิเคราะห์ RHEED patterns แล้ว การสังเกตการเปลี่ยนแปลงของ RHEED Intensity ก็ยังทำให้เราทราบค่าความเร็วในการปลูกผลึกได้ด้วย โดยอาศัยหลักการที่ว่าผิวผลึกที่สมบูรณ์เต็มหน้า จะทำให้ RHEED Intensity มีค่าสูงสุด ในขณะที่อะตอมเริ่มเรียงตัวไม่เต็มหน้า RHEED Intensity จะมีค่าลดลง และเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อครบ 1 ชั้นอะตอม เมื่อปลูกชั้นอะตอมหลาย ๆ ชั้น ก็จะเกิด RHEED Intensity Oscillation ขึ้นดังแสดงในรูปที่ 15



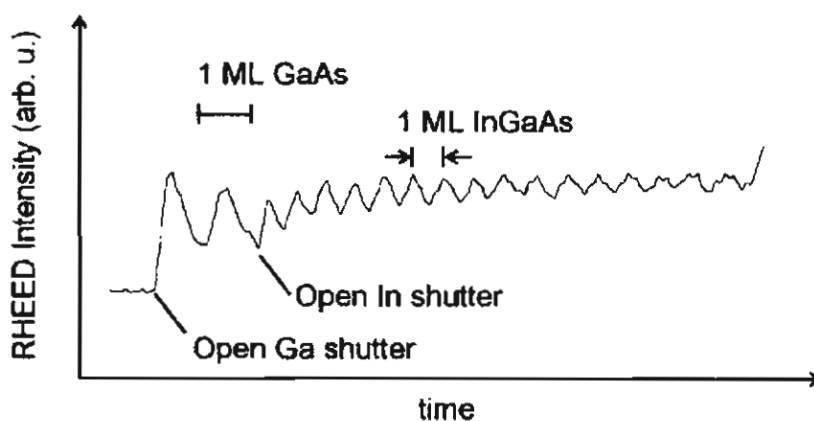
รูปที่ 15 แผนภาพแสดงลักษณะการเกิด RHEED intensity oscillation [8, 14]

นอกจากนี้ RHEED Intensity Oscillation ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของผิวผลึก GaAs ยังมี Characteristics ที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 16 อีกด้วย

ในการปลูกชั้นผลึก InAs บน GaAs นั้น อาจมีปัญหาในการวิเคราะห์ค่าความเร็วในการเกิดชั้นผลึก InAs เพราะ InAs/GaAs มี Lattice Mismatch ดังนั้นชั้นผลึก InAs จะปลูกหนาเกินค่าความหนาวิกฤติไม่ได้ เพราะจะเริ่มเกิดเป็น InAs Quantum Dots ขึ้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จึงมีการ Calibrate ค่าความเร็วในการเกิดชั้นผลึก โดยปลูกชั้นผลึก InGaAs ซึ่งมีความเครียดเนื่องจาก Lattice Mismatch น้อยกว่า แล้วจึงคำนวณหาค่าความเร็วในการปลูกชั้นผลึก InAs ได้ ดังแสดงผลการทดลองดู RHEED Intensity Oscillation ในรูปที่ 17

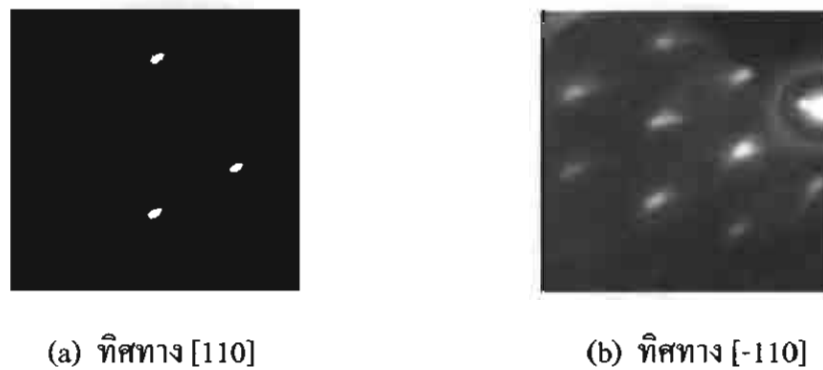


รูปที่ 16 สัญญาณ RHEED intensity oscillation ที่วัดจากจุด specular beam ในระหว่างการปลูกผลึกชั้น GaAs ที่อุณหภูมิแผ่นฐานค่าต่าง ๆ (โดยให้ค่าความเร็วในการปลูกผลึกคงที่ = 1 ML/s)



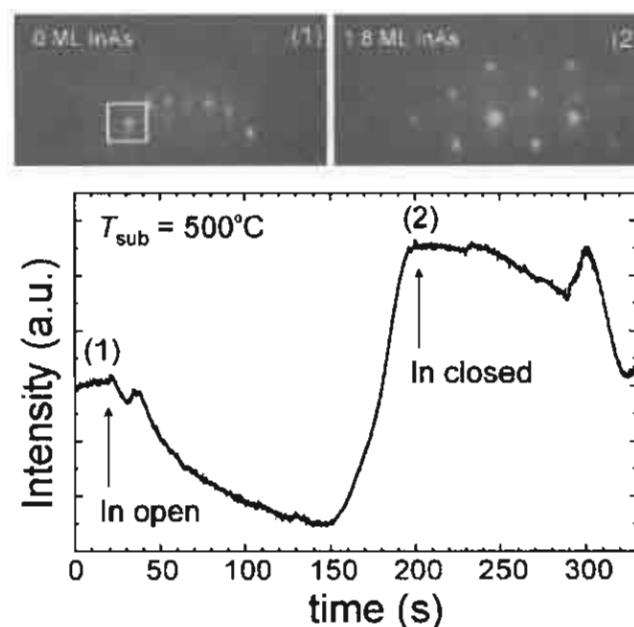
รูปที่ 17 ตัวอย่างการเทียบวัดค่าความเร็วในการปลูกผลึกชั้น InAs โดยการดู RHEED intensity oscillation

เมื่อกำหนดความเร็วในการปลูกชั้นผลึก InAs ได้แล้ว หากชั้นผลึก InAs มีความหนาเกินค่าวิกฤติค่าหนึ่ง ก็จะเกิด InAs Quantum Dots ขึ้น เนื่องจาก Strain Field ที่เกิดจาก Lattice Mismatch RHEED Patterns ของชั้นผลึก InAs ก่อนค่าความหนาวิกฤติ ซึ่งเรียกว่า Wetting Layers และ RHEED Patterns ของ InAs Quantum Dots จะมีความเปลี่ยนแปลงเกิดอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือ RHEED Patterns จะเปลี่ยนจาก Steaky Pattern เป็น Spotty Patterns ดังแสดงในรูปที่ 18



รูปที่ 18 RHEED Patterns ของ QDs ในทิศทางต่าง ๆ

และหากวัดดู RHEED Intensity Oscillation ในขณะที่ปลูกชั้น InAs จนเกิดเป็น InAs Quantum Dots ก็จะสามารถสังเกตความเปลี่ยนแปลงของความเข้มของ RHEED ได้ตามรูปที่ 19

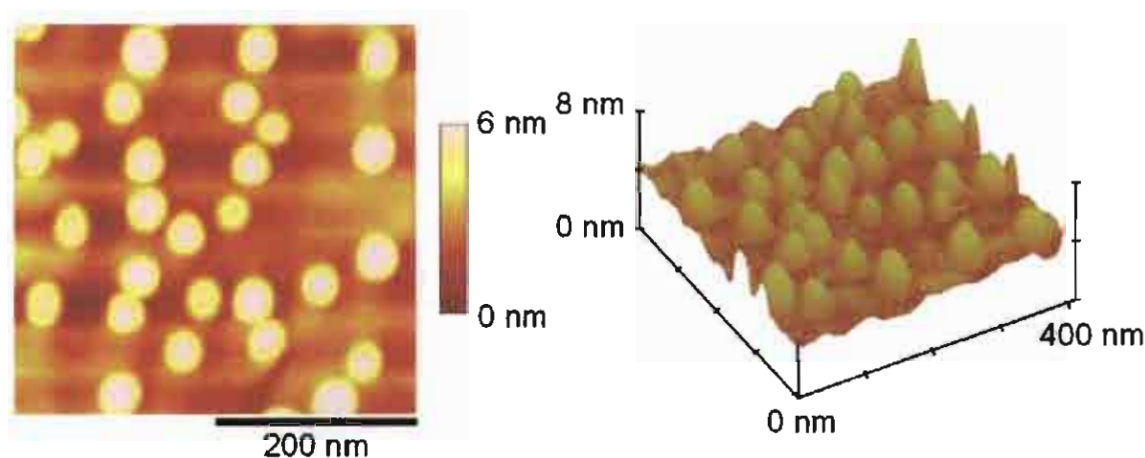


รูปที่ 19 รูปแบบ RHEED ในทิศทาง $[1\ -1\ 0]$ ก่อน และหลังการปลูกชั้น 1.8 ML InAs
 ควอนตัมคือแบบจัดเรียงตัวเอง ที่อุณหภูมิแผ่นฐาน 500°C ภาพล่างแสดง
 ค่าความเข้มของสัญญาณ RHEED ที่วัดจากตำแหน่งในกรอบสีขาว

การตรวจสอบ RHEED Patterns และ RHEED Intensity oscillations จึงเป็นวิธีการที่มีคุณค่าในการวิเคราะห์อุณหภูมิที่แท้จริงของขั้นตอนการปลูกผลึก ชนิดของผลึกที่ปลูก สภาพผิวผลึก อัตราการปลูกผลึก และการเกิดโครงสร้างควอนตัมดอท RHEED จึงเป็นเทคนิคที่เปรียบเสมือนตาเพื่อมองดูสิ่งที่เกิดขึ้นในขณะที่ปลูกผลึกที่มีโครงสร้างแบบ Nanoscale ในเครื่อง MBE ได้

