

วิวัฒนาการของการเกิดอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอตที่ปลูกบนแผ่นฐานลายตาราง



นายธีรวัฒน์ ลิ้มวงศ์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

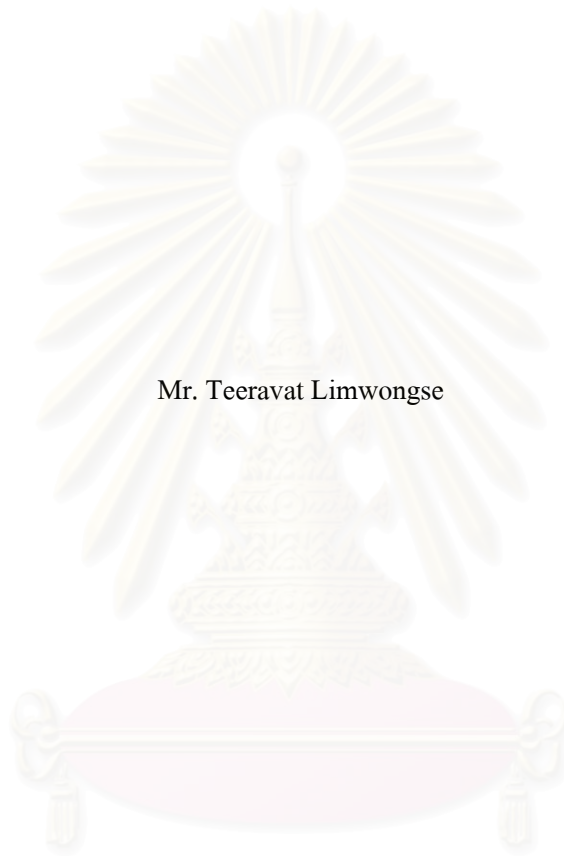
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EVOLUTION OF InAs QUANTUM DOTS GROWN ON CROSS-HATCH SUBSTRATES



Mr. Teeravat Limwongse

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

ธีรวัฒน์ คิมวงศ์ : วิวัฒนาการของการเกิดอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอตที่ปลูกบนแผ่นฐานลายตาราง.
(EVOLUTION OF InAs QUANTUM DOTS GROWN ON CROSS-HATCH SUBSTRATES)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร. ทรงพล กาญจนชูชัย, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม :
ดร. ชัญญา ธนชยานนท์, 96 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิวัฒนาการของการเกิด InAs ควอนตัมดอตบนแผ่นฐานลายตาราง InGaAs ซึ่งเริ่มมาจากการสังเกตการณ์การเกิดควอนตัมดอตบนแผ่นฐานลายตาราง พบว่ากลุ่มของควอนตัมดอต ในแต่ละตำแหน่งมีช่วงความสูงที่แตกต่างกัน จากการทำ Image thresholding ของชิ้นงานดังกล่าว ได้แบ่งควอนตัมดอตบนผิวหน้าออกได้เป็น 4 กลุ่ม เรียงตามความสูงจากมากไปน้อยได้แก่ กลุ่มควอนตัมดอตที่จุดตัดของลายตาราง กลุ่มควอนตัมดอตบนแนวเส้นลายตารางที่ขนานกับทิศ [1-10] ตามด้วยทิศ [110] และกลุ่มสุดท้ายคือกลุ่มควอนตัมดอตบนพื้นเรียบที่ไม่มีลายตาราง จึงได้ตั้งสมมติฐานว่าควอนตัมดอตทั้ง 4 กลุ่มนี้มีลำดับการเกิดก่อนหลังตามความสูงที่จัดกลุ่มไว้ โดยกลุ่มที่สูงกว่าก่อตัวขึ้นก่อน

เพื่อพิสูจน์ข้อสมมติฐานข้างต้น คุณสมบัติของชั้นลายตารางจึงถูกปรับทั้งสัดส่วน In ใน InGaAs และความหนาของชั้นลายตาราง และได้ผลว่า เมื่อสัดส่วนของ In และความหนาของชั้น InGaAs ลดลงจะทำให้ความหนาแน่นเชิงเส้นของลายตารางลดลงทั้งแนว [1-10] และ [110] เนื่องจากทั้งสองวิธีมีผลในการลดความเครียดภายในชั้นลายตาราง ซึ่งความเครียดนี้ส่งผลต่อการเกิด Dislocation เมื่อทำการปลูกควอนตัมดอตทับบนลายตาราง ควอนตัมดอตจะเรียงตัวตามเส้น Dislocations ที่เกิดขึ้นนี้ การทดลองอีกชุดหนึ่งคือการปรับปริมาณ InAs ในชั้นควอนตัมดอต โดยเปลี่ยนค่าเป็น 0.8, 0.76 และ 0.72 ML ขณะที่มอดอร์หมุนแผ่นฐาน หรือทำการปลูกโดยหุยมอดอร์ที่หมุนแผ่นฐานและปลูกด้วยความหนาเทียบเท่า 0.8 ML ทั้งสองวิธีที่กล่าวมาให้ผลเชิงคุณภาพเช่นเดียวกันซึ่งสามารถพิสูจน์ว่าวิวัฒนาการของการเกิด InAs ควอนตัมดอตบนแผ่นฐานลายตาราง InGaAs เริ่มต้นจากการก่อตัวของควอนตัมดอตบน Threading dislocation (TD) ตามด้วยการก่อตัวที่จุดตัดของเส้นลายตาราง ตามด้วยการก่อตัวตามแนว Misfit dislocation (MD) ในทิศ [1-10] ตามด้วยตามแนว MD ในทิศ [110] และตามด้วยการก่อตัวบนพื้นเรียบ หลักการพื้นฐานที่ใช้อธิบายลำดับการก่อตัวดังกล่าวคือ การกระจายตัวอย่างไม่สมมาตรของความเครียด รอบๆเส้น Dislocation ซึ่งแสดงให้เห็นด้วยการจำลอง

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อนิสิต..... ธีรวัฒน์ คิมวงศ์
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก..... ทรงพล กาญจนชูชัย
ปีการศึกษา 2551..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม..... ชัญญา ธนชยานนท์

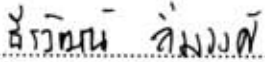


4970362621 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: / InAs QD / InGaAs / CROSS-HATCH / STRAIN / DISLOCATION

TEERAVAT LIMWONGSE : EVOLUTION OF InAs QUANTUM DOTS GROWN ON CROSS-HATCH SUBSTRATES. THESIS PRINCIPAL ADVISOR : ASSOC. PROF. SONGPHOL KANJANACHUCHAI, DR. THESIS COADVISOR : CHANCHANA THANACHAYANONT, DR., 96 pp.

This thesis reports the evolution of InAs QDs on InGaAs cross-hatch substrates. By observing the differences of QDs formed on the cross-hatch substrate, it is found that the heights are different. Image thresholding analyses indicate that surface QDs can be categorized into 4 groups in order of height: those formed at the intersection of the cross-hatch; those formed along the [1-10] direction, along the [110] direction, and those formed on the flat area. It is thus hypothesized that these 4 groups of QDs may form on cross-hatch in sequence, with taller dots being earlier formed.

In order to probe the above hypothesis, the properties of the cross-hatch layer are adjusted. Both the In composition in and the thickness of the InGaAs cross-hatch layer are varied. It is found that when the In content and the thickness of the InGaAs decrease, the line density of the cross-hatch in both [110] and [1-10] directions also decrease. This is due to the fact that both methods reduce the strain in the cross-hatch layer. Consequently, the dislocations are affected. When QDs are grown on the cross-hatch surface, they are aligned along these direction lines. In another set of experiment, the amount of InAs QD layer is varied by setting the deposited amount to 0.8, 0.76 and 0.72 ML while the substrate rotates, or by stopping substrate rotation and grow up to a nominal thickness of 0.8 ML. Both procedures yield the same qualitative results which prove that InAs quantum dots grown on cross-hatch substrates evolves from the formation of QDs *on* threading dislocation (TD), *at* the intersections of cross-hatches, *along* the [1-10] misfit dislocation (MD) lines, *along* the [110] MD lines, and *on* the flat area. The underlying principle which explains the formation sequence is asymmetrical strain distribution around dislocation lines which is shown by simulation.

Department.....Electrical Engineering..... Student's signature..... .....
 Field of study.....Electrical Engineering Principal Advisor's signature..... .....
 Academic year...2008..... Co-advisor's signature..... .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีอาจสำเร็จลุล่วงได้ตามเป้าหมายที่วางไว้ หากขาดเครื่องมือทำการทดลองและวิจัย รวมทั้งการช่วยเหลือและสนับสนุนจากผู้มีพระคุณทั้งหลายในห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาคไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้เขียนขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร. ทรงพล กาญจนชูชัย ที่เอื้อเพื่อสละเวลาอันมีค่า เพื่อมาช่วยเหลือ ดูแลและให้คำปรึกษาอันมีประโยชน์ยิ่ง แก่ข้าพเจ้ามาตั้งแต่ข้าพเจ้าเรียนปริญญาตรีจนกระทั่งจบการศึกษาระดับปริญญาโท

ผู้เขียนขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. ชัญชนา ธนชยานนท์ ที่เอื้อเพื่อสละเวลาอันมีค่า ให้คำปรึกษา และให้คำแนะนำตอนสอบขออนุมัติหัวข้อวิทยานิพนธ์

ผู้เขียนขอขอบคุณคณะกรรมการสอบอนุมัติหัวข้อวิทยานิพนธ์ สอบจบการศึกษาประกอบไปด้วย ศ. ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว รศ.ดร.มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร ดร. สุวัฒน์ โสภิตพันธ์ และอาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ผู้เขียนขอขอบคุณพี่ๆห้องธุรการ ที่ให้ความช่วยเหลือด้านงานธุรการ และทางเทคนิค ประกอบไปด้วย พี่ศุภโชค และ พี่ขวัญเรือน ไทยน้อย พี่พรชัย ช่างม่วง พี่พัฒนา พันธุ์วงศ์ และพี่ท่านอื่นๆที่ไม่ได้กล่าวถึง

ผู้เขียนขอขอบคุณพี่ๆปริญญาโท และ ปริญญาเอก ทั้งที่จบไปแล้ว และที่ยังศึกษาอยู่ที่ให้ความช่วยเหลืออย่างอบอุ่นเรื่อยมา

ผู้เขียนขอขอบคุณศูนย์วิจัยร่วมเฉพาะทางด้านส่วนประกอบฮาร์ดดิסקไดรฟ์ (I/UCRC in HDD Component) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) และสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (NSTDA) ที่ให้ทุนสนับสนุนทุนการศึกษาและทุนวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบคุณครอบครัว ประกอบไปด้วย บิดา มารดา และญาติพี่น้อง ที่เป็นกำลังใจ และให้คำปรึกษาอย่างดีตลอดมา ประโยชน์อันใดที่เกิดจากข้าพเจ้าขอบเป็นเครื่องบูชาบูรพาจารย์ตลอดจนคุณบิดามารดาที่เป็นผู้มีพระคุณยิ่งต่อข้าพเจ้า

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง | ฅ |
| สารบัญภาพ..... | ญ |
| | |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| | |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้พื้นฐาน | 5 |
| 2.1 เฮเทอโรเอพิแทกซ์ (Heteroepitaxy)..... | 5 |
| 2.2 ความไม่พอดีกันของค่าคงที่ผลึก (Lattice mismatch)..... | 9 |
| 2.2.1 ความเครียดและการผ่อนคลายความเครียด..... | 10 |
| 2.2.2 Dislocations..... | 11 |
| 2.2.3 Surface steps..... | 13 |
| 2.3 ควอนตัมดอต (Quantum dots)..... | 15 |
| 2.4 พื้นฐานลายตาราง (Cross-hatch substrate)..... | 17 |
| | |
| บทที่ 3 การปลูกโครงสร้างและการวัดลักษณะสมบัติ..... | 22 |
| 3.1 การปลูกโครงสร้างด้วยเครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล..... | 22 |
| 3.1.1 เครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล..... | 23 |
| 3.1.2 ระบบตรวจวัดแบบติดตั้งภายใน (in-situ)..... | 28 |
| 3.1.2.1 การวัดค่าความดันไอ (Flux measuring)..... | 29 |
| 3.1.2.2 RHEED (Reflective High-Energy Electron Diffraction)..... | 30 |
| 3.1.2.3 Quadrupole Mass Spectrometer..... | 33 |
| 3.1.3 กระบวนการการปลูก..... | 34 |
| 3.1.3.1 การเตรียมผิวหน้า..... | 34 |
| 3.1.3.2 การปลูกชั้นผลึก..... | 39 |
| ก. ชั้นผลึกแบบก้อนผลึก..... | 40 |

| | |
|--|----|
| ข. ชั้นควอนตัมดอท..... | 40 |
| ค. ชั้นลายตาราง..... | 42 |
| ง. ชั้นกลบทับ..... | 43 |
| 3.2 การวัดลักษณะสมบัติด้วยระบบวัดติดตั้งภายนอก (ex-situ)..... | 44 |
| 3.2.1 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM)..... | 44 |
| 3.2.2 ระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ (PL)..... | 39 |
| | |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์..... | 48 |
| 4.1 ควอนตัมดอทบนลายตาราง..... | 48 |
| 4.1.1 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนอินเดียมต่อแกลเลียม (ค่า X ใน $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$).. | 49 |
| 4.1.2 การเปลี่ยนแปลงความหนาชั้นลายตาราง..... | 50 |
| 4.2 วิวัฒนาการของการเกิดควอนตัมดอทบนลายตาราง..... | 53 |
| 4.2.1 วิธีที่ 1 (ชิ้นงาน u0817 และ u0815)..... | 56 |
| 4.2.2 วิธีที่ 2 (ชิ้นงาน u0840)..... | 60 |
| 4.3 สาเหตุการเกิดควอนตัมดอทบนพื้นผิวลายตาราง..... | 63 |
| 4.4 คุณสมบัติเชิงแสงของควอนตัมดอทโมเลกุล..... | 65 |
| | |
| บทที่ 5 สรุป..... | 68 |
| | |
| รายการอ้างอิง..... | 70 |
| ภาคผนวก..... | 75 |
| ผลงานตีพิมพ์..... | 81 |
| ผลงานนำเสนอ..... | 82 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 83 |

สารบัญตาราง

| | |
|---|------|
| ตาราง | หน้า |
| 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของ InAs, GaAs และ InGaAs [10]..... | 9 |



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 2.1 | แผนภาพเฟสสมดุล (Equilibrium phase diagram) ในรูปของฟังก์ชันระหว่าง H กับ \mathcal{E} โดยภาพประกอบด้านบนและล่างแสดงถึงลักษณะของผิวหน้าของโหนดต่างๆ ทั้ง 6 โหนด สามเหลี่ยมเล็กสีขาวแทนโครงสร้างเกาะสามมิติที่มีเสถียรภาพ สามเหลี่ยมใหญ่ระบายสีข้างในแทนโครงสร้างเกาะสามมิติที่โตเต็มที่ (Ripening island) เฟสแต่ละรูปแบบถูกแบ่งด้วยเส้นขอบเขต $Hc_1(\mathcal{E})$: FM-R ₁ , FM-SK ₁ ; $Hc_2(\mathcal{E})$: SK ₁ -R ₂ ; $Hc_3(\mathcal{E})$: SK ₂ -SK ₁ ; $Hc_4(\mathcal{E})$: VW-SK ₂ , VW-R ₃ | 6 |
| 2.2 | Unit cell และขอบเขตของค่าคงที่ผลึกของ GaAs..... | 10 |
| 2.3 | การเกิดชั้นผลึกของคู่สารที่ไม่เข้ากันแบบอัดตัว (Compressive)..... | 10 |
| 2.4 | รูปแบบของ dislocation แบบ (a) Edge dislocation โดย b คือ Bergers vector เส้นที่เกิดจากการแยกของชั้นคือ dislocation line และ (b) Screw dislocation..... | 11 |
| 2.5 | Dislocation ของฟิล์มที่ปลูกบนแผ่นฐานแบบมีความไม่เข้ากันของค่าคงที่ผลึก (a) Slip plane ของ (001)-Face Center Cubic (FCC) แสดง Misfit dislocation และ Threading dislocation ที่เกิดขึ้น (b) Bergers vector ของ Slip plane ดังกล่าว แยกย่อยเป็น Edge-, Screw Bergers vector..... | 12 |
| 2.6 | TD และ MD (a) เมื่อ $h < h_c$ ยังไม่ปรากฏ MD ขึ้น และ TD มาจากแผ่นฐานเท่านั้น (b) เมื่อ $h > h_c$ แล้ว TD จะเริ่มเคลื่อนและทำให้ MD ยาวขึ้น $\Delta\lambda$ ตามความหนา dh ที่มากขึ้น (c) เมื่อ TD เคลื่อนมาจนพบกับ MD อีกเส้นที่ขวางอยู่ TD จะหยุดเคลื่อนที่ กลายเป็น Immobile TD | 13 |
| 2.7 | การเกิด Surface step elimination (a) ชั้นฟิล์มเกิด Compressive strain (b) เกิด Dislocations และ Surface steps ตามมา (c) เมื่อเพิ่มความหนาต่อไป จะเกิดเนินที่เกิดจาก Surface step elimination..... | 14 |
| 2.8 | (แถวบน) โครงสร้างแบบก้อนผลึก, แบบควอนตัมเวลล์ และแบบควอนตัมดอต (แถวกลาง) สถานะแบบชั้นของควอนตัมเวลล์และควอนตัมดอต (แถวล่าง) ความหนาแน่นสถานะ (DOS)..... | 15 |
| 2.9 | ระดับพลังงานภายในของโครงสร้างแบบก้อนผลึก (ซ้าย) และ ควอนตัมดอต (ขวา)..... | 16 |
| 2.10 | ลักษณะของการเกิดควอนตัมดอต InAs บนแผ่นฐาน GaAs แบบ SK..... | 17 |
| 2.11 | ผิวหน้าของควอนตัมดอต Ge ปลูกบน SiGe/Si (100) ที่วัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม..... | 19 |

| รูปที่ | หน้า | |
|--------|---|----|
| 2.12 | ผิวหน้าลายตารางจากสารประกอบหมู่ III-V (a) $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 50 nm บน GaAs (001) (b) เมื่อปลูกทับด้วยควอนตัมดอต InAs 0.8 ML ทั้ง (a) และ (b) วางในทิศทางเดียวกัน ตามลูกศร..... | 19 |
| 2.13 | ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาวิกฤติของชั้น InGaAs (Monolayer) ที่ปลูกบน GaAs กับสัดส่วนของ In (ค่า X)..... | 20 |
| 3.1 | เครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล RIBER 32P..... | 23 |
| 3.2 | Diaphragm pump..... | 24 |
| 3.3 | รูปแบบโมเลกุลของ Zeolite (ซ้าย) ตัวอย่าง Sorption pump (กลาง) และ ภาคตัดขวาง (ขวา)..... | 25 |
| 3.4 | แผนภาพอย่างง่ายภายในห้องปลูกของเครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล..... | 26 |
| 3.5 | ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมแสดงผิวหน้าของชั้นงานเดียวกันเมื่อวัด (ก) ทันที หลังจากปลูก และ (ข) เมื่อปล่อยให้ทิ้งไว้ 4 เดือน..... | 28 |
| 3.6 | แผนผังแสดงระบบ RHEED..... | 30 |
| 3.7 | RHEED pattern (ก) ผิวหน้า GaAs ที่เรียบ (ข) ผิวหน้าของแผ่นฐาน GaAs หลัง De-ox และ (ค) ผิวหน้าของ InAs ควอนตัมดอตบนแผ่นฐาน GaAs..... | 31 |
| 3.8 | (ซ้าย) Specular beam (ขวา) ตำแหน่งของ Specular beam บน RHEED screen เมื่อลำ อิเล็กตรอนยิงมาทางทิศ [1-10]..... | 31 |
| 3.9 | ความสัมพันธ์ของลักษณะผิวหน้าและ RHEED oscillation (a) การก่อตัวของ GaAs บน GaAs (001) 1 ML จาก A ไป E (b) การสั่นของความสว่างของ Specular beam (00) ขณะทำการปลูก GaAs บนแผ่นฐาน GaAs (100) (c) ความสว่างของ Specular beam กับการก่อตัวของผลึกใน (a) | 32 |
| 3.10 | แผนภาพการทำงานของ Quadrupole mass analyzer..... | 33 |
| 3.11 | Profile ของโปรแกรมอัตโนมัติของกระบวนการ Heat treatment (Pre-heat)..... | 35 |
| 3.12 | Profile ของกระบวนการ De-gas ช่องสาร In และ Ga..... | 36 |
| 3.13 | Profile ของกระบวนการ De-ox ที่รวมขั้นตอนการวัดแรงดันไอของ As_4 ด้วย..... | 37 |
| 3.14 | แผนภาพแสดง RHEED pattern ณ อุณหภูมิ T_1 - T_4 สำหรับการหา T_{trans} | 39 |
| 3.15 | ภาพจาก RHEED screen ขณะปลูกควอนตัมดอต InAs บนแผ่นฐานลายตาราง $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ (a) เมื่อเริ่มเกิดควอนตัมดอต (b) เกิดควอนตัมดอตแล้ว (c) Chevron pattern..... | 40 |
| 3.16 | ความสัมพันธ์ของ Chevron pattern ต่อลักษณะทางกายภาพของควอนตัมดอต..... | 41 |

| รูปที่ | หน้า |
|--------|---|
| 3.17 | การกลบทับแบบบางสำหรับปลูกโครงสร้างควอนตัมคอตความหนาแน่นสูง (a) กลบทับแบบบางและปลูกซ้ำด้วยความหนา 0.6 ML 3 ครั้ง (b) กลบทับแบบบาง และปลูกซ้ำด้วยความหนา 0.6 ML 4 ครั้งแรกและ 1.2 ML ครั้งสุดท้าย43 |
| 3.18 | Seiko SPA-400 (a) ภาพจริงของเครื่องที่ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (b) แผนภาพอย่างง่ายของการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม.....44 |
| 3.19 | ระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์.....46 |
| 4.1 | ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมแสดง InAs ควอนตัมคอตบนแผ่นฐานลายตาราง $In_xGa_{1-x}As$ เมื่อ X มีค่าเป็น (a) 0.08, (b) 0.10, (c) 0.16 และ (d) 0.20 โดยทุกภาพมีขนาด $10 \times 10 \mu m^2$ ลูกศรแสดงทิศ [1-10] (e) แบบจำลองของภาพตัดขวางโครงสร้างของชั้นงาน ในการทดลอง.....49 |
| 4.2 | ผิวหน้าของ InAs ควอนตัมคอตกลบทับบนแผ่นฐานลายตาราง $In_{0.15}Ga_{0.85}As$ ที่ความหนา ของชั้นลายตาราง (a) 50 nm (b) 100 nm และ (c) 150 nm วัดจากกล้องจุลทรรศน์แรง อะตอม ทิศทางตามลูกศรคือทิศ [1-10]50 |
| 4.3 | แบบจำลองของภาพตัดขวางของ InAs ควอนตัมคอตบนแผ่นฐานลายตาราง $In_{0.15}Ga_{0.85}As$ ที่ความหนา (a) 50 nm (b) 100 nm (c) 150 nm51 |
| 4.4 | (a) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมแสดงผิวหน้าขนาด $10 \times 10 \mu m^2$ โดยลูกศรแสดง ทิศทาง [1-10] และ (b) แบบจำลองภาพตัดขวางโครงสร้างของชั้นงาน u0842.....52 |
| 4.5 | (a) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมแสดงผิวหน้าชั้นงานขนาด $2 \times 2 \mu m^2$ และภาพจาก ใช้ Image thresholding โดยมีระดับ Threshold ที่ (b) 5.5-, (c) 4.9-, (d) 4.0- และ (e) 3.0 nm โดยสีขาวหมายถึงบริเวณที่มีความสูงต่ำกว่า และสีดำหมายถึงบริเวณที่มีความ สูงสูงกว่าค่า Threshold.....53 |
| 4.6 | ชั้นงาน u0811 : ชั้นลายตาราง $In_{0.2}Ga_{0.8}As$ เปล่าๆบนแผ่นฐาน GaAs (a) โครงสร้างชั้นงาน (b) ผิวหน้าชั้นงานที่วัดจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมขนาด $10 \times 10 \mu m^2$ ทิศทางตามลูกศร (c) Line scan ผิวหน้าชั้นงานกับทิศ [110] เพื่อวัดความสูง ของเส้นลายตารางทิศ [1-10] (d) Line scan ผิวหน้าชั้นงานกับทิศ [1-10] เพื่อวัดความสูง เส้นลายตารางทิศ [110].....55 |
| 4.7 | ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมแสดงผิวหน้าของชั้นงาน u0817 ขนาด (a) $10 \times 10 \mu m^2$ และ (b) $2 \times 2 \mu m^2$ โดยลูกศรแสดงทิศทาง [1-10].....56 |
| 4.8 | ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมแสดง (a) ผิวหน้าชั้นงาน u0817 กับรูปที่ 4.7 ขนาด $8 \times 5 \mu m^2$ และ (b), (c) ส่วนขยายขนาด $2.5 \times 2.5 \mu m^2$ ของบริเวณที่ตีกรอบเส้นประใน |

