

## การสร้าง InAs ควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเองด้วยเทคนิคการปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล

### The growth of InAs self-organized quantum dots by molecular beam epitaxy

ฤดีสันต์ ต่องเมือง สุวิทย์ กิระวิทยา มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร และ สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว

ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

โทร 218-6524 โทรสาร 218-6524

E-Mail: 43718152@student.chula.ac.th

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอลักษณะการเกิดควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเองของ InAs โดยใช้การปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุลในรูปแบบการก่อตัวในโหมด Stranski-Krastanow และได้ศึกษาเงื่อนไขการปลูกผลึกที่มีผลต่อคุณสมบัติทางแสงของโครงสร้างควอนตัมดอต ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิแผ่นฐาน ปริมาณ In อัตราเร็วในการปลูกผลึก ปริมาณ As<sub>4</sub> และจำนวนชั้นของโครงสร้างควอนตัมดอต ด้วยการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ นอกจากนี้ยังกล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์กับขนาดและการกระจายขนาดของโครงสร้างควอนตัมดอตในเชิงพรรณนา ผลการทดลองเหล่านี้สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการสร้างควอนตัมดอตให้มีคุณสมบัติทางแสงตามที่ต้องการเพื่อนำไปใช้ในสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์

คำสำคัญ: ควอนตัมดอต, โหมด Stranski-Krastanow, การปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล, อินเดียมอาร์เซไนด์

#### Abstract

The formation of InAs self-organized quantum dots grown by molecular beam epitaxy using Stranski-Krastanow growth mode was reported. The effects of growth conditions i.e. growth temperature, the amount of In, growth rate, As<sub>4</sub> beam flux and a number of stacked layers on the optical properties of InAs quantum dots were studied by photoluminescence measurement. The relation between the photoluminescence results and the size and size distribution of quantum dots was descriptively discussed. These experimental results can be used as basic information for producing the desired optical properties of quantum dots for optoelectronic devices.

Keywords: quantum dot, Stranski-Krastanow mode, molecular beam epitaxy, indium arsenide

#### 1. บทนำ

ปัจจุบัน โครงสร้างควอนตัมดอตได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายในการนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ เนื่องจากพาหะในโครงสร้างควอนตัมดอตมีความอิสระใน 0 มิติ จึงทำให้ electronic spectrum ของควอนตัมดอตมีลักษณะเหมือนอะตอม (เราอาจเรียกควอนตัมดอตได้ว่าเป็น ซุปเปอร์อะตอม เพราะประกอบด้วยอะตอมประมาณ  $10^3-10^6$  อะตอม) ในทางทฤษฎีได้มีการพิสูจน์แล้วว่า เลเซอร์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างควอนตัมดอตเป็นชั้นเปล่งแสงจะมีค่ากระแสจิดเริ่มเปลี่ยนต่ำ [1] และมีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิสูง [2] นอกจากนี้ยังมีแนวคิดที่จะนำควอนตัมดอตไปใช้ในสิ่งประดิษฐ์ชนิดอื่น ๆ ด้วย เช่น ทรานซิสเตอร์ [3] เซลล์แสงอาทิตย์ [4] ฯลฯ ดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะสร้างโครงสร้างควอนตัมดอตให้มีคุณสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในงานด้านสิ่งประดิษฐ์ชนิดต่าง ๆ โดยคุณสมบัติสำคัญที่จำเป็นต้องมีของควอนตัมดอตเพื่อให้สามารถใช้งานในสิ่งประดิษฐ์ได้คือ [5]

1. ควอนตัมดอตจะต้องมีขนาดเล็กพอที่จะเก็บกักพาหะให้มีความอิสระใน 0 มิติ และมีขนาดใหญ่พอที่จะมีระดับพลังงานควอนไทซ์อย่างน้อยหนึ่งระดับพลังงาน
2. จำนวนควอนตัมดอตที่สร้างได้จะต้องมากพอและมีความสม่ำเสมอเพียงพอที่จะนำไปใช้งาน
3. ควอนตัมดอตจะต้องไม่มีจุดบกพร่อง (defect) เช่น dislocation ฯลฯ

ในช่วงแรกของความพยายามในการสร้างโครงสร้างควอนตัมดอตนั้น ได้มีการทดลองอยู่หลายแนวทางเช่น การใช้เทคนิคลิโทกราฟีด้วยลำอิเล็กตรอน (e-beam lithography) ร่วมกับกระบวนการกัดทางเคมี แต่จากการตรวจวัดลักษณะทางโครงสร้างของควอนตัมดอตที่สร้างได้พบว่ากระบวนการกัดทางเคมีก่อให้เกิดจุดบกพร่องขึ้น นอกจากนี้กระบวนการทำลวดลายที่มีความละเอียดสูงในระดับนาโนเมตรนั้นมีความยุ่งยากมากทำให้ควอนตัมดอตที่สร้างด้วยวิธีนี้ไม่ได้รับความนิยม ต่อมาจากงานวิจัยทางด้านการศึกษาการปลูกผลึกแบบอพิแทกซ์พบว่าโครงสร้างควอนตัมดอตสามารถเกิดขึ้นได้เองถ้าเงื่อนไขการปลูกผลึกเหมาะสม กล่าวคือ ชนิดของสารที่ใช้ปลูกผลึกกับชนิดของแผ่นฐาน ค่าอุณหภูมิแผ่นฐานขณะ

ปลูกผลึก ความหนาชั้นควอนตัมคือต (คือปริมาณอะตอมที่ก่อตัวเป็นคือต) อัตราเร็วในการปลูกผลึกชั้นควอนตัมคือต ซึ่งเทคนิคในการปลูกผลึกเพื่อสร้างโครงสร้างควอนตัมคือตนี้ เรียกว่า เทคนิคการปลูกผลึกแบบจัดเรียงตัวเอง (self-organized growth technique) ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้กระบวนการกัดทางเคมีและการทำลวดลายที่มีความละเอียดสูง แต่สิ่งสำคัญในกระบวนการสร้างโครงสร้างควอนตัมคือตด้วยเทคนิคนี้ คือ ความเข้าใจในธรรมชาติของการเกิดผลึกแบบจัดเรียงตัวเองเพื่อให้สามารถควบคุมการเกิดควอนตัมคือตให้เป็นไปตามต้องการได้ ในการประยุกต์ใช้ควอนตัมคือตชนิดจัดเรียงตัวเองในด้านเลเซอร์สารกึ่งตัวนำอินเดียมอาร์เซไนด์ (InAs) ควอนตัมคือตแบบจัดเรียงตัวเองที่สร้างบนแผ่นฐานแกเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเนื่องจาก InAs ควอนตัมคือตสามารถที่จะให้แสงความยาวคลื่นยาวตั้งแต่ 1000-1300 nm บนแผ่นฐาน GaAs ได้ [6] และมีความน่าจะเป็นที่จะสามารถขยายช่วงความยาวคลื่นแสงออกไปถึง 1520 nm [7] ซึ่งเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานด้านสื่อสารทางแสง