5. การวิเคราะห์โครงสร้างควอนตัมด้วย AFM

RHEED เปรียบเสมือนตาที่เรามองสิ่งที่เกิดขึ้นในกระบวนการปลูกโครงสร้างควอนตัมดังที่กล่าวมาแล้วในตอนที่ 4 แต่ก็เป็นการมองภาพแบบทางอ้อม ต้องอาศัยจินตนาการจากข้อมูลของ RHEED Pattern และ RHEED Intensity Oscillation แต่ Atomic Force Microscopy (AFM) นั้นเป็นเครื่องมือที่เปรียบเสมือนดวงตาที่เรามองโครงสร้างควอนตัมโดยตรง แต่เป็นการตรวจวัดที่ทำภายหลังการปลูกผลึกเสร็จแล้ว ซึ่งเป็นการวัดภายนอก (*ex-situ* measurement) AFM เป็นเทคนิคที่ใช้ตรวจสอบโครงสร้างควอนตัมโดยอาศัยแรงกดและผลึกเชิงอะตอมระหว่างอะตอมที่ AFM tip และอะตอมผิวผลึก จึงมีความละเอียดมากในระดับ Nanoscale ตัวอย่าง AFM Image ของควอนตัมดอทที่แสดงในรูปที่ 20



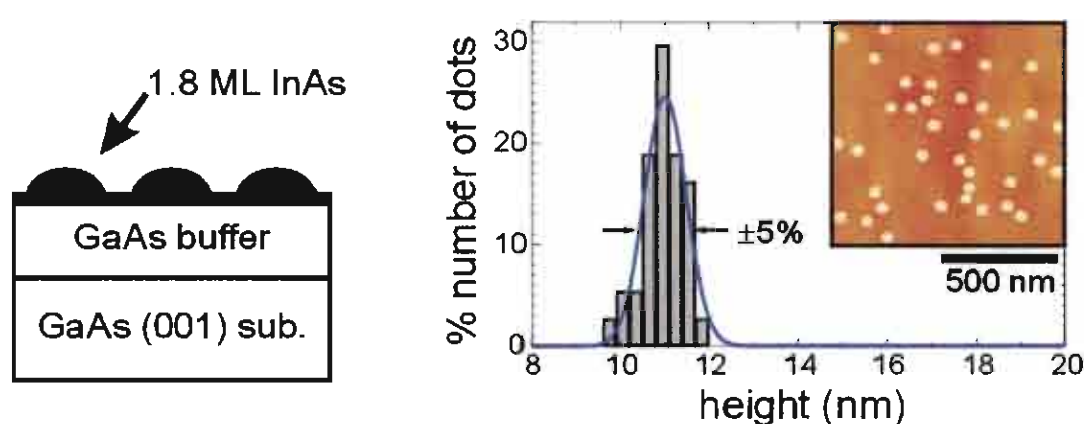
รูปที่ 20 ภาพผลการวัด AFM ขนาด $400 \times 400 \text{ nm}^2$ ของโครงสร้างควอนตัมคือเทคนิคจัดเรียงตัวเองที่ปลูกที่อุณหภูมิแผ่นฐาน 500°C และอัตราเร็วในการปลูกผลึก InAs เท่ากับ 0.1 ML/s

AFM Image จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างควอนตัมคือได้แก่ ความสูง ความกว้างของดอทแต่ละดอท และตำแหน่งตลอดจนความหนาแน่นของดอทต่อหนึ่งตารางพื้นที่ ในงานวิจัยครั้งนี้เราไม่มีเครื่อง AFM ใช้งานเอง จึงจำเป็นต้องส่งตัวอย่างไปวัดที่ต่างประเทศ คือที่ Tokyo Institute of Technology (TIT) และที่ Max Planck Institute Stuttgart ทำให้งานวิจัยมีความล่าช้าและติดขัดบ้าง ขณะนี้กำลังพยายามหางบประมาณวิจัยเพื่อจัดซื้อเครื่อง AFM ไว้ใช้งานเองอยู่

การวัด AFM Image นั้นมีข้อเสียอยู่บางประการคือ ตัวอย่างที่จะนำมาวัด AFM นั้นจะต้องเป็นผิวผลึกที่มีโครงสร้างควอนตัมคือ ดังนั้นเมื่อนำออกมาจากเครื่อง MBE แล้ว จะนำไปปลูกชั้นผลึกต่อในเครื่อง MBE อีกไม่ได้ เพราะผิวผลึกจะเกิด Contaminations มากมาย จึงนำกลับไปที่งานต่อไม่ได้ ตัวอย่างที่จะนำมาใช้วัด AFM จึงเป็นเพียงเพื่อให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างในส่วนที่เป็น Nanostructure เท่านั้น เพราะโครงสร้างควอนตัมที่นำไปใช้งานเป็นสิ่งประดิษฐ์ได้นั้น จะต้องมีการปลูกชั้นผลึกกลับ

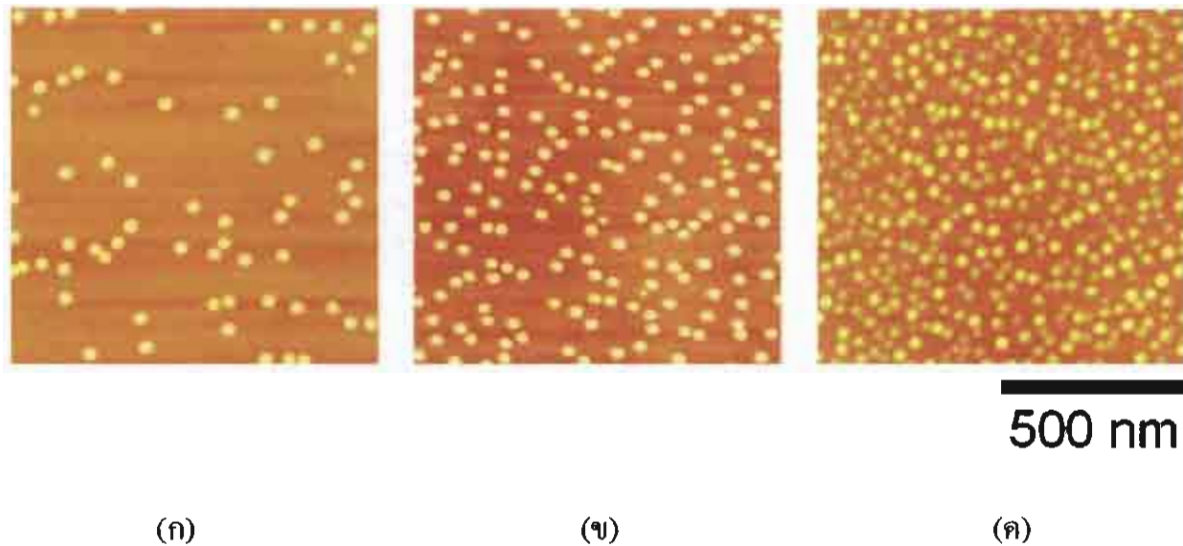
โครงสร้างควอนตัมดอทไว้เสมอ เช่น เมื่อมีการปลูก InAs QDs แล้วจะมีการปลูกชั้น GaAs เป็น Capped Layers เสมอ การปลูกชั้นเปลือก GaAs ปิดทับ InAs QDs ก็อาจทำให้โครงสร้างควอนตัมดอทที่มีอยู่ในสิ่งประดิษฐ์มีขนาดและโครงสร้างเปลี่ยนไปจากที่ตรวจวัดด้วย AFM ได้ด้วย

รูปที่ 21 เป็นตัวอย่างโครงสร้างของชิ้นงานที่ใช้วัด AFM Image และมีข้อมูลเกี่ยวกับการกระจายค่าความสูงของควอนตัมดอทที่ปลูก ตลอดจนจำนวนความหนาแน่นของควอนตัมดอทในหนึ่งตารางพื้นที่ จะเห็นได้ว่า เทคนิคการปลูก Self-Assembled Quantum Dots ด้วย MBE Technology นั้นมีความไม่สม่ำเสมอไม่คั่น ซึ่งจะมีผลต่อการนำไปประยุกต์เป็นสิ่งประดิษฐ์ด้าน Nanoelectronics ทั้งทางด้านบวกและด้านลบ เช่น การมี Broad Spectrum เนื่องจากดอทมีขนาดไม่เท่ากัน อาจมีประโยชน์เมื่อใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์ แต่จะกลายเป็นปัญหาของเลเซอร์ ซึ่งต้องการ Emission Spectrum ที่แคบ



รูปที่ 21 (ก) ลักษณะโครงสร้างของชิ้นงานสำหรับการวัด AFM และ (ข) ตัวอย่างผลการวัด AFM บนพื้นที่ขนาด $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ และ ผลการวิเคราะห์การกระจายเชิงความสูงของควอนตัมดอทที่วัดได้

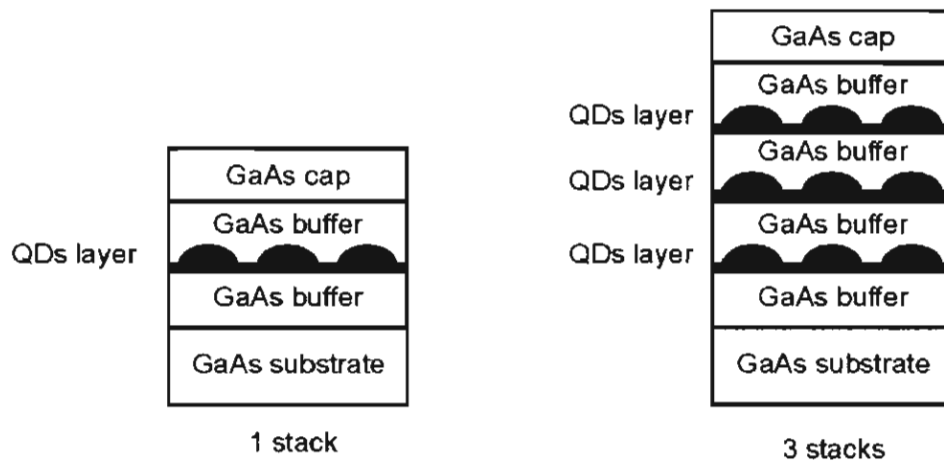
การสร้างโครงสร้างควอนตัมดอทนั้น เราควรสามารถควบคุมขนาดของควอนตัมดอท ให้มีค่าตามต้องการ เพราะขนาดของควอนตัมดอทจะเป็นตัวกำหนดระดับของ Quantized States ในควอนตัมดอท ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติทางแสง เช่น การเปล่งแสงและการดูดกลืนแสง ดังนั้น AFM Images จึงเป็นเครื่องมือในการตรวจสอบขนาดของควอนตัมดอทว่ามีส่วนสัมพันธ์กับเงื่อนไขในการปลูกควอนตัมดอทอย่างไร เช่น อุณหภูมิของแผ่นผลึกฐาน อัตราการปลูก InAs การทำ Growth Interruption ฯลฯ รูปที่ 22 เป็นตัวอย่างของ AFM Image ของควอนตัมดอทที่ปลูกที่อุณหภูมิเดียวกัน แต่มีอัตราการปลูก InAs ที่ต่าง ๆ กัน (0.2/0.05/0.01 ML/s) ทำให้ได้ควอนตัมดอทที่มีขนาดใหญ่เล็กไม่เท่ากัน และความหนาแน่นของดอต่อหนึ่งตารางพื้นที่ไม่เท่ากันด้วย ควอนตัมดอทจะมีขนาดใหญ่ และความหนาแน่นต่ำที่อัตราการปลูก InAs ที่ช้าแต่จะมีขนาดเล็กและความหนาแน่นสูงที่อัตราการปลูก InAs ที่เร็ว