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| (a) โดย Line scans ในทิศทางขนานกับ [1-10] และ [110] ในรูป (b) และ (c) ถูกแสดง ในรูป (d) และ (e) ตามลำดับ..... | 57 |
| 4.9 สภาพของผิวหน้าของชั้นงานที่ลดปริมาณ InAs ลงไปเป็นก่อนที่จะก่อตัวเป็นควอนตัม ดอตจาก 0.8 ML เหลือ 0.72 ML วัดจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมที่ (a) $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ และ (b) $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ ลูกศรแสดงทิศ [1-10]..... | 58 |
| 4.10 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมขนาด $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ ของชั้นงาน 27n (InAs ควอนตัมดอตที่ความหนา ต่ำกว่า 0.8 ML บน $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ หนา 50 nm) และภาพแสดงวิวัฒนาการการเกิดควอนตัมดอตที่จุดของตัดลายตาราง จากทั้ง 6 จุดที่ทำ เครื่องหมายไว้..... | 59 |
| 4.11 ผิวหน้าชั้นงาน u0840 ที่ตำแหน่งต่างๆกันแสดงถึง InAs ควอนตัมดอต บนชั้นลายตารางที่ปริมาณ InAs ต่างๆกัน ลูกศรแสดงทิศ [1-10] ภาพจากกล้อง จุลทรรศน์แรงอะตอมแถวบนเป็นภาพขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ และแถวล่างมีขนาด $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ เป็นส่วนขยายจากบริเวณที่ติกรอบในภาพบน..... | 62 |
| 4.12 ภาพแสดงแบบจำลองของการกระจายตัวของความเครียดบนผิวหน้าสองมิติของ ชั้นลายตาราง (a) ของแนว [110] (b) ของแนว [1-10] และ (c) ของจุดตัดของทั้งสองแนว (d) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ขนาด $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ แสดงผิวหน้าและเส้นประหมายถึงบริเวณที่ แบบจำลองเป็นสีเข้มที่สุด..... | 63 |
| 4.13 (a) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมขนาด $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ แสดงผิวหน้าชั้นงาน u0702 (b) การกระจายตัวของความเค้นอัดที่ผิวหน้าฟิล์มจาก Surface step แต่ละเส้นของ u0702 ทับซ้อนกัน ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับที่ใช้ในรูปที่ 4.12 โดยสีอ่อนหมายถึง ความเค้นอัดต่ำ สีเข้มหมายถึงความเค้นอัดสูง (c) นำ b ไปซ้อนทับบน a แสดงถึง โอกาสที่แต่ละบริเวณจะมีการก่อตัวของควอนตัมดอต..... | 64 |
| 4.14 (a) ภาพตัดขวางของ โครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุลผลและผลการแปลงแสงที่วัด ได้จากชั้นงานจริง (เส้นทึบ) และผลจากการใช้เครื่องมือเพื่อจำแนกออกเป็น Gaussian functions (เส้นประ) ของชั้นงานที่มีการกลบทับแบบบาง (a) 15 และ (b) 25 ML รูปเล็กที่แทรกอยู่แสดงถึง โครงสร้างที่สามารถอธิบาย ผลการแปลงแสงที่แสดงไว้ได้..... | 67 |

บทที่ 1

บทนำ

สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor devices) ได้มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายและยาวนาน จนถึงปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำก็ยังมีการพัฒนามาตลอด ทั้งด้านเทคนิคการปลูกผลึก (Epitaxial growth) และการพัฒนาโครงสร้าง (Structure) ของสิ่งประดิษฐ์ อันเนื่องมาจากการศึกษาลักษณะเฉพาะตัว (Characterization) ของสารกึ่งตัวนำแบบสารบริสุทธิ์ และสารกึ่งตัวนำผสม (Compound semiconductor) ตลอดมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำนั้นไม่ได้ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในเฉพาะด้านคุณสมบัติทางไฟฟ้าเท่านั้น แต่ยังถูกใช้ทางด้านแสงอีกด้วย ทั้งความสามารถในการตรวจจับแสง และความสามารถในการเปล่งแสงของสิ่งประดิษฐ์ เช่น ตัวตรวจจับแสง (Photodetector) หลอดไดโอดเปล่งแสง (LED, Light Emitting Diode) เลเซอร์ (LASER) เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) ซึ่งสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่กล่าวมานี้สามารถพบเห็นได้ทั่วไปจากชีวิตประจำวัน ดังนั้นการศึกษาลักษณะเฉพาะตัวของสารกึ่งตัวนำ เทคนิคการปลูกโครงสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ จึงไม่ใช่เรื่องไกลตัว และยังน่าสนใจต่อการค้นคว้าวิจัย เพราะอย่างยิ่งสามารถคิดค้นเทคนิค หรือการประยุกต์ใช้ใหม่ๆ ได้ เพื่อสร้างโครงสร้างขนาดเล็ก รูปแบบต่างๆ เช่น ควอนตัมเวลล์ (Quantum well) ควอนตัมดอต (Quantum dot) ซุปเปอร์แลตทิซ (Super lattice) ควอนตัมริง (Quantum ring) ควอนตัมดอตโมเลกุล (Quantum dot molecule) และควอนตัมดอตบนลายตาราง (Cross-hatch quantum dots) [1,2,3,4,5]

การปลูกผลึกของสารกึ่งตัวนำสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การปลูกผลึกด้วยวิธีการเกิดผลึกจากสถานะของเหลว (LPE, Liquid Phase Epitaxy) การปลูกผลึกแบบการเกาะตัวด้วยไอเคมี (CVD, Chemical Vapor Deposition) สำหรับหนึ่งในวิธีที่มีความละเอียดสูงที่สุดในการสร้างผลึกสารกึ่งตัวนำ คือวิธีการปลูกผลึกด้วยเครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล (MBE, Molecular Beam Epitaxy) เพราะสามารถควบคุมการเกิดชั้นได้ในระดับหน่วยของ ชั้นอะตอมต่อวินาที (ML/s, Monolayer per second) แล้วยังสามารถใช้เทคนิคการปลูกผลึกได้หลายแบบ จากการควบคุมการเปิด-ปิดชัตเตอร์ (Shutter) ของแต่ละช่องสาร (Effusion Cell) เพื่อควบคุมการผสมสาร และอัตราส่วนของสารผสม (Compound) จากการควบคุมอุณหภูมิของเตา (Crucible) ของแต่ละช่อง ด้วยความละเอียดที่สูงในระดับนี้ ทำให้สามารถปลูกชั้น Heterostructure ได้ด้วยความหนาที่น้อยในระดับนาโนเมตร

(Nanometer) ถึงอังสตรอม (Angstrom, Å) เพื่อให้เกิดเป็นโครงสร้างควอนตัมเวลล์ ซึ่งมีระดับความอิสระสองมิติ [6] สามารถใช้กักประจุพาหะ (Charged carrier) ไว้ได้ และยังสามารถนำมาใช้เป็นโครงสร้างของหลอดไดโอดเปล่งแสง [7,8] เพราะสามารถใช้เป็นแหล่งรวมตัวแบบเปล่งแสงของประจุพาหะ (Radiative recombination center) [6] ได้อีกด้วย มีประโยชน์ใช้ประยุกต์ได้มากมาย และถ้าสารที่ใช้มีค่าคงที่ผลึก (Lattice constant) ต่างกันมากถึงค่าหนึ่ง ประกอบกับความหนาชั้นผลึกถึงค่าความหนาวิกฤติ (Critical thickness) จะทำให้เกิดเป็นโครงสร้างสามมิติขนาดเล็กที่สามารถกักประจุพาหะไว้ได้เช่นกัน แต่เป็นที่ระดับความอิสระเป็นศูนย์ และมีระดับพลังงานเป็นชั้นๆแบบไม่ต่อเนื่องดังเป็นอะตอมเสมือน (Artificial atom) นั่นคือโครงสร้างควอนตัมคอต [1]

โครงสร้างควอนตัมคอตเป็นโครงสร้างสามมิติซึ่งเกิดจากการคลายความเครียดของการเกาะกันของสารที่มีความไม่พอดีกันของค่าคงที่ผลึกและความหนามากพอ โครงสร้างควอนตัมคอตนั้นมีปัจจัยที่ส่งผลถึงลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงหลายปัจจัยได้แก่ ขนาดและรูปร่างของควอนตัมคอต และส่วนประกอบของสารภายในโครงสร้างควอนตัมคอต ขนาดที่แตกต่างกันของควอนตัมคอตก็จะส่งผลถึงค่าระดับพลังงานภายในของควอนตัมคอต [1] โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติทางแสงของควอนตัมคอต ขนาดของควอนตัมคอตที่แตกต่างกันก็จะให้ผลตอบสนองทางแสงที่แตกต่างกัน ทั้งนี้นอกจากคุณสมบัติของควอนตัมคอตแต่ละคอตแล้ว การเรียงตัวของกลุ่มของควอนตัมคอตก็ยังสามารถศึกษาด้วยว่าให้ผลต่อขั้ว (Polarization) ของผลการเปล่งแสงของชิ้นงานที่มีกลุ่มของควอนตัมคอตอีกด้วย [9]

แผ่นฐานตั้งต้น (Substrate) ที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดสำหรับงานในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นแผ่นฐานตั้งต้น GaAs (Gallium arsenide) ระนาบ (Plane) 100 ซึ่งเขียนตามข้อกำหนดของ Miller indices เป็นรูปแบบมาตรฐานคือ (100) โดยโครงสร้างทุกโครงสร้างที่ปลูกภายใต้วิทยานิพนธ์นี้เป็นการปลูกบนแผ่นฐานตั้งต้นชนิดนี้โดยตรง รวมทั้งแผ่นฐานลายตารางที่ศึกษาก็ต้องทำการปลูกบนแผ่นฐาน (100)-GaAs นี้ด้วยเช่นกัน

แผ่นฐานลายตาราง (Cross-hatched substrate) เป็นหนึ่งในแผ่นฐานที่สามารถปลูกควอนตัมคอตทับด้านบนได้ และยังสามารถส่งผลต่อการประกอบตนเอง (Self assembly) [3] ของกลุ่มของควอนตัมคอตที่ปลูกลงไป รวมทั้งตำแหน่งการเกิดก่อนและหลังของควอนตัมคอตเมื่อทำการปลูกชั้นของควอนตัมคอตไปเรื่อยๆอย่างต่อเนื่อง แผ่นฐานลายตารางที่ใช้เกิดจากการปลูกผลึกแบบสอง

มิติของสารประกอบ InGaAs [10] แต่ชั้นของแผ่นฐานลายตารางจะแตกต่างจากการปลูกผลึกแบบสองมิติทั่วไปคือ ภายในแผ่นฐานลายตารางจะมีจุดที่เกิดความผิดปกติทางตำแหน่งของอะตอมที่เกาะกัน (Dislocations) และความผิดปกตินี้ก็ยังส่งผลต่อเนื่องไปสู่ผิวหน้าของชั้นแผ่นฐานนี้อีกด้วย โดยทำมุม 60° จากแนวระนาบก่อให้เกิดความผิดปกติของโครงผลึกสองแบบ เรียกว่า Threading dislocations และ Misfit dislocation [11,12,13,14]

เอกลักษณ์ของแผ่นฐานชนิดนี้คือเป็นเส้นสองแนวไขว้กันเป็นลายตารางทั่วทั้งผิวหน้า ทั้งนี้เส้นลายตารางดังกล่าวสามารถปรับแต่งความสูง ความหนาแน่นของจำนวนเส้น ได้จากปัจจัยหลายอย่างในระหว่างการปลูก เช่น ความหนาของชั้นแผ่นฐาน [15] และอัตราส่วนของส่วนประกอบของสารภายในชั้นแผ่นฐานลายตาราง [3] เป็นต้น

วิวัฒนาการการเกิดอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอทบนแผ่นฐานลายตาราง เริ่มจากการศึกษาลักษณะการเกิดควอนตัมดอทบนแผ่นฐานลายตาราง โดยศึกษาทั้งขนาดของควอนตัมดอทบนลายตารางเทียบกับควอนตัมดอทบนแผ่นฐานแกเลียมอาร์เซไนด์ธรรมดา ซึ่งด้วยเงื่อนไขความหนาวิกฤติที่แตกต่างกัน รวมทั้งแผ่นฐานสำหรับปลูกควอนตัมดอทต่างกัน ผลที่ออกมาจึงมีลักษณะของควอนตัมดอท, การเรียงตัวของกลุ่มของควอนตัมดอทที่แตกต่างกัน และวิธีการเรียงตัวของกลุ่มของควอนตัมดอททั้งสองแบบ รวมทั้งเวลาของการเกิดควอนตัมดอทที่ตำแหน่งต่างๆกันไม่พร้อมกัน ทั้งที่อยู่ภายใต้สภาวะลำโมเลกุลของสารด้วยเงื่อนไขเดียวกัน [16]

ผลการศึกษาจากงานภายใต้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำให้พบว่าควอนตัมดอทบนลายตารางสามารถแบ่งได้ออกเป็น 5 กลุ่ม คือ กลุ่มที่เกิดตรง Threading dislocation กลุ่มที่เกิดตรงจุดของเส้นไขว้ของลายตาราง กลุ่มที่เกิดบนเส้นแนวที่ขนานกับทิศ [1-10] กลุ่มที่เกิดบนแนวเส้นที่ขนานกับทิศ [110] และกลุ่มที่เกิดบนบริเวณที่ไม่มีแนวเส้น โดยทั้ง 5 กลุ่มนี้จะแตกต่างกันทั้งขนาดและเวลาการก่อตัวเป็นควอนตัมดอท ดังนั้นจึงสามารถควบคุมการเกิดกลุ่มของควอนตัมดอทบนลายตารางได้ด้วยการหยุดเวลาการปลูกของชั้นอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอทที่เหมาะสมกับเงื่อนไขที่ต้องการให้เกิดควอนตัมดอทในบริเวณที่ต้องการ อย่างไรก็ตาม การปรับผิวหน้าของลายตารางสำหรับปลูกควอนตัมดอททับนั้น มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะของควอนตัมดอท และการเรียงตัวของกลุ่มของควอนตัมดอทบนลายตารางด้วย ดังนั้นวิธีการปรับแต่งแผ่นฐานให้

เหมาะสมกับเงื่อนไขการปลูกควอนตัมดอตก็เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเช่นกันกับปัจจัยอื่นๆของการปลูกควอนตัมดอตด้วย

ประโยชน์ที่ได้จากการศึกษาวิวัฒนาการการเกิดควอนตัมดอตบนลายตารางนี้คือการที่จะสามารถกำหนดให้เกิดควอนตัมดอตบนลายตารางแค่บางตำแหน่งเท่านั้น อันเนื่องมาจากเหตุผลที่กล่าวไปแล้ว และด้วยการที่สามารถควบคุมบริเวณที่ต้องการให้เกิดการก่อตัวของควอนตัมดอตได้ รวมทั้งขนาดและการเรียงตัวของกลุ่มของควอนตัมดอตทำให้สามารถควบคุมผลการเปล่งแสงของสิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้างควอนตัมดอตบนลายตารางได้ การปรับแต่งขนาดของควอนตัมดอตและการเรียงตัวของกลุ่มของควอนตัมดอต ก็จะส่งผลไปถึงความยาวคลื่นแสงที่จะเปล่งออกมาได้และรูปแบบของขั้วของแสงที่เปล่งออกมา ซึ่งการที่เราสามารถปรับแต่งการตอบสนองทางแสงของสิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้างควอนตัมดอตได้ ถือเป็นหนึ่งในการใช้ข้อได้เปรียบของโครงสร้างควอนตัมดอตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เนื้อหาในบทต่อไปของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบไปด้วย บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้พื้นฐาน บทที่ 3 การปลูกโครงสร้างและการวัดลักษณะสมบัติ ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในการปลูกโครงสร้างด้วยเทคนิค MBE (Molecular Beam Epitaxy) รวมทั้งระบบวัดลักษณะสมบัติและระบบตรวจวัดขณะปลูกโครงสร้างทั้งแบบติดตั้งภายในและภายนอกเครื่องปลูกผลึก บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ ซึ่งจะกล่าวถึงวิวัฒนาการการเกิดควอนตัมดอตบนลายตารางและความสำคัญของข้อมูลดังกล่าว ท้ายสุดเป็นการสรุปในบทที่ 5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

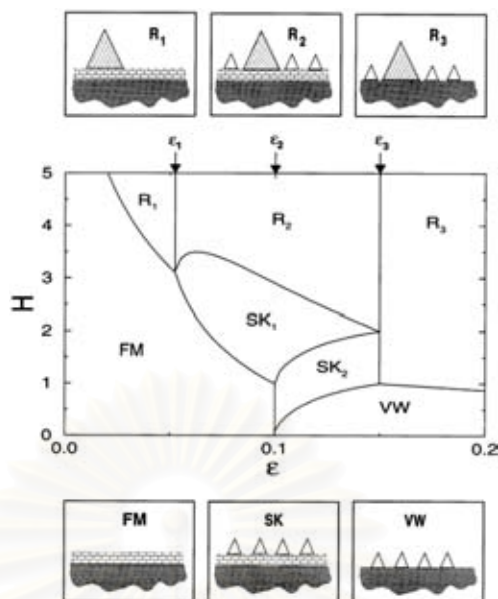
ทฤษฎีและความรู้พื้นฐาน

เนื้อหาในบทนี้ครอบคลุมถึงทฤษฎีและความรู้พื้นฐานที่จะใช้อ้างอิงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อให้สามารถเข้าใจถึงวิวัฒนาการของการเกิดควอนตัมดอทอินเดียมอาร์เซไนด์ที่ปลูกบนแผ่นฐานลายตาราง ประกอบด้วย 4 หัวข้อได้แก่ เฮเทอโรเอพิแทกซี (Heteroepitaxy), ความไม่พอดีกันของค่าคงที่ผลึก, ควอนตัมดอท และ แผ่นฐานลายตารางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 เฮเทอโรเอพิแทกซี (Heteroepitaxy)

เทคนิคการปลูกผลึกเดี่ยวชนิดฟิล์มบาง (Thin film epitaxy) สามารถให้ชั้นผลึกเดี่ยวที่หนาในระดับนาโนเมตร (Nanometer) ถึงไมโครเมตร (Micrometer, micron) ได้เนื่องจากฟิล์มบางนั้นมีการประยุกต์ใช้ได้หลายด้าน โดยเฉพาะด้านของสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์จำพวกสารกึ่งตัวนำ [17] ดังนั้นกระบวนการการเกิดชั้นผลึกแบบฟิล์มบางจึงมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมการผลิตสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำอย่างมาก

การปลูกผลึกด้วยเครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล (MBE) สามารถสร้างชั้นผลึกแบบฟิล์มบางที่สามารถควบคุมความหนาได้อย่างแม่นยำในระดับชั้นอะตอม และสามารถควบคุมความบริสุทธิ์ของเนื้อสารให้เข้าใกล้ความเป็นอุดมคติ เนื่องจากกระบวนการปลูกผลึกเกิดภายใต้ภาวะสุญญากาศ ซึ่งมีความดันต่ำในระดับ 10^{-9} ถึง 10^{-12} Torr และมีระบบสร้างสุญญากาศที่ทำงานอย่างต่อเนื่องตลอดกระบวนการ เครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุลอาศัยหลักการการปล่อยไอโมเลกุลออกไปเป็นลำ ไปถึงที่ชิ้นงาน เพื่อให้ลำโมเลกุลแตก (Dissociate) ถ่ายเทพลังงานภายใน และไปเกาะตัว (Deposit) อยู่ที่ผิวหน้าของชิ้นงาน ส่งผลให้เกิดการปลูกผลึก (Growth) ในรูปแบบต่างๆ ซึ่งถูกกำหนดโดยหลายปัจจัย โดยเฉพาะความไม่พอดีกันของค่าคงที่ผลึก ค่าความเครียด (Strain: ϵ) และความหนา (Thickness: H) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนภาพเฟสสมดุล (Equilibrium phase diagram) ในรูปของฟังก์ชันระหว่าง H กับ ϵ โดยภาพประกอบด้านบนและล่างแสดงถึงลักษณะของผิวหน้าของโหมดต่างๆ ทั้ง 6 โหมด สามเหลี่ยมเล็กสีขาวแทน โครงสร้างเกาะสามมิติที่มีเสถียรภาพ สามเหลี่ยมใหญ่ระบายสีข้างในแทน โครงสร้างเกาะสามมิติที่โตเต็มที่ (Ripening island) เฟสแต่ละรูปแบบถูกแบ่งด้วยเส้นขอบเขต $H_c(\epsilon)$: FM-

$$R_1, \text{ FM-SK}_1; H_c_2(\epsilon): \text{SK}_1\text{-R}_2; H_c_3(\epsilon): \text{SK}_2\text{-SK}_1; H_c_4(\epsilon): \text{VW-SK}_2, \text{ VW-R}_3 \text{ [18]}$$

รูปแบบการปลูกผลึกซึ่งขึ้นกับ ϵ และ H ดัง รูปที่ 2.1 มีอย่างต่ำ 3 โหมด ประกอบไปด้วย โหมดการเกิดชั้นผลึกแบบสองมิติ (Frank-van der Merwe, FM) โหมดการเกิดชั้น Wetting layer ผสมควอนตัมดอทซึ่งเรียกว่า สรานสกี-คราซานอฟ (Stranski-Krastanov, SK) และโหมดการเกิดควอนตัมดอทอย่างเดียว ที่เรียกว่า โวลเมอร์-วีเบอร์ (Volmer-Weber, VW) โดยตัวแปรหลักในการกำหนดว่าการปลูกผลึกจะเกิดขึ้นในโหมดใดได้แก่ความหนาของชั้นฟิล์ม (H) และความเครียดจากความไม่พอดีกันของค่าคงที่ผลึก (Misfit strain: ϵ)

$$\epsilon = \frac{a_f - a_s}{a_s} \quad (2.1)$$

เมื่อ a_f คือค่าคงที่ผลึกของฟิล์มบางในสภาวะสมดุล และ a_s คือค่าคงที่ผลึกของแผ่นฐาน (Substrate) ดังนั้นยิ่งค่าคงที่ผลึกของสารทั้งสองชนิดต่างกันมาก ($a_f - a_s$ มีค่าสูง) ความเครียด (ϵ) ก็ จะสูงขึ้นตามไปด้วย ค่าความเครียด (ϵ) และความหนาของฟิล์มที่ถูกปลูก (H) จะเป็นตัวกำหนด โหมดในการปลูกในรูปที่ 2.1 ดังนี้ [18]

1. **Frank-van de Merwe (FM, 2D growth mode)** เป็นโหมดของการเกิดชั้นผลึกเดี่ยวแบบสองมิติสมบูรณ์แบบ เกิดจากการรักษาให้สถานะขณะปลูกชั้นผลึกอยู่ในส่วน FM ในแผนภาพเฟสสมดุลโดยมีค่าความไม่พอดีกันของค่าคงที่ผลึกน้อย ($\epsilon < 0.1$) และความหนาต้องไม่เกินขอบเขตของแผนภาพในบริเวณของ FM มิฉะนั้นชั้นผลึกจะก่อตัวในโหมด SK_1 , R_1 หรือ R_2 แทน ดังจะกล่าวรายละเอียดในลำดับต่อไป

2. **Stranski-Krastanov (SK, 2D + 3D growth mode)** เป็นโหมดของการเกิดชั้นผลึกแบบสองมิติผสมกับสามมิติ เกิดจากการที่ค่าความเครียดจากความไม่พอดีกันของค่าคงที่ผลึกของสารที่มาเกาะตัวกับสารตั้งต้นมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ $0.05 < \epsilon < 0.15$ ทำให้ชั้นผลึกชั้นแรกๆสามารถเกาะตัวแบบสองมิติได้ โดยจะมีความเครียดสะสมอยู่ในชั้นฟิล์มกระทั่งการปลูกดำเนินต่อไปถึงค่าความหนาวิกฤต (Critical thickness: H_c) ชั้นผลึกสองมิติ (Wetting layer) ที่สะสมความเครียดไว้ก็จะคลายความเครียดเพื่อลดพลังงานรวมของระบบ เกิดเป็น โครงสร้างสามมิติหรือควอนตัมดอต (QD) ขึ้นมา อย่างไรก็ตามยังมีบางส่วนที่ยังคงสามารถเกาะกันแบบสองมิติได้ โดยยังคงมีความเครียดสะสมอยู่ส่วนหนึ่ง เรียกว่า Wetting layer

การเกิด Wetting layer และ QD ในโหมด SK มีสองรูปแบบคือ SK_1 และ SK_2 ซึ่งมีผลสุดท้ายที่ได้ไม่ต่างกัน แต่มีลำดับการเกิดต่างกันตามความหนาชั้นผลึกที่เพิ่มขึ้น ในกรณีของโหมด SK_1 มีการเกิดเป็นชั้นผลึกสองมิติก่อน เมื่อความหนาเพิ่มขึ้น ชั้นผลึกสองมิติคลายตัวเป็นรูปแบบสามมิติผสมสองมิติ แต่ในกรณีของโหมด SK_2 นั้นมีการเกิดรูปแบบสามมิติก่อน เมื่อความหนาชั้นผลึกเพิ่มมากขึ้น ก็จะมี Wetting layer ไปก่อตัว ณ บริเวณที่ไม่มีการก่อตัวแบบสามมิติในตอนแรก ทำให้ผลสุดท้าย SK ทั้งสองโหมดให้ผิวหน้าที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน คือเป็นรูปแบบการผสมของโครงสร้างสองมิติและสามมิติ อย่างไรก็ตามโหมด SK_2 แท้จริงแล้วคือการเกิดโครงสร้างสามมิติในโหมด VW ก่อน แต่ด้วยความเครียดที่ไม่สูงเกินไป ทำให้มีชั้น Wetting layer เกิดขึ้นได้ภายหลังเมื่อเพิ่มความหนา กลายจากโหมด VW เป็นโหมด SK_2

3. **Volmer-Weber (VW, 3D growth mode หรือ Island growth mode)** เป็นโหมดการเกิดชั้นผลึกแบบสามมิติซึ่งเกิดขึ้นทันทีที่เริ่มทำการปลูกชั้นผลึก เนื่องจากค่า ϵ ที่สูง ($\epsilon > 0.1$) ผลึกของสารที่มาเกาะตัวบนสารตั้งต้นมีความเครียดสูงกว่าแบบ SK ผลึกจึงต้องก่อตัวเป็นรูปแบบเกาะสามมิติเพื่อคลายความเครียดทันที

นอกจากโหมดการเกิดชั้นผลึกหลักสามโหมดข้างต้นแล้ว ยังมีโหมดรองซึ่งเป็นโหมดที่มีโครงสร้างสามมิติโตเต็มที่ (Ripening island) อีก 3 โหมดได้แก่

R_1 (2D + 3D growth mode) เมื่อ $\mathcal{E} < \mathcal{E}_1$ และ $H > 3 ML$ โดยประมาณ เป็นโหมดการเกิดชั้นผลึกที่เกิดขึ้นได้เมื่อมีการเพิ่มความหนาชั้นผลึกไปมากกว่าค่าความหนาวิกฤติสำหรับความเครียดค่าหนึ่งๆ ($H_c(\mathcal{E})$) จากชั้นผลึกแบบ FM ซึ่งลักษณะผิวหน้าคือจะมีการก่อตัวแบบสามมิติที่โตเต็มที่ (Ripening island) และมี Wetting layer อยู่ด้านล่าง