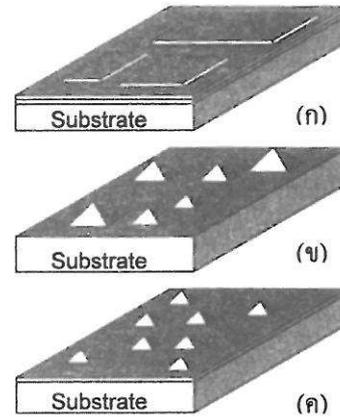
บทความนี้จะนำเสนอเทคนิคการสร้างโครงสร้างควอนตัมคือตแบบจัดเรียงตัวเองในรูปแบบการก่อตัวในโหมด Stranski-Krastanow ด้วยการปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล (molecular beam epitaxy) โดยจะอธิบายถึงลักษณะการเกิดควอนตัมคือตและความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางโครงสร้างกับคุณสมบัติทางแสง โดยการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence) ของควอนตัมคือตชนิด InAs ใน GaAs ที่ปลูกบนแผ่นฐาน GaAs โดยการเปลี่ยนเงื่อนไขต่าง ๆ ในการปลูกผลึก

## 2. การปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล

การปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุลเป็นการปลูกผลึกแบบอพิแทกซี คือ อะตอมที่ปลูกลงไปจะมีการจัดเรียงตัวเหมือนการเรียงตัวของอะตอมที่อยู่บนแผ่นฐาน ดังนั้นผลึกที่ได้จึงเป็นแบบผลึกเดี่ยว (single crystal) ซึ่งมีคุณภาพสูง การควบคุมลำโมเลกุลที่ใช้ในการสร้างผลึก ทำให้สามารถควบคุมความหนาของชั้นผลึกที่สร้างได้ในระดับชั้นอะตอม (monolayer: ML) นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมองค์ประกอบของโครงสร้างและปริมาณสารเจือปนได้อย่างแม่นยำ ทำให้การปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุลนี้เป็นเทคนิคที่สามารถนำมาใช้สร้าง โครงสร้างระดับนาโนเมตร (nanostructure) ทั้งโครงสร้างควอนตัมเวลล์ ควอนตัมไวร์ และควอนตัมคือตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ปัจจุบัน รูปแบบการก่อตัวของผลึกสามารถแบ่งได้เป็น 3 โหมด (ดูรูปที่ 1) คือ [8]

1. Frank-van der Merwe เป็นรูปแบบการก่อตัวของผลึกแบบ 2 มิติ ผลึกจะก่อตัวในแนวระนาบเป็นชั้น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 1(ก) การก่อตัวลักษณะนี้เกิดขึ้นเนื่องจาก แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมในลำโมเลกุลกับอะตอมบนผิวหน้าของแผ่นฐานมีค่ามากกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอม-อะตอมในลำโมเลกุล ซึ่งเป็นรูปแบบการเกิดผลึกที่พบในการ



รูปที่ 1 รูปแบบการก่อตัวของผลึกในโหมด (ก) Frank-van der Merwe (ข) Volmer-Weber และ (ค) Stranski-Krastanow

ปลูกผลึกสารกึ่งตัวนำบนผิวหน้าผลึกสารกึ่งตัวนำที่มีค่าคงที่โครงสร้างผลึกเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน เช่น การปลูกอะลูมิเนียมอาร์เซไนด์ (AlAs) ซึ่งมีค่าคงที่โครงสร้างผลึก 0.566 nm บน GaAs (มีค่าคงที่โครงสร้างผลึกเท่ากับ 0.565 nm)

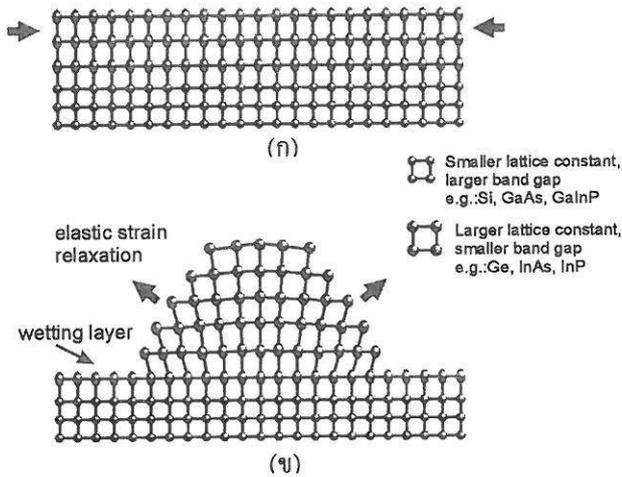
2. Volmer-Weber เป็นรูปแบบการก่อตัวของผลึกแบบ 3 มิติ เกิดขึ้นเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมที่ปลูกลงไปมีค่ามากกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมในลำโมเลกุลกับอะตอมบนผิวหน้าของแผ่นฐาน ดังแสดงในรูปที่ 1(ข) การเกิดผลึกในรูปแบบนี้จะพบในการปลูกผลึกที่มีค่าคงที่โครงสร้างผลึกแตกต่างกันมาก ๆ

3. Stranski-Krastanow เป็นรูปแบบการก่อตัวของผลึกแบบ 2 มิติในช่วงแรก และแบบ 3 มิติในช่วงหลัง ซึ่งทำให้ได้เกาะ (islands) แบบ 3 มิติบนฟิล์มบางแบบ 2 มิติของสารที่ปลูกลงไป ดังแสดงในรูปที่ 1(ค) การก่อตัวรูปแบบนี้เกิดขึ้นในการปลูกผลึกที่มีค่าคงที่โครงสร้างผลึกของสารที่ปลูกลงไปต่างกับค่าคงที่โครงสร้างผลึกของอะตอมของแผ่นฐานไม่มากนัก (น้อยกว่า 10% [9])

เทคนิคการปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุลสามารถสร้างชั้นฟิล์มบางโดยใช้การปลูกผลึกในโหมด Frank-van der Merwe ได้ ซึ่งฟิล์มบางที่สร้างได้เมื่อมีความหนาน้อยกว่า 20 nm ก็คือโครงสร้างควอนตัมเวลล์นั่นเอง โครงสร้างควอนตัมเวลล์นี้ได้มีการนำไปใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน [10] โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในสิ่งประดิษฐ์เลเซอร์สารกึ่งตัวนำ ในการสร้างโครงสร้างควอนตัมคือตแบบจัดเรียงตัวเองที่นำเสนอในบทความนี้จะใช้การปลูกผลึกในโหมด Stranski-Krastanow ซึ่งรายละเอียดจะขอล่าไว้ในหัวข้อถัดไป

## 3. การเกิดควอนตัมคือตแบบจัดเรียงตัวเอง

ลำดับขั้นตอนในการเกิดควอนตัมคือตแบบจัดเรียงตัวเองในการก่อตัวของผลึกในโหมด Stranski-Krastanow สามารถแบ่งออกเป็น 3 ลำดับขั้นดังต่อไปนี้คือ [12]



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการก่อตัวของอะตอมบนผิวหน้าจาก 2 มิติ (ก) เป็น 3 มิติ (ข) ในโหมด Stranski-Krastanow [11]

1. การก่อตัวแบบ 2 มิติ
2. การเปลี่ยนแปลงรูปแบบ โครงสร้างจาก 2 มิติเป็น 3 มิติ
3. การก่อตัวแบบ 3 มิติ

**การก่อตัวแบบ 2 มิติ**

เมื่อทำการปลูกผลึกของอะตอมที่มีค่าคงที่โครงสร้างผลึกต่างจากค่าคงที่โครงสร้างผลึกของแผ่นฐานจะเกิดการเรียงตัวของอะตอมในลักษณะ 2 มิติ โดยพลังงานความเครียด (strain energy) ของผิวหน้าจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณอะตอมที่ปลูกลงไป ซึ่งเมื่อพลังงานความเครียดนี้ถูกสะสมมากพอก็จะทำให้เกิดปรากฏการณ์เปลี่ยนแปลงรูปแบบโครงสร้างขึ้น โดยค่าความหนาของชั้นนี้ เรียกว่า ความหนาวิกฤต (critical thickness) โดยค่าความหนาวิกฤตนี้คิดเป็นปริมาณอะตอมที่ปลูกลงไปต่อหน่วยพื้นที่ ซึ่งอาจมีค่าเป็นเศษส่วนของชั้นอะตอมได้ จะแปรผกผันกับค่าความต่างของค่าคงที่โครงสร้างผลึกในระบบสารที่สนใจ เช่น กรณีการปลูก InAs ลงบน GaAs ซึ่งค่าคงที่โครงสร้างผลึกของ InAs มากกว่า GaAs อยู่ 7% จะมีค่าความหนาวิกฤตของ InAs เท่ากับ 1.7 ML [9] และ กรณีการปลูกเจอร์มันเนียม (Ge) ลงบนซิลิกอน (Si) ซึ่งมีความแตกต่างของค่าคงที่โครงสร้างผลึกเท่ากับ 4% (Ge มีค่าคงที่โครงสร้างผลึกมากกว่า Si) จะมีค่าความหนาวิกฤตของ Ge เท่ากับ 3.7 ML [13]

**การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการก่อตัวจาก 2 มิติเป็น 3 มิติ**

ในขั้นตอนนี้ การเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดเมื่อปริมาณอะตอมบนผิวหน้ามีค่ามากกว่าค่าความหนาวิกฤต พลังงานของอะตอมที่ปลูกบนผิวหน้ามีค่ามากเกินไปที่ผิวหน้าจะรักษารูปแบบการเกิดผลึกใน 2 มิติ ทำให้ต้องมีการเปลี่ยนรูปเพื่อลดพลังงานความเครียดของระบบลง (relaxation) ดังแสดงในรูปที่ 2 รูปที่ 2(ก) อะตอมที่ปลูกบนผิวหน้าจะมีความเครียดแบบบีบอัดใน 2 ทิศทาง (biaxial compressive strain) และจะ

มีการลดพลังงานรวมของระบบลง โดยการเรียงตัวของผลึกจะเปลี่ยนเป็นแบบ 3 มิติดังแสดงในรูปที่ 2(ข) ซึ่งกลุ่มผลึกที่ก่อตัวแบบ 3 มิติก็คือควอนตัมดอทแบบจัดเรียงตัวเอง และชั้นของสารที่ปลูกผลึกที่มีการเรียงตัวแบบ 2 มิติที่เหลืออยู่จะถูกเรียกว่า wetting layer

**การก่อตัวแบบ 3 มิติ**

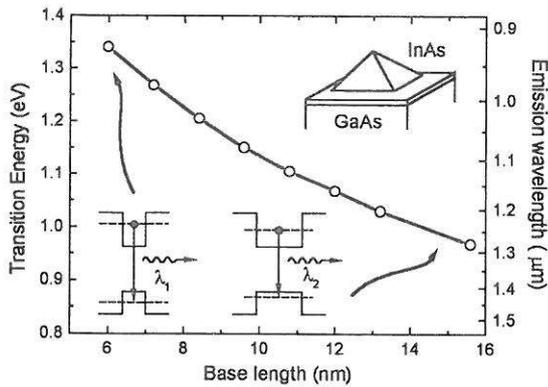
เมื่อทำการปลูกผลึกต่อไปหลังจากที่การก่อตัวของผลึกเป็นแบบ 3 มิติ ผลึกจะก่อตัวที่บริเวณผิวของดอท ทำให้ควอนตัมดอทที่มีขนาดใหญ่อันขึ้นโดยขนาดของควอนตัมดอทจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณสารที่ทำการปลูกเพิ่มเข้าไปหลังจากการเกิดควอนตัมดอทแล้ว ดังนั้นเราสามารถควบคุมขนาดของควอนตัมดอทที่สร้างให้มีขนาดตามต้องการอย่างไรก็ได้ วิธีนี้มีข้อจำกัดคือ ถ้าหากทำการปลูกผลึกต่อไปอีก จะทำให้พลังงานของระบบเพิ่มขึ้นมากจนกระทั่งเกิดการลดพลังงานของระบบอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งทำให้เกิดจุดบกพร่องแบบ dislocation ขึ้น ดังนั้นโดยทั่วไปการสร้างควอนตัมดอทด้วยเทคนิคการจัดเรียงตัวเอง ปริมาณอะตอมที่ใช้สร้างโครงสร้างควอนตัมดอทจะถูกจำกัดอยู่ในช่วงหนึ่งก็มีความมากกว่าค่าความหนาวิกฤตและไม่มากจนก่อให้เกิดการลดพลังงานของระบบแบบที่ทำให้เกิดจุดบกพร่อง