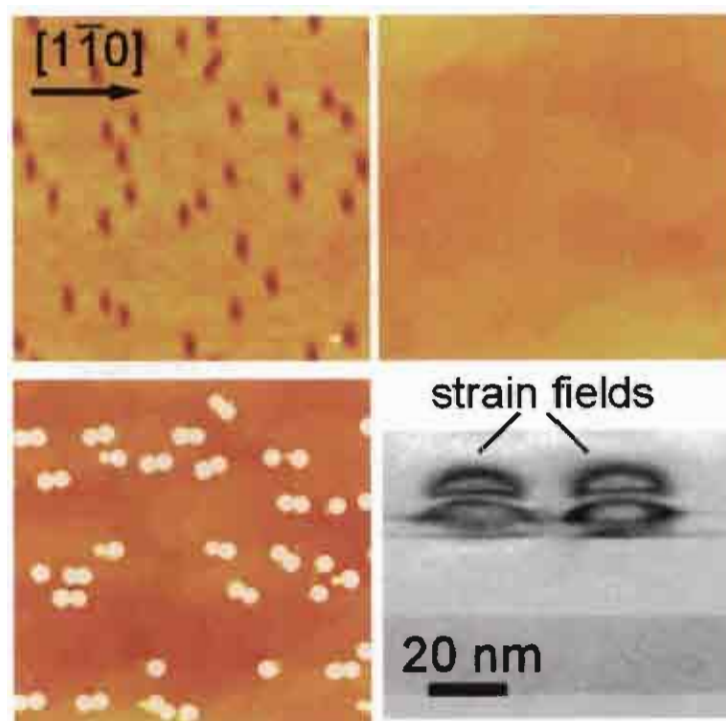
รูปที่ 22 InAs ควอนตัมดอตใน GaAs ที่ใช้อัตราเร็วในการปลูกผลึก InAs เท่ากับ (ก) 0.01 ML/s (ข) 0.05 ML/s และ (ค) 0.2 ML/s โดยภาพ AFM แสดงลักษณะดอตที่เกิดขึ้นบนผิวหน้า GaAs

การปลูกควอนตัมดอตนั้น นอกจากปลูกเป็น Single Stack แล้วอาจจะทำเป็น Multi-stacked QDs ตามโครงสร้างที่แสดงในรูปที่ 23 และจะพบว่า ควอนตัมดอตที่ปลูกทับชั้นแรก ๆ จะมีลักษณะการ Alignment ในแนวตั้ง เนื่องจาก Strain Fields ที่เกิดขึ้นในบริเวณที่มีควอนตัมดอต แม้จะมีการปลูกชั้น GaAs Barrier Layers คั่นไว้ก็ตาม ลักษณะโครงสร้างของ Multi-stacked QDs จึงเป็น InAs/GaAs Matrix และมีประโยชน์ในการนำไปทำโครงสร้างที่ต้องการชั้น Active ที่มี Volume มาก เช่น เป็นชั้น Absorber ของเซลล์แสงอาทิตย์ หรือตัวตรวจวัดแสง

ในการปลูกชั้น GaAs Barrier Layers ที่มีความบางมาก ๆ บริเวณที่มีควอนตัมดอตจะมี Strain field อยู่ ทำให้ชั้นผลึก GaAs ไม่เรียบหากไม่ปลูกให้หนาถึงค่าที่เหมาะสมค่าหนึ่ง แต่การที่มีลักษณะพื้นผิวดังกล่าว อาจเป็นเงื่อนไขในการปลูกควอนตัมดอตที่เป็นดอตแฝด (Twin QDs) หรือดอตแฝดสี่ (Quadruple QDs) ได้ ดังแสดงตัวอย่างของ AFM Image ในรูปที่ 24 การศึกษาการสร้างควอนตัมดอตที่เป็นคู่หรือมากกว่า 2 ดอตในจุดหนึ่ง จึงเป็นหัวข้อวิจัยที่น่าสนใจ และอยู่ในทิศทางการทำวิจัยในอนาคต โดยใช้เทคนิค In-Situ Etching ภายในเครื่อง MBE⁽³⁰⁾



รูปที่ 23 แสดงถึงโครงสร้างของตัวอย่างที่มี QDs แบบ 1 และ 3 ชั้น ตามลำดับ

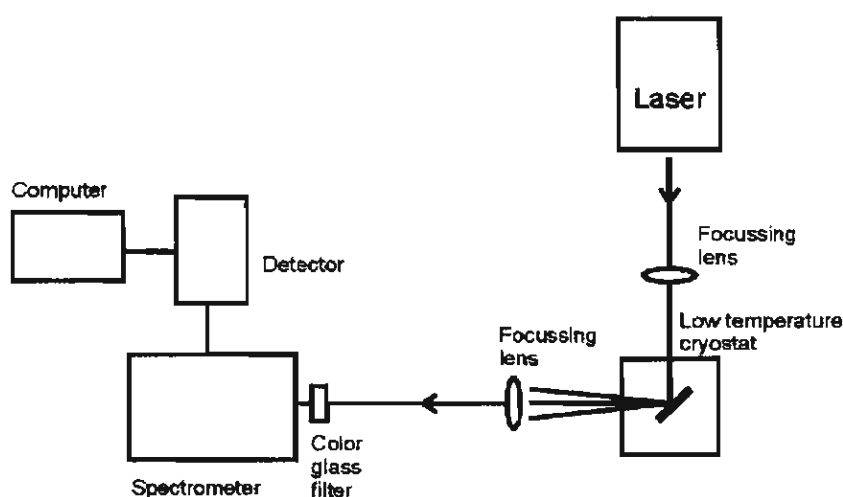


รูปที่ 24 รูป AFM ของควอนตัมดอตที่จับคู่ หรือเกิดเป็นชุด

Twin QDs หรือ Quadruplets QDs นี้จะมีประโยชน์ในการทำ Quantum Bits (Qubit) เพื่อใช้งานสำหรับ Quantum Computing ในอนาคต

6. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางโครงสร้างควอนตัมด้วย Photoluminescence

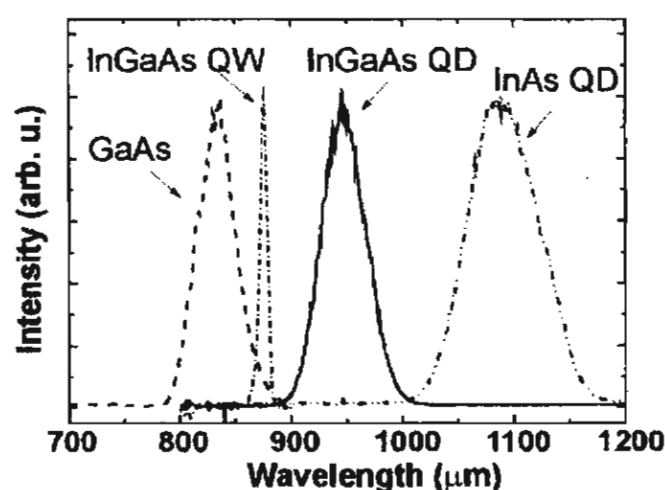
โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence) เป็นเทคนิคหนึ่งในการวิเคราะห์คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำแบบไม่ทำลาย (Non-destructive) ทั้งที่มีโครงสร้างเป็นแบบก้อน (Bulk) หรือโครงสร้างควอนตัม โดยใช้เลเซอร์ที่มีพลังงานโฟตอนสูงหรือมีค่าความยาวคลื่นสั้น เป็นแหล่งกระตุ้น (Excitation Source) ในการทดลองนี้ใช้เลเซอร์อาร์กอนที่มีแสงสีฟ้า ค่าความยาวคลื่น 4880 Å ฉายลงบนตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ เพื่อให้เกิดการเรืองแสง ที่ค่าความยาวคลื่นที่ยาวกว่า เช่น ในช่วงแสงสีแดง และแสงอินฟราเรด แล้วแต่ชนิดของสารกึ่งตัวนำและโครงสร้างของตัวอย่าง การวัดการเรืองแสงจากตัวอย่างนี้อาจกระทำที่อุณหภูมิต่ำได้ หากตัวอย่างชิ้นงานถูกนำไปติดตั้งใน Cryostat ที่หล่อเย็นด้วยไนโตรเจนเหลว (77 °K) หรือฮีเลียมเหลว (9-10 °K) การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิต่ำนี้จะทำให้เราสามารถศึกษารายละเอียดของโครงสร้างได้ เพราะระดับพลังงานในโครงสร้างจะถูกกำหนดให้มีค่าที่แคบ และ confined ในตำแหน่งที่ชัดเจน สเปกตรัมที่วัดได้จึงมีรายละเอียดที่สะท้อนให้เห็น Fine Structure ได้ หากการวัดกระทำที่อุณหภูมิสูง เช่น ที่อุณหภูมิห้อง ความเข้มของการเรืองแสงจะลดลง และมีสเปกตรัมที่กว้างขึ้น เนื่องจากการกระจายของระดับพลังงานในโครงสร้าง เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิ แสงที่เรืองจากตัวอย่าง จะถูกรวบรวมด้วยเลนส์ที่มีความยาวโฟกัสที่มีระยะโฟกัสเท่ากับ Optical Path ของ Monochromator ที่ใช้ในการวิเคราะห์สเปกตรัม แสงที่ผ่าน Monochromator จะถูกตรวจจับด้วย Detector ที่มี Sensitivity สูง ในการทดลองนี้ใช้ Ge Detector ที่ทำงานที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว และเพื่อให้การวัดกระทำได้ที่ค่าความเข้มแสงต่ำมาก ๆ จะมีการใช้ Chopper เพื่อตัดแสงให้เป็นห้วง ๆ ที่ความถี่ที่คงที่ (100~200 Hz) สัญญาณไฟฟ้าที่ตัวตรวจจับแสงวัดได้จะถูกส่งเข้าไปใน Lock-in Amplifier เพื่อขยายสัญญาณ แล้วจึงส่งต่อไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผลบนหน้าจอ ระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ในการทดลองจะมีแสดงดังรูปที่ 25