R_2 (2D + 3D growth mode) เมื่อ $\mathcal{E}_1 < \mathcal{E} < \mathcal{E}_3$ และ $H > 2-3 ML$ โดยประมาณ เป็นโหมดการเกิด Wetting layer, เกาะสามมิติ และ เกาะสามมิติที่โตเต็มที่ ซึ่งรูปแบบการเกิดนี้เกิดจากการปลูก SK_1 โดยเพิ่มความหนาไปเกินจุดแบ่ง SK_1-R_2 ในรูปที่ 2.1

R_3 (3D growth mode) เมื่อ $\mathcal{E} > \mathcal{E}_3$ และ $H > 1 ML$ โดยประมาณ โหมดการเกิดชั้นผลึกที่เพิ่มความหนาจาก VW จนความหนาเกินกว่าจุดแบ่ง $VW-R_3$ ในรูปที่ 2.1 เป็นผลให้เกิดเกาะสามมิติแบบปกติ และ เกาะสามมิติแบบที่โตเต็มที่ โดยไม่มี Wetting layer

สรุปได้ว่ารูปแบบการเกิดชั้นผลึกแบบต่างๆ มีปัจจัยสำคัญอยู่สองอย่างคือ 1) ความต่างของค่าคงที่ผลึกระหว่างสารที่ทำการปลูกกับสารที่เป็นแผ่นฐานตั้งต้น และ 2) ความหนาชั้นผลึกที่ทำการปลูก เนื่องจากสารแต่ละชนิดมีคุณสมบัติเฉพาะ (Characteristic) ที่แตกต่างกัน เช่นค่าคงที่ผลึกเป็นต้น เป็นสาเหตุให้เกิดการเกาะตัวกันเป็นชั้นผลึกแบบต่างๆ แต่สารบางชนิดอาจจะมีค่าคงที่ผลึกที่เข้ากันได้แม้ว่าจะเป็นคนละชนิดกัน เช่น GaAs และ AlGaAs [19] เนื่องจากค่าคงที่ผลึกมีค่าใกล้เคียงกันมากจนประมาณได้ว่ามีค่าคงที่ผลึกเท่ากัน ทำให้สามารถปลูกชั้นผลึกขึ้นแบบสองมิติแบบ Heterostructure ได้โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบโครงสร้างผลึก

สำหรับควอนตัมดอททั้งหมดภายใต้การทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะถูกปลูกในโหมด SK_1 เนื่องจากเป็นการปลูก InAs บน GaAs ($\mathcal{E} \sim 0.07$) หรือบน $In_{0.15}Ga_{0.85}As$ ($\mathcal{E} \sim 0.06$) โดยมีความหนา $H \sim 1.8 ML$ และ $H > 0.8 ML$ ในการปลูกบน GaAs และปลูกบน $In_{0.15}Ga_{0.85}As$ ตามลำดับ เนื้อหาในส่วนต่อไปเป็นการอธิบายเรื่องความไม่พอดีกันของค่าคงที่ผลึกซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อ \mathcal{E} และโหมดในการปลูกผลึก

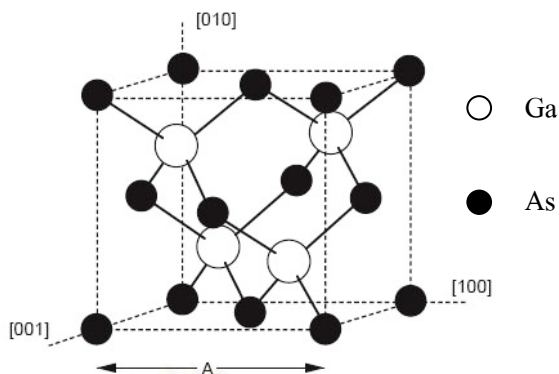
2.2 ความไม่พอดีกันของค่าคงที่ผลึก (Lattice mismatch)

ค่าคงที่ผลึก (Lattice constant : a) คือค่าความกว้างของ Unit cell ของผลึก วัดจากศูนย์กลางอะตอมริมสุดด้านหนึ่งของ Unit cell ไปถึงศูนย์กลางอะตอมริมสุดอีกด้านของ Unit cell ดังแสดงเป็นระยะ 'A' ในรูปที่ 2.2 ค่าคงที่ผลึกจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่ประกอบกันเป็นโครงผลึก โดยที่ชนิดของสารเป็นตัวกำหนดลักษณะสมบัติที่มีผลต่อค่าคงที่ผลึก เช่น แรงดึงดูดและระหว่างอะตอม พันธะระหว่างอะตอม ทำให้สารประกอบหรือธาตุแต่ละชนิดมีค่าคงที่ผลึกแตกต่างกันออกไป เช่น InAs และ GaAs มีค่าคงที่ผลึกที่ 6.0583 และ 5.6533 Å [10] และก็อาจจะมีบางชนิดที่มีค่าคงที่ผลึกที่ใกล้เคียงกันมาก จนถือได้ว่าค่าคงที่ผลึกทั้งสองเข้ากันได้ (Lattice match) เช่น GaAs และ AlGaAs

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของ InAs, GaAs และ InGaAs [10]

| Material | Bandgap (eV) (at 300 Kelvin) | Lattice constant (Å) |
|---------------------------------------|---|----------------------|
| GaAs | 1.424 / Direct band-gap | 5.6533 |
| InAs | 0.354 / Direct band-gap | 6.0584 |
| $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ | $0.324 + 0.7(1-X) + 0.4(1-X)^2$ / Direct band-gap | $5.6533 + 0.405(X)$ |

สารกึ่งตัวนำที่ทำการทดลองภายใต้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แก่ InAs, GaAs และ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($X \leq 20\%$) ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพโดยสรุปดังตารางที่ 2.1 ในกรณีของ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ค่าคงที่ผลึกจะเปลี่ยนไปตามค่า X นั้นหมายความว่า การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน In ต่อ Ga ใน $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ทั้งค่าแถบช่องว่างพลังงานและค่าคงที่ผลึก ซึ่งค่าคงที่ผลึกที่เปลี่ยนไปมีความสำคัญต่อการดำเนินการปลูกเพราะว่าจะส่งผลให้ ϵ เปลี่ยนแปลงไปและจะทำให้เกิดการผ่อนคลายความเครียด, Dislocations และ Surface steps ดังรายละเอียดต่อไปนี้

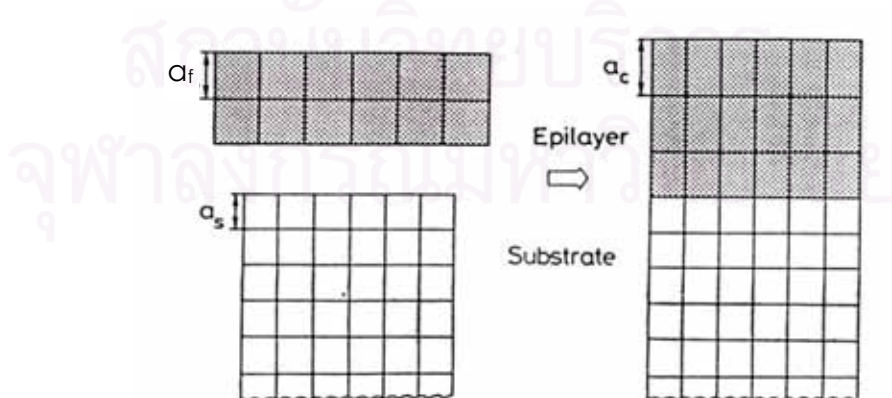


รูปที่ 2.2 Unit cell และขอบเขตของค่าคงที่ผลึกของ GaAs [20]

2.2.1 ความเครียดและการผ่อนคลายความเครียด

การปลูก InAs ลงบน GaAs โดยตรงหรือบน $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x \leq 0.2$) ก็ตาม ส่งผลให้เกิดการก่อตัวแบบสามมิติ โครงสร้างสามมิติดังกล่าวมีขนาดที่เล็กในระดับ 20-40 nm และสูงในระดับ 3-5 nm [1] และถูกเรียกในวงกว้างว่าควอนตัมดอต (Quantum dot, QD) ซึ่งเป็นผลโดยตรงจากความเครียดและการผ่อนคลายความเครียด

ความไม่เข้ากันของค่าคงที่ผลึกเป็นผลให้ชั้นผลึกด้านบน (Overlayer) ที่ก่อตัวขึ้นต้องก่อตัวแบบบีบอัด (Compressive: $a_f > a_s$) หรือแบบขยายตัว (Tensile: $a_f < a_s$) เนื่องจากในชั้นแรกๆของการก่อตัว Overlayer จะถูกบังคับให้ก่อตัวอย่างเป็นระเบียบด้วยค่าคงที่ผลึกแนวขนาน ($a_{//}$) ที่เท่ากับค่าของแผ่นฐานที่ถูกปลูกทับขณะที่ค่าคงที่ผลึกแนวตั้งฉากกับผิวหน้า (a_{\perp}) มีการยืดตัวดังแสดงในรูปที่ 2.3 [21] โดยสภาพผิวหน้าดังกล่าวจัดได้ว่ามีความเครียด (ϵ) ถูกสะสมอยู่ภายในผลึก

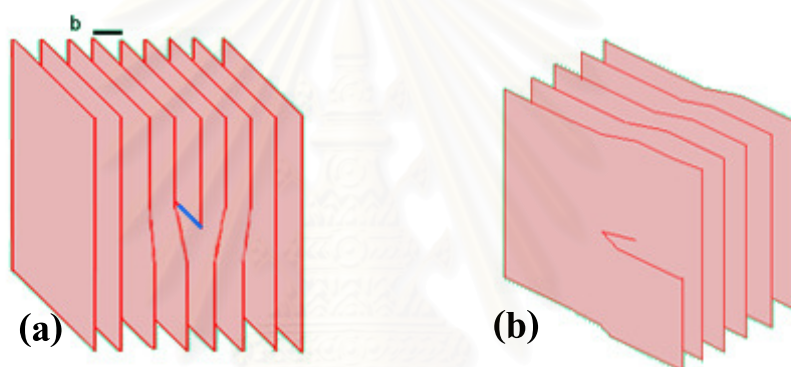


รูปที่ 2.3 การเกิดชั้นผลึกของคู่สารที่ไม่เข้ากันแบบอัดตัว (Compressive) [21]

2.2.2 Dislocations

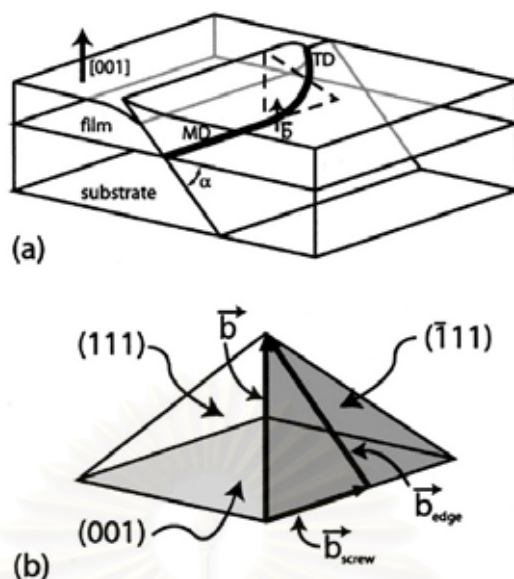
การปลูกชั้นผลึกที่มีความเครียดสะสมต่อไปกระทั่งความหนาชั้นผลึกดังกล่าวสูงเกินกว่าค่าความหนาวิกฤติ (Critical thickness, h_c) ผลึกจะเริ่มเกิดจุดที่อะตอมเกาะกันอย่างผิดปกติเป็นจุดบกพร่อง (Defect) เพื่อคลายความเครียดลง (Strain relaxation)

จุดบกพร่องที่สำคัญมีสี่แบบได้แก่จุดบกพร่องแบบจุด (Point defect) จุดบกพร่องแบบเส้น (Line defect) จุดบกพร่องแบบระนาบ (Planar defect) และจุดบกพร่องแบบปริมาตร (Volume defect) ซึ่งจุดบกพร่องแบบเส้นก็คือ Dislocation ซึ่งยังจำแนกออกเป็นสองชนิดคือ Edge dislocation และ Screw dislocation ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 รูปแบบของ dislocation แบบ (a) Edge dislocation โดย b คือ Bergers vector เส้นที่เกิดจากการแยกของชั้นคือ dislocation line และ (b) Screw dislocation

โดยทั่วไปแล้ว Dislocation ในผลึกจริงๆจะเป็นการผสมกันระหว่าง Dislocation ทั้งสองแบบ [13] และสามารถระบุได้ด้วยสองสิ่งคือ Bergers vector และ Dislocation line สำหรับ Edge dislocation นั้นแนวของ Bergers vector ตั้งฉากกันกับแนวของ Dislocation line ส่วน Screw dislocation จะกลับกันคือแนวทั้งสองจะขนานกันแทน

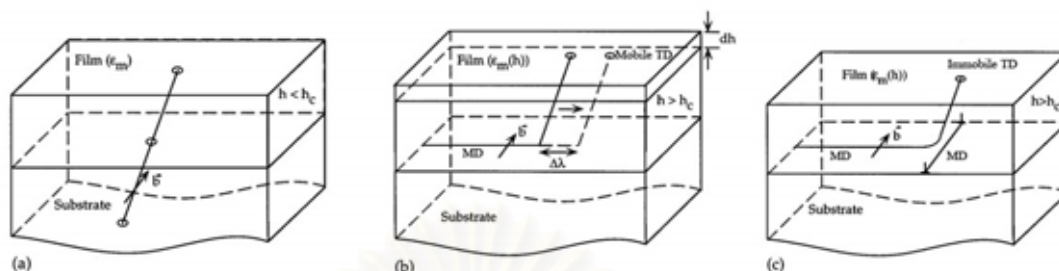


รูปที่ 2.5 Dislocation ของฟิล์มที่ปลูกบนแผ่นฐานแบบมีความไม่เข้ากันของค่าคงที่ผลึก (a) Slip plane ของ (001)-Face Center Cubic (FCC) แสดง Misfit dislocation และ Threading dislocation ที่เกิดขึ้น (b) Bergers vector ของ Slip plane ดังกล่าว แยกย่อยเป็น Edge-, Screw Bergers vector [13]

Dislocation เป็นผลจากกระบวนการในการคลายความเครียดของชั้นผลึกที่มีความเครียดสะสมจนถึงค่าวิกฤติ แบ่งออกเป็น Misfit dislocation (MD) และ Threading dislocation (TD) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 MD เป็น Dislocation ที่มีลักษณะเป็นเส้นยาวเกิดจากการจับกันแบบเหลี่ยมของอะตอมอย่างเป็นระเบียบ จุดที่เกิดการเกาะอย่างผิดปกติถือว่าเป็น Defect แต่ส่วนที่มาเกาะกันที่หลังนั้น อะตอมยังเกาะกันเป็นระเบียบเช่นเดิมและไม่มี Defects จึงทำให้มีเส้นเป็นแนวยาวจากจุด Defects รูปที่ 2.5 (a) แสดงให้เห็นว่าการเกิด Dislocation (MD และ TD) ทำให้เกิดระนาบเลื่อนขึ้นมาจาก MD เป็นมุมกับมุมระนาบผิวแผ่นฐาน 60° (60° dislocation) เรียกชื่อว่า Slip plane เกิดขึ้นเป็นแนวยาวตาม MD ปรากฏขึ้นที่ผิวหน้าเรียกว่า Surface step โดยที่จุดสิ้นสุดของ Surface step คือจุดที่ TD วิ่งมาถึงนั่นเอง

Threading dislocation (TD) สามารถเกิดจากแผ่นฐานดังแสดงในรูปที่ 2.6 (a) หรือมาจากฟิล์มที่ปลูกดังแสดงในรูปที่ 2.6 (b) และ (c) ในกรณีที่ TD เกิดจากฟิล์มที่ปลูกสามารถจำแนกย่อยได้เป็นสองชนิดได้แก่ Mobile TD และ Immobile TD ซึ่งต่างกันในประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ โดย Immobile TD จะถูกกั้น (Block) โดย MD เส้นที่ตั้งฉากกัน ส่วน Mobile TD นั้นสามารถเลื่อน

(Glide) ได้ตามความหนาชั้นผลึกที่ปลูก และยังเพิ่มความยาวให้กับ MD ได้อีกด้วย โดยที่ทั้งสองกรณีนั้นความหนาต้องมากกว่าความหนาวิกฤตขึ้นไป ($h > h_c$) [14] ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 TD และ MD (a) เมื่อ $h < h_c$ ยังไม่ปรากฏ MD ขึ้น และ TD มาจากแผ่นฐานเท่านั้น (b) เมื่อ $h > h_c$ แล้ว TD จะเริ่มเคลื่อนและทำให้ MD ยาวขึ้น $\Delta\lambda$ ตามความหนา dh ที่มากขึ้น (c) เมื่อ TD เคลื่อนมาจนพบกับ MD อีกเส้นที่ขวางอยู่ TD จะหยุดเคลื่อนที่ กลายเป็น Immobile TD [14]

Dislocation ที่เกิดขึ้นทำให้ความเครียดสะสมภายในผลึก $\epsilon(h_{c60})$ ลดลงตามความหนาที่เพิ่มขึ้น h_{c60} ตามความสัมพันธ์ [10]

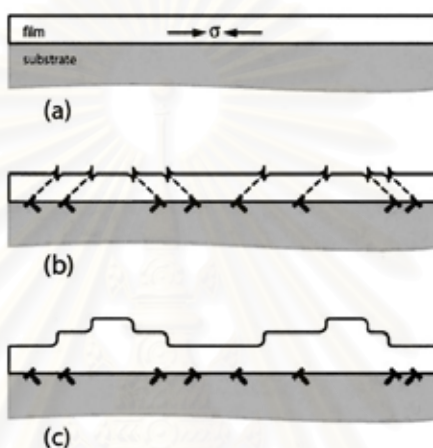
$$\epsilon(h_{c60}) = \frac{G_{GaAs}G_{InGaAs}b}{\pi(G_{GaAs}+G_{InGaAs})(1-\nu)} \frac{(1-\nu \cos^2 \theta)(\ln(\frac{h_{c60}}{b})+1)}{Yh_{c60}} \quad (2.2)$$

Dislocations ที่เกิดขึ้น นอกจากจะทำหน้าที่ลดความเครียดสะสมภายในผลึกแล้ว ยังมีผลต่อผิวหน้าอีกด้วย ซึ่งผลกระทบนี้เป็นต้นเหตุของการเกิดลายตารางบนผิวหน้า เรียกผิวหน้านี้อาว่าผิวหน้าลายตาราง ซึ่งผิวหน้าลายตารางนี้หากปลูกควอนตัมดอตทับลงไป ผิวหน้านี้อาจเสมือนเป็นแผ่นฐานสำหรับควอนตัมดอต เรียกผิวหน้าที่ทำหน้าที่เป็นเสมือนแผ่นฐานนี้ว่าแผ่นฐานลายตาราง (Cross-hatch substrate) หรือแผ่นฐานเสมือนอย่างไรก็ตามนอกจากความหนาวิกฤต (h_c) ที่มีความหนาที่เริ่มเกิด Dislocation แล้ว ยังมีความหนาวิกฤตอีกค่าหนึ่งที่ Dislocations เกิดขึ้นมากขึ้นแบบทวีคูณ (h_p) ซึ่งมีผลต่อผิวหน้าโดยตรงเช่นกัน

2.2.3 Surface steps

ต้นกำเนิด Surface step มาจาก Dislocation ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น นั้นหมายความว่าผลของการผ่อนคลายความเครียดสะสมภายในของชั้นผลึกส่งผลต่อผิวหน้าด้วย เมื่อมีการปลูกทับ Surface steps ที่เกิดขึ้นต่อไป ชั้นผลึกจะหนาขึ้นและเกิดกระบวนการกำจัด Surface steps ที่ผิวหน้า

(Surface step elimination) [13] ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อความเครียดสะสมในชั้นผลึกปลูกทับ (Overlayer) ไปจนกระทั่งความหนาชั้นผลึกมาถึงค่าวิกฤติ (h_c) จึงเกิด Dislocation เพื่อผ่อนคลายความเครียดของชั้นผลึกที่สะสมมามาก ซึ่ง Dislocation ได้ส่งผลไปที่ผิวหน้าโดย Slip plane จาก 60° dislocation เกิดเป็น Surface step สุดท้ายแล้วกระบวนการ Surface step elimination ทำให้ผิวหน้าเกิดความเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 2.7 (c) เมื่อทำการปลูกชั้นผลึกต่อไป ซึ่งผิวหน้าที่เป็นลักษณะลอนเช่นนี้ (Undulation surface) เป็นลักษณะของแผ่นฐานลายตาราง



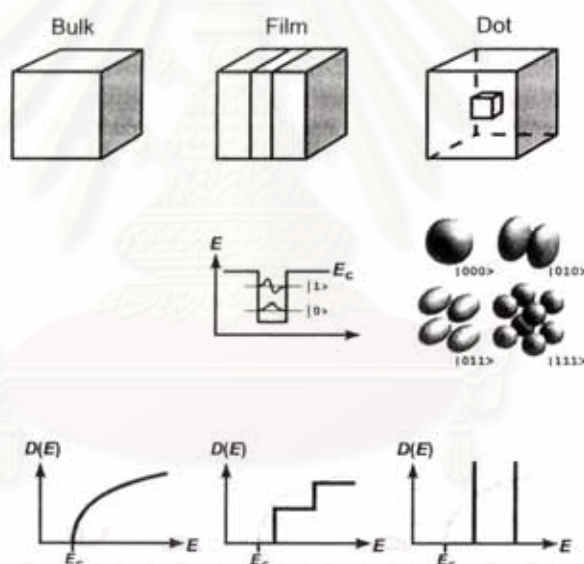
รูปที่ 2.7 การเกิด Surface step elimination (a) ชั้นฟิล์มเกิด Compressive strain (b) เกิด Dislocations และ Surface steps ตามมา (c) เมื่อเพิ่มความหนาต่อไปจะเกิดเนินที่เกิดจาก

Surface step elimination [13]

สรุปหัวข้อ 2.2 ได้ว่าแผ่นฐานลายตารางเกิดมาจากการมีความเครียดจากการปลูกชั้นผลึกที่มีค่าคงที่ผลึกไม่เข้ากันและความเครียดดังกล่าวในชั้นผลึกมีมากจนเกินค่าวิกฤติ ผลึกจะก่อตัวแบบเหลี่ยมกันเกิดเป็น Line defects หรือ Dislocations เพื่อลดความเครียดที่เกิดขึ้น แต่ Dislocations (MDs และ TDs) ที่เมื่อเกิดขึ้นมาแล้วจะส่งผลต่อผิวหน้าไปตลอดการปลูกด้วย Slip plane ซึ่งเป็นผลมาจาก Dislocations สำหรับผลของ Slip plane ที่ไปปรากฏบนผิวหน้าจะเรียกว่า Surface steps เมื่อการปลูกยังดำเนินต่อไป Surface steps ที่เกิดขึ้นจะเป็นต้นเหตุของการเกิดลายตารางจากกระบวนการ Surface step elimination (ดังในรูปที่ 2.7) จะเห็นว่าลายตารางที่เกิดขึ้นในที่สุดนั้น มีต้นเหตุมาจากการปลูกผลึกด้วยค่าคงที่ผลึกที่ต่างกันดังเช่น InGaAs / GaAs

2.3 ควอนตัมดอต (Quantum dots, QDs)

ควอนตัมดอตคือโครงสร้างขนาดเล็กในระดับที่เข้าใกล้ขนาดของอะตอมหรือโมเลกุลซึ่งมีลักษณะสมบัติที่ต่างจากโครงสร้างขนาดใหญ่เช่นแบบก้อนผลึก (Bulk) โครงสร้างขนาดเล็กมีหลายรูปแบบซึ่งถูกจำแนกตามมิติความเป็นอิสระ (Degree of freedom) ของพาหะในโครงสร้าง โครงสร้างขนาดใหญ่ (Bulk) พาหะภายในมีอิสระในการเคลื่อนที่ทั้งสามมิติ (3D) สำหรับโครงสร้างขนาดเล็ก ได้แก่ ควอนตัมเวลล์ (Quantum well) ควอนตัมไวร์ (Quantum wire) และควอนตัมดอต (Quantum dot) พาหะจะถูกกัก (Confine) และมีอิสรภาพในการเคลื่อนที่เพียง สองมิติ หนึ่งมิติ และ ศูนย์มิติตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 เมื่อเทียบโครงสร้างแบบต่างๆกันแล้วพบว่าโครงสร้างแบบก้อนผลึกจะมีความหนาแน่นสถานะ (Density Of States, DOS) แบบต่อเนื่อง ในขณะที่โครงสร้างขนาดเล็กแบบอื่นๆจะเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง [6]

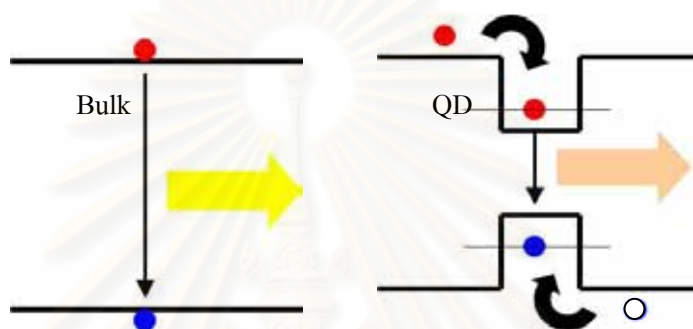


รูปที่ 2.8 (แถวบน) โครงสร้างแบบก้อนผลึก, แบบควอนตัมเวลล์ และแบบควอนตัมดอต
(แถวกลาง) สถานะแบบขั้นของควอนตัมเวลล์และควอนตัมดอต
(แถวล่าง) ความหนาแน่นสถานะ (DOS) [1]