**4. การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของโครงสร้างระดับนาโนเมตร**

ในโครงสร้างระดับนาโนเมตรไม่ว่าจะเป็นโครงสร้าง ควอนตัมเวลล์ ควอนตัมไวร์ หรือควอนตัมดอทนั้น ระดับพลังงานควอนไทซ์ จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่ใช้สร้างโครงสร้างและขนาดของโครงสร้าง กล่าวคือ ถ้าหากมีการนำสาร 2 ชนิดที่ต่างกันมาทำการสร้างโครงสร้างระดับนาโนเมตรให้มีขนาดและรูปร่างเดียวกัน จะมีระดับพลังงานควอนไทซ์ต่างกันอันเนื่องมาจากคุณสมบัติ (ค่ามวลประสิทธิผล ความกว้างช่องว่างพลังงาน ฯลฯ) ของสารแต่ละชนิดนั้นต่างกัน และ ถ้านำสารชนิดเดียวกันมาสร้างโครงสร้างระดับนาโนเมตร เมื่อสร้างให้ขนาดของโครงสร้างมีขนาดต่างกัน ระดับพลังงานควอนไทซ์หรือค่าความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกจากโครงสร้างจะมีค่าต่างกัน โดยค่าความยาวคลื่นแสง  $\lambda$  แปรผกผันกับขนาดของระดับพลังงานของโครงสร้าง  $E$  ตามสมการที่ (1)

$$E = hc/\lambda \tag{1}$$

โดย  $h$  คือค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant) มีค่าเท่ากับ  $6.63 \times 10^{-34}$  J.s  $c$  คือค่าความเร็วแสงในสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ  $3 \times 10^8$  m/s ดังนั้นเมื่อนำข้อมูลพื้นฐานของสารที่ใช้ทำโครงสร้างระดับนาโนเมตรมาวิเคราะห์ร่วมกับผลการวัดค่าความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมาจากโครงสร้างซึ่งก็คือการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ทำให้สามารถทราบลักษณะของโครงสร้างควอนตัมได้ นอกจากนี้ การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์นี้ก็ยังทำให้ทราบถึงคุณสมบัติทางแสงของโครงสร้างระดับนาโนเมตรว่าเหมาะสมกับการนำไปใช้ในสิ่งประดิษฐ์ที่เปล่งแสงได้มากน้อยเพียงไร



รูปที่ 3 ผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานที่แสงเปล่งออกจาก โครงสร้างกับค่าความกว้างฐานของควอนตัมดอทชนิด InAs ใน GaAs โดยคำนวณจากลักษณะควอนตัมดอทที่มีรูปร่างเป็นปิระมิด [15]

ในการวิเคราะห์ระดับพลังงานควอนไทซ์ด้วยทฤษฎีควอนตัม มีผู้คำนวณค่าระดับพลังงานควอนไทซ์และลักษณะของการกระจายของพาหะในโครงสร้างระดับนาโนเมตรไว้ในหลายระบบสาร [14] โดยในกรณี โครงสร้างควอนตัมดอทชนิด InAs Grundmann *et al.* [15] ได้ทำการคำนวณค่าความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างฐานของโครงสร้างควอนตัมดอทกับค่าระดับพลังงานของโครงสร้างด้วยระเบียบวิธี finite difference โดยกำหนดให้ควอนตัมดอทมีลักษณะเป็นรูปปิระมิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส ผลการคำนวณแสดงดังรูปที่ 3 จากรูปที่ 3 คือ ควอนตัมดอทมีขนาดเล็กจะมีค่าระดับพลังงานควอนไทซ์สูงทำให้ค่าความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมา ( $\lambda_1$ ) มีค่าสั้นกว่าค่าความยาวคลื่นแสงจากควอนตัมดอทที่มีขนาดใหญ่กว่า ( $\lambda_2$ ) ซึ่งจะสอดคล้องกับแผนภาพแถบพลังงานในโครงสร้างควอนตัมดอทขนาดเล็กและขนาดใหญ่อ้างแสดงในภาพเล็กในรูปที่ 3

ในการวิเคราะห์ความกว้างของสเปกตรัมที่ได้จากการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ มีการคาดการณ์ว่าสเปกตรัมที่ได้จากการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของโครงสร้างระดับนาโนเมตรจะมีความแคบมากขึ้นตามความสามารถในการกักเก็บพาหะของโครงสร้าง เนื่องจากระดับพลังงานควอนไทซ์ในโครงสร้างระดับนาโนเมตรมีลักษณะเป็นขั้นไม่ต่อเนื่อง โดยทางทฤษฎีคาดว่าสเปกตรัมที่ได้จากควอนตัมดอทจะมีความแคบที่สุด (เหมือนกับสเปกตรัมของอะตอม) แต่จากการที่ปรากฏการณ์การเกิดควอนตัมดอทแบบจัดเรียงตัวเองในการปลูกผลึกในโหมด Stranski-Krastanow เป็นปรากฏการณ์แบบสุ่ม (random) ทำให้ขนาดของควอนตัมดอทที่เกิดขึ้นแต่ละดอทนั้นไม่เท่ากัน ระดับพลังงานควอนไทซ์ในแต่ละดอทจึงไม่เท่ากันด้วย ดังนั้นสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์จึงเป็นผลรวมของการเปล่งแสงจากควอนตัมดอทจำนวนมาก (ประมาณ  $10^9$ - $10^{11}$   $\text{cm}^{-3}$ ) ที่มีขนาดไม่เท่ากัน สเปกตรัมของควอนตัมดอทแบบจัดเรียงตัวเองที่วัดด้วยวิธีการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์โดยทั่วไปนั้น จะไม่มีลักษณะที่แคบเหมือนสเปกตรัมของอะตอม อย่างไรก็ตามที่ ได้สามารถให้ข้อมูลอื่นเกี่ยวกับ