รูปที่ 25 ชุดวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์เพื่อใช้วิเคราะห์คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำที่สามารถเรืองแสงได้

เมื่อแสงเลเซอร์ที่มีค่าความยาวคลื่นสั้นตกกระทบบสารกึ่งตัวนำ คู่อิเล็กตรอน-โฮลจะถูกสร้างขึ้น ทำให้เกิดสถานะไม่สมดุลยอุณหภูมิขึ้น พาหะนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นของแสงเลเซอร์จะ Relax เข้าสู่ระดับพลังงานต่าง ๆ ที่มีอยู่ในโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำ เช่น กรณีของ Bulk Semiconductor ระดับพลังงานที่มีเสถียรภาพ ได้แก่ ค่าต่ำสุดของ Conduction Band และค่าสูงสุดของ Valence Band ซึ่งเป็น Band Edge ที่เป็นตัวกำหนดค่า Bandgap ของสารกึ่งตัวนำนั้นเอง หลังจากการ Relaxation อิเล็กตรอนและโฮลจะรวมตัวกันและปลดปล่อยพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับ Bandgap ของสารกึ่งตัวนำ ออกมา ดังนั้นการเรืองแสงจากการกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์นี้จึงให้ข้อมูลเกี่ยวกับ Bandgap และระดับพลังงานต่าง ๆ เช่น Localized Energy States ทั้ง Impurity Levels/Trap Levels/Excitons ฯลฯ ได้ ในทำนองเดียวกัน การทดลอง Photoluminescence กับสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างควอนตัมไม่ว่าจะเป็น ควอนตัมเวลล์ ควอนตัมไวร์ คอนดัคตีดอต ซึ่งพลังงานของอิเล็กตรอน และโฮลจะเป็นแบบ Quantized Energy States สเปกตรัมของการเรืองแสงจึงให้ข้อมูลเกี่ยวกับ Quantizations ของโครงสร้างควอนตัม และยังสะท้อนให้เห็นถึงระดับพลังงานต่าง ๆ ทั้ง Ground States และ Excited States ในโครงสร้างควอนตัม และลักษณะการกระจายตัวของ Quantized States ที่สามารถบอกให้ทราบถึงความสม่ำเสมอของโครงสร้างควอนตัม เช่น ถ้าเป็นควอนตัมเวลล์จะหมายถึง ความหนาที่คงที่ของควอนตัมเวลล์ ถ้าเป็นควอนตัมดอตจะหมายถึงความสม่ำเสมอของขนาดของดอต และความหนาแน่นของดอต

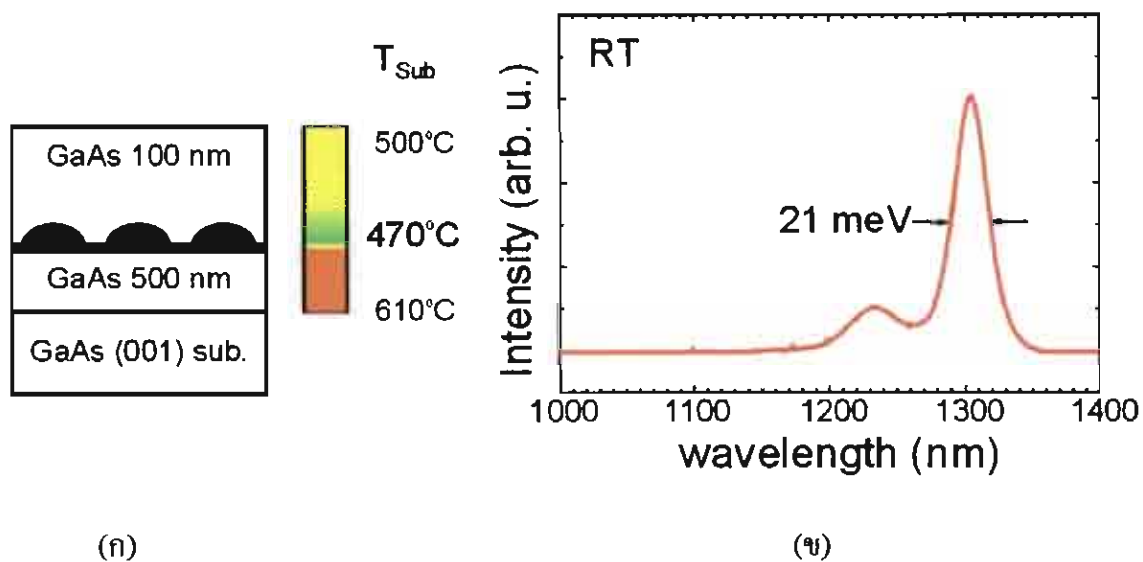
รูปที่ 26 เป็นผลการทดลองที่แสดงสเปกตรัมของโฟโตลูมิเนสเซนซ์จาก Bulk GaAs เทียบกับ InGaAs QW/InGaAs QD และ InAs QD Peak ที่ 850 nm เกิดขึ้น จากค่า Bandgap ของ GaAs ซึ่งมีค่า 1.46 eV ที่อุณหภูมิ 77 K ส่วน Peaks ที่เกิดจากโครงสร้างควอนตัมทั้งหลายจะมีค่าพลังงานโฟตอนที่น้อยลง (มีค่าความยาวคลื่นที่ยาวขึ้น) เนื่องจาก Quantized Energy States ในโครงสร้างควอนตัมมี



รูปที่ 26 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 77 K ของโครงสร้าง bulk GaAs $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ 3 nm ควอนตัมเวลล์ $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{GaAs}$ ควอนตัมดอต และ InAs/GaAs ควอนตัมดอต

ค่าระดับพลังงานที่ต่ำกว่า Band Edge ของ Bulk GaAs ในกรณีของควอนตัมเวลล์ สเปกตรัมของโฟโตลูมิเนสเซนซ์จะแคบมาก แสดงให้เห็นว่า Quantized Energy States ในควอนตัมเวลล์มีค่าเฉพาะเป็น Discrete Energy ตามการกระจายแบบขั้นบันได ในขณะที่ควอนตัมดอททั้งที่ทำจาก InGaAs และ InAs ต่างมีสเปกตรัมที่กว้างกว่า ซึ่งไม่สอดคล้องกับทฤษฎี ทั้งนี้เนื่องจากควอนตัมดอทที่ใช้ทดสอบนี้เป็น Self-Assembled Quantum Dots จึงมีขนาดดอทที่ไม่คงที่ แต่จะมีขนาดคือกระจายตัวแบบ Gaussian จึงเป็นสาเหตุให้ สเปกตรัมมีการกระจายตัวที่กว้างกว่าการเรืองแสงจาก QD เดียว ๆ

การเรืองแสงโคหวิธิ Photoluminescence นั้นนอกจากจะให้ข้อมูลในเชิงฟิสิกส์เกี่ยวกับ Band Structure/Quantized Energy States/Localized Energy States ฯลฯ แล้ว ความแรงของสัญญาณ Photoluminescence ยังบอกถึงคุณภาพผลึกที่มี Defects มากหรือน้อยได้ ดังนั้นผลการวัด Photoluminescence จึงใช้ประเมินวิธีการปลูกผลึกที่เงื่อนไขต่าง ๆ ว่าจะได้คุณภาพผลึกที่ดีเพียงใด ปกติการใช้ผล Photoluminescence เพื่อใช้ประเมินคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของผลึกนั้นมักเป็นผลการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ๆ เช่น ที่ 77°K (ไนโตรเจนเหลว) หรือที่ $4.2\text{--}10^{\circ}\text{K}$ (ฮีเลียมเหลว) ซึ่งจะทำให้สเปกตรัมที่ได้มีรายละเอียดของ Peaks ต่าง ๆ ที่สะท้อนให้เห็นข้อมูลทางฟิสิกส์ได้ชัดเจน แต่ผลการวัด Photoluminescence ที่อุณหภูมิห้อง นอกจากจะแสดงให้เห็นความสามารถการเรืองแสงที่อุณหภูมิสูงแล้ว ยังแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่ใช้ทดลองนั้นสามารถนำมาประยุกต์เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้งานจริงได้ เช่น กรณีของ Laser Diodes ซึ่งปกติจะใช้งานที่อุณหภูมิห้อง และ Photoluminescence Peaks ที่อุณหภูมิห้องยังบอกถึงค่าความยาวคลื่นของแสงที่ Laser Diodes จะสามารถเปล่งแสงได้ในขณะที่ใช้งานจริง การปรับเปลี่ยนโครงสร้างโดยการปรับแต่งส่วนผสมของสารประกอบกึ่งตัวนำ กระบวนการปลูกผลึกที่ใช้เงื่อนไขต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิของแผ่นผลึกฐาน อัตราความเร็วในการปลูกผลึก ฯลฯ จะสามารถทำให้เราออกแบบโครงสร้างควอนตัมที่ให้ค่าความยาวคลื่นในการเรืองแสงที่ค่าที่กำหนดได้ เช่น 1.3 หรือ 1.55 ไมครอน ซึ่งเป็นค่าความยาวคลื่นที่ใช้กับ Fibre Communication เนื่องจากแสงที่ค่าความยาวคลื่นดังกล่าว มี Dispersion และ Loss ต่ำในสาย Fibre รูปที่ 27 แสดงตัวอย่างการปลูกโครงสร้างควอนตัมดอทที่ทำจาก InAs ที่ให้แสงเปล่งออกมาที่ 1.3 ไมครอน ที่อุณหภูมิห้อง

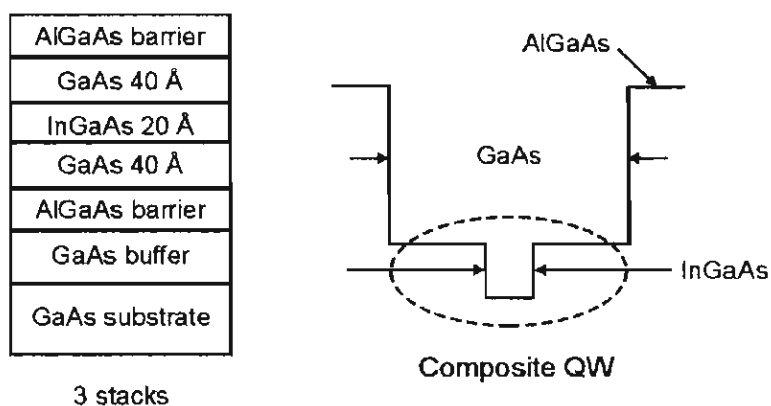


รูปที่ 27 (ก) โครงสร้างควอนตัมดอท และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกชั้นต่าง ๆ และ (ข) ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ที่อุณหภูมิห้องของควอนตัมดอทที่มีปลูกกลับที่อุณหภูมิห้อง โดยอัตราเร็วในการปลูกชั้นควอนตัมดอทคือ 0.01 ML/s และมีการขัดจังหวะในระหว่างปลูก 30 วินาที