ลักษณะสมบัติของระดับพลังงานภายในของโครงสร้างขนาดเล็ก เช่น ควอนตัมดอตและควอนตัมเวลล์นั้น จะแตกต่างจากโครงสร้างแบบก้อนผลึก โดยระดับพลังงานภายในของควอนตัมดอตจะมีลักษณะเป็นค่าไม่ต่อเนื่อง (Discrete) เรียกว่า Quantized state [1] ต่างจากโครงสร้างแบบก้อนผลึกที่พาหะสามารถมีพลังงานได้ทุกระดับที่พลังงานที่ต่ำกว่า Valence band และสูงกว่า

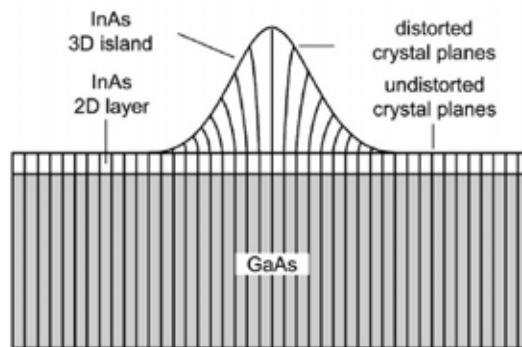
Conduction band ส่วน DOS ของควอนตัมดอตในอุดมคติจะเป็น Delta function (δ) [1,6] ดังแสดงในรูปที่ 2.9 หมายความว่าพาหะจะสามารถมีพลังงานได้เพียงบางค่าที่ไม่ต่อเนื่องเท่านั้น

ผลของการที่มีระดับพลังงานเพียงบางค่าและไม่ต่อเนื่องทำให้โครงสร้างควอนตัมดอตนั้นสามารถใช้ประยุกต์เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางแสงได้หลากหลาย และยังปรับแต่งคุณสมบัติของโฟตอนที่ปล่อยออกมาได้ เช่น โดยการแปรอัตราส่วนของสารประกอบของควอนตัมดอต ขนาดของควอนตัมดอต และการเรียงตัวของกลุ่มของควอนตัมดอต เป็นต้น



รูปที่ 2.9 ระดับพลังงานภายในของ โครงสร้างแบบก้อนผลึก (ซ้าย) และ ควอนตัมดอต (ขวา)

ควอนตัมดอตสามารถเกิดขึ้นได้จากปัจจัยหลายๆอย่าง โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เน้นไปที่การปลูกควอนตัมดอตลงบนแผ่นฐานลายตาราง ซึ่งให้ผลเป็นการเรียงตัวแถวของควอนตัมดอต แม้เป็นการปลูกบนแผ่นฐาน GaAs ระนาบ (001) ธรรมดา ต่างจากการทำรูปแบบ (Pattern) ลงบนแผ่นฐานซึ่งกรณีนี้เกิดจากการเตรียมแผ่นฐานที่มีการทำตำหนิไว้ตามลายที่ต้องการก่อนนำมาปลูก [22] เมื่อปล่อยสารที่ต้องการให้เกิดเป็นควอนตัมดอตลงไป ลายที่ทำไว้ทำหน้าที่เป็นจุดกำหนดตำแหน่งการเกิดของควอนตัมดอตบนแผ่นฐาน สำหรับวิธีการปลูกควอนตัมดอตทับบนชั้นแผ่นฐานลายตาราง เมื่อควอนตัมดอตเกิดการก่อตัวแบบประกอบตนเอง (Self-assembly quantum dot) ควอนตัมดอตที่เกิดขึ้นจะมีตำแหน่งไม่เป็นแบบสุ่ม แต่จะเรียงตัวบนเส้นลายตารางที่เกิดบนผิวหน้าของแผ่นฐานลายตาราง แสดงให้เห็นได้ว่าการเกิดควอนตัมดอตสามารถเกิดได้บนแผ่นฐานแบบต่างๆ และรูปแบบการเกิดก็แตกต่างกันด้วย



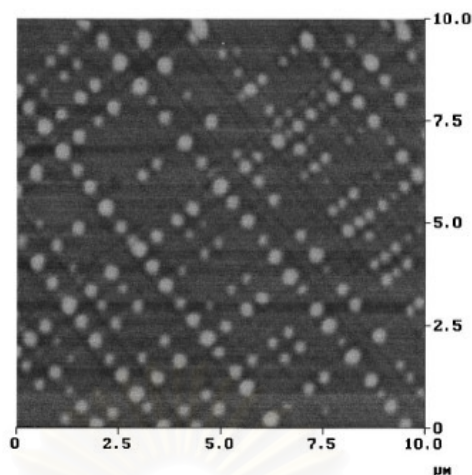
รูปที่ 2.10 ลักษณะของการเกิดควอนตัมดอท InAs บนแผ่นฐาน GaAs แบบ SK [23]

การเกิดควอนตัมดอท InAs บน GaAs เป็นรูปแบบการเกิดชั้นผลึกแบบ SK เริ่มต้นด้วยการที่ InAs ชั้นแรกๆที่ก่อตัวที่ผิวหน้า GaAs ทำหน้าที่เป็น Wetting layer เนื่องจากค่า ϵ ของกระบวนการนี้คือประมาณ 7 % ซึ่งจากแผนภาพเฟสสมดุลในรูปที่ 2.1 พบว่าที่ $\epsilon = 0.07$ ชั้นแรกๆของ InAs จะยังเป็นรูปแบบ FM อยู่ InAs ที่เกิดขึ้นจะเกาะตัวกับแผ่นฐาน GaAs แบบอัดตัว (Compressive) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งยังคงเป็นเป็นการเกิดชั้นผลึกแบบสองมิติเพราะว่าค่าคงที่ผลึกของ InAs มากกว่า GaAs เมื่อดำเนินการปลูกชั้น InAs ต่อไป Wetting layer ของ InAs จะหนาขึ้นและความเครียดของชั้นฟิล์มจะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ปลูกชั้น InAs เมื่อความเครียดสะสมถึงระดับหนึ่ง InAs ที่เกาะกันอยู่เดิมจะก่อตัวใหม่เพื่อคลายความเครียดที่เกิดจากการเกาะกันแบบอัดตัวจากตอนแรก การก่อตัวขึ้นใหม่จะเกิดเป็นโครงสร้างควอนตัมดอทดังแสดงในรูปที่ 2.10 อย่างไรก็ตาม สำหรับการปลูกผลึกที่ Lattice mismatch $\epsilon < 1.5\%$ เมื่อความเครียดสะสมมากถึงค่าหนึ่ง การคลายความเครียดจะไม่เกิดเป็นควอนตัมดอท แต่จะเกิด Dislocation แทน [24] ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.2 ส่งผลให้ผิวหน้ามีลักษณะเป็นลายตารางดังที่จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

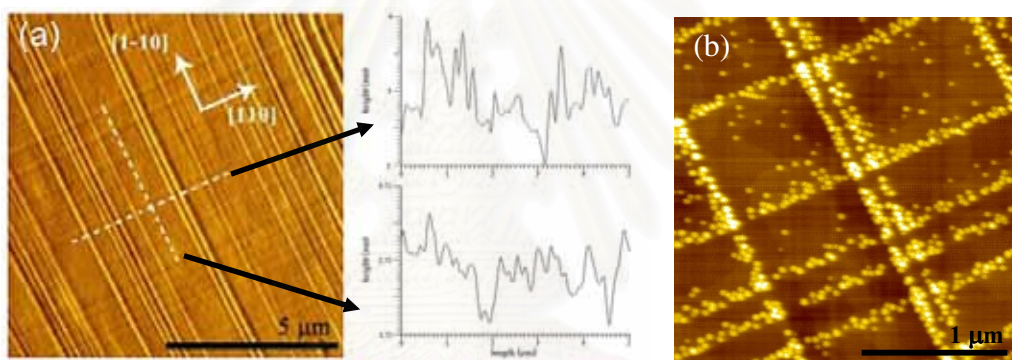
2.4 แผ่นฐานลายตาราง (Cross-hatch substrate)

แผ่นฐานลายตารางเป็นผลมาจากการปลูกชั้นผลึกที่ค่าคงที่ผลึกของฟิล์มที่ปลูกแตกต่างจากของแผ่นฐานในระดับที่ไม่สูงนัก ($\epsilon < 1.5\%$) การเกิด MD จากกระบวนการดังกล่าวเป็นการเกิดเองตามธรรมชาติและถูกกำหนดโดยหลักการทางสถิติ ลายตารางอันเนื่องมาจากการปลูกฟิล์มทับบน MD และ TD จึงมีลักษณะเป็นแบบสุ่ม คือไม่สามารถกำหนดตำแหน่งที่แน่นอนของลายตารางได้ อย่างไรก็ตามการปรับกระบวนการในการปลูกจะทำให้สามารถกำหนดความหนาแน่นของลายตาราง และความสูงของลายตารางได้

ลายตาราง (Cross-hatch pattern) เกิดจากความไม่เข้ากันของค่าคงที่ผลึก เช่นจากคู่ของสารประกอบ III-V (เช่น InGaAs / GaAs) หรือ จากคู่ของสารประกอบหมู่ IV-IV (เช่น SiGe / Si) [24,25,26] เป็นต้น คู่ของสารประกอบหมู่ IV-IV กับ III-V เหมือนกันตรงที่ลายตารางมีต้นเหตุการเกิดเดียวกันคือเกิดจากความไม่เข้ากันของค่าคงที่ผลึกแบบ Low lattice mismatch และการเกิด Dislocation จากกระบวนการ Strain relaxation แต่ก็มี ความแตกต่างกันด้วย ตรงที่เส้นลายตารางของคู่สารประกอบหมู่ IV-IV ทั้งสองแนวที่ตั้งฉากกันของลายตารางนั้นเหมือนกันดังแสดงในรูปที่ 2.11 ในขณะที่ลายตารางจากสารประกอบหมู่ III-V อย่างเช่น InGaAs/GaAs จะให้ลายตารางสองแนวที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน เพราะว่าสารประกอบหมู่ III-V นั้นเกิดจากธาตุของหมู่ III และ หมู่ V เกาะเป็น Unit cell ด้วยรูปแบบ Zinc blend [20] ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ดังนั้นถ้านำแผ่นฐาน GaAs (001) มาเป็นแผ่นฐานตั้งต้น เมื่อปลูกทับด้วย InGaAs ภายใต้เงื่อนไข Low lattice mismatch แล้วลายตารางที่ขนานกับทิศ [1-10] กับ [110] จะมีความแตกต่างกันดังในรูปที่ 2.12 (a) ซึ่งเป็นรูปของผิวหน้าชิ้นงานซึ่งปลูกชั้นลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ หนา 50 nm บนแผ่นฐาน GaAs ระนาบ (001) มี Line scan ของเส้นลายตารางทั้งสองแนวแสดงไว้ด้านข้าง พบว่าความสูงของเส้นลายตารางที่ขนานกับทิศ [1-10] มีความสูงมากกว่าเส้นลายตารางที่ขนานกับทิศ [110] เนื่องจากสารที่เป็นแกน (Core) ของทั้งสองแนวนั้นต่างกัน โดยแนว [1-10] มี As เป็น Core ขณะที่แนว [110] มี Ga เป็น Core [12] เป็นผลให้ลายตารางที่เกิดขึ้นจากทั้งสองแนวมีคุณสมบัติต่างกันด้วย และผลนี้ยังส่งผลถึงชั้นควอนตัมดอตที่ปลูกทับลายตารางอีกด้วย ซึ่งผลของการปลูกชั้นควอนตัมดอต 0.8 ML ทับบนแผ่นฐานลายตารางที่ปลูกด้วยเงื่อนไขเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (b) ซึ่งควอนตัมดอตบนแนวเส้นที่ขนานกับทิศทาง [1-10] ก็มีขนาดสูงกว่าบนแนวเส้นที่ขนานกับ [110] เช่นกัน เพราะว่าเป็นผลมาจากชั้นลายตารางนั่นเอง [16] สำหรับข้อสรุปเกี่ยวกับชั้นลายตารางจะกล่าวละเอียดในบทที่ 4



รูปที่ 2.11 ผิวหน้าของควอนตัมดอท Ge ปลูกบน SiGe/Si (100) ที่วัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม [25]



รูปที่ 2.12 ผิวหน้าลายตารางจากสารประกอบหมู่ III-V (a) $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 50 nm บน GaAs (001) (b) เมื่อปลูกทับด้วยควอนตัมดอท InAs 0.8 ML ทั้ง (a) และ (b) วางในทิศทางเดียวกันตามลูกศร [16]

การเกิด Dislocations จากการปลูก InGaAs / GaAs โดยที่ $\epsilon < 1.5\%$ จะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อปลูกชั้นผลึกหนาเกินค่าวิกฤติ (h_{c60}) ซึ่งหากความหนาน้อยกว่าค่าวิกฤตินี้ ผลึกยังคงมีความเครียดอยู่และยังไม่เกิด Dislocation เพื่อคลายความเครียด แต่ถ้าชั้นผลึกหนามากกว่าค่าวิกฤตินี้ ผลึกจะเริ่มมี Dislocations ขึ้นบางตำแหน่งและความเครียดในชั้นผลึกจะเริ่มลดลง และลดลงเรื่อยๆหากทำการปลูกต่อไป ค่า h_{c60} สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ด้านล่าง [10]

$$h_{c60} = \frac{G_{\text{GaAs}} G_{\text{InGaAs}} b}{\pi(G_{\text{GaAs}} + G_{\text{InGaAs}})(1-\nu)} \frac{(1-\nu \cos^2 \theta) \left(\ln \left(\frac{h_{c60}}{b} \right) + 1 \right)}{Yf} \quad (2.3)$$

$$G = C_{11} - \frac{1}{3} (2C_{44} + C_{12} - C_{11}) \quad (2.4)$$

$$b = \frac{\sqrt{2}}{2} a_{InGaAs} \quad (2.5)$$

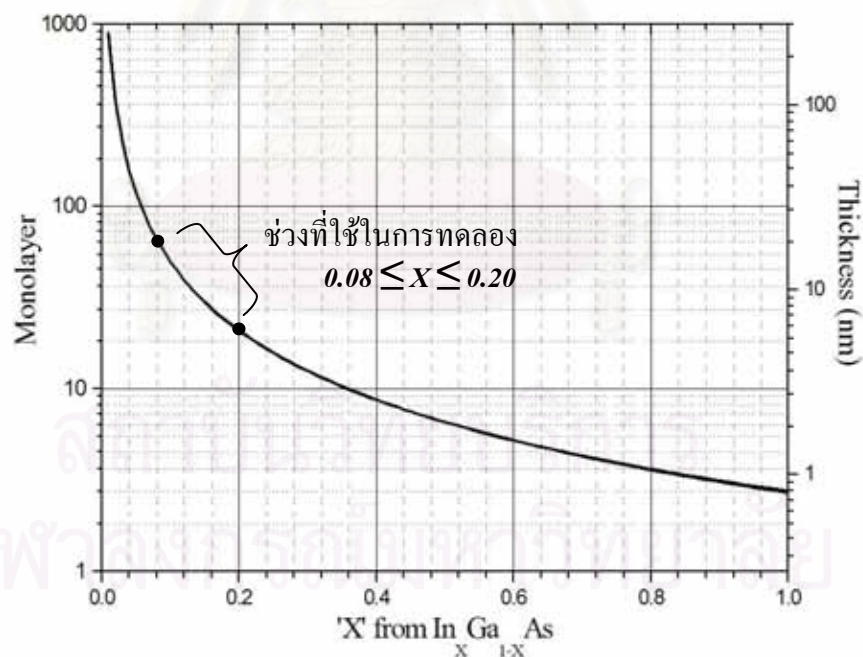
$$\nu = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{11}} \quad (2.6)$$

$$Y = C_{11} + C_{12} - 2 \frac{C_{12}^2}{C_{11}} \quad (2.7)$$

$$f = \frac{a_{InGaAs} - a_{GaAs}}{a_{InGaAs}} \quad (2.8)$$

เมื่อ h_{c60} คือความหนาวิกฤติที่ 60° dislocation เกิดขึ้นพอดี, $\Theta = 60^\circ$, ν คือ Poisson ratio, G แทน Anisotropic factor, C คือ Elastic constant และ Y คือ Young's modulus

จากความสัมพันธ์ข้างบน พบว่าค่าความหนาวิกฤติของ InGaAs บน GaAs จะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตาม X ใน $In_xGa_{1-x}As$ ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งมีแนวโน้มคือ เมื่อสัดส่วนของ In ใน InGaAs เพิ่มขึ้น ค่าความหนาวิกฤติจะลดลง



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาวิกฤติของชั้น InGaAs (Monolayer) ที่ปลูกบน GaAs กับ สัดส่วนของ In (ค่า X)

สำหรับการทดลองทั้งหมดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ค่า X ระหว่าง 8-20 % ซึ่งมีค่า h_c อยู่ระหว่าง $6.0 < h_c < 18.7$ nm ซึ่งจะทำให้ได้ผิวหน้าเป็นลายตารางและจะใช้ประโยชน์ในการนำมาเป็นแผ่นฐานเสมือน (Virtual substrate) เพื่อใช้ในการจัดเรียงควอนตัมดอตด้วยการประกอบตนเอง ดังจะได้กล่าวโดยละเอียดในบทที่ 4 สำหรับบทต่อไปเป็นการอธิบายถึงเทคนิคการปลูกผลึกและการวัดลักษณะสมบัติ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การปลูกโครงสร้างและการวัดลักษณะสมบัติ

โครงสร้างชั้นงานทั้งหมดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ปลูกด้วยเครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy, MBE) ยี่ห้อ RIBER รุ่น 32P ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัย สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (SDRL, Semiconductor Device Research Laboratory) โดยที่เครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุลเป็นอุปกรณ์หลักสำหรับการปลูกโครงสร้างควอนตัมดอตแบบประกอบตนเอง (Self-Assembled Quantum Dots, SAQD) ความสามารถในการควบคุมการปล่อยปริมาณสารในลำโมเลกุลที่ละเอียดและมีความคลาดเคลื่อนในระดับต่ำ ทำให้เทคนิค MBE สามารถปลูกโครงสร้างควอนตัมแบบต่างๆ ได้ตามที่ต้องการ ทั้งควอนตัมเวลล์ (Quantum well) และควอนตัมดอตหลายๆแบบ เช่นควอนตัมดอตแบบกลุ่ม (QDM, Quantum Dot Molecule) ควอนตัมดอตแบบคู่ (Quantum dots pair) และควอนตัมดอตบนลายตาราง (Quantum dots on cross-hatches) เป็นต้น ความเข้าใจในหลักการของเครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุลเป็นสิ่งจำเป็นต่อการศึกษาวิวัฒนาการของควอนตัมดอตบนแผ่นฐานลายตาราง ซึ่งเป็นงานหลักของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

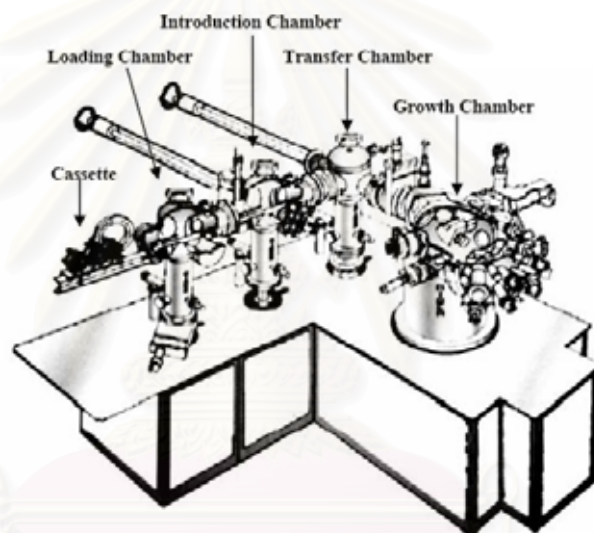
ชั้นงานที่ได้จากการปลูกนั้นสามารถศึกษาและวิเคราะห์ได้จากการวัดลักษณะสมบัติของโครงสร้าง ทั้งการวัดเพื่อตรวจสอบ (Monitor) ขณะทำการปลูกโครงสร้างด้วยเครื่องวัดแบบติดตั้งภายในระบบ (*in-situ*) เพื่อใช้ติดตามสภาพปัจจุบันแบบตามเวลาจริง (Real-time monitoring) และการวัดเพื่อผลด้วยเครื่องวัดภายนอกระบบ (*ex-situ*) โดยผลที่วัดได้จะเป็นผลของโครงสร้างที่ปลูกเสร็จแล้ว ซึ่งมีทั้งระบบวัดที่ใช้วัดผิวหน้า วัดการปลดปล่อยทางแสง วัดสภาพหน้าตัด เป็นต้น ความเข้าใจในหลักการของการวัดลักษณะสมบัติด้วยเครื่องวัดแบบต่างๆทั้งภายในและภายนอกจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะใช้ยืนยันว่าโครงสร้างที่ปลูกมานั้นเป็นโครงสร้างตามที่ต้องการจริง และผลที่ได้นั้นก็เกิดมาจากโครงสร้างที่ปลูกขึ้นจริง ประโยชน์ที่เห็นได้ชัดก็คือสามารถเชื่อมโยงเชิงทฤษฎีระหว่างลักษณะโครงสร้างที่ปลูกกับคุณสมบัติทางแสงที่วัดได้

3.1 การปลูกโครงสร้างด้วยเครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล

การปลูกชั้นผลึก (Epitaxial growth) สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การปลูกชั้นผลึกแบบสถานะของเหลว (LPE, Liquid-Phase Epitaxy) แบบสถานะไอ (VPE, Vapor-Phase Epitaxy) และ

แบบลำโมเลกุล (MBE) โดย MBE มีข้อได้เปรียบหลายอย่าง เช่น ความบริสุทธิ์ของชั้นผลึกที่ปลูกได้ อันเนื่องมาจากกระบวนการจะเกิดในห้องปลูก (Growth chamber) ที่ความดันต่ำในระดับ 10^{-9} Torr มีระบบดูดอากาศภายในออก และมีระบบหล่อเย็นด้วยไนโตรเจนเหลวตลอดเวลา ทำให้มีอนุภาคอื่นๆ เจือปนน้อยมาก เหมาะกับการปลูกสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์และทางแสงต่างๆ ที่ต้องการความแม่นยำในการปลูกชั้นผลึกสูง เช่น เลเซอร์ เซลล์แสงอาทิตย์ และ ไดโอดเปล่งแสง เป็นต้น

รายละเอียดการปลูกนั้นมีขอบเขตที่กว้างมาก เนื้อหาในหัวข้อนี้จึงจำกัดไว้เท่าที่จำเป็น ได้แก่ รายละเอียดของเครื่องปลูกผลึกระบบตรวจวัดแบบติดตั้งภายในและกระบวนการปลูก



รูปที่ 3.1 เครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล RIBER 32P

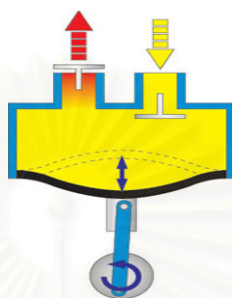
3.1.1 เครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล

เครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุลประกอบไปด้วยห้อง (Chamber) ทั้งหมด 4 ห้องดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งแต่ละห้องจะมีประตู (Gate) กั้นไว้ เพื่อให้แต่ละห้องเป็นอิสระต่อกัน โดยห้องทั้ง 4 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. Loading chamber ห้องโหลดเป็นห้องที่ใช้สำหรับส่งผ่านชิ้นงาน (Samples) ซึ่งได้มาจากการตัดแผ่นเวเฟอร์ (Wafer) ที่ถูกติดอยู่ที่ MO Block (Molybdenum block) จากสภาวะภายนอกเข้าสู่ภายในเครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุลที่เป็นระบบสุญญากาศ (Vacuum system) ห้องโหลดนี้

จะอยู่ติดกับห้องอินโทรดักชัน (Introduction chamber) ซึ่งถูกกั้นด้วยประตูกั้นเพื่อไม่ให้อากาศจากภายนอกทำให้ความดันภายในห้องอื่นๆเปลี่ยนแปลง

ภายในห้องนี้ชิ้นงานทั้งหมดจะถูกลำเลียงผ่านรถที่ใช้ระบบสายพานเป็นตัวส่ง การควบคุมสายพานกระทำได้ด้วยมือ (Manual control) โดยการหมุนเป็นขั้วเฟืองสายพานจากภายนอก



รูปที่ 3.2 Diaphragm pump

ระบบสุญญากาศในห้องโหลดนี้จะมีสองชนิดคือ Diaphragm pump และ Sorption pump ซึ่งการลดความดันในห้องโหลดจะใช้ Diaphragm pump ทำงานก่อนเพื่อดูดอากาศภายในห้องโหลดให้ต่ำลงมาจากค่าความดันบรรยากาศ (760 Torr) ลงมาสู่ประมาณ 60 Torr การทำงานของ Diaphragm pump นั้นจะใช้หลักการของการหมุนแกนมอเตอร์ ร่วมกับคุณสมบัติความยืดหยุ่นของแผ่น Diaphragm ซึ่งนิยมใช้วัสดุคิปีประเภท ยาง หรือ เทฟลอน (Teflon) ตามรูปที่ 3.2 ซึ่งจะเห็นว่าอากาศจะถูกดูดออกจากทางด้านหนึ่งไปสู่อีกด้านหนึ่งได้ โดยอากาศจะถูกไล่จากท่อเข้า และถูกแผ่น Diaphragm ซึ่งบังคับด้วยการหมุนของแกนมอเตอร์บีบไล่ให้ออกไปทางท่อออก จะเห็นว่าด้วยวิธีการหมุนแกนมอเตอร์ไปในทิศทางเดียวแบบนี้ อากาศที่ถูกดูดออกจะไม่มีโอกาสในการไหลย้อนกลับ แต่ข้อเสียของ Diaphragm pump คือมีความสามารถในการดูดอากาศไม่ค่อยดีนัก ซึ่งถ้าเทียบกับความดันในระบบสุญญากาศภายในเครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุลแล้ว ความดันที่ได้จาก Diaphragm pump ถือว่ายังไม่ต่ำพอที่จะเปิดประตูกั้นจากห้องโหลดไปห้องอินโทรดักชันได้ ซึ่งก็ต้องเปิดระบบดูดอากาศ Sorption pump เข้ารับช่วงต่อจาก Diaphragm pump