ควอนตัมดอทแบบจัดเรียงตัวเองได้ เนื่องจากสเปกตรัมของควอนตัมดอทสามารถมีความสัมพันธ์กับขนาดของควอนตัมดอท ดังนั้นความแคบของสเปกตรัมซึ่งวิเคราะห์จาก Full width at half maximum (FWHM) จึงเป็นข้อมูลที่สามารถบอกการกระจายของขนาดของควอนตัมดอทได้

นอกจากนี้นักวิจัยหลายกลุ่มได้มีความพยายามที่จะวัดสเปกตรัมของควอนตัมดอทเพียงดอทเดียว โดยการพัฒนากล้องจุลทรรศน์โฟโตลูมิเนสเซนซ์และพบว่าสเปกตรัมของควอนตัมดอทนั้นมีลักษณะแคบมากเป็นไปตามที่คาดการณ์กันไว้ [16]

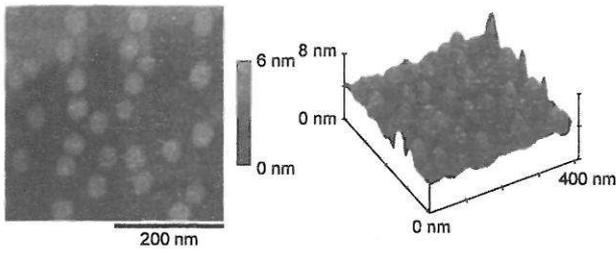
### 5. ผลกระทบของเงื่อนไขการปลูกผลึกต่อคุณสมบัติทางแสงของควอนตัมดอท

ในหัวข้อนี้จะทำการนำเสนอคุณสมบัติทางแสงของโครงสร้างควอนตัมดอท รวมทั้งแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของเงื่อนไขการปลูกผลึกต่อคุณสมบัติทางแสงของควอนตัมดอท โดยวิเคราะห์จากผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะเป็นพื้นฐานที่ทำให้สามารถควบคุมการปลูกผลึกให้ได้ควอนตัมดอทที่มีคุณภาพตามต้องการได้ โดยผลการทดลองนี้จะแยกออกเป็นหัวข้อย่อย ตามตัวแปรที่ทำการศึกษา

โครงสร้างควอนตัมดอทที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นควอนตัมดอทแบบจัดเรียงตัวเองที่สร้างโดยการปลูกผลึกด้วยลำไมเลกุล โดยมีรูปแบบการก่อตัวของผลึกในโหมด Stranski-Krastanow ชนิดของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการสร้างโครงสร้างควอนตัมดอทคือ InAs และ แผ่นฐานที่ใช้คือ GaAs ชนิดเอิน ที่มีระนาบผิวหน้า (100) โดยความเร็วในการปลูกผลึกชั้น GaAs ก่อนและหลังการปลูกชั้นควอนตัมดอทคือ 1 ML/s (เท่ากับ 0.283 nm/s) ซึ่งทำการเทียบวัดโดยการดู reflection high energy electron diffraction (RHEED) intensity oscillation [17] โดยในการเกิดควอนตัมดอทนั้น เราสามารถตรวจสอบแบบ *in-situ* ได้โดยการดูการเปลี่ยนแปลงของ RHEED pattern จากลักษณะ 2 มิติ (streaky pattern) มาเป็น 3 มิติ (spotty pattern) [6] ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการก่อตัวของผลึกในโหมด Stranski-Krastanow ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

ในการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ในการทดลองนี้ ใช้อาร์กอนเลเซอร์ (มีค่าความยาวคลื่น 488 nm) กำลังแสง 12 mW เป็นตัวกระตุ้นโครงสร้างควอนตัมดอทโดยชั้นสารตัวอย่างที่มีโครงสร้างควอนตัมดอทจะถูกหล่อเย็นไว้ที่ 77 K ด้วยไนโตรเจนเหลว แสงที่เปล่งออกมาจากโครงสร้างจะถูกรวบรวมโดยเลนส์ผ่าน monochromator และตรวจวัดความเข้มด้วย Ge detector

ความหนาแน่นของควอนตัมดอทสามารถตรวจวัดได้โดยการปลูกควอนตัมดอทบนผิวหน้าของแผ่นฐาน และไม่ปลูกทับด้วย GaAs แล้วนำควอนตัมดอทที่สร้างได้บนผิว มาทำการวัด atomic force microscopy (AFM) รูปที่ 4 เป็นตัวอย่างผลการวัด AFM ของ 1.8 ML InAs ควอนตัมดอทที่ปลูกที่อุณหภูมิแผ่นฐาน 500°C และอัตราเร็วในการปลูกผลึก InAs

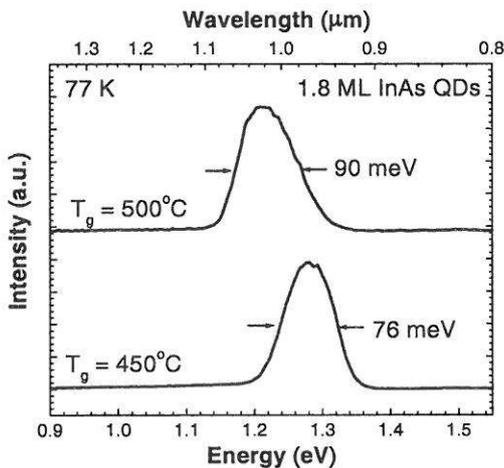


รูปที่ 4 ผลการวัด AFM ของโครงสร้าง 1.8 ML InAs ควอนตัมดอตที่ปลูกที่อุณหภูมิแผ่นฐาน 500°C และอัตราเร็วในการปลูกผลึก InAs เท่ากับ 0.1 ML/s

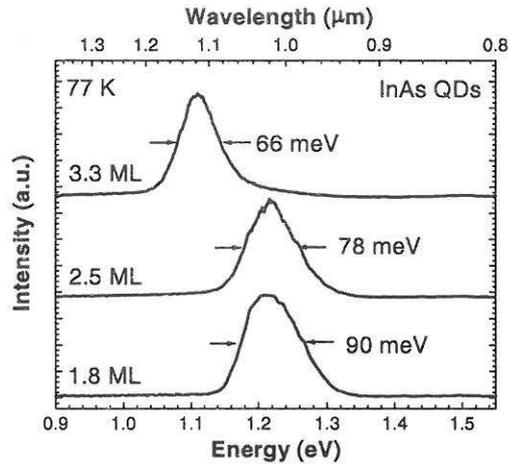
เท่ากับ 0.1 ML/s (InAs 1 ML หน้า 0.303 nm) จากรูปความหนาแน่นของควอนตัมดอตมีค่าประมาณ  $1.8 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$