7. ผลการทดลอง และบทวิจารณ์

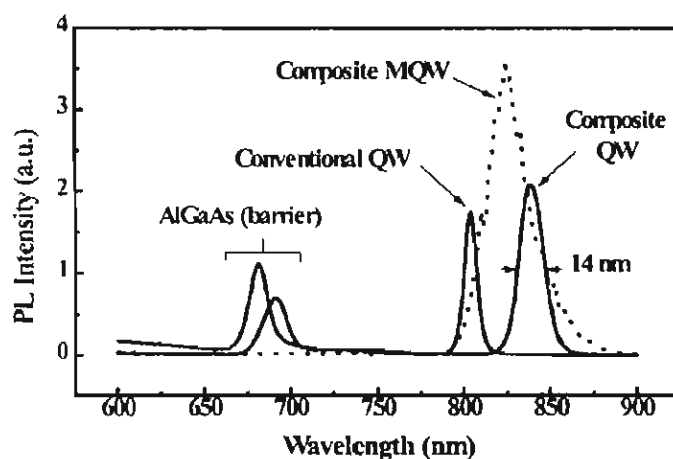
โครงสร้างควอนตัมเวลล์ (QW)

ในงานวิจัยช่วงแรกจะมีการศึกษาโครงสร้างควอนตัมเวลล์ (QW) โดยใช้ AlGaAs/GaAs ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มี Lattice Matching จึงสามารถสร้างโครงสร้างควอนตัมเวลล์ที่มีคุณภาพดีปราศจากจุดบกพร่องด้วยเทคนิค MBE จากนั้นจึงมีการสร้างโครงสร้างควอนตัมเวลล์ด้วย GaAs/InGaAs แล้วจึงนำโครงสร้างทั้งสองมาผสมผสานกันเป็น Composite MQW structure ดังโครงสร้างที่แสดงในรูปที่ 28



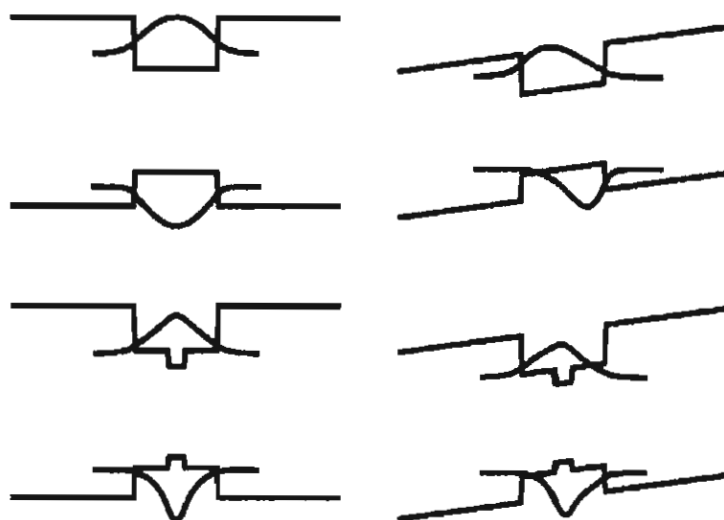
รูปที่ 28 การออกแบบโครงสร้าง Composite Quantum Well ที่ทำจาก AlGaAs/GaAs/InGaAs

จากนั้นจึงนำโครงสร้างดังกล่าวมาวัด Photoluminescence เพื่อดูความสามารถการเปล่งแสงที่สะท้อนให้เห็นถึง Optical Properties ของโครงสร้างฯ ดังแสดงในรูปที่ 29 ซึ่งจะเห็นการเปรียบเทียบ PL Spectral ของ Composite MQW Structure กับ Conventional QW และ Composite SQW ซึ่งมีความกว้างมากกว่า



รูปที่ 29 สเปกตรัมของโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่วัดจาก Conventional QW และ Composite SQW เทียบกับของ Composite MQW

จากข้อมูลเบื้องต้นในการทดลองจึงได้นำเสนอแนวคิดการใช้ Composite MQW Structure เพื่อประยุกต์ด้าน Photovoltaics โดยอาศัยหลักการทางทฤษฎีควอนตัมแมคานิกส์ที่ว่า Wave Function ของอิเล็กตรอนในโครงสร้างควอนตัมเวลล์ปกติจะเกิดบิดเบี้ยว (Distortion) เมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้า ซึ่งในกรณีของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นสนามไฟฟ้าจะเกิดจากแรงขับเคลื่อนด้วยแสง (Photovoltage) ซึ่งเป็นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในหัวต่อของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้น Wave Function ของอิเล็กตรอนและของโฮลจะอยู่ในตำแหน่งที่ไม่ตรงกัน ทำให้ Transition Probability ในการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับโฮลมีค่าลดลงได้ แต่เมื่อนำเอาโครงสร้างควอนตัมเวลล์แบบ Composite มาทำเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ การบิดเบี้ยวของ Wave Function จะลดน้อยลง ทำให้โอกาสการรวมตัวของอิเล็กตรอน-โฮลมีมากขึ้น ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น แนวคิดดังกล่าวมีแสดงดังรูปที่ 30 และนำเสนอเป็นบทความที่รับการตีพิมพ์ในวารสาร Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 68 (2001) pp. 89-95⁽²³⁾

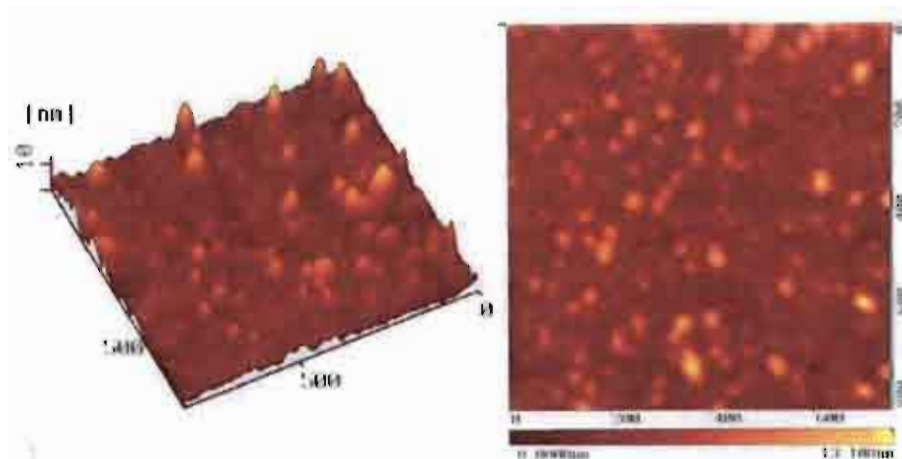


รูปที่ 30 แสดงค่า Probability density $|\psi|^2$ ของโครงสร้างควอนตัมเวลล์แบบ Conventional และแบบ Composite เมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าและมีสนามไฟฟ้า 100 KV/cm ตามลำดับ

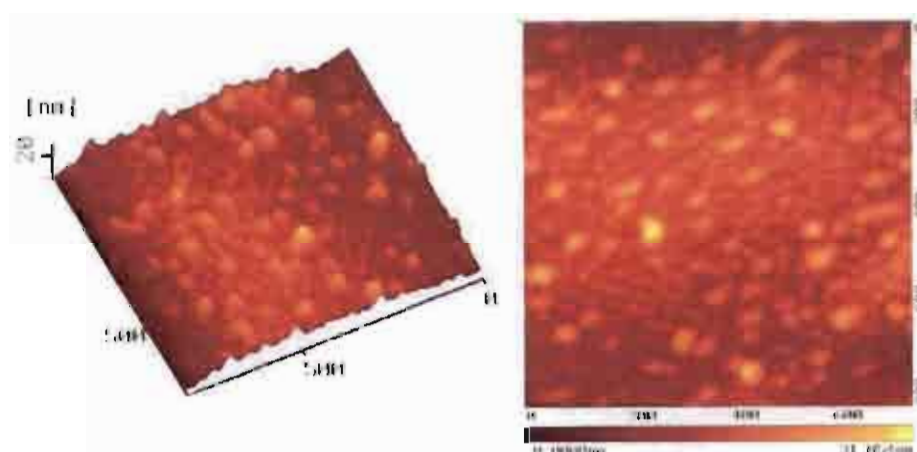
โครงสร้างควอนตัมดอต (QD)

คณะผู้วิจัยได้เริ่มต้นศึกษาวิจัยโครงสร้างควอนตัมดอตโดยอาศัยการปลูกสารประกอบกึ่งตัวนำ InAs ที่มีค่า Lattice Mismatch กับ GaAs ถึง 7 % ทำให้ชั้นผลึก InAs สามารถก่อตัวเป็นควอนตัมดอตได้เอง (Self-Assembled Quantum Dots) เนื่องจากการมีแรงเครียด (Strain) ในโครงสร้าง การปลดปล่อยแรงเครียดโดยเกิดเป็นควอนตัมดอตนี้มีผลดี ทำให้โครงสร้างควอนตัมดอตไม่มีจุดบกพร่องทางผลึก ส่งผลให้ควอนตัมดอตมีคุณภาพผลึกที่ดี มีคุณสมบัติไฟฟ้าและแสงที่ดี จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้ในด้าน Nanoelectronics/Optoelectronics/Lasers/Solar Cells ฯลฯ