รูปที่ 3.3 รูปแบบโมเลกุลของ Zeolite (ซ้าย) ตัวอย่าง Sorption pump (กลาง) และภาคตัดขวาง (ขวา)

Sorption pump จะทำงานต่อจาก Diaphragm pump ที่ระดับความดันประมาณ 60 Torr การทำงานของ Sorption pump นั้นอาศัยหลักการการดูดโมเลกุลอากาศด้วยวัสดุที่ดูดซึมได้ (Porous material) เช่น Zeolite (เป็นสารประกอบประเภท aluminosilicate) ซึ่งมีการเกาะกันของโมเลกุลดังแสดงในรูปที่ 3.3 (ซ้าย) และถูกบรรจุอยู่ภายในถังอลูมิเนียมที่อยู่ภายในกระเปาะโฟมดังแสดงในรูปที่ 3.3 (ขวา) โดยมีช่องให้หล่อเย็นด้วยไนโตรเจนเหลว

เมื่อทำให้ Zeolite เย็นตัวลงด้วยไนโตรเจนเหลว โมเลกุลของ Zeolite จะสามารถดูดจับอากาศได้ดี ซึ่งใช้หลักการของการทำให้อากาศหรือไอที่ดักจับได้เกิดการควบแน่นและเกาะอยู่ตลอดเวลาที่ Zeolite ยังคงถูกหล่อเย็นอยู่ หลังจากปล่อยให้ Sorption pump ทำงานติดต่อกันเป็นเวลาประมาณ 20-30 นาที ความดันภายในห้องโหลดจะอยู่ที่ระดับประมาณ 10^{-3} Torr เมื่อความดันภายในห้องโหลดไม่ลดลงไปกว่านี้แล้ว ก็จะใช้ระบบดูดอากาศของห้องอินโทรดักชันช่วยแทน โดยการเปิดประตูก้อนอย่างช้าๆ เพื่อให้ความดันค่อยๆ ถ่างเทไปให้ห้องอินโทรดักชันดูดออก สุดท้ายเมื่อสามารถเปิดประตูก้อนได้สุดบาน ก็จะทำการลำเลียงชิ้นงานผ่านรถสายพานไปห้องอินโทรดักชันได้ต่อไป

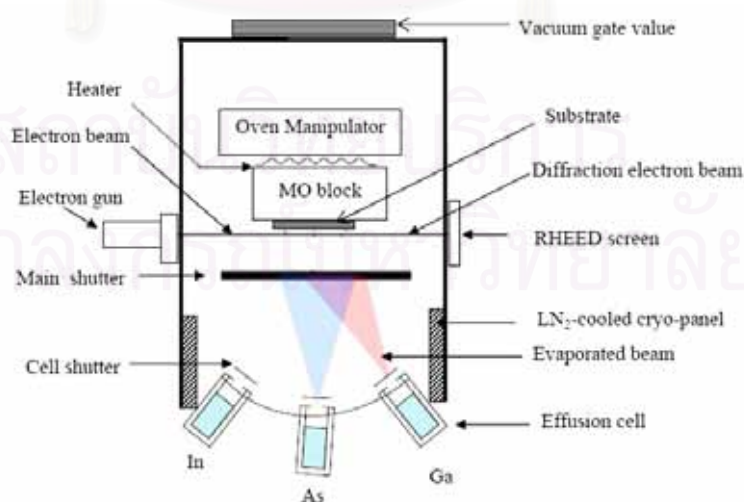
2. Introduction chamber ในห้องอินโทรดักชันนั้นนอกจากจะใช้ลำเลียงชิ้นงานผ่านจากห้องโหลดไปห้องทรานส์เฟอร์แล้ว ยังมีแขนจับ (Magnetic arm) ที่เอาไว้จับ MO Block ออกจากรถเพื่อสลับตำแหน่งบล็อก หรือนำชิ้นงานไปเข้ากระบวนการ Heat treatment (Pre-heat) เพื่อขจัดสิ่งเจือปนที่เกาะอยู่ที่ผิวหน้าของชิ้นงาน และแขนจับก็ยังเป็นตัวกลางในการส่งผ่านชิ้นงานจากรถ

คันแรก (สำหรับขนถ่ายชิ้นงานระหว่างห้องโหลดและห้องอินโทรดักชัน) ไปสู่รถคันที่สอง (สำหรับขนถ่ายชิ้นงานระหว่างห้องอินโทรดักชันและห้องทรานส์เฟอร์) สำหรับการทำให้ Heat treatment นั้นจะกล่าวโดยละเอียดในส่วนการเตรียมผิวหน้าชิ้นงานสำหรับปลูกชั้นผลึก

ระบบสุญญากาศภายในห้องนี้เป็นระบบ Ion pump และ Titanium pump ซึ่งระบบสุญญากาศนี้จะล้มเหลวก็ต่อเมื่อความดันภายในห้องนี้มีมากกว่าที่ระบบสุญญากาศจะสามารถดูดออกได้ คือประมาณ 10^{-6} ถึง 10^{-5} Torr ระบบสุญญากาศจะตัดการทำงานตัวเองลง หากต้องการจะใช้งานใหม่ ก็จะต้องใช้ Diaphragm pump และ Sorption pump ทำการดูดอากาศออกบางส่วนก่อน จากนั้นก็จะใช้ระบบสุญญากาศของห้องข้างๆกันช่วยดูดลง ไปให้ถึงระดับที่สามารถเปิดการทำงานของระบบ Ion pump และ Titanium pump ที่ปิดตัวลงไปได้

3. Transfer chamber ห้องทรานส์เฟอร์ใช้สำหรับการส่งชิ้นงานจากรถคันที่สองเข้าสู่ห้องปลูก และยังเป็นที่พักชิ้นงานที่รอการปลูก หรือรอการทำ Heat treatment ด้วยเพราะว่าเป็นห้องที่ติดกับห้องปลูกและห้องอินโทรดักชัน ระบบสุญญากาศภายในห้องนี้เป็นระบบเดียวกับห้องอินโทรดักชันและห้องปลูก ซึ่งสามารถรักษาความดันภายในห้องทรานส์เฟอร์ให้อยู่ในระดับประมาณ 10^{-9} Torr

ภายในห้องนี้มีแขนจับอยู่อีก 1 แขนเพื่อเอาไว้จับ MO Block ที่ติดชิ้นงานที่ต้องการจะนำเข้าสู่ห้องปลูก และใช้ย้ายตำแหน่งบล็อกบนรถอีกด้วย



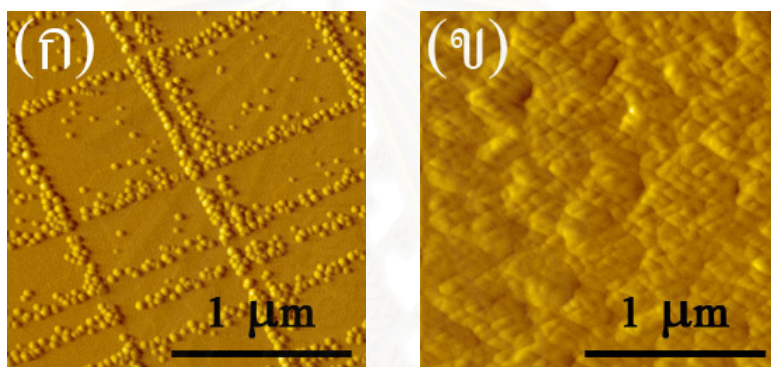
รูปที่ 3.4 แผนภาพอย่างง่ายภายในห้องปลูกของเครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล [3]

4. *Growth chamber* ห้องปลูกเป็นห้องที่ใช้ทำกระบวนการปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล จึงถือว่าเป็นหัวใจของเครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล ส่วนประกอบสำคัญภายในห้องปลูกดังแสดงในรูปที่ 3.4 ได้แก่

- แท่น Manipulator มีที่ใส่บล็อก ซึ่งมีอุปกรณ์วัดแรงดันไอ (Ionization gauge) ติดตั้งอยู่ และมี Heater ไว้สำหรับปรับอุณหภูมิชิ้นงาน แท่นนี้ตรงส่วนที่ติดกับ MO Block จะสามารถหมุนได้ โดยขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ปรับความเร็วรอบการหมุนได้จากแป้นหมุน เพื่อให้ชิ้นงานได้รับลำโมเลกุลสม่ำเสมอทั้งชิ้นงาน และแท่นนี้ยังสามารถปรับมุมไปได้หลายมุม เพื่อใช้ในหน้าที่ต่างๆ เช่น มุมประมาณ 160-170° คือมุมสำหรับนำ MO Block เข้า-ออกจากห้องปลูก มุม 224° คือมุมสำหรับวัดแรงดันไอ และมุม 330° คือมุมปลูกเนื่องจากชิ้นงานจะหันหน้าเข้าตรงตำแหน่งลำโมเลกุลที่ปล่อยออกมาจากแต่ละเซลล์พอดี
- ระบบดูดอากาศออก เป็นระบบ Ion pump และ Titanium pump เช่นเดียวกับห้องอินโทรดักชันและห้องทรานส์เฟอร์ ต่างกันที่ห้องนี้จะเปิดระบบดูดอากาศทั้งสองก็เฉพาะเมื่ออยู่ในสถานะพักเท่านั้น โดยในขณะที่ปลูกระบบ Titanium pump จะต้องปิดไว้และเปิดให้ทำงานได้เฉพาะ Ion pump เท่านั้น
- ระบบตรวจวัดแบบติดตั้งภายใน (*In-situ monitor system*) มี Quadrupole mass spectrometer เพื่อวิเคราะห์มวลของอนุภาคภายในห้องปลูก โดยสามารถเทียบได้จากตารางว่ามีสารใดในห้องปลูกบ้างจากยอด (Peak) ของกราฟที่กวาดค่ามวลในช่วงที่ตั้งไว้ เพราะเครื่องจะบอกมาเป็นเลขมวลของสาร และมี RHEED (Reflection High-Energy Electron Diffraction) เพื่อตรวจจับผิวหน้าตามเวลาจริงให้สามารถติดตามผลระหว่างการปลูกได้ทันที

หลักการปลูกผลึกแบบลำโมเลกุลสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 3.4 ชิ้นงานที่ติดอยู่กับ MO Block จะมีม่านชัตเตอร์หลัก (Main shutter) ปิดอยู่เพื่อป้องกันผิวหน้าชิ้นงานไม่ให้มีอนุภาคเล็ดลอดมาเกาะได้ ไม่ว่าม่านชัตเตอร์ของเซลล์ (Cell shutter) จะเปิดหรือปิดอยู่ก็ตาม เซลล์บรรจุสารแต่ละเซลล์ (Effusion cell) ก็จะมีม่านชัตเตอร์ของแต่ละเซลล์แยกอิสระต่อกัน ซึ่งหน้าที่ของม่านชัตเตอร์แยกย่อยของแต่ละเซลล์นี้ก็เอาไว้ใช้ควบคุมการปล่อยลำโมเลกุล (Molecular beam) ของสาร

นั้นๆ หากเปิดมันซ์เตอร์พร้อมกันมากกว่าหนึ่งเซลล์ ก็จะทำให้เกิดเป็นสารผสมเช่นเปิดมันซ์เตอร์ของเซลล์อาร์เซนิก (As_4) แกลเลียม (Ga) และอินเดียม (In) พร้อมกัน ก็จะได้เป็นสารประกอบอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ (InGaAs) ส่วนการควบคุมปริมาณสารในลำโมเลกุลนั้นจะควบคุมด้วยการปรับอุณหภูมิเตา (Crucible) ของเซลล์ที่ทำการปล่อยลำโมเลกุลอยู่ ยิ่งอุณหภูมิสูง สารนั้นก็จะถูกปล่อยออกมามาก อย่างไรก็ตาม อัตราเร็วในการเปลี่ยนอุณหภูมิของสารแต่ละชนิดก็จะแตกต่างกันออกไป หากเป็นสารผสม การควบคุมอุณหภูมิของแต่ละเซลล์ก็จะเป็นการปรับอัตราส่วนของสารผสมนั้นๆด้วย ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงและต้องควบคุมอย่างแม่นยำในการปลูกชั้นแผ่นฐานลายตาราง (Cross-hatch substrate)



รูปที่ 3.5 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมแสดงผิวหน้าของชิ้นงานเดียวกันเมื่อวัด (ก) ทันทีหลังจากปลูก และ (ข) เมื่อปล่อยทิ้งไว้ 4 เดือน

ชิ้นงานที่ปลูกเสร็จแล้วก็จะถูกลำเลียงย้อนกลับออกจากห้องปลูก ไปยังห้องทรานส์เฟอร์ ห้องอินโทรดักชัน และห้องโหลดเพื่อนำออกสู่สภาวะภายนอกในที่สุด ชิ้นงานที่ปลูกแล้วบางชิ้นงานอาจจะทำปฏิกิริยากับอากาศภายนอก ดังนั้นต้องลำเลียงออกอย่างระมัดระวังและเก็บรักษาอย่างดี หรืออาจจะต้องรีบทำการวัดลักษณะสมบัติให้เร็วที่สุดเพื่อให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นงานน้อยที่สุด สำหรับรูปที่ 3.5 แสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่างผิวหน้าของชิ้นงานเดียวกันที่วัด (ก) ทันทีหลังจากปลูกเสร็จและ (ข) หลังจากทิ้งไว้ภายในกล่องบรรจุที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 4 เดือน จึงเห็นได้ถึงความแตกต่างของผิวหน้าอย่างชัดเจน

3.1.2 ระบบตรวจวัดแบบติดตั้งภายใน (in-situ)

การปลูกโครงสร้างบนชิ้นงานด้วยเครื่องปลูกชนิดนี้ หลังจากที่ได้นำชิ้นงานเข้าไปที่ห้องโหลดแล้วชิ้นงานจะไม่สัมผัสกับบรรยากาศภายนอกอีก และสุดท้ายเมื่อชิ้นงานเข้าสู่ห้องปลูก

ผู้ดำเนินการจะไม่สามารถรับรู้สภาพของชิ้นงานระหว่างปลูกโครงสร้างได้ด้วยตา เพราะว่าห้องปลูกเป็นห้องทึบ ไม่สามารถเห็นได้จากภายนอก และแม้ว่าเครื่องปลูกผลิตบางรุ่นอาจมี Viewport แต่กระบวนการการเกิดโครงสร้างบนผิวหน้าก็เป็นในระดับชั้นของอะตอมหรือโมเลกุล จึงไม่สามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่าอยู่ดี ระบบวัดแบบติดตั้งภายในเครื่องปลูกผลิตแบบลำโมเลกุลจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้ทราบสถานการณ์ภายในห้องปลูกในขณะดำเนินการอยู่ ทั้งการสังเกตการณ์การเกิดโครงสร้างบนผิวหน้า การวัดค่าความดันไอและการเกิดความผิดพลาดระหว่างดำเนินการ

ระบบตรวจวัดแบบติดตั้งภายในเครื่องปลูกผลิตแบบลำโมเลกุลที่สำคัญประกอบด้วย เกจ (Gauge) วัดแรงดันไอ (Flux) ระบบตรวจวัดผิวหน้าด้วย RHEED (Reflection High Energy Electron Diffraction), ระบบวัดมวลและปริมาณสาร QMS (Quadrupole Mass Spectrometer) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1.2.1 การวัดค่าแรงดันไอ (Flux measuring)

เกจวัดแรงดันไอเป็นชนิด Ionization gauge ซึ่งติดตั้งอยู่ที่แท่น Manipulator แต่อยู่มุมที่แตกต่างกับมุมที่ใส่ MO Block ทำให้ไม่สามารถวัดแรงดันไอที่ถูกต้องระหว่างปลูกได้ ดังนั้นก่อนทำการปลูกทุกครั้งจึงต้องวัดค่าแรงดันไอของสารแต่ละชนิดก่อน

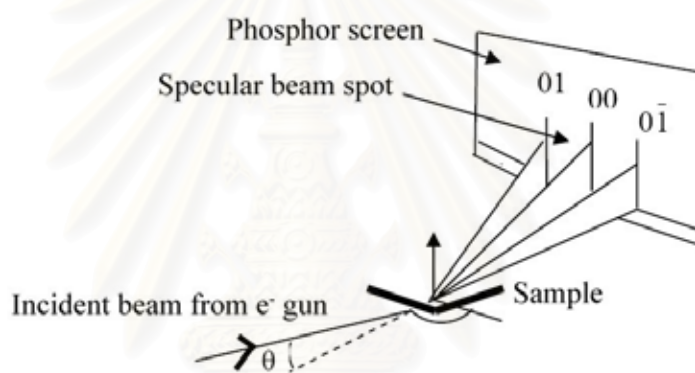
สารที่ใช้สำหรับปลูกโครงสร้างในการศึกษามีอยู่สามชนิดคือ In, Ga และ As ก่อนที่จะทำการปลูกโครงสร้าง สารทั้งสามชนิดนี้ต้องผ่านกระบวนการวัดค่าแรงดันไอให้ครบทุกค่า ซึ่งสิ่งที่ควบคุมได้คือ อุณหภูมิเตาและม่านชัตเตอร์ ดังนั้นเมื่อได้แรงดันไอที่วัดมาแล้ว ต้องบันทึกค่าอุณหภูมิเตาที่สอดคล้องกันด้วย การวัดแรงดันไอมิฉะนั้นคือ In และ Ga ต้องถูกวัดก่อน As เพราะว่า In และ Ga นั้นเมื่อเปิด-ปิดม่านชัตเตอร์ ค่าที่วัดได้จะเปลี่ยนแปลงทันที แต่สำหรับ As ค่าที่อ่านได้จากเกจจะเปลี่ยนแปลงหลังจากการเปิด-ปิดชัตเตอร์ช้ากว่าสารสองชนิดแรกมาก และเมื่อปิดม่านชัตเตอร์แล้ว As จะยังค้างอยู่ในห้องปลูกอีกระยะหนึ่ง เกจจึงไม่สามารถแสดงผลการเปลี่ยนแปลงไปสู่ค่าแรงดันไอจริงทันทีได้

สำหรับ In และ Ga ก่อนเริ่มทำการวัดแรงดันไอ ต้องทำความสะอาดเซลล์ก่อน (De-gas process) เนื่องจากขณะที่ไม่ได้มีการใช้เครื่อง ในโตนเจนเหลวไม่ได้ถูกป้อนเข้าสู่ระบบ ทำให้อุณหภูมิและสิ่งแปลกปลอมทั้งหลายที่อยู่ที่ผนังห้องปลูกมีการหลุดออกมา อาจจะไปเกาะตัวอยู่ที่

บริเวณช่องปล่อยสารได้ การทำความสะอาดทำได้โดยเพิ่มอุณหภูมิเตาไปมากกว่าค่าที่มากที่สุดที่จะใช้อยู่ประมาณ 50°C เช่นหากใช้ In สูงสุดที่ 670°C จะต้องเพิ่มอุณหภูมิเตาไปที่ 720°C เพื่อทำความสะอาดเซลล์ก่อน รายละเอียดดังกล่าวจะถูกอธิบายไว้ในหัวข้อ 3.1.3.1

3.1.2.2 RHEED (Reflective High-Energy Electron Diffraction)

RHEED เป็นระบบตรวจวัดที่ใช้หลักการสะท้อน (Reflection) และเลี้ยวเบน (Diffraction) ของอิเล็กตรอนพลังงานสูง (High-energy electron) ระบบนี้ถูกติดตั้งภายในเครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุลเพื่อใช้สังเกตสถานการณ์ที่ผิวหน้าชิ้นงานขณะดำเนินการปลูก และยังเป็นเครื่องมือสำคัญในการวัดเทียบอัตราปลูก (Growth rate calibration) อีกด้วย

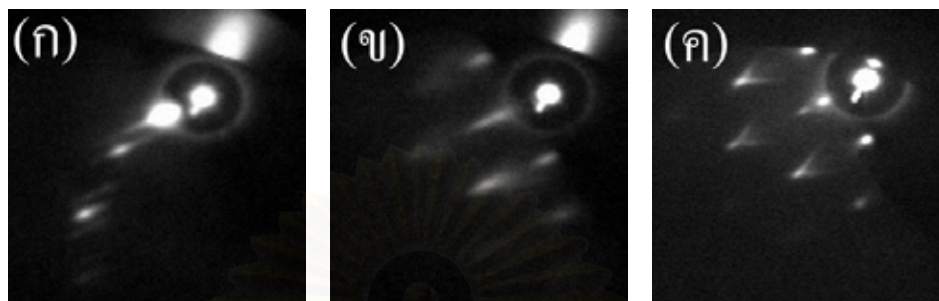


รูปที่ 3.6 แผนผังแสดงระบบ RHEED [3]

ระบบ RHEED ประกอบด้วยปืนยิงอิเล็กตรอนพลังงานสูง (High-energy electron gun) ในระดับ 10-30 kV [27] และฉากฟอสเฟออร์ (Phosphor screen) [28] นิยมใช้ทั้งสแตนฟิลาเมนต์ (Tungsten filament) เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่ขั้วคาโทด (Cathode) เพราะว่าทั้งสแตนมีค่า Work function ต่ำ อิเล็กตรอนจึงถูกสกัดออกมาได้ง่าย เมื่ออิเล็กตรอนพุ่งมาที่ชิ้นงานทำมุม θ (มีค่าประมาณ 1° - 3°) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 อิเล็กตรอนจะสะท้อนและเลี้ยวเบนผ่านช่องระหว่างระนาบของอะตอมที่ผิวหน้าของชิ้นงาน (อะตอมที่อยู่ลึกกว่านี้จะไม่มีผลกับ RHEED) และสุดท้ายไปตกกระทบบนฉากฟอสเฟออร์ ทำให้ฉากเปล่งแสงออกมาเป็นภาพที่สื่อถึงสภาพผิวหน้าของชิ้นงานในขณะนั้น [28]

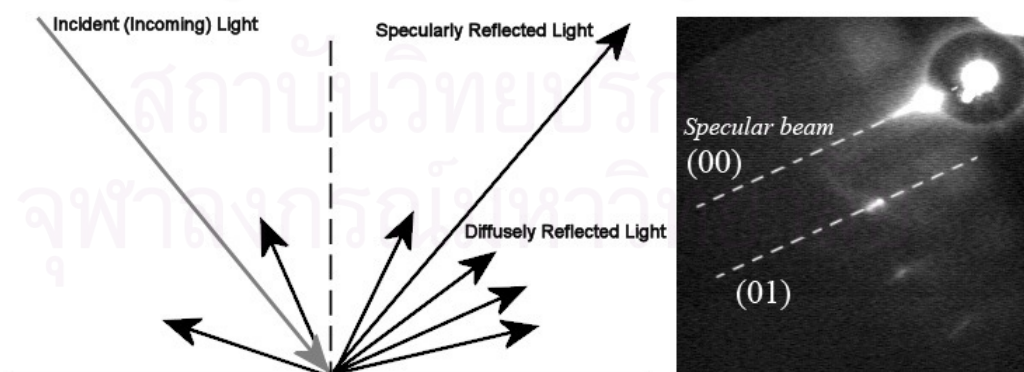
ภาพที่ปรากฏบนฉากนั้นไม่ได้สื่อเป็นสภาพผิวหน้าทางกายภาพออกมาโดยตรง (Real space) แต่เป็นภาพที่สื่อความหมายโดยอ้อม เนื่องจากเป็นในมิติกลับ (Reciprocal space) ภาพที่เป็น

รูปแบบเฉพาะของ RHEED [28] ซึ่งต้องตีความหรือเปรียบเทียบก่อน จึงจะทราบได้ว่าสภาพผิวหน้าเป็นอย่างไร ดังนั้นขณะดำเนินการปลูกโครงสร้าง ผู้ดำเนินการจำเป็นต้องทราบว่า RHEED pattern ที่เห็นสะท้อนถึงสภาพผิวหน้าที่แท้จริงอย่างไร



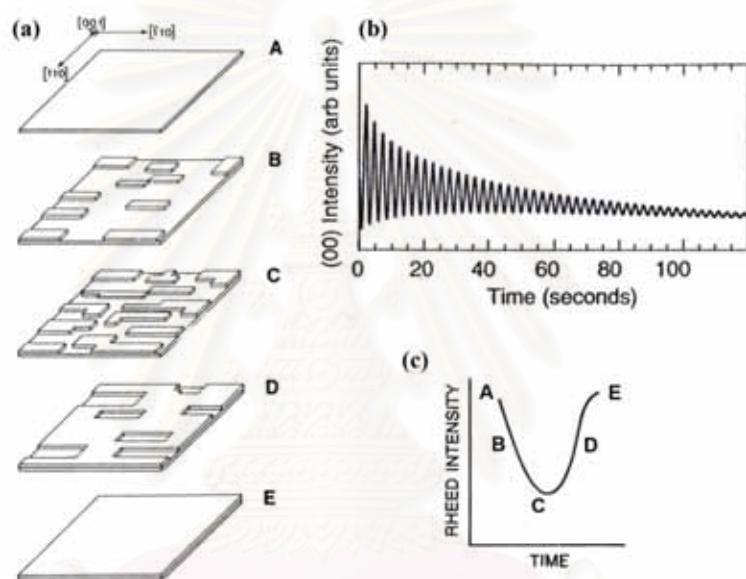
รูปที่ 3.7 RHEED pattern (ก) ผิวหน้า GaAs ที่เรียบ (ข) ผิวหน้าของแผ่นฐาน GaAs หลัง De-ox และ (ค) ผิวหน้าของ InAs ควอนดัมคอตบนแผ่นฐาน GaAs

RHEED pattern ที่มีประโยชน์มากที่สุดต่อการปลูกผลึกได้แก่ (ก) Streaky pattern ในรูปที่ 3.7 (ก) ซึ่งสื่อถึงผิวหน้าขณะนั้นเป็น GaAs ที่เรียบ, Pattern ในรูปที่ 3.7 (ข) แสดงถึง pattern ที่เริ่มเกิดขึ้นเมื่อผิวหน้ามีอุณหภูมิ 580°C ซึ่งก็คืออุณหภูมิเทียบเท่ากับ T_{de-ox} นั่นเอง pattern นี้ปรากฏเพียงครั้งเดียว เมื่อทำการกลบด้วย GaAs แล้วจะไม่ปรากฏขึ้นมาอีก และ (ค) Spotty pattern ในรูปที่ 3.7 (ค) ซึ่งสื่อถึงผิวหน้าที่ไม่เรียบ เกิดเป็นเกาะสามมิติ และมี Chevron [1] แสดงถึงการมีอยู่ของควอนดัมคอตบนผิวหน้า ผู้ที่ดำเนินการปลูกเป็นประจำจำเป็นต้องคุ้นเคยกับ pattern เหล่านี้ เพื่อที่จะสามารถติดตามผลการปลูกได้ทันที