**ผลของอุณหภูมิแผ่นฐาน**

ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของควอนตัมดอตที่ปลูกที่อุณหภูมิแผ่นฐาน 450°C และ 500°C แสดงดังรูปที่ 5 จากรูปจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าควอนตัมดอตที่ปลูกที่อุณหภูมิแผ่นฐาน 500°C มีระดับพลังงานที่มีค่าความเข้มสูงสุด (1.21 eV) ต่ำกว่าควอนตัมดอตที่ปลูกที่อุณหภูมิแผ่นฐาน 450°C (1.28 eV) เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิของแผ่นฐานจะส่งผลกระทบต่อในช่วงการเปลี่ยนรูปของโครงสร้างจาก 2 มิติเป็น 3 มิติ [18] (ดูรูปที่ 2) โดยถ้าหากอุณหภูมิของแผ่นฐานสูงจะทำให้อะตอมของ In ที่ปลูกลงไปมีพลังงานมาก และสามารถเคลื่อนที่บนผิวหน้าได้เป็นอย่างดี ทำให้อะตอม In สามารถวิ่งเข้าไปรวมตัวเป็นดอตใหญ่ได้มากขึ้นในช่วงการเปลี่ยนรูปโครงสร้าง ดังนั้นระดับพลังงานควอนไทซ์ในโครงสร้างจึงมีค่าต่ำลง (ดูรูปที่ 3)



รูปที่ 5 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ 1.8 ML InAs ควอนตัมดอตใน GaAs ที่ปลูกที่อุณหภูมิแผ่นฐาน 500°C และ 450°C



รูปที่ 6 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ InAs ควอนตัมดอตใน GaAs ที่ปลูกที่อุณหภูมิแผ่นฐาน 500°C โดยมีความหนาของชั้น InAs ต่างกันคือ 3.3 ML 2.5 ML และ 1.8 ML

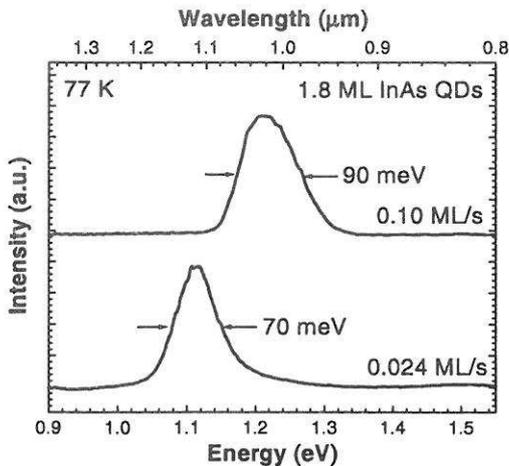
**ผลของปริมาณ In**

รูปที่ 6 คือสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่ได้จากการวัด InAs ควอนตัมดอตที่ปลูกโดยใช้ปริมาณ In ต่าง ๆ คือ 1.8 ML 2.5 ML และ 3.3 ML โดยคงค่าอัตราเร็วในการปลูกผลึกชั้น InAs นี้ไว้ที่ 0.1 ML/s และอุณหภูมิแผ่นฐาน 500°C จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มปริมาณ In จาก 1.8 ML ไปเป็น 2.5 ML นั้น ไม่ทำให้ระดับพลังงานที่ให้ค่าความเข้มแสงสูงสุดเปลี่ยนแปลงไปเลย โดยยังคงอยู่ที่ 1.21 eV หมายความว่าค่าเฉลี่ยของขนาดควอนตัมดอตมีค่าเท่าเดิมแต่การกระจายของขนาดลดลง (FWHM แคบลง) และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณ In เป็น 3.3 ML พบว่าระดับพลังงานที่ให้ค่าความเข้มแสงสูงสุดลดลงไปที่ 1.11 eV นั่นคือดอตที่สร้างได้มีขนาดใหญ่ขึ้น

จากผลการทดลองนี้สามารถอธิบายได้ว่าในช่วงแรกของการเกิดควอนตัมดอต (1.8 – 2.5 ML) การเพิ่มปริมาณ In ที่ปลูก จะไปเพิ่มจำนวนดอตให้มากขึ้นแล้วและดอตที่เกิดขึ้นแล้วจะมีการปรับขนาดและรูปร่างให้มีลักษณะเดียวกันเพื่อเข้าสู่สมดุล [19] ทำให้การกระจายของขนาดลดลงแต่ค่าเฉลี่ยของขนาดดอตยังมีค่าเท่าเดิม หลังจากนั้นเมื่อดอตมีการเรียงตัวกันจนเต็มผิวหน้าแล้ว In อะตอมที่ปลูกเพิ่มลงไปในช่วงหลัง (2.5 – 3.3 ML) จึงจะไปเพิ่มขนาดของดอต ทำให้ขนาดเฉลี่ยของดอตเพิ่มขึ้น

**ผลของอัตราเร็วในการปลูกผลึกชั้นควอนตัมดอต**

ในการทดลองนี้ อัตราเร็วในการปลูกผลึกชั้น InAs ควอนตัมดอตจะถูกเปลี่ยนแปลงจาก 0.1 ML/s เป็น 0.024 ML/s และยังคงเงื่อนไขอื่น ๆ ให้คงที่ จากผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 7 พบว่าดอตที่ปลูกที่อัตราเร็ว 0.024 ML/s มีระดับพลังงานของแสงที่เปล่งออกมา (1.11 eV) ต่ำกว่าดอตที่ปลูกที่อัตราเร็ว 0.1 ML/s (1.21 eV) เนื่องจาก การปลูกดอตที่อัตราเร็วต่ำเปรียบเสมือนการที่ให้ In อะตอม มีเวลาที่จะสามารถวิ่งบนผิวได้มากขึ้นจึงส่งผลกระทบต่อในลักษณะเดียวกันกับการปลูกดอตที่อุณหภูมิสูง



รูปที่ 7 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ 1.8 ML InAs ควอนตัมดอทใน GaAs ที่ใช้อัตราเร็วในการปลูกผลึก InAs เท่ากับ 0.10 ML/s และ 0.024 ML/s