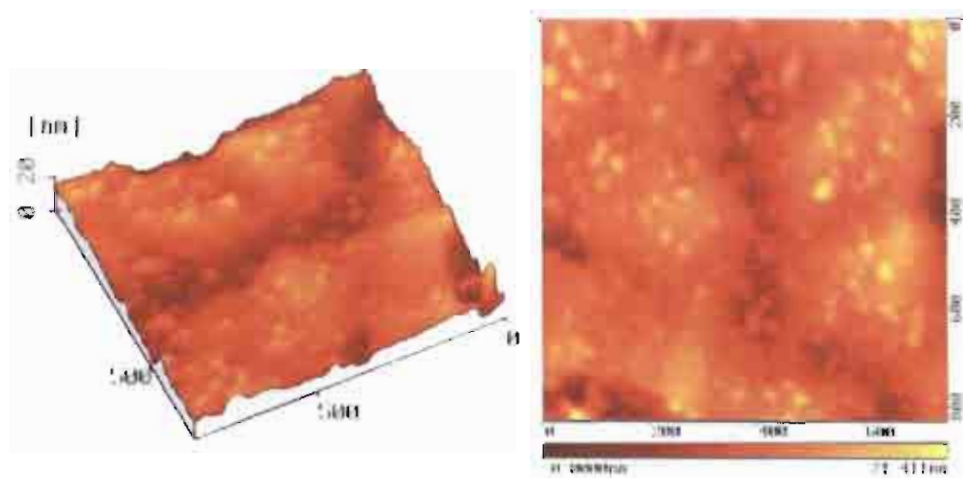
ในการวิจัยโครงสร้างควอนตัมดอทในระยะต้น ๆ นั้น ผู้วิจัยต้องศึกษาหาข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับเงื่อนไขการปลูกควอนตัมดอทด้วยเครื่อง MBE ซึ่งมีตัวแปรมากมาย ไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐาน อุณหภูมิของแหล่งกำเนิดสาร เวลาในการปิดเปิดชัตเตอร์ของ Effusion Cells ตัวละตัว อัตราความเร็วในการปลูกผลึก ฯลฯ ซึ่งมีข้อมูลทางเทคนิคมากมาย ในรายงานนี้จะนำเสนอผลการทดลองที่เป็น Typical results ที่แสดงให้เห็นวิวัฒนาการของงานวิจัยที่ก้าวหน้าไปตามลำดับ โดยสามารถควบคุมกระบวนการปลูกผลึกให้ได้โครงสร้างควอนตัมดอทที่มีคุณภาพดี และ reproducible ดังแสดงในรูป AFM ที่ 31 32 และ 33 ตามลำดับ



รูปที่ 31 AFM ของ QDs ที่ปลูกที่อุณหภูมิ 450 °C



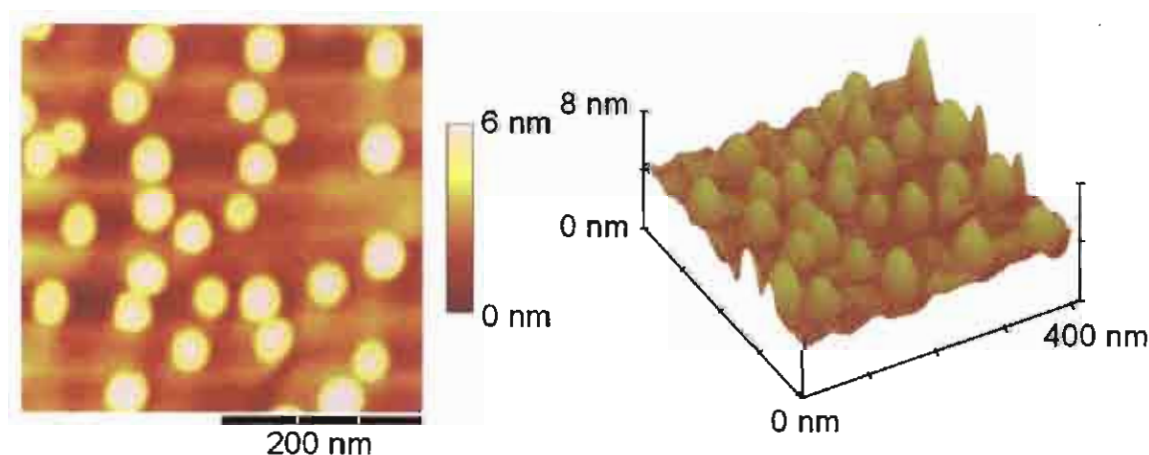
รูปที่ 32 AFM ของ QDs ที่ปลูกที่อุณหภูมิ 550 °C



รูปที่ 33 AFM ของ QDs ที่ปลูกที่อุณหภูมิ 500 °C

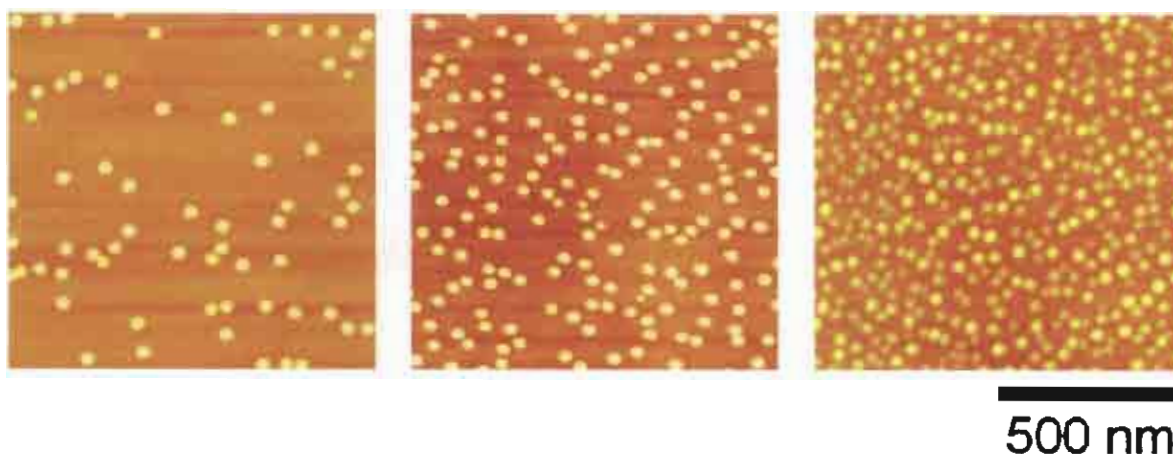
จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า อุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานมีส่วนสำคัญต่อการเกิดโครงสร้างควอนตัมดอท เพราะจะได้ดอทเล็ก-ใหญ่ และความหนาแน่นของดอทที่ต่างกัน จากรูปที่ 33 จะเห็นว่าควอนตัมดอทมีขนาดความสูงประมาณ 5-10 nm และมีฐานกว้างประมาณ 30-40 nm

ด้วยความร่วมมือวิจัยกับ Max Planck Institute ที่ Stuttgart คณะวิจัยได้ส่งทีมงานไปเรียนรู้ Know-hows ในการปลูกควอนตัมดอทเพื่อพัฒนาคุณภาพของควอนตัมดอทที่ปลูกได้ โดยหาเงื่อนไขอุณหภูมิในการปลูกที่ถูกต้องชัดเจนขึ้น โดยการวิเคราะห์ผลจากการเปลี่ยนแปลงของ RHEED Pattern เพื่อการ Calibrate อุณหภูมิในการปลูกโครงสร้างควอนตัมดอท ตลอดจนการเลือกใช้อัตราความเร็วในการปลูกควอนตัมดอทที่เหมาะสม เพื่อให้ได้คุณสมบัติทางไฟฟ้า-แสงที่ต้องการ



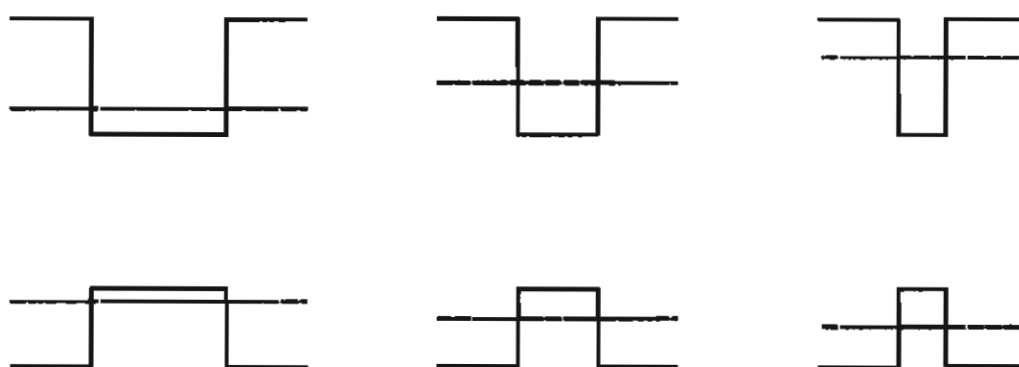
รูปที่ 34 AFM ของ QDs ที่ปลูกที่อุณหภูมิ 500 °C และอัตราเร็วในการปลูกผลึก InAs เท่ากับ 0.1 ML/s

รูปที่ 34 แสดงให้เห็นว่า ควอนตัมดอทที่ปลูกได้มีขนาดที่สม่ำเสมอขึ้น กล่าวคือ มีความสูงประมาณ 4 nm และฐานกว้างประมาณ 40 nm เมื่อมีการกำหนดอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานให้คงที่ และปรับเปลี่ยนความเร็วในการปลูกให้ช้าลง ควอนตัมดอทจะมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่จะมีความหนาแน่นของด็อตน้อยลง ดังแสดงในรูป 35



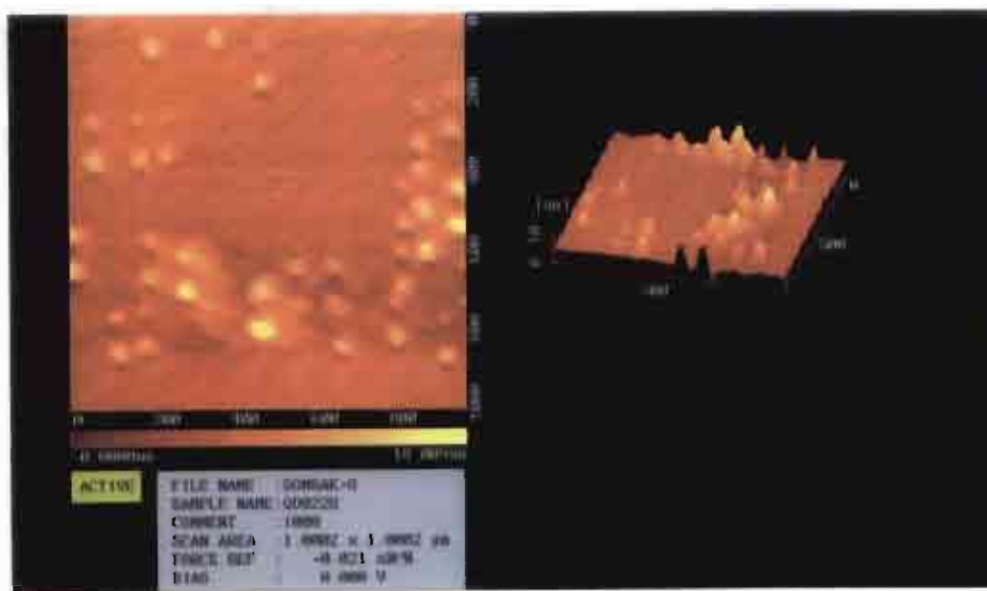
รูปที่ 35 AFM ของ QDs ที่ปลูกที่อัตราเร็ว 0.01/0.05/0.2 ML/s ตามลำดับ

ควอนตัมดอทที่มีขนาดเล็ก-ใหญ่ ต่างกันนี้จะมีผลต่อระดับ Quantized Energy States ในโครงสร้างควอนตัมดอท กล่าวคือ Ground State ในควอนตัมดอทขนาดใหญ่จะมีระดับต่ำ ในขณะที่ Ground State ในควอนตัมดอทขนาดเล็กจะถูกบีบให้มีค่าสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 36 ดังนั้นคุณสมบัติทางไฟฟ้า-แสงจะไม่เหมือนกัน ดังแสดงให้เห็นจากผลการวัด PL ที่จะพูดถึงในตอนต่อไป



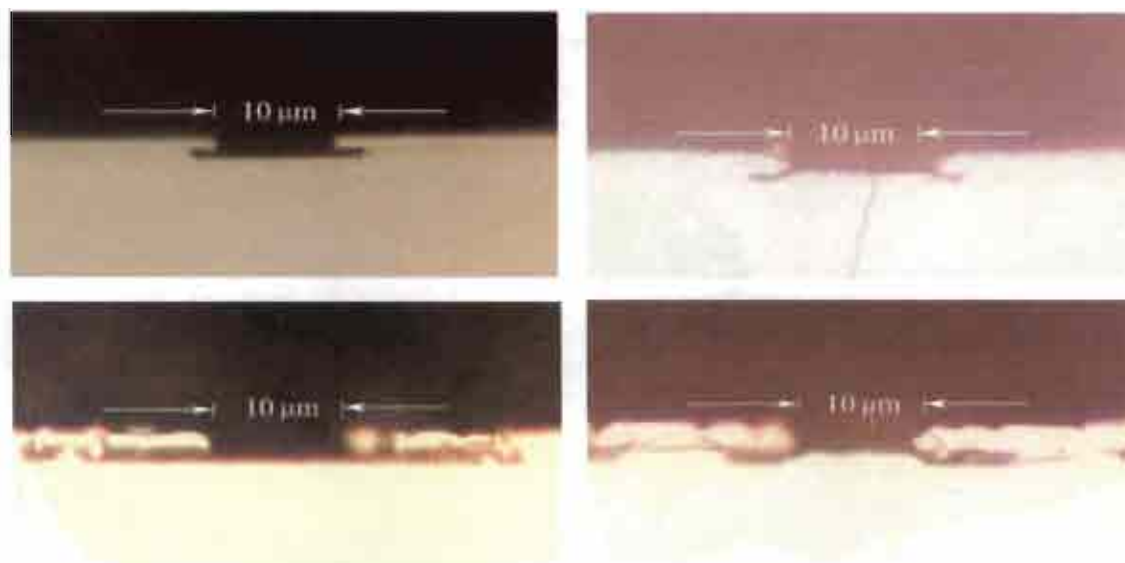
รูปที่ 36 ระดับพลังงานของ Ground State ในควอนตัมดอทขนาดใหญ่ / กลาง / เล็ก

จากผลการทดลองที่แสดงในรูปของ AFM ทั้งหมด จะเห็นว่าโครงสร้างควอนตัมดอททั้งหมดนั้นจะเกิดขึ้นอย่าง Random ไม่สามารถกำหนดตำแหน่งที่เกิดได้แน่นอน ดังนั้นการประยุกต์ควอนตัมดอทในสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์บางประเภท เช่น ควอนตัมดอททรานซิสเตอร์ ควอนตัมดอทคอมพิวเตอร์ ซึ่งต้องการความเป็นระเบียบของดอท จึงยังพัฒนาได้ยาก จนกว่าจะหาแนวทางในการปลูกควอนตัมดอทที่เป็นระเบียบ หรือมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อน เช่น กรณีของ Twin QDs ที่เกิดขึ้นโดยเงื่อนไขการปลูกผลึกที่มีความจำเพาะ ดังแสดงในรูปที่ 37



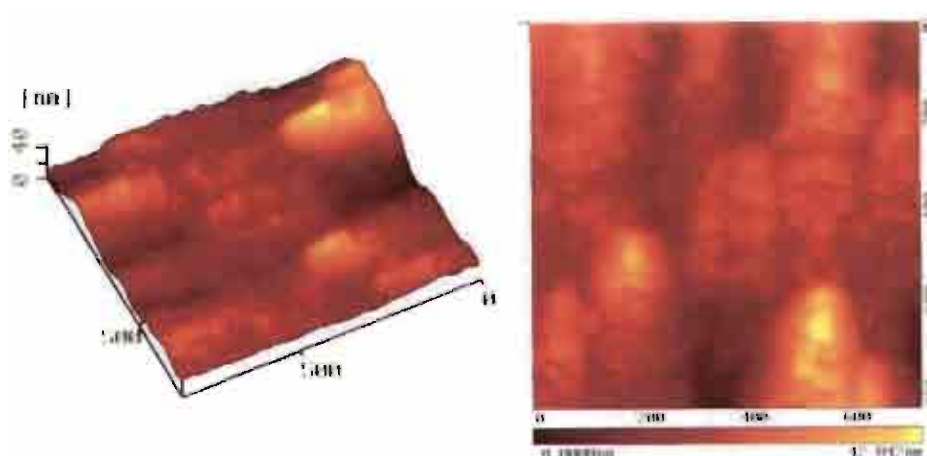
รูปที่ 37 AFM ของ QDs ที่มีการจับเป็นคู่ ๆ

ความพยายามในการจัดระเบียบควอนตัมดอทมีหลาย approaches เช่น การศึกษาเรื่อง Selective Growth ของ InAs/GaAs Self-Organized Quantum Dots โดยใช้เทคนิคการปลูกผลึกผ่าน Shadow Mask ซึ่งคณะผู้วิจัยได้นำเสนอไว้ในบทความที่ตีพิมพ์ใน Journal of Crystal Growth, Vol. 227-228 (2001) pp. 1053-1056⁽²⁸⁾ เทคนิคดังกล่าวยังต้องใช้ Lithography จึงยังมีขีดจำกัดในด้านเทคนิค เพราะ Shadow Mask ยังมีสเกลในระดับไมโครเมตร (μm) ซึ่งจะพัฒนาต่อไปในอนาคต ให้มีช่องเปิดในระดับนาโนเมตร (nm) แนวคิดของ Shadow Mask Technique มีแสดงดังรูปที่ 38



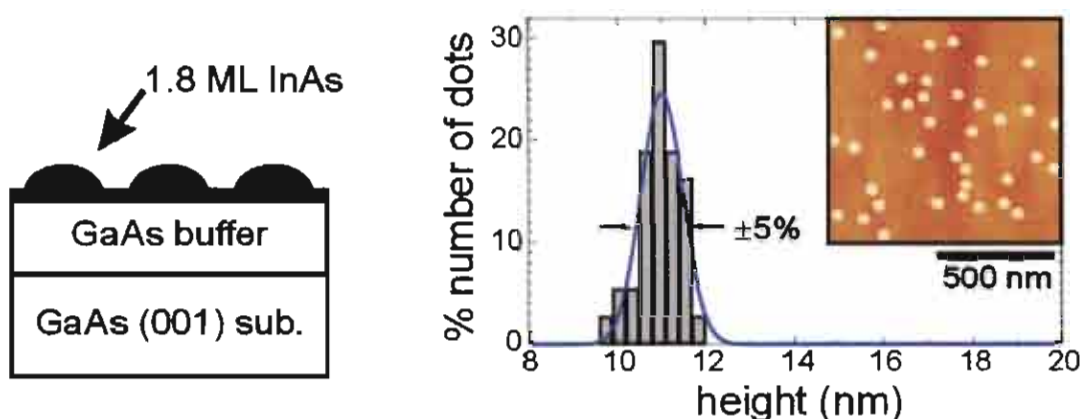
รูปที่ 38 เทคนิคการปลูก QDs ผ่าน Shadow Mask ที่สร้างขึ้นด้วยชั้นผลึก GaAs/AlGaAs และ
การทำ Photolithography

การจัดระเบียบควอนตัมดอตโดยไม่ต้องใช้เทคนิค Photolithography หากทำได้สำเร็จ จะเป็นกระบวนการที่ง่ายและมีประโยชน์ในด้านวิศวกรรมการผลิต ดังนั้นคณะวิจัยจึงได้ศึกษาการปลูกควอนตัมดอตโดยใช้ High Index Substrate ด้วย โดยเลือกใช้แผ่นผลึกฐานที่มีระนาบผลึกแบบ (411) A และได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 39 ที่บ่งบอกถึงความเป็นไปได้ในการเกิด Alignment ของ QDs บนผิวผลึกแบบ (411) A ผลงานวิจัยส่วนนี้ถูกนำไปตีพิมพ์ในบทความที่ลงในวารสาร Journal of Crystal Growth, Vol. 227-228 (2001) pp. 1010-1015⁽²⁹⁾ การเกิดควอนตัมดอตที่มีลักษณะที่เป็นระเบียบขึ้นนี้จะมีผลทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้า-แสงดีขึ้น ดังแสดงในผลการวัด PL ที่จะนำเสนอในตอนต่อไป