รูปที่ 3.8 (ซ้าย) Specular beam (ขวา) ตำแหน่งของ Specular beam บน RHEED screen เมื่อถ้าอิเล็กตรอนยิงมาทางทิศ [1-10]

ประโยชน์ของ RHEED นอกจากสามารถใช้บอกสถานะของฟิล์มบนผิวได้แล้วยังสามารถใช้ในการปรับเทียบอัตราปลูก (Growth rate calibration) ได้ด้วย [29] โดยการสังเกตการสั่นของความเข้มของ RHEED (RHEED intensity oscillation) ซึ่งเป็นการสังเกตความเปลี่ยนแปลงของความเข้มของ RHEED ตรงตำแหน่ง Specular beam ดังแสดงในรูปที่ 3.8 เนื่องจาก Specular beam เป็นลำที่มาจากกระสะท้อนลําอิเล็กตรอนโดยตรง ดังนั้นความเข้มที่ตำแหน่ง Specular beam จึงแสดงถึงความเรียบของผิวสะท้อน คือ ความสว่างของ Specular beam มาก หมายถึงผิวมีความเรียบมากนั่นเอง



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ของลักษณะผิวหน้าและ RHEED oscillation (a) การก่อตัวของ GaAs บน GaAs (001) 1 ML จาก A ไป E (b) การสั่นของความสว่างของ Specular beam (00) ขณะทำการปลูก GaAs บนแผ่นฐาน GaAs (100) (c) ความสว่างของ Specular beam กับการก่อตัวของผลึกใน (a) [29]

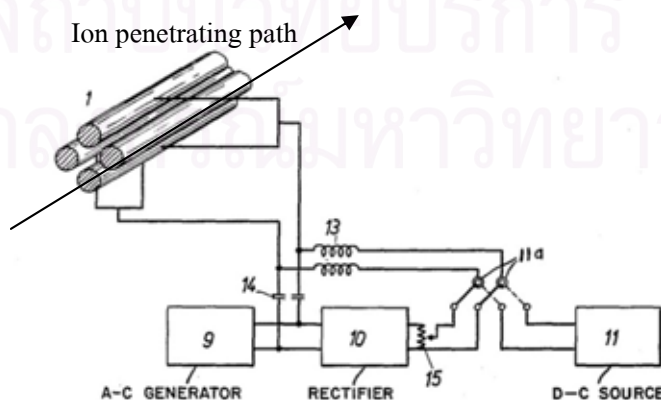
การปรับเทียบอัตราปลูกของ GaAs บนแผ่นฐาน GaAs (001) ใช้หลักการข้างต้นที่กล่าวไว้คือการสังเกตการสั่นของความเข้มของ Specular beam เริ่มต้นด้วยแผ่นฐานตั้งต้น GaAs ที่เรียงดังแสดงในรูปที่ 3.9 (a) (จุด A) ความเข้มของ Specular beam จะสูงที่สุดดังแสดงในรูปที่ 3.9 (c) (จุด A) เมื่อเริ่มให้ GaAs ก่อตัวขึ้นบนแผ่นฐานดังกล่าว จาก GaAs ที่ก่อตัวขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ผิวหน้าขณะที่ GaAs กำลังก่อตัวแต่ยังไม่เต็มแผ่นนั้นไม่เรียบดังแสดงในรูปที่ 3.9 (a) (จุด B, C และ D ตามลำดับ) เนื่องจากผิวสะท้อนไม่เรียบ Specular beam จะเข้มน้อยลง เพราะว่ามี Diffusion มาก

จากผิวหน้าที่ขรุขระ ดังแสดงในรูปที่ 3.9 (c) (จุด B, C และ D ตามลำดับ) เมื่อ GaAs เกาะจนเต็มแผ่น ทำให้ผิวหน้ากลับมาเรียบเหมือนเดิมอีกครั้ง Specular beam ก็จะกลับมาเข้มอีกครั้ง แสดงว่าได้มีการก่อตัวของ GaAs ครบ 1 ML พอดี ดังนั้นหากทำการจับเวลาและนับจำนวนรอบของการสั่นของความเข้ม จะทำให้สามารถหาค่าอัตราการปลูกในหน่วย ML/s ได้ อย่างไรก็ตามประโยชน์ของ RHEED ต่อการปรับเทียบอัตราปลูกของ InAs บน GaAs นั้นยังสามารถทำได้เช่นกัน เพียงแต่จะใช้วิธีการปรับเทียบโดยการจับเวลาการเกิด Spotty pattern แทนการสังเกตจากการสั่นของความเข้มของ Specular beam

3.1.2.3 Quadrupole mass spectrometer

Quadrupole mass spectrometer หรือเครื่องวิเคราะห์ห้มวล ทำให้ทราบได้ทันทีว่ามีสารใดอยู่ในห้องปลูกบ้าง (ในสถานะก๊าซ) ดังนั้นเมื่อมีอนุภาคของสารที่ไม่ต้องการ เช่น Oxide หรือ สารอื่นที่อยู่ในเบ้ารั่วออกมา ก็จะสามารถทราบได้ทันที และดำเนินการแก้ไขต่อไป

ด้านในการทำงานของเครื่องวิเคราะห์ห้มวลมี Quadrupole mass analyzer ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ประกอบไปด้วยแท่งโลหะที่วางห่างกันและขนานซึ่งกันและกันสี่แท่ง (Quadrupole) โดยจะจ่ายแรงดันไฟเป็นคลื่นความถี่วิทยุ (R.F. Voltage) ซี่ไปบน (Superimpose) สัญญาณกระแสตรงทำให้เกิดการสั่นของสนามไฟฟ้าในช่องว่างระหว่างแท่งโลหะทั้งสี่ เมื่อมีอนุภาคผ่านเข้ามา จะเกิดการสั่นตามสนามไฟฟ้าที่สั่นจากแท่งทั้งสี่ด้วยค่า Mass-to-charge ratio ที่ต่างกัน อนุภาคที่สั่นเข้ากับความถี่ที่ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพเท่านั้นที่จะสามารถเดินทางพ้นจากแท่งทั้งสี่ตรงไปสู่ Detector ได้ อนุภาคอื่นๆนอกเหนือจากนี้จะสั่นอย่างไม่มีเสถียรภาพและเส้นทางจะไม่ตรงไปสู่ Detector



รูปที่ 3.10 แผนภาพการทำงานของ Quadrupole mass analyzer [30]

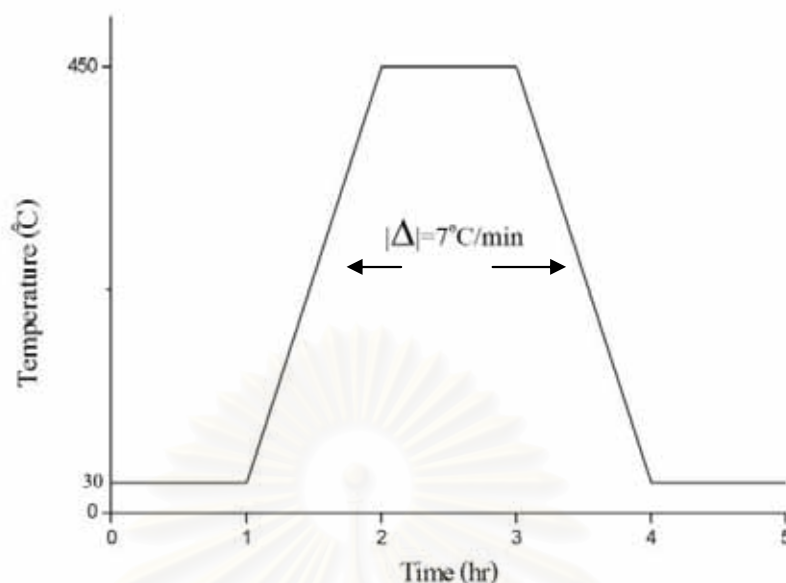
การเปลี่ยนความถี่ของแรงดันที่จ่ายไปอย่างต่อเนื่อง มีผลให้มวลของอนุภาคที่สามารถเดินทางเล็ดลอด Quadrupole ไปสู่ Detector ได้เปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นหากนำผลการตรวจจับด้วย Detector มาเป็นแกนตั้ง (Y-axis) และค่ามวล (ที่หาได้จาก Mass-to-charge ratio) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความถี่ของแรงดันมาเป็นแกนนอน (X-axis) สุดท้ายก็จะได้เป็นผลการตรวจจับมวลแบบกวาดขึ้นทางจอแสดงผล จุดยอด ณ ค่ามวลต่างๆ สามารถชี้ได้ว่าในห้องปลูกมีองค์ประกอบของสารใดอยู่ เช่น ถ้าค่ายอดอยู่ที่ 28 หมายความว่า มี CO (Carbonmonoxide) หรือค่ายอดที่ 75 หมายความว่า มี As₄

3.1.3 กระบวนการปลูก

กระบวนการปลูกที่จะกล่าวถึงในหัวข้อนี้ครอบคลุมตั้งแต่การเตรียมชิ้นงานก่อนที่จะเข้าสู่ห้องปลูก การเตรียมผิวหน้าให้เรียบในห้องปลูก กระทั่งเสร็จสิ้นกระบวนการปลูก ขั้นตอนต่างๆ ระหว่างดำเนินการปลูกควรทำด้วยความระมัดระวัง เพราะหากมีความผิดพลาดเกิดขึ้น ความแม่นยำของค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการปลูก เช่น อุณหภูมิเตา แรงดันไอ ฯลฯ จะต่ำลง และทำให้ผลที่ได้คลาดเคลื่อน นอกจากนี้ยังอาจทำให้เกิดอุบัติเหตุกับผู้ดำเนินการได้ หากมีสารพิษรั่วไหลออกมา หรือเครื่องปลูกผลึกอาจมีความเสียหายได้

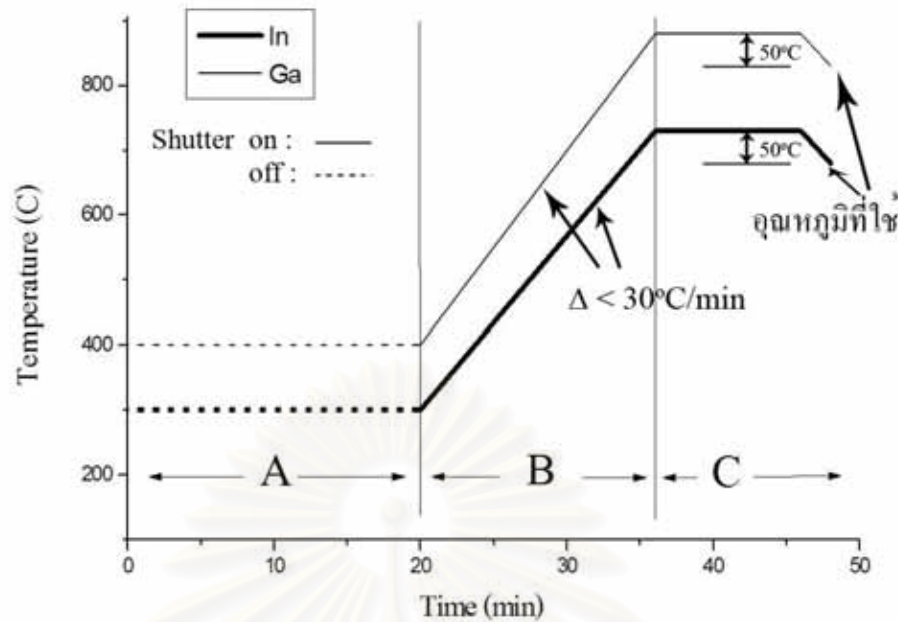
3.1.3.1 การเตรียมผิวหน้า

ก่อนชิ้นงานจะเข้าสู่ห้องปลูก จะต้องผ่านกระบวนการการกำจัดอนุภาคสิ่งแปลกปลอมต่างๆ และไอน้ำก่อน เพื่อให้ได้ผิวหน้าชิ้นงานที่มีคุณภาพและมีความบริสุทธิ์ กระบวนการแรกที่จะต้องทำก่อนก็คือการทำ Pre-heat หรือ Heat treatment ณ ห้องอินโทรคักชัน



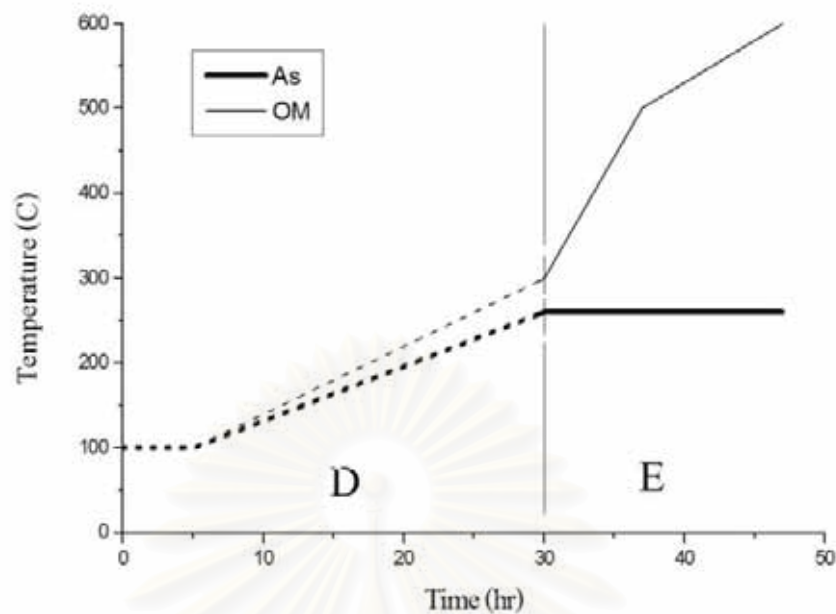
รูปที่ 3.11 Profile ของโปรแกรมอัติโนมัตินៃกระบวนการ Heat treatment (Pre-heat)

การทำ Heat treatment นั้นจะมีรูปแบบการปรับอุณหภูมิตามรูปที่ 3.11 ซึ่งอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมินี้ติดตั้งอยู่ที่ห้องอินโทรดัคชัน ก่อนที่จะเริ่มทำ Heat treatment ต้องแน่ใจก่อนว่าความดันภายในห้องอินโทรดัคชันอยู่ต่ำกว่าหรือเท่ากับ 5×10^{-8} Torr เพื่อป้องกันการล้มนไหวของระบบดูดอากาศออกเมื่อดำเนินการการทำ Heat treatment ไปแล้ว เมื่อความดันตรงเงื่อนไขแล้ว ก็เริ่มโปรแกรมอัติโนมัติโดยเริ่มขึ้นจากอุณหภูมิตั้งต้นที่ 30°C และใช้เวลา 1 ชั่วโมงในการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นอย่างสม่ำเสมอด้วยอัตราการเพิ่มคงที่ ไปหยุดที่อุณหภูมิสูงสุด คือ 450°C และค้างที่ค่านี้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นก็ทำการลดอุณหภูมิลงกลับสู่อุณหภูมิปกติ ด้วยเวลาและอัตราที่เท่ากับตอนที่เพิ่ม เมื่อผ่านกระบวนการนี้ไปแล้ว สิ่งแปลกปลอมที่ผิวหน้าของชิ้นงานจะหลุดออก ทั้งไอน้ำ และอนุภาคต่างๆที่เป็นสิ่งปลอมปน แล้วสิ่งแปลกปลอมที่หลุดออกมาก็ถูกดูดออกไปด้วยระบบดูดอากาศภายในห้องอินโทรดัคชันที่ทำงานตลอดเวลา อย่างไรก็ตามชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการนี้จะยังไม่สามารถกำจัด Oxide ออกไปจากผิวหน้าได้ ซึ่งจะต้องผ่านกระบวนการ De-ox (Oxide Desorption) ในห้องปลุกซึ่งเป็นกระบวนการกำจัด Oxide ก่อนปลุกโครงสร้างที่ต้องการ แต่ก่อนทำการ De-ox จะต้องทำการ De-gas เซลล์ก่อน



รูปที่ 3.12 Profile ของกระบวนการ De-gas เซลล์ In และ Ga

กระบวนการ De-gas เป็นการทำความสะอาดเซลล์เพื่อให้อนุภาคลิ่งสกปรกหลุดออกไปก่อนที่จะใช้งานเซลล์นั้นๆ โดย Profile ของการ De-gas เซลล์ In และ Ga (กล่าวเฉพาะที่ใช้ในการปลูกชิ้นงานสำหรับศึกษาภายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้) ถูกแสดงในรูปที่ 3.12 โดยในช่วงเวลา A เซลล์ทั้งสองถูกปิดอยู่ และอุณหภูมิอยู่ที่อุณหภูมิเก็บรักษา ช่วงนี้จะเป็นช่วงที่มีการปล่อยไนโตรเจนเหลวเข้าสู่ระบบเพื่อลดอุณหภูมิผนังและส่วนต่างๆภายในห้องปลูก ทำให้อนุภาคต่างๆไม่หลุดออกมาเมื่อเซลล์แต่ละช่องถูกเพิ่มอุณหภูมิ ช่วงเวลา B จะเริ่มเปิดม่านชัตเตอร์ของเซลล์และเริ่มเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเรื่อยๆด้วยอัตรา $30^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ไปจนมากกว่าค่าสูงสุดที่จะใช้จริง 50°C ต่อมาในช่วงเวลา C ทิ้งไว้ประมาณ 10 นาทีเพื่อให้อนุภาคแปลกปลอมต่างๆหลุดออก จากนั้นก็ลดอุณหภูมิลงสู่ค่าที่ต้องการใช้ และปิดม่านชัตเตอร์ของเซลล์ลง แล้ววัดแรงดันไอของอัตราปลูกที่ใช้ทุกค่าของ In และ Ga ก่อนการ De-ox



รูปที่ 3.13 Profile ของกระบวนการ De-ox ที่รวมขั้นตอนการวัดแรงดันไอของ As_4 ด้วย

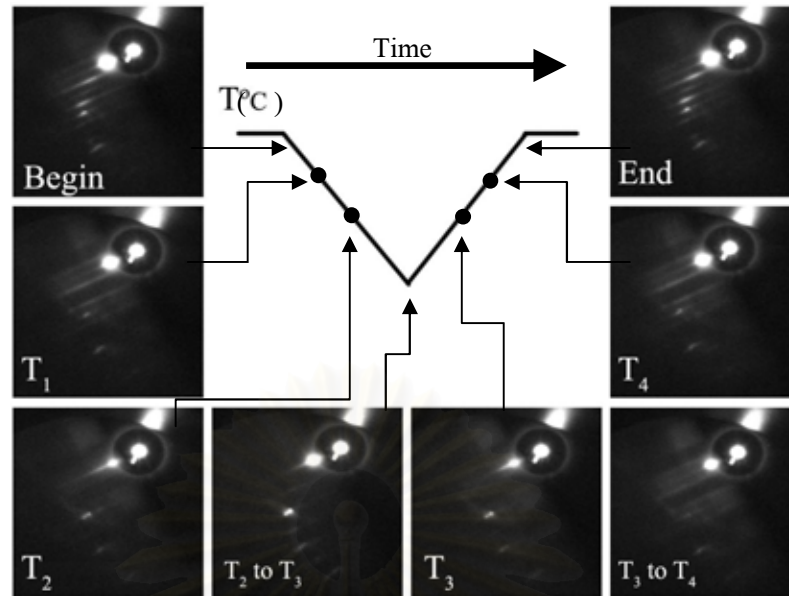
กระบวนการ De-ox ในห้องปลูก เริ่มจากการใส่ MO Block ที่ติดตั้งงานแล้ว เข้าที่แทนสำหรับใส่ปลอก ทำการ De-gas เซลล์ที่จะใช้ในการปลูกโครงสร้างและทำการวัดแรงดันไอสำหรับการปลูกทุกค่า รวมทั้ง As_4 ดังที่อธิบายไปยังข้างต้น จากนั้นสามารถเริ่มกระบวนการ De-ox ได้เลย เพราะว่ก่อนจะทำการ De-ox ชิ้นงานจะถูกให้ความร้อนสูงประมาณ $600^{\circ}C$ (อุณหภูมิเทียบเท่าที่ผิวหน้า ซึ่งจะแตกต่างจากที่วัดได้จากคู่ควความร้อน (Thermocouple)) หากไม่ทำให้สภาพแวดล้อมบริเวณนั้นมีไอ As_4 ก่อไว้ ผิวหน้าของชิ้นงานจะเสียหายจากการหลุดออกของ As ไอออน เมื่อเปิดม่านชัตเตอร์ของเซลล์ As ค่าความดันไอจะไม่ขึ้นสู่ค่าใช้งานทันที แต่จะขึ้นช้ากว่าเซลล์ In และ Ga รวมทั้งเวลาปิดม่านชัตเตอร์ของเซลล์แล้ว ไอของ As_4 ก็ยังฟุ้งอยู่ภายในห้องปลูกอยู่ระยะหนึ่ง นี่เป็นเหตุผลที่ As_4 ถูกวัดแรงดันไอเป็นอันดับสุดท้าย และด้วยข้อจำกัดด้านอัตราการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิเก็บรักษา (Stand-by temperature) ของเซลล์ As_4 ที่อัตรา $5^{\circ}C/min$ (เทียบกับ $30^{\circ}C/min$ ของ In และ Ga) เพื่อเป็นการประหยัดเวลา จึงได้รวมเอากระบวนการวัดแรงดันไอ As_4 ควบคู่ไปกับกระบวนการ De-ox

รูปที่ 3.13 แสดงให้เห็นถึง Profile ของการเพิ่มอุณหภูมิของชิ้นงานจากอุณหภูมิเก็บรักษาที่ $100^{\circ}C$ ไปจนถึง $300^{\circ}C$ ตรงจุดนี้จะทำการหยุดโปรแกรมชั่วคราว (Hold) เพื่อวัดแรงดันไอ BEP (Beam Equivalent Pressure) As_4 ซึ่งจะต้องมีค่าระหว่าง 15 ถึง 25 เท่าของค่าแรงดันไอที่มากที่สุด

ของลำโมเลกุลของธาตุหมู่ III (ทั้ง In และ Ga รวมกัน) โดยแรงดันไอของ Ga สูงสุดจะเกิดในขณะทำการปลูกชั้น Buffer ที่อัตรา 0.6 ML/s ดังนั้นแรงดันไอของ As₄ ที่วัดได้จึงต้องมีค่าอ้างอิงจากอัตราปลูก GaAs buffer ทุกครั้ง หลังจากนั้นก็ให้เปิดมันซ์เตอร์ของเซลล์ของ As₄ ที่ไว้ตลอดจนจบการปลูก อันเนื่องมาจากชิ้นงานระหว่างทำการปลูกมีอุณหภูมิสูงมากหากไม่มี As₄ อยู่ในบรรยากาศตลอดเวลา มีโอกาสเกิดเหตุการณ์ที่ As⁻³ ภายในผลึก GaAs ของสารตั้งต้น (แผ่นฐาน) หลุดระเหยออกมาจากผิวหน้าเป็น As₄ ทำให้ผลึก GaAs ที่ผิวหน้าเสียหาย เกิดเป็นฝ้าที่ผิวหน้าสามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่าเมื่อนำชิ้นงานออกมา เรียกลักษณะผิวหน้าดังกล่าวว่า Gallium rich [28,31] เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปเกิน 500°C ก็ให้เริ่มลดอัตราการเพิ่มอุณหภูมิลงเพื่อจะได้สามารถหาอุณหภูมิอ้างอิงของ T_{de-ox} (Oxide Desorption Temperature) ได้ทัน (เทียบเท่าอุณหภูมิผิวหน้าที่ 580°C) จากนั้นให้เพิ่มอุณหภูมิไปต่อจากค่า T_{de-ox} อีกประมาณ 30°C แล้วทิ้งอุณหภูมิก้างไว้ที่ค่าดังกล่าวประมาณ 15-20 นาที เฝ้ารอจนกระทั่งปริมาณ CO ลดลงจนกระทั่งอิ่มตัวที่ค่าพื้นหลัง โดยตรวจดูได้จาก QMS ที่ค่าจุดยอด 28 ซึ่งปริมาณ CO ที่วัดได้นั้นบ่งบอกถึงปริมาณ Oxide ภายในห้องปลูกทั้งหมด ซึ่งก็รวมไปถึงที่หลุดออกมาจากผิวหน้าชิ้นงานด้วยเช่นกัน เมื่อผิวหน้ามีปริมาณ Oxide ลดลงจนแทบจะไม่เหลือแล้ว (ตรวจดูได้จาก QMS เช่นกัน) ก็ให้ทำการลดอุณหภูมิกลับมาที่ค่า T_{de-ox} เพื่อเตรียมทำการปลูกชั้น Buffer layer ในขั้นต่อไป

ที่ต้องการอุณหภูมิเทียบเท่าผิวนั้น ก็เพราะว่าที่ผิวหน้าเป็นบริเวณของชิ้นงานที่เกิดการปลูกชั้นผลึก ซึ่งอุณหภูมิผิวหน้าจะมีผลมากต่อเวลาปลูกชั้นที่มี In เนื่องจาก In จะหลุดออกจากผิวหน้าเร็วกว่า Ga ที่อุณหภูมิเท่ากัน ดังนั้นจึงมีกระบวนการที่ใช้อ้างอิงอุณหภูมิผิวหน้ากับอุณหภูมิที่ได้จากคู่วอบอุณหภูมิ (Thermocouple) ระหว่างการปลูกถึง 2 ครั้ง คือตอนหา T_{de-ox} จะเทียบเท่าอุณหภูมิผิวหน้าที่ 580°C และตอนหา Pattern Transition อุณหภูมิ T_{trans} เทียบเท่าที่ผิวหน้าเป็น 500°C

หลังจากผ่านกระบวนการ De-ox แล้วและ Oxide ออกจากผิวหน้าชิ้นงานจนผิวหน้ามีปริมาณ Oxide ลดลงไปมาก แต่ว่าผิวหน้าขณะนี้จะยังไม่เรียบเพราะว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า T_{de-ox} ผิวหน้าจะเกิดความเสียหายบางส่วน ทำให้ไม่เรียบ ดังนั้นเพื่อให้ได้ผิวหน้าที่เรียบ ต้องทำการปลูกชั้น Buffer ทับก่อน ซึ่ง Buffer ก็คือชั้นกลบทับที่เป็นสารชนิดเดียวกับแผ่นฐาน ก็คือการปลูก GaAs ลงบนแผ่นฐาน GaAs โดยที่ชิ้นงานที่ปลูกภายใต้วิธานิพจน์ฉบับนี้ทุกชิ้น มีชั้น Buffer หนา 300 nm ที่ปลูกที่อุณหภูมิผิวหน้า 580°C (เท่ากับ T_{de-ox})



รูปที่ 3.14 แผนภาพแสดง RHEED pattern ณ อุณหภูมิ T_1 - T_4 สำหรับการหา T_{trans}

อุณหภูมิผิวหน้าของชิ้นงานที่วัดด้วยคู่ควมความร้อนไม่สามารถใช้ระบุเป็นอุณหภูมิจริงที่ผิวหน้า ณ ขณะนั้นได้ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น T_{deox} ที่หาในขั้นตอนที่ผ่านมาเอาไว้เทียบกับอุณหภูมิผิวหน้าที่ 580°C สำหรับอุณหภูมิอีกค่าที่ใช้เทียบกับอุณหภูมิจริงที่ผิวหน้าคือ T_{trans} (Transition temperature) ซึ่งจะเทียบกับ 500°C ขั้นตอนการหา T_{trans} จะแทรกอยู่ระหว่างการปลูกชั้น Buffer โดยให้ทำการแบ่ง Buffer เป็นสองช่วง (หรือสามช่วงหากมีการปรับเทียบอัตราปลูกด้วย) Buffer ช่วงแรก (150 nm) จะใช้กลบทับผิวหน้าหลังจากกระบวนการ De-ox ให้เรียบก่อน จากนั้นให้เริ่มทำการหา T_{trans} โดยสังเกตสภาพผิวหน้าจาก RHEED pattern ค่อยๆลดและเพิ่มอุณหภูมิจนเริ่มเห็นการเปลี่ยนแปลง RHEED pattern ตามลำดับในรูปที่ 3.14 จากนั้นนำค่า T_1 - T_4 มาหาค่าเฉลี่ย เป็นค่า T_{trans} ในที่สุด สุดท้ายก่อนไปสู่ขั้นตอนต่อไปในการปลูกโครงสร้าง ผิวหน้าจะถูกกลบด้วยชั้น Buffer อีกครั้งหนึ่ง (150 nm) เพื่อให้ได้ผิวหน้า GaAs ที่เรียบ

3.1.3.2 การปลูกชั้นผลึก

ชั้นผลึกที่เกิดขึ้นจากการปลูกโครงสร้างด้วยเครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุลในวิธานิพนธ์ฉบับนี้เน้นไปที่สารประกอบหมู่ III-V สามชนิด คือ Ga, In และ As ซึ่งสามารถสร้างเป็นชั้นสารประกอบ GaAs, InAs, และ InGaAs ได้ โดยจะจำแนกออกเป็นกลุ่มจากลักษณะการเกิดชั้นผลึกได้ 4 กลุ่มได้แก่ ก) ชั้นผลึกแบบก้อนผลึก ข) ชั้นควอนตัมดอต ค) ชั้นลายตาราง และ ง) ชั้นกลบทับ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

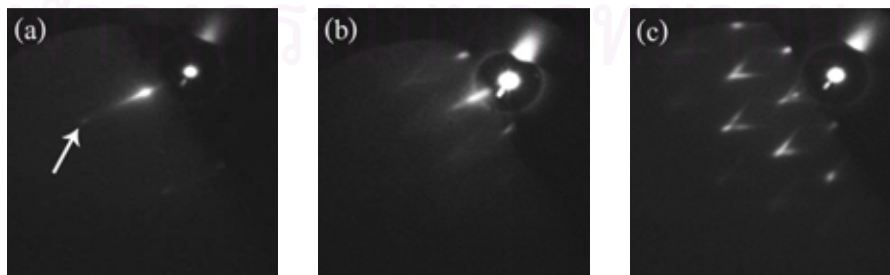
ก. ชั้นผลึกแบบก้อนผลึก

ชั้นผลึกแบบก้อนผลึก (Bulk) เป็นชั้นผลึกที่มีความหนาและมีการก่อตัวเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ ชั้น Buffer ของ GaAs บนแผ่นฐาน GaAs สามารถจัดอยู่ในจำพวกก้อนผลึกได้ เนื่องจากมีความหนาถึง 300 nm ชั้นที่ปลูกจึงมีคุณสมบัติเหมือนกับก้อนผลึก GaAs การปลูกชั้น Buffer ของ GaAs บนแผ่นฐาน GaAs ทำได้โดยการปล่อยไอของ Ga ออกจากเซลล์ ภายใต้บรรยากาศของ As_4 เนื่องจากกระบวนการเกิดภายใต้บรรยากาศของ As_4 ที่ผิวหน้าของชิ้นงานจะถูกกัดด้วย As_4 เป็นเสมือนชั้นบนสุดของผิวหน้าขณะนั้น เมื่อ Ga ที่ปล่อยมาจากเซลล์มาถึงผิวหน้าชิ้นงาน ก็จะเกิดพันธะกันเป็น GaAs ใหม่เกาะกับผลึก GaAs เดิมบนแผ่นฐาน อย่างไรก็ตาม ด้วย Mean free path ที่มาก ทำให้ไอสารที่ปล่อยออกมาปนกันจะไม่ทำปฏิกิริยากันจนกว่าจะถึงผิวหน้าของชิ้นงาน ซึ่งหากอนุภาคยังคงมีพลังงานสูงอยู่ก็จะวิ่งไปชนกับอะตอมหรือ โมเลกุลอื่นๆบนผิวหน้าได้อีก จนกว่าจะหยุดและเกาะตัวกันเป็นผลึก

ข. ชั้นควอนตัมดอต

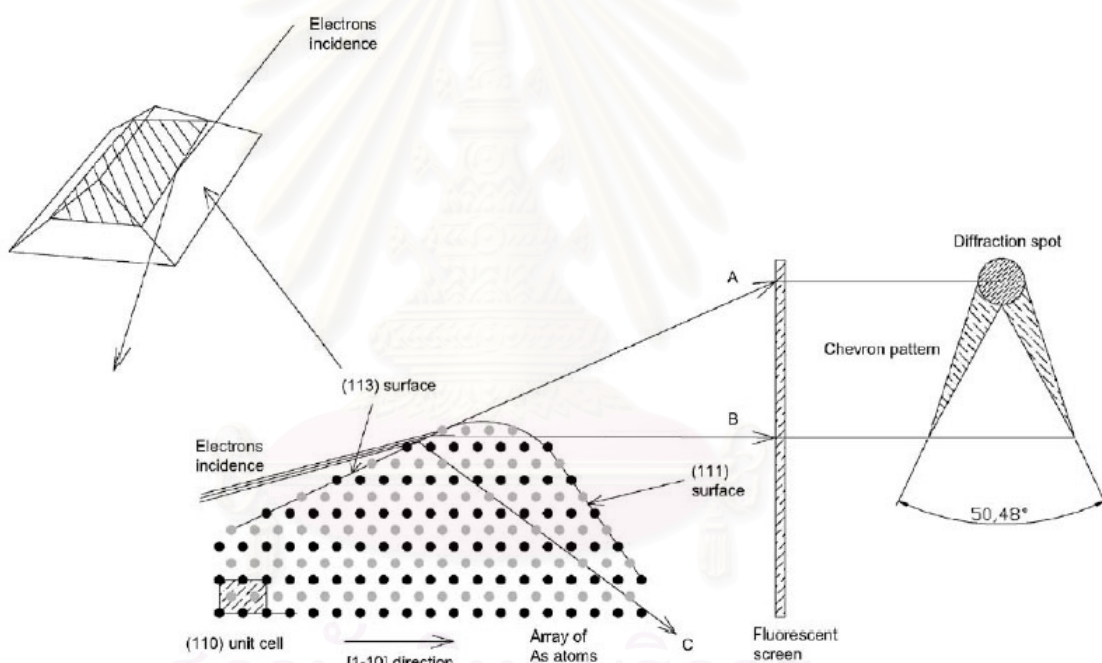
ชั้นควอนตัมดอตสามารถเกิดขึ้นบนผิวหน้าที่ทำการปลูกได้ด้วยการกำหนดเงื่อนไขการปลูกที่ทำให้ E และ H อยู่ในช่วง SK_1 หรือ SK_2 ตามแผนภาพสภาวะสมดุลในรูปที่ 2.1 ซึ่งในที่นี่จะให้ความสำคัญกับรูปแบบการเกิดชั้นควอนตัมดอตในโหมด SK_1

การเกิดควอนตัมดอตแบบ SK_1 ต้องมี Wetting layer หนาปริมาณหนึ่งก่อน ควอนตัมดอตจึงค่อยเริ่มก่อตัวตามขึ้นมา [1] ในแต่ละเงื่อนไขการปลูกแต่ละครั้ง จะมีความหนาของ Wetting layer ที่แน่นอนที่เป็นขอบเขตก่อนที่จะเกิดการก่อตัวเป็นควอนตัมดอต กระบวนการทั้งหมดสามารถตีความได้จากภาพบน RHEED screen



รูปที่ 3.15 ภาพจาก RHEED screen ขณะปลูกควอนตัมดอต InAs บนแผ่นฐานลายตาราง $In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs$ (a) เมื่อเริ่มเกิดควอนตัมดอต (b) เกิดควอนตัมดอตแล้ว (c) Chevron pattern

การสังเกตการเกิดควอนตัมดอทบนลายตาราง InGaAs/GaAs และบนแผ่นฐาน GaAs นั้น คล้ายกัน คือให้สังเกตการเปลี่ยนแปลง RHEED pattern จาก Streaky pattern ไปเป็น Spotty pattern โดยจุดที่บอกว่าควอนตัมดอทกำลังก่อตัวขึ้นมาคือในรูปที่ 3.15 (a) ตรงที่ลูกศรชี้ ซึ่งอยู่ในแนวเดียวกับ Specular beam จะเริ่มมีจุดสว่างขึ้นมา แสดงว่าควอนตัมดอทเริ่มเกิดบ้างบนผิวหน้าชั้นงานแล้ว หากปลูกควอนตัมดอทต่อไป ควอนตัมดอทจะมีขนาดใหญ่ขึ้นและปริมาณเพิ่มขึ้นซึ่งมีผลต่อลักษณะ RHEED pattern รวมของผิวหน้าขณะนั้นมากขึ้นในรูปที่ 3.15 (b) และ Chevron pattern จะขึ้นชัดดังในรูปที่ 3.15 (c) แสดงถึงการมีควอนตัมดอทอยู่มากบนผิวหน้า อย่างไรก็ตามการสังเกตลักษณะของ Chevron pattern ยังสามารถบอกถึงลักษณะทางกายภาพของควอนตัมดอทได้ด้วยมุมหน้าจั่วของ Chevron pattern ดังแสดงในรูปที่ 3.16 [32,33]



รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ของ Chevron pattern ต่อลักษณะทางกายภาพของควอนตัมดอท [33]

ควอนตัมดอทที่ปลูกในการทดลองภายใต้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นควอนตัมดอท InAs ทั้งหมด แต่ด้วยชั้นที่เป็นฐานแตกต่างกัน มีผลทำให้ความหนาเทียบเท่าของ InAs มีความเปลี่ยนแปลง หากปลูกชั้นควอนตัมดอท InAs ลงบนแผ่นฐาน GaAs ธรรมดา จะต้องปลูกด้วยความหนาเทียบเท่า ~ 1.8 ML [1] จึงจะเกิดควอนตัมดอท แต่หากปลูกบนแผ่นฐานลายตาราง $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ หนา 50 nm จะต้องปลูกเพียงแก่ความหนาเทียบเท่า ~ 0.9 ML [3] เท่านั้น

ค. ชั้นลายตาราง

ชั้นลายตาราง (Cross-hatch layer) เป็นชั้นที่เกิดจากการปลูกชั้นผลึกซึ่งมีค่าคงที่ผลึกแตกต่างจากสารที่เป็นแผ่นฐานตั้งต้น (Substrate) ไม่มาก โดยค่าของ ϵ อยู่ในขอบเขตที่ทำให้เกิดเป็นชั้นผลึกแบบสองมิติ หรือรูปแบบ FM ดังนั้นชั้นผลึกที่เกิดขึ้นจึงยังคงรูปเป็นชั้นผลึกแบบสองมิติอยู่เหมือนเดิม

ความเครียดที่เกิดจากการเกาะกันด้วยค่าคงที่ผลึกที่ต่างกันไม่มาก แม้ว่าจะไม่พอที่ทำให้เกิดเกาะสามมิติได้ แต่ความเครียดในชั้นผลึกที่สะสมมากขึ้นตามความหนาที่เพิ่มขึ้น เป็นผลให้ผลึกเกิด Dislocation เพื่อลดความเครียดสะสม โดยสำหรับผลึกตระกูล Zincblend จะเกิด Dislocation ง่ายที่สุด ในทิศ $[1-10]$ และ $[110]$ เป็นต้นเหตุของการเกิดลายตาราง ดังรายละเอียดในบทที่ 2

กระบวนการปลูกชั้นลายตารางของ InGaAs บน GaAs ใช้วิธีการเปิดมันซ์เตอร์ของเซลล์ In และ Ga พร้อมกันภายใต้บรรยากาศของ As_4 ทำให้เกิดเป็นชั้น InGaAs ขึ้นมา แต่อัตราส่วนของ In ไม่ควรมีค่ามากเกินไปค่าวิกฤตค่าหนึ่งคือ 20 % ซึ่งจะทำให้ชั้น InGaAs ไม่เกิดอยู่ภายใต้เงื่อนไข Low lattice mismatch ซึ่งมี $\epsilon < 1.5\%$ [24]

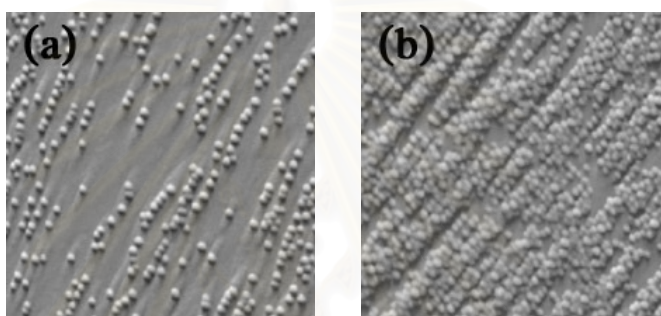
เมื่อได้ความหนาตามที่ต้องการแล้ว (จากการคำนวณ) ให้ปิดมันซ์เตอร์ของเซลล์ In และ Ga ทิ้งที่ ส่วน As ให้เปิดทิ้งไว้ตามปกติ ก็จะได้ผิวหน้าที่เป็นชั้นลายตารางตามที่คำนวณไว้

การสังเกตชั้นลายตารางด้วยการดู RHEED screen พบว่ามีความแตกต่างจาก Streaky pattern ของ GaAs ที่เรียบไม่มากนัก และเนื่องจากการปลูกชั้นลายตารางต้องคำนวณความหนาและเวลาการเปิดมันซ์เตอร์ของเซลล์ In และ Ga ไว้แน่นอนแล้ว ดังนั้นการสังเกต RHEED ของแผ่นฐานลายตารางจึงไม่มีนัยสำคัญเท่ากับตอนปลูกควอนตัมดอต

การปรับแต่งชั้นลายตารางสามารถกระทำได้หลายวิธี เช่นการปรับอัตราส่วน In / Ga [3], ความหนา [3], และอุณหภูมิแผ่นฐานขณะปลูกชั้นลายตาราง [12,16] ผลการปรับแต่งจะอธิบายในบทที่ 4

ง. ชั้นกบตบ

ชั้นกบตบ (Capping layer) ถูกใช้เพื่อจุดประสงค์สองอย่างคือ เพื่อกบตบชั้นบนสุดของโครงสร้างเพื่อกำจัดสถานะที่ผิว (Surface states) ซึ่งคล้ายกับกับดัก (Trap) ที่ทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะแบบไม่เปล่งแสง (Non-radiative recombination) ดังนั้นชั้นกบตบจึงจำเป็นสำหรับชิ้นงานที่ต้องการปลูกเพื่อวัตถุประสงค์เปล่งแสง อีกจุดประสงค์หนึ่งคือใช้สร้าง Nanohole สำหรับเป็น Template ในการปลูกโครงสร้างที่ซับซ้อนขึ้น เช่น โครงสร้างควอนตัมดอทหนาแน่นสูง (High density quantum dots) หรือควอนตัมดอทโมเลกุล (Quantum dots molecule) [9,34] เป็นต้น



รูปที่ 3.17 การกบตบแบบบางสำหรับปลูกโครงสร้างควอนตัมดอทความหนาแน่นสูง (a) กบตบแบบบางและปลูกซ้ำด้วยความหนา 0.6 ML 3 ครั้ง (b) กบตบแบบบางและปลูกซ้ำด้วยความหนา 0.6 ML 4 ครั้งแรกและ 1.2 ML ครั้งสุดท้าย [34]

การกบตบแบบบาง (Thin capping) ทำให้ควอนตัมดอทที่ถูกกบตบเกิดการเปลี่ยนรูปร่างโดยแนวโน้มคือ เป็นเนินยี่ดัวยาวขึ้นไปในทิศ [1-10] มีรูปร่างคล้ายอูฐ (Camel-like shape) และมีหลุมขนาดเล็กตรงกลาง (Nanohole) เมื่อทำการปลูกควอนตัมดอททับอีกครั้งจะได้เป็น Nanopropeller เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นไปอีก 3-5 ครั้ง และปลูกควอนตัมดอทครั้งสุดท้ายที่ความหนามากกว่าชั้นอื่นๆ โครงสร้างที่ได้เป็นกลุ่มควอนตัมดอทหนาแน่นสูงเกาะกันเป็นโมเลกุล

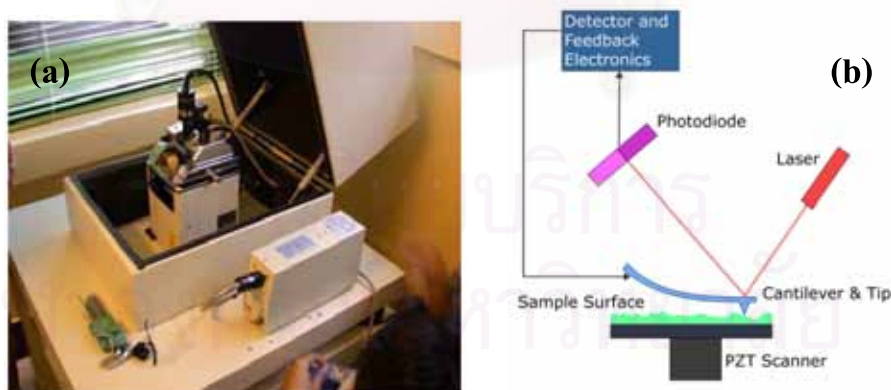
การทำสลับกันหลายรอบของการกบตบแบบบางกับการปลูกทับจะนำไปสู่การเกิดควอนตัมดอทหนาแน่นสูง ซึ่งมีแนวโน้มในการเรียงตัวของกลุ่มควอนตัมดอทไปในทิศทาง [1-10] [9]

3.2 การวัดลักษณะสมบัติด้วยระบบวัดติดตั้งภายนอก (ex-situ)

เครื่องตรวจวัดภายในเครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุลมีจุดประสงค์เพื่อตรวจวัดขณะที่กำลังดำเนินการปลูกอยู่ หรือใช้วัดค่าแรงดันไอในกระบวนการปลูก แต่เครื่องตรวจวัดแบบติดตั้งภายนอก มีจุดประสงค์เพื่อวัดลักษณะสมบัติของชิ้นงานที่ผ่านการปลูกโครงสร้างมาแล้ว แต่ละเครื่องก็มีเป้าหมายในการวัดที่แตกต่างกันออกไป กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM) ใช้สำหรับวัดลักษณะทางกายภาพของผิวหน้าของชิ้นงาน กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy: TEM) ใช้ดูรายละเอียดชิ้นงานแบบภาคตัดขวาง ระบบวัดการเปล่งแสง (Photoluminescence: PL) ใช้สำหรับวัดช่วงความยาวคลื่นและปริมาณโฟตอนที่ปล่อยออกมาจากชิ้นงานที่ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานสูง

3.2.1 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM)

การศึกษาผิวหน้าของโครงสร้างที่ผ่านกระบวนการปลูกมาแล้ว เป็นการตรวจสอบผลที่ได้ทางกายภาพของผิวหน้าของโครงสร้าง ซึ่งสามารถสื่อถึงลักษณะสมบัติด้านอื่นๆ ได้ เช่น ลักษณะสมบัติทางแสง หรือ ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า โดยได้มีการใช้ผลที่ได้จากการวัดลักษณะโครงสร้างที่ผิวหน้าชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ไปเป็นข้อมูลการจำลองโครงสร้างเสมือนจริง (Simulation) เพื่อศึกษาลักษณะของผลการเปล่งแสง (Photoluminescence) ของโครงสร้างได้ [35]



รูปที่ 3.18 Seiko SPA-400 (a) ภาพจริงของเครื่องที่ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (b) แผนภาพอย่างง่ายของการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม [3]

กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM) เป็นเครื่องมือหนึ่งที่ใช้สำหรับตรวจสอบผิวหน้าของชิ้นงานได้เล็กในระดับ Nanometer (ทางห้องวิจัยที่ผู้เขียนสังกัดอยู่ใช้

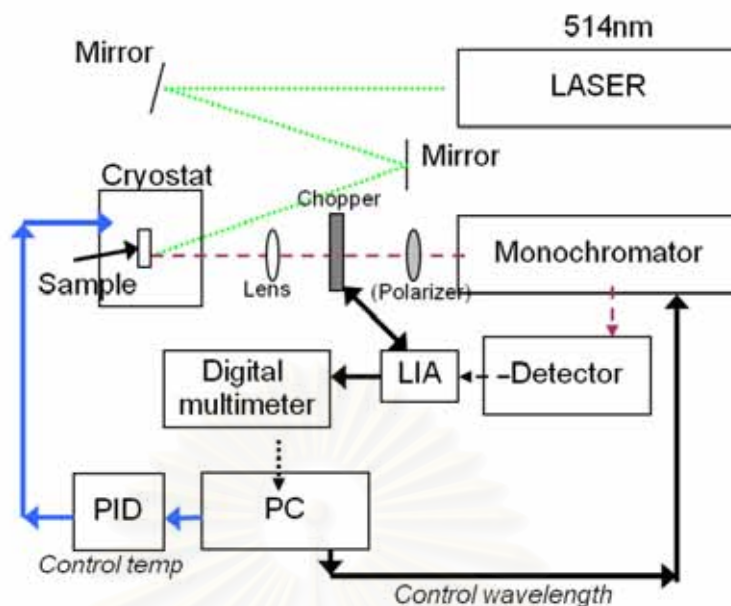
เครื่องของ Seiko รุ่น SPA-400 ดังแสดงในรูปที่ 3.18 (a) ลักษณะการทำงานของเครื่องแสดงไว้ในรูปที่ 3.18 (b) การทำงานของเครื่องนั้นทำโดยใช้หัวทิป (AFM tip, Cantilever) กวาดผ่าน (Scan) ผิวหน้าของชิ้นงาน เมื่อหัวทิปกวาดผ่านผิวหน้าชิ้นงานที่มีความขรุขระ หัวทิปจะมีการขยับไปตามลักษณะของผิวหน้าที่ตำแหน่งนั้นๆ ดังนั้นการขยับของหัวทิปจะสื่อถึงลักษณะทางกายภาพของผิวหน้าในบริเวณที่กวาดผ่าน ส่วนการแปลงมาเป็นข้อมูลลักษณะทางกายภาพของผิวหน้านั้นจะใช้แสง LASER ยิ่งไปที่หัวทิปที่มีคุณสมบัติสะท้อนแสง LASER ได้ดี เมื่อหัวทิปมีการขยับ ตัวตรวจจับแสง (Photodetector) จะตรวจจับการขยับของหัวทิป ผลลัพธ์ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมคือการแปลงลักษณะทางกายภาพของผิวหน้ามาเป็นข้อมูลของพื้นผิวที่สามารถนำไปวิเคราะห์หรือแปลงเป็นภาพไปใช้ได้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สนใจผลทางกายภาพของผิวหน้าของชิ้นงาน เพราะสามารถใช้ศึกษาถึงวิวัฒนาการของการเกิดอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอตที่ปลูกบนแผ่นฐานลายตารางได้ ซึ่งผลการทดลองและการวิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมถูกแสดงไว้ในบทที่ 4

3.2.2 ระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ (PL)

ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการปลูกมาแล้วและมีคุณสมบัติในการปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน (Radiative recombination) ด้วยการดูดพลังงานโฟตอนจากกระตุ้นด้วยแสงสามารถนำมาวัดปริมาณโฟตอนและช่วงความยาวคลื่นของโฟตอนที่ถูกคายออกมาได้ด้วยระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.19 ระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์

ดังแสดงในรูปที่ 3.19 ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนหลักๆได้แก่ แหล่งกำเนิดโฟตอน (Photon source), ชุดเลนส์สำหรับการโฟกัส แยก และเปลี่ยนทิศทางโฟตอน (Lens kit), เครื่องแยกแถบความยาวคลื่นโฟตอน หรือ สเปกโตรมิเตอร์, โมโนโครเมเตอร์ (Spectrometer, Monochromator), ชิ้นงาน (Sample) และระบบคอมพิวเตอร์ (PC) สำหรับใช้ในการ คำนวณ, วิเคราะห์, แสดงผล และเก็บผล

การวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์เริ่มจากการยิงแสง LASER ที่มีพลังงานสูงกว่า Energy gap ของสารกึ่งตัวนำภายใต้การทดลอง แสงจะถูกยิงผ่านชุดเลนส์เพื่อโฟกัสลงไปที่พื้นผิวของชิ้นงานให้เข้มที่สุด เมื่อชิ้นงานได้รับโฟตอนและเกิดการดูดกลืนพลังงานโฟตอนโดยอิเล็กตรอนภายในโครงสร้างของชิ้นงาน (พาหะจะไม่ดูดกลืนพลังงานโฟตอนหากโฟตอนมีพลังงานไม่พอที่จะกระตุ้นให้พาหะเกิดการเปลี่ยนสถานะพลังงาน (State)) อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจะลดพลังงานออกมาเพื่อกลับสู่สถานะพื้น ในกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิด Direct band gap ผลต่างของพลังงานจะอยู่ในรูปของโฟตอน โฟตอนที่ปล่อยออกมาจะถูกโฟกัสโดยเลนส์เข้าสู่สเปกโตรมิเตอร์เพื่อจำกัดความยาวคลื่นที่สามารถเดินทางผ่านสเปกโตรมิเตอร์ได้ และทำการวัดความเข้มของช่วงความยาวคลื่นแคบๆดังกล่าวด้วยโฟโตดีเทคเตอร์ ข้อมูลที่ได้จากการกวาดความยาวคลื่นและวัดความเข้มแสงจากโฟโตดีเทคเตอร์จะอยู่ในรูปคู่อันดับเรียกว่า Spectral response

การวัดทุกชนิดย่อมมีสัญญาณรบกวน ดังนั้นโฟตอนที่ปล่อยออกมาและโฟตอนจากสิ่งแวดล้อม หรือ สัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า จะปนกัน ซึ่งบางครั้งโฟตอนที่ปล่อยออกมามีปริมาณไม่พอที่จะแยกจากสัญญาณรบกวนได้ ระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์จึงมักมีล็อกอินแอมป์ (Lock-in Amp, LIA) และช้อปเปอร์ (Chopper) เพื่อทำการแปลงสัญญาณเข้าให้อยู่ในปริภูมิความถี่ และแยกคัดความถี่ออกมาเพื่อตัดสัญญาณรบกวน นอกจากนี้ชิ้นงานที่มีโครงสร้างที่แถบช่องว่างพลังงานเป็นแบบ Indirect ทำให้พลังงานที่ปล่อยออกมาอาจจะไม่มีหรือมีโฟตอนน้อย ซึ่งพลังงานส่วนหนึ่งใช้ในการเปลี่ยนค่าโมเมนตัมของพาหะและคายพลังงานออกมาในรูปการสั่นหรือโฟนอน (Phonon) มักเสียไปในรูปความร้อน ดังนั้นชิ้นงานที่เหมาะสมต่อการวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ควรเป็นชิ้นงานที่โครงสร้างมีแถบช่องว่างพลังงานแบบ Direct



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ควอนตัมดอทบนแผ่นฐานลายตารางมีลักษณะที่การเรียงตัวเป็นเส้นตรงตามแนวของ Slip plane ที่เกิดจาก Misfit dislocation สองแนวตัดขวางกัน และปรากฏที่ผิวหน้าในรูป Surface step ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของการปลูกควอนตัมดอทบนแผ่นฐานชนิดนี้ เช่นในระบบ Ge/SiGe [25] และ InAs/InGaAs [13,15] แต่สิ่งที่การศึกษาในอดีตไม่ได้มีการวิเคราะห์คือลำดับของการประกอบตนเอง (Self-assembling) ของควอนตัมดอทบนแผ่นฐานลายตาราง ผลการทดลองที่ได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ข้อสรุปที่สำคัญคือ ควอนตัมดอท InAs ที่ถูกปลูกบนแผ่นฐานลายตาราง InGaAs มีลำดับการเกิดที่ตำแหน่งต่างๆไม่พร้อมกัน ซึ่งเป็นผลมาจากความสูงต่ำของพื้นผิวลายตารางที่ไม่เท่ากัน ทำให้ความหนาวิกฤติของการเกิดควอนตัมดอทที่ตำแหน่งต่างๆไม่เท่ากันด้วยความเข้าใจในวิวัฒนาการของการเกิดควอนตัมดอทบนแผ่นฐานลายตาราง ทำให้สามารถควบคุมการเกิดควอนตัมดอทแต่ละตำแหน่งได้และอาจนำไปสู่การปลูกควอนตัมดอทแบบ Deterministic [36] แทนที่จะเป็นแบบ Probabilistic (แบบ SK) ที่งานวิจัยส่วนใหญ่ใช้ในปัจจุบัน

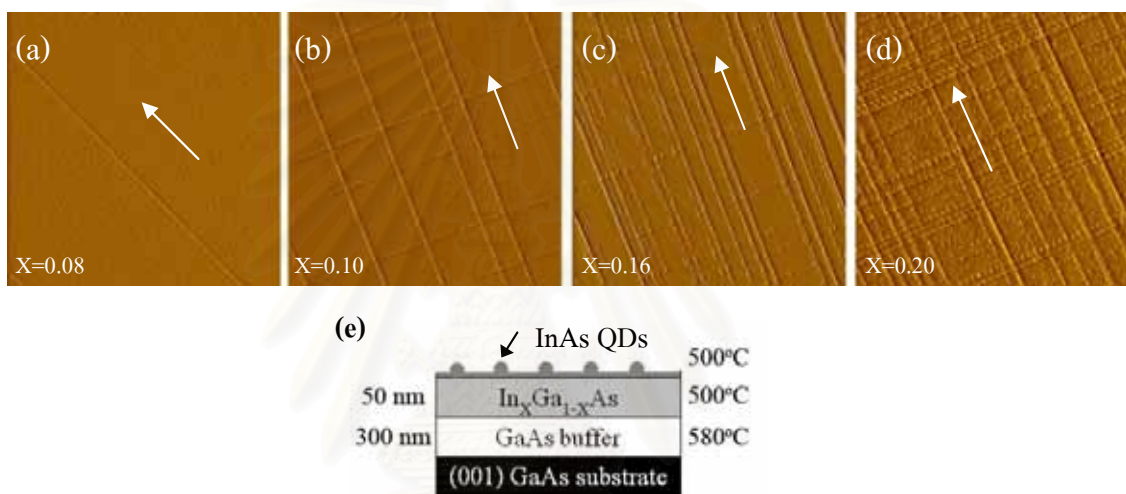
การทดลองที่นำมาสู่การวิเคราะห์วิวัฒนาการการเกิดควอนตัมดอท InAs ที่ปลูกบนแผ่นฐานลายตาราง $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($X < 0.2$) ถูกแบ่งออกเป็นหัวข้อย่อย ได้แก่ ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ In ต่อ Ga ในชั้นลายตาราง การเปลี่ยนความหนาชั้นลายตาราง การทดลองปรับเปลี่ยนความหนา InAs ของชั้นควอนตัมดอท และการจำลอง Strain field ของผิวหน้าลายตารางดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1 ควอนตัมดอทบนลายตาราง

การปรับเปลี่ยนชั้นลายตารางมีผลโดยตรงต่อการเรียงตัวของควอนตัมดอทที่ปลูกทับบนลายตารางด้วย เพราะว่าการเรียงตัวของควอนตัมดอทบนลายตารางได้รับผลกระทบโดยตรงจากการเปลี่ยนแปลงผิวหน้าของลายตาราง ซึ่งขึ้นกับทั้งค่าของ X และความหนาของชั้น $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ดังที่ได้กล่าวต่อไป

4.1.1 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนอินเดียมต่อแกลเลียม (ค่าของ X ใน $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$)

แผ่นฐานลายตาราง InGaAs มีลักษณะสมบัติที่แตกต่างกันออกไป ตามอัตราส่วนของ In และ Ga ที่เป็นส่วนประกอบอยู่ เนื่องจากการปลูกชั้นแผ่นฐานลายตารางนี้ ใช้การเปิดซัดเตอร์เซลล์ As , In และ Ga พร้อมกัน โดยที่ As ที่เป็นหมู่ V ทำหน้าที่เป็นสารหลัก ขณะที่ In และ Ga ที่เป็นหมู่ III ต้องพยายามจับกับ As ให้ได้ทั้งคู่ เนื่องจากเป็นสารประกอบหมู่ III-V ดังนั้น In และ Ga จึงเป็นอัตราส่วนกันในสารประกอบหมู่ III-V แบบสามธาตุ (Ternary compound) ตามต้องการ เขียนแทนด้วย $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$



รูปที่ 4.1 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมแสดง InAs ควอนตัมดอตบนแผ่นฐานลายตาราง

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ เมื่อ X มีค่าเป็น (a) 0.08, (b) 0.10, (c) 0.16 และ (d) 0.20 โดยทุกภาพมีขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ ลูกศรแสดงทิศ [1-10] (e) แบบจำลองของภาพตัดขวาง โครงสร้างของชิ้นงานในการ

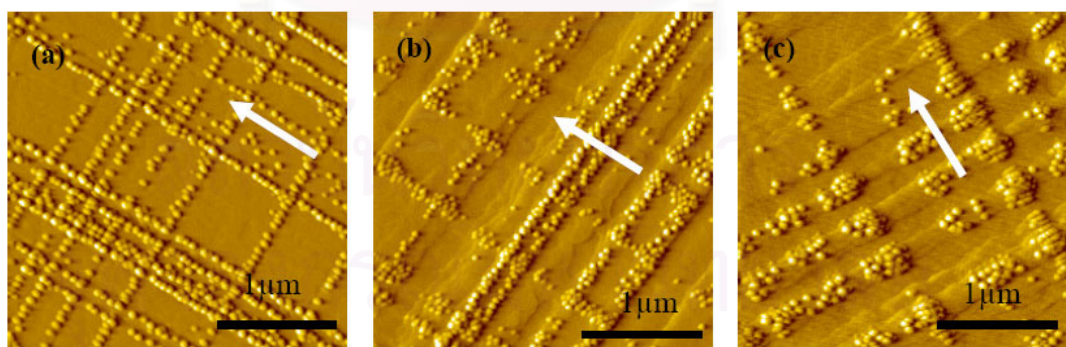
ทดลอง

ผลการทดลองการเปลี่ยนอัตราส่วน In ต่อ Ga (ปรับค่า X) โดยยังคงความหนาของชั้น InGaAs ไว้ที่ 50 nm ดังภาพตัดขวางในรูปที่ 4.1 (e) ได้ถูกแสดงในรูปที่ 4.1 (a) - (d) ซึ่งชี้ให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ In ในชั้น InGaAs (ค่า X เพิ่มขึ้น) ปริมาณลายตารางก็เพิ่มขึ้นด้วย โดยการก่อตัวของควอนตัมดอตบนผิวหน้าชิ้นงานนั้นมีลักษณะร่วม คือมีควอนตัมดอตที่เรียงตัวเป็นแนวเส้นตรงและที่กระจายตัวกันแบบสุ่มในบริเวณที่ไม่มีลายตาราง ซึ่งสามารถอธิบายได้จากการผ่อนคลายความเครียดระหว่างการปลูกชั้น InGaAs เนื่องจากค่า ϵ นั้นคำนวณมาจากความต่างของค่าคงที่ผลึกของ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ และ GaAs ดังข้อมูลในตารางที่ 2.1 โดยที่อิงปริมาณ In ใน InGaAs

มาก ค่าคงที่ผลึกของ InGaAs ก็ยิ่งมาก ทำให้ ϵ มากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นหากคงความหนาชั้นลายตารางไว้ที่ 50 nm เมื่อปริมาณ In เพิ่มขึ้น ค่าความหนาวิกฤติของการเกิด Dislocations จะลดลงตามความสัมพันธ์ของ Matthews-Blakeslee [10] ซึ่งได้สร้างเป็นกราฟไว้ในรูปที่ 2.13 การที่ความเครียดในชั้นผลึกเพิ่มขึ้นตามปริมาณ In ผลึกจึงถึงค่าวิกฤติที่ทำให้เกิด MD และ TD เร็วขึ้น เป็นสาเหตุให้ชั้นลายตารางที่มีปริมาณ In น้อยจะมีลายตารางน้อยด้วย เพราะลายตารางเป็นผลมาจากการเกิดขึ้นของ MD และ TD สิ่งที่น่าสนใจจากรูปที่ 4.1 (a) คือหากทำการควบคุมค่า X ให้เหมาะสม จะสามารถควบคุมการเกิด Dislocations ในทิศทางเดียวคือทิศ [1-10] ได้ และหากควบคุมการเปิดปิดชุดเตอร์ระหว่างการปลูกชั้นควอนตัมดอตและปรับเวลา GI (Growth interruption) และเทคนิคการปลูกให้เหมาะสมก็จะสามารถสร้างควอนตัมดอตที่เรียงตัวเป็นแนวเดียวในทิศ [1-10] ได้เช่นกัน

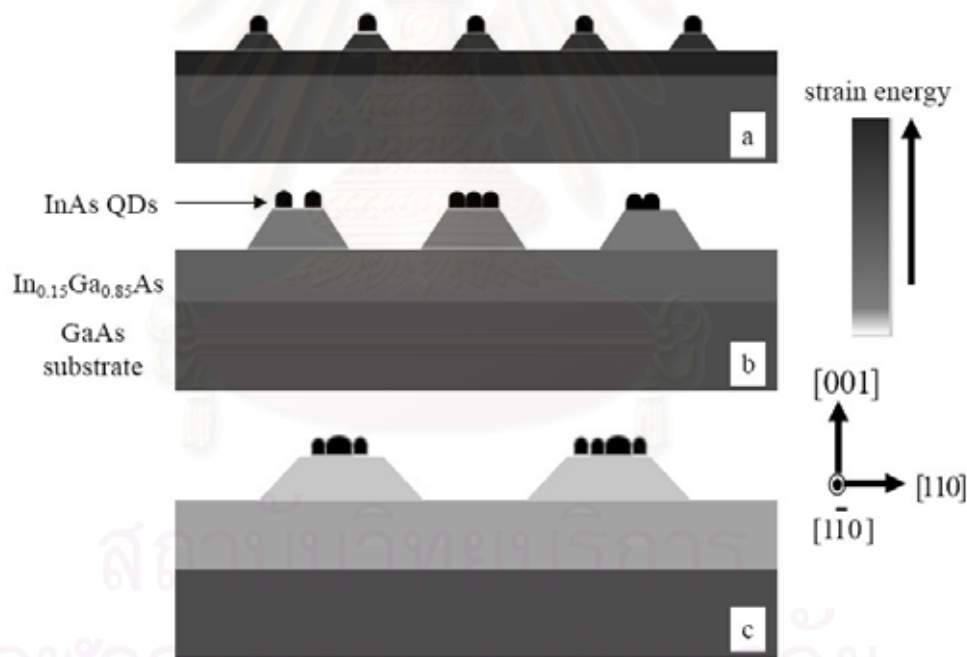
4.1.2 การเปลี่ยนแปลงความหนาชั้นลายตาราง

นอกจากปริมาณ In จะมีผลต่อลายตารางของชั้นลายตารางแล้ว ความหนาก็มีผลต่อความเครียดสะสมและพื้นผิวของชั้นลายตารางเช่นกัน การเพิ่มความหนาไปเกินค่าวิกฤติการทวีคูณปริมาณ Dislocation (h_p) หรือ Dislocation multiplication [15,37,38] จะทำให้ความเครียดของชั้นฟิล์ม InGaAs ลดลงอย่างรวดเร็วพร้อมกับผิวหน้าที่มีความสูงต่ำเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งการทดลองเพิ่มความหนาได้ทำการศึกษามาแล้วโดย C. C. Thet et al. [15] ผลการทดลองถูกแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผิวหน้าของ InAs ควอนตัมดอตกลบทับบนแผ่นฐานลายตาราง $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ ที่ความหนาของชั้นลายตาราง (a) 50 nm (b) 100 nm และ (c) 150 nm วัดจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ทิศทางตามลูกศรคือทิศ [1-10] [15]

ความหนาของชั้นแผ่นฐานลายตารางก็มีผลต่อรูปแบบของลายตารางที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าด้วยการแปรค่าความหนาในช่วง 50-150 nm จะทำให้ผิวหน้าของแผ่นฐานลายตารางจะมีความสูงของลายตารางและลักษณะของลายตารางเป็นดังแสดงในรูปที่ 4.2 ความหนาของชั้น $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ ที่มากกว่า $h_p = 76$ nm จะทำให้เกิด Dislocations multiplication [15,37,38] จากรูปที่ 4.2 (a) พบว่าความหนาชั้นผลึกที่ 50 nm เกินกว่าค่าความหนาวิกฤติ (h_c) แต่ไม่มากไปกว่า h_p ที่ 76 nm หมายความว่าเกิด Dislocation แล้วและส่งผลไปยังผิวหน้าแต่จำนวนลอนที่ผิวหน้านั้นยังมีไม่มาก ในขณะที่รูปที่ 4.2 (b และ c) แผ่นฐานลายตารางหนากว่า h_p จึงมีการทวีคูณปริมาณ dislocation ทำให้มี MD (60° dislocation) ปริมาณมากที่เกิดขึ้นส่ง Slip plane มาที่ผิวหน้ามากจนผิวหน้าของแผ่นฐานลายตารางมีบางตำแหน่งที่เกิดการรวมกันของ MD ผลที่ได้คือระยะห่าง (Spacing) ระหว่างเส้นลายตารางของแผ่นฐานลายตารางที่ขนานกันในแต่ละแนว จะน้อยลงตามความหนาที่มากขึ้น และเส้นลายตารางจะมีความหนาและสูงมากขึ้นด้วย

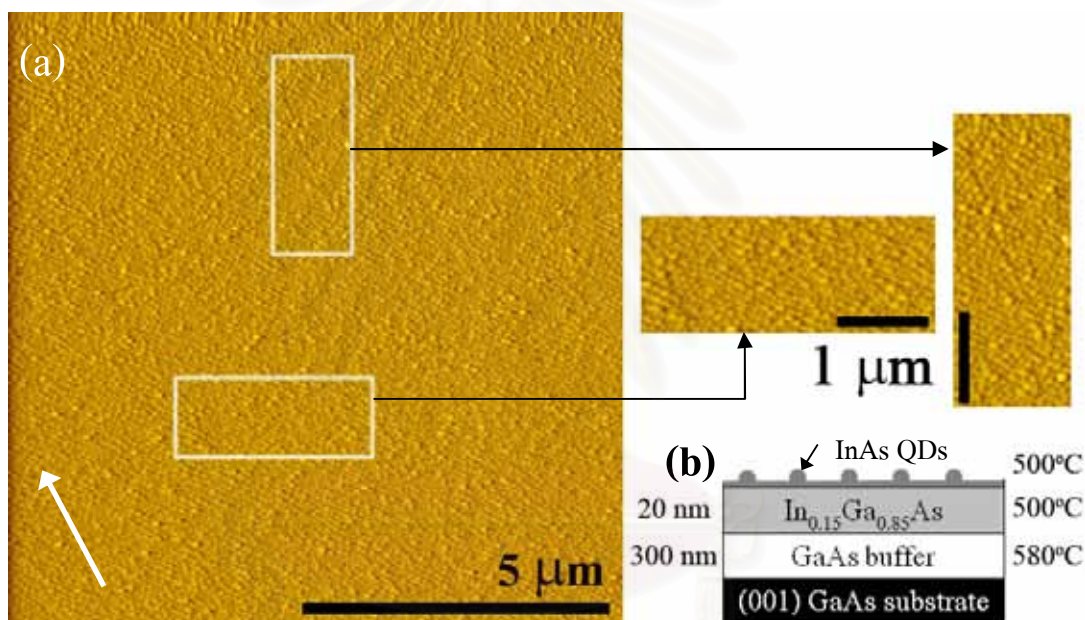


รูปที่ 4.3 แบบจำลองของภาพตัดขวางของ InAs ควอนตัมดอตบนแผ่นฐานลายตาราง $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ ที่ความหนา (a) 50 nm (b) 100 nm (c) 150 nm [15]

ที่ความหนามากกว่าค่า h_p ทำให้เกิด Dislocations จำนวนมาก และทำให้มี Surface steps จำนวนมากเช่นกันที่ผิวหน้าชั้นลายตาราง จึงมีกระบวนการ Surface step elimination ตามมา เมื่อทำการปลูกชั้นลายตารางต่อไปดังแสดงในรูปที่ 2.7 [39] จะเห็นจากรูปว่าหากมี Dislocation เพิ่มขึ้น

จะมีโอกาสที่จะเกิดเนินใหญ่ขึ้นสูง เนื่องมาจากการทับซ้อนของ 60° Dislocations ที่มากขึ้นตาม MD นั่นเอง เมื่อทับซ้อนกันมากขึ้นเรื่อยๆ เนินก็จะใหญ่ขึ้นตามความหนาของชั้นลายตารางและปริมาณของ Dislocations ดังแสดงในรูปที่ 4.3 [15,29,39]

การทดลองเพิ่มความหนาที่ได้อธิบายไปแล้วทำให้สามารถคาดเดาผลของการลดความหนาชั้นลายตารางได้ว่า หากเพิ่มความหนาแล้ว Dislocation เพิ่มมากขึ้นจนซ้อนทับกันทำให้เกิดเนินที่ผิวหน้าขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นเมื่อลดความหนาลงผลที่ได้จะตรงกันข้ามกัน จึงได้ปลูกชั้นงาน u0842 เป็นโครงสร้างชั้นควอนตัมดอทที่อุณหภูมิผิวหน้า 500°C ปลูกทับบนชั้น $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ หนา 20 nm ที่ปลูกด้วยอุณหภูมิผิวหน้า 500°C เช่นกัน ผลที่ได้ถูกแสดงในรูปที่ 4.4



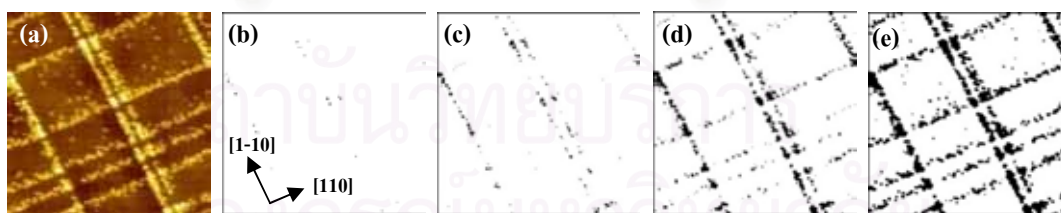
รูปที่ 4.4 (a) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมแสดงผิวหน้าขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ โดยลูกศรแสดงทิศทาง $[1-10]$ และ (b) แบบจำลองภาพตัดขวางโครงสร้างของชั้นงาน u0842

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.4 พบว่าแม้จะมีควอนตัมดอทบนผิวหน้าชั้นงานแต่กลุ่มควอนตัมดอทไม่มีการเรียงตัวเป็นระเบียบเหมือนควอนตัมดอทบนชั้นลายตารางที่หนา 50 nm แสดงให้เห็นว่าที่ชั้น $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ หนา 20 nm ไม่มีลายตารางเกิดขึ้นอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามหากพิจารณารูปที่ 4.4 โดยละเอียดแล้ว พบว่าควอนตัมดอทบางตำแหน่งมีลักษณะคล้ายกับว่าเรียงตัวเป็นเส้นตรงทั้งตามแนวลูกศร และแนวตั้งฉากกับลูกศร เหมือนกับทิศขนานกับ $[1-10]$ และ $[110]$ ดังที่แสดงไว้ในส่วนขยายของรูปที่ 4.4 (a) ที่ด้านขวา ซึ่งเป็นไปได้ว่าอาจจะมีการเกิดลายตารางเกิดขึ้นแล้ว เพราะว่าที่

ความหนา 20 nm นั้นมากกว่าค่าความหนาวิกฤติที่มีการเกิด Dislocation ของชั้น $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ คือ $h_c = 6 \text{ nm}$ ไปแล้ว (ค่า h_c จากรูปที่ 2.13) แต่ว่าลายตารางยังไม่ยาวมากเนื่องมาจากตอนแรกๆของการเกิด Strain relaxation นั้น MD และ TD จะยังไม่เกิดเป็นแนวยาวมากเพราะว่า MD จะยาวขึ้นเรื่อยๆตามความหนาชั้น InGaAs [14]

4.2 วิวัฒนาการของการเกิดควอนตัมดอทบนลายตาราง

ความคิดในการใช้ลายตารางเป็นแผ่นฐานแม่แบบ (Template) ในการจัดเรียงควอนตัมดอทนั้นได้มีมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1997 [25] แต่ว่าตลอด 11 ปีที่ผ่านมา ยังไม่มีการศึกษาธรรมชาติของการเกิดควอนตัมดอทบนแผ่นฐานลายตารางเลย ข้อมูลที่ถูกนำเสนอในหัวข้อนี้เป็นการพิสูจน์โดยการปลูกจริงและการจำลอง Strain field ที่ผิวหน้าของลายตารางว่าควอนตัมดอทบนลายตารางเกิดที่เวลาต่างกัน การทดลองในส่วนนี้เริ่มจากการศึกษาขนาดของควอนตัมดอท InAs 0.8 ML ปลูกที่ 470°C มีเวลาขัดจังหวะหลังการปลูก (Growth interruption, GI) 30 วินาที [40] บนแผ่นฐานลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As} / \text{GaAs} (001)$ หนา 50 nm ปลูกที่ 500°C ชื่อชิ้นงาน u0702 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมดังแสดงในรูปที่ 4.5 (a) พบว่าควอนตัมดอท InAs บนผิวหน้าชิ้นงานดังกล่าวสามารถจัดลำดับความสูงจากสูงไปต่ำได้เป็น 4 กลุ่มแสดงไว้ในรูปที่ 4.5 (b-e) ดังนี้ ก) กลุ่มควอนตัมดอทบนจุดที่เส้นลายตารางตัดกัน (Intersection) ข) กลุ่มควอนตัมดอทบนเส้นลายตารางที่ขนานกับทิศ $[1-10]$ ค) กลุ่มควอนตัมดอทบนเส้นลายตารางที่ขนานกับทิศ $[110]$ และ ง) กลุ่มควอนตัมดอทบนพื้นเรียบที่ไม่มีลายตาราง