[12] ดังนั้นควอนตัมดอทที่ได้จะมีขนาดใหญ่มากขึ้น ซึ่งเป็นผลให้ระดับพลังงานควอนตัมของไอซ์ลดต่ำลง (ดูรูปที่ 3)

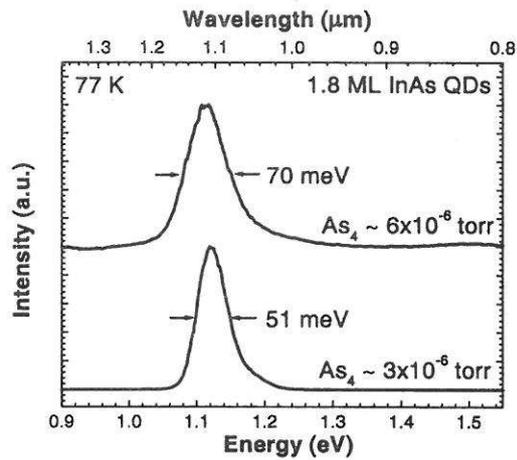
ผลของปริมาณ As

ในการสร้างควอนตัมดอท InAs บนแผ่นฐาน GaAs ควอนตัมดอทจะถูกสร้างในสภาวะ As-riched ซึ่งหมายถึงว่าการปลูกผลึกจะกระทำในบรรยากาศที่เต็มไปด้วย As โดยสารที่เป็นแหล่งจ่าย As คือ As<sub>4</sub> ในหัวข้อนี้เราจะทำการลดปริมาณ As<sub>4</sub> ขณะทำการปลูกผลึกชั้น InAs ลงเพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณ As ต่อคุณสมบัติของควอนตัมดอท

จากผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ในรูปที่ 8 ควอนตัมดอทที่สร้างในสภาวะใช้ As<sub>4</sub> flux ~ 3x10<sup>-6</sup> torr (ปริมาณอะตอมที่ใช้ในการปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุลจะถูกวัดเป็นค่าขนาดของความดันของลำโมเลกุล ซึ่งค่าความดันที่วัดได้นี้จะแปรผันโดยตรงกับปริมาณอะตอมในลำโมเลกุล [18]) จะให้สเปกตรัมที่มีความแคบกว่า (51 meV) โดยที่สเปกตรัมยังคงมีค่าสูงสุดอยู่ตำแหน่งเดิม นั่นแสดงว่า ปริมาณ As<sub>4</sub> จะส่งผลกระทบต่อความสม่ำเสมอของควอนตัมดอท เนื่องมาจากการที่มีอะตอม As ในบรรยากาศมาก จะทำให้การเคลื่อนที่ของอะตอม In บนผิวหน้าของแผ่นฐานไม่ดี ขนาดของควอนตัมดอทที่เกิดขึ้นจึงมีความไม่สม่ำเสมอ แต่อย่างไรก็ดีการลดปริมาณ As ในบรรยากาศขณะทำการปลูกผลึกจะมีขีดจำกัดกล่าวคือบรรยากาศจะต้องยังคงอยู่ในสภาวะเต็มไปด้วย As อยู่ด้วยเพื่อให้สามารถสร้างผลึก InAs ที่มีคุณภาพได้

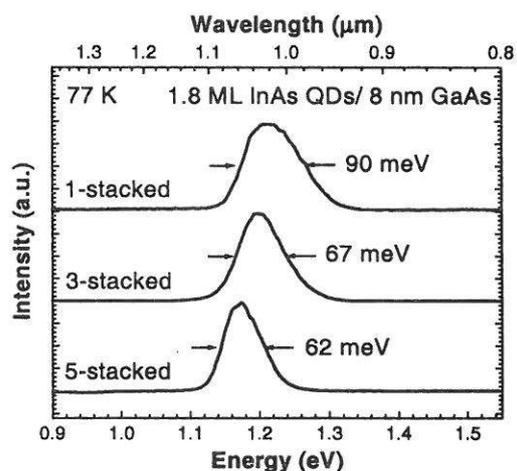
ผลของจำนวนชั้นของควอนตัมดอท

ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอผลจากการสร้างควอนตัมดอทแบบหลายชั้น (multi-stacked) โดยการสร้างให้ความหนาของชั้น GaAs barrier ระหว่างชั้นควอนตัมแต่ละชั้นเท่ากับ 8 nm เพื่อเป็นการศึกษาการ coupling ระหว่างควอนตัมแต่ละชั้น จากผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ในรูปที่ 9 พบว่า



รูปที่ 8 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ 1.8 ML InAs ควอนตัมดอทใน GaAs ที่สร้างโดยใช้อัตราเร็วในการปลูกผลึก InAs เท่ากับ 0.024 ML/s โดยระหว่างปลูกใช้ปริมาณ As<sub>4</sub> flux ~ 6 x 10<sup>-6</sup> torr และ ~ 3x10<sup>-6</sup> torr

เมื่อจำนวนชั้นของควอนตัมดอทเพิ่มขึ้นทำให้ค่าระดับพลังงานของสเปกตรัม ณ จุดที่มีความเข้มสูงสุดลดลงตามการเพิ่มของจำนวนชั้นควอนตัมดอท จากงานวิจัยของ Xie *et al.* [21] แสดงให้เห็นว่าดอทมีการเรียงตัวในแนวตั้งเนื่องจาก strain field ของควอนตัมที่อยู่ชั้นล่าง ดังนั้นการปลูกควอนตัมดอทแบบหลายชั้นนี้จะเสมือนว่าได้ควอนตัมที่มีขนาด (ความสูง) ใหญ่ขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าระดับพลังงานของโครงสร้างควอนตัมดอทลดลง โดยนอกจากการปลูกควอนตัมดอทแบบหลายชั้นนี้ยังทำให้ค่า FWHM ของสเปกตรัมมีค่าลดลงอีกด้วย โดยเป็นผลเนื่องมาจากเราสามารถควบคุมค่าความสูงประสิทธิภาพของควอนตัมได้ [6] ซึ่งไปกว่านั้นจากผลการคำนวณโดย Endoh *et al.* [22] จะเห็นได้ว่าการกระจายของค่าความสูงของควอนตัมดอทนี้จะมีผลต่อความกว้างของสเปกตรัมโฟโตลูมิ



รูปที่ 9 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ 1.8 ML InAs ควอนตัมดอทแบบ 1 3 และ 5 stacks ใน GaAs ที่มีความหนาชั้น barrier (GaAs) เท่ากับ 8 nm