รูปที่ 39 AFM ของ QDs ที่ปลูกบน (411) A GaAs

ในการปลูกควอนตัมดอตนั้น ความสม่ำเสมอของขนาดดอตยังเป็นประเด็นที่มีความสำคัญอย่างมากด้วย เพราะหมายถึงความโคจรของคุณสมบัติควอนตัมดอตจะปรากฏได้ชัดเจนมากขึ้นเพียงใดจะขึ้นอยู่กับค่าความสม่ำเสมอนี้ ซึ่งก็เป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดโดยเงื่อนไขต่าง ๆ ในการปลูกผลึก รวมไปถึงเงื่อนไขในการปลูกชั้นผลึก GaAs ที่ใช้เป็น Capped Layers ด้วย สเปกตรัมในการเปล่งแสงจากควอนตัมดอตจะแคบมากขึ้นเพียงใดขึ้นอยู่กับความสม่ำเสมอของควอนตัมดอตนี้เอง จึงมีความสำคัญเมื่อนำไปประยุกต์เป็น Quantum Dot Laser ที่มีคุณภาพดี รูปที่ 40 แสดงให้เห็นถึงการกระจายเชิงความสูงของดอตที่ตรวจสอบได้จาก AFM ในพื้นที่ $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ พบว่ามีค่าการกระจายอยู่ที่ประมาณ $\pm 5\%$

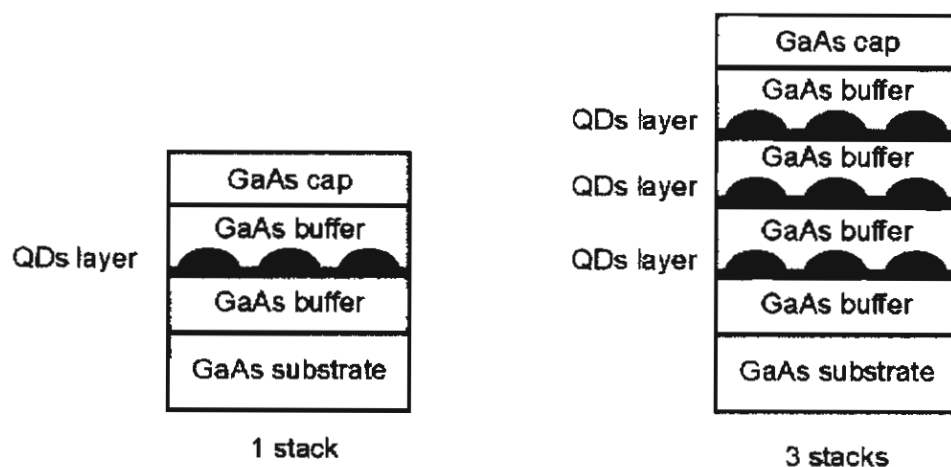


รูปที่ 40 (ก) ลักษณะโครงสร้างของชิ้นงานสำหรับการวัด AFM และ (ข) ตัวอย่างผลการวัด AFM บนพื้นที่ขนาด $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ และผลการวิเคราะห์การกระจายเชิงความสูงของควอนตัมดอตที่วัดได้

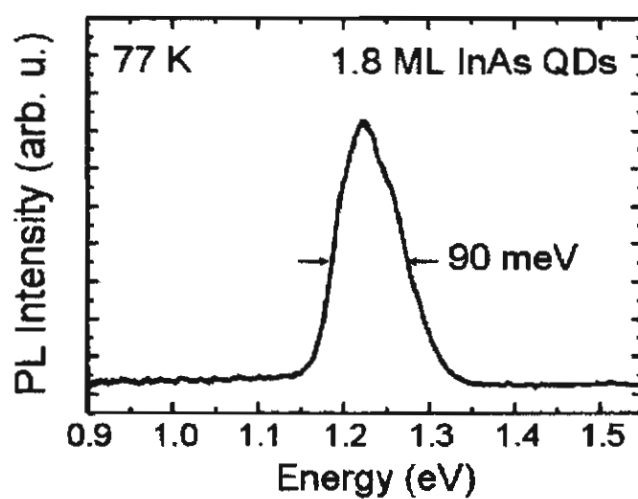
โครงสร้าง QDs แบบต่าง ๆ กับผลการวัด PL

โครงสร้างควอนตัมดอตที่ทดลองสร้างในงานวิจัยนี้มีทั้งแบบ Single-Stack และ Multi-stack ดังแสดงในรูปที่ 41 โดยปกติแล้วเมื่อมีการสร้าง QDs ชั้นแรกแล้ว QDs ในชั้นถัด ๆ ไปของ Multi-stacked Structure จะมีลักษณะการเรียงตัวในแนวตั้ง (Vertical Alignment) เนื่องจากตำแหน่งที่เกิด QDs นั้นจะมี Strain Field อยู่ ทำให้ QDs เกิดขึ้นในตำแหน่งเดิมได้ง่าย

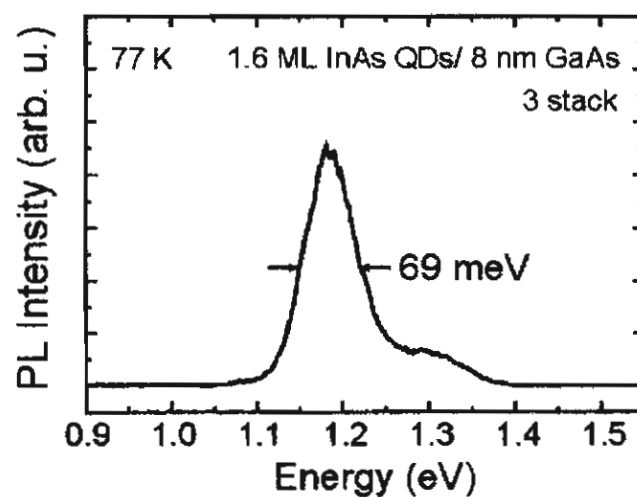
เมื่อนำโครงสร้างควอนตัมดอตในรูปที่ 41 ซึ่งเป็น 1 stack และ 3 stacks มาวัด PL จะได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 42 และ 43 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า PL ของโครงสร้างควอนตัมดอตที่มีหลาย stacks จะมีแนวโน้มที่ให้ PL Peak ที่แคบลง เนื่องจาก QDs เริ่มมีความสม่ำเสมอมากขึ้น คือค่า FWHM ลดลงจาก 74 nm (90 meV) เป็น 62 nm (69 meV)



รูปที่ 41 แสดงถึงโครงสร้างของตัวอย่างที่มี QDs แบบ 1 และ 3 ชั้นตามลำดับ

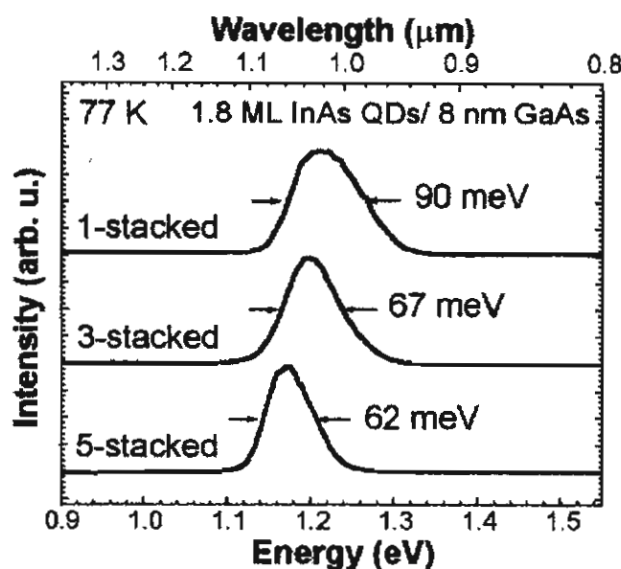


รูปที่ 42 PL Spectrum ของ QD 0176 (1 stack) ที่ 77 K



รูปที่ 43 PL Spectrum ของ QD 0141 (3 Stacks) ที่ 77 K

เพื่อเป็นขั้นผลการทดลองข้างต้นได้มีการสร้างโครงสร้างควอนตัมดอทแบบหลายชั้น (1/3/5 stacks) โดยมีชั้น GaAs Barrier ที่มีขนาดเท่ากันคือ 8 nm เพื่อดูผลการ Coupling ของดอทแต่ละชั้น ผลการวัด PL มีแสดงดังรูปที่ 44 ซึ่งค่า FWHM ลดลงจาก 90 meV เป็น 67 meV และ 62 meV สำหรับ 1 stack 3 stack และ 5 stacks ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ค่า PL Peak มีการ Shift ไปในทิศทางที่มีค่า Peak Energy ที่น้อยลง (ค่าความยาวคลื่นที่มากขึ้น) เนื่องจากการปลูก QDs ที่จำนวน Stacks มากขึ้น QDs จะมีขนาดโตขึ้น ระดับพลังงานในควอนตัมดอทจึงมีค่าลดลง



รูปที่ 44 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ 1.8 ML InAs ควอนตัมดอทแบบ 1 3 และ 5 stacks ใน GaAs ที่มีความหนาชั้น barrier (GaAs) เท่ากับ 8 nm

ในการปลูกควอนตัมดอทที่มีคุณภาพดีนั้นจะทำให้โครงสร้างควอนตัมดอทสามารถเปล่งแสงได้ดีที่อุณหภูมิห้อง (Room Temperature : RT) ในขณะเดียวกันควรมีค่า FWHM ที่แคบลงด้วย ในการพัฒนาเทคนิคการปลูกผลึกด้วย MBE นั้นจำเป็นต้องเรียนรู้เงื่อนไขการเตรียมอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้อยู่ในสภาพดี โดยการบำรุงรักษาเครื่อง MBE ให้อุปกรณ์ เช่น การรักษาสภาพสุญญากาศที่ดี การใช้อุปกรณ์ชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่มีความสะอาด มีการ Treatment ต่าง ๆ เช่น การ Baking ที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลานานเพียงพอ เพื่อให้สิ่งสกปรกที่ติดตามผิวของอุปกรณ์ชิ้นส่วนหลุดออกไปหมด เนื่องจากประเทศไทยมีอุณหภูมิสูงและความชื้นสูง ทำให้การทำงานมีความยุ่งยากกว่าการวิจัยในต่างประเทศมาก เพราะความชื้นมีส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดชั้นออกไซด์ที่ผิวผลึกได้ง่าย ดังนั้นแผ่นผลึกฐานที่ใช้งาน จึงต้องมีการเตรียมผิวที่ดีก่อนการปลูกผลึก ด้วยการแลกเปลี่ยนประสบการณ์ทำวิจัยเกี่ยวกับ MBE กับ Max Planck Institute ทำให้คณะวิจัยได้ทราบจุดอ่อนต่าง ๆ และนำมาแก้ไขขั้นตอนการทำงาน ทำให้เครื่อง MBE ที่คณะวิศวฯ จุฬาฯ อยู่ในสภาพดี และปลูกควอนตัมดอทที่มีคุณภาพดีเทียบเท่ากับของผู้อื่นที่ทำงานใน