เนสเซนต์มากที่สุดด้วย

## 6. สรุป

บทความเรื่องนี้ได้ทำการนำเสนอลักษณะการเกิดควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเองในการปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล และการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของโครงสร้างระดับนาโนเมตร จากนั้นจึงทำการเสนอผลการทดลองที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับผลกระทบของเงื่อนไขในการปลูกผลึกที่มีต่อคุณสมบัติทางแสงของโครงสร้างควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเองชนิด InAs โดยเงื่อนไขที่ทำให้ขนาดเฉลี่ยของควอนตัมดอตเปลี่ยนแปลงคือค่าอุณหภูมิแผ่นฐาน ปริมาณ In อัตราเร็วในการปลูกผลึก InAs และจำนวนชั้นของโครงสร้างควอนตัมดอต และเงื่อนไขที่ทำให้การกระจายขนาดของดอตเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดคือ ปริมาณ As<sub>4</sub> และ จำนวนชั้นของโครงสร้างควอนตัมดอต ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถนำไปใช้เป็นพื้นฐานในการสร้างควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเองให้มีคุณสมบัติทางแสงตามต้องการ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำประเภทสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ต่อไปได้

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณการสนับสนุนด้านทุนวิจัยจากโครงการศึกษากันกุกิ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (NSTDA) ร่วมกับจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) และ โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (Thailand Research Fund) และขอขอบคุณ Dr. Karl Eberl และ Dr. Oliver G. Schmidt แห่ง Max-Planck Institute Stuttgart ตลอดจนทุน DAAD-Royal Golden Jubilee Scholarships

## เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Asada, Y. Miyamoto, and Y. Suematsu, "Gain and the threshold of three-dimensional quantum-box lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-22, pp. 1915-1921, 1986.
- [2] Y. Arakawa and H. Sakaki, "Multidimensional quantum well laser and temperature dependence of its threshold current," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 40, pp. 939-941, 1982.
- [3] S. K. Jung, S. W. Hwang, D. Ahn, J. H. Park, Y. Kim, E. K. Kim, "Fabrication of quantum dot transistors incorporating a single self-assembled quantum dot," *Physica E*, vol. 7, pp. 430-434, 2000.
- [4] V. Aroutiounian, S. Petrosyan, A. Khachatryan, and K. Touryan, "Quantum dot solar cells," *J. Appl. Phys.*, vol. 89, pp. 2268-2271, 2001.
- [5] D. Bimberg, M. Grundmann, and N. N. Ledentsov, *Quantum Dot Heterostructures*, Wiley, New York, 1999.
- [6] Y. Nakata, Y. Sugiyama, and M. Sugawara, "Molecular beam epitaxial growth of self-assembled InAs/GaAs quantum dots," in *Semiconductors and Semimetals vol. 60*, R. K. Willardson and A. C. Beer (eds.), Academic Press, London, 1999.
- [7] J. Tatebayashi, M. Nishioka, and Y. Arakawa, "Over 1.5  $\mu\text{m}$  light emission from InAs quantum dots embedded in InGaAs strain-reducing layer grown by metalorganic chemical vapor deposition," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 78, pp. 3469-3471, 2001.
- [8] M. A. Herman, and H. Sitter, *Molecular Beam Epitaxy Fundamental and Current Status*, Springer-Verlag, Berlin, 1989.
- [9] I. Daruka, and A.-L. Barabási, "Dislocation-free island formation in heteroepitaxial growth: a study at equilibrium," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 70, pp. 3708-3711, 1997.
- [10] J. J. Coleman, "Strained-layer InGaAs quantum-well heterostructure lasers," *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, vol. 6, pp. 1008-1013, 2000.
- [11] K. Eberl, M.O. Lipinski, Y. Manz, W. Winter, N.Y. Jin-Phillipp, and O.G. Schmidt, "Self-assembled quantum dots for optoelectronic devices on Si and GaAs," *Physica E*, vol. 9, pp. 164-174, 2001.
- [12] W. Seifert, N. Carlsson, M. Miller, M.-E. Pistol, L. Samuelson, and L. R. Wallenberg, "In-situ growth of quantum dot structures by the Stranski-Krastanow growth mode," *Prog. Crystal Growth and Charact.*, vol. 33, pp. 423-471, 1996.
- [13] H. Sunamura, S. Fukatsu, N. Usami, and Y. Shiraki, "Photoluminescence investigation on growth mode changeover of Ge on Si(100)," *J. Crystal Growth*, vol. 157, pp. 265-269, 1995.
- [14] ตัวอย่างเช่นใน H. Fu H, L.-W. Wang, and A. Zunger, "Applicability of the k-p method to the electronic structure of quantum dots," *Phys. Rev. B*, vol. 57, pp. 9971-9987, 1998.
- [15] M. Grundmann, O. Stier, and D. Bimberg, "InAs/GaAs pyramidal quantum dots: strain distribution, optical phonons, and electronic structure," *Phys. Rev. B*, vol. 52, pp. 11969-11981, 1995.
- [16] A. Zrenner, "A close look on single quantum dots," *J. Chem. Phys.*, vol. 112, pp. 7790-7798, 2000.
- [17] K. Köhler, "Molecular beam epitaxy of GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/In<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>As heterostructures for opto-electronic devices: control of

- growth parameters," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 100/101, pp. 383-390, 1996.
- [18] Ch. Heyn, D. Endler, K. Zhang, and W. Hansen, "Formation and dissolution of InAs quantum dots on GaAs," *J. Crystal Growth*, vol. 210, pp. 421-428, 2000.
- [19] L.G. Wang, P. Kratzer, N. Moll, and M. Scheffler, "Size, shape, and stability of InAs quantum dots on the GaAs(001) substrate," *Phys. Rev. B*, vol. 62, pp. 1897-1904, 2000.
- [20] A. Y. Cho, "Growth of III-V semiconductors by molecular beam epitaxy and their properties," *Thin Solid Film*, vol. 100, pp. 219-317, 1983.
- [21] Q. Xie, A. Madhukar, P. Chen, and N. P. Kobayashi, "Vertically self-organized InAs quantum box islands on GaAs(100)," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 75, pp. 2542-2545, 1995.
- [22] A. Endoh, Y. Nakata, Y. Sugiyama, M. Takatsu, and N. Yokoyama, "Effect of size fluctuations on photoluminescence spectral linewidth of closely stacked InAs self-assembled quantum dot structures," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 38 part 1, pp. 1805-1809, 1999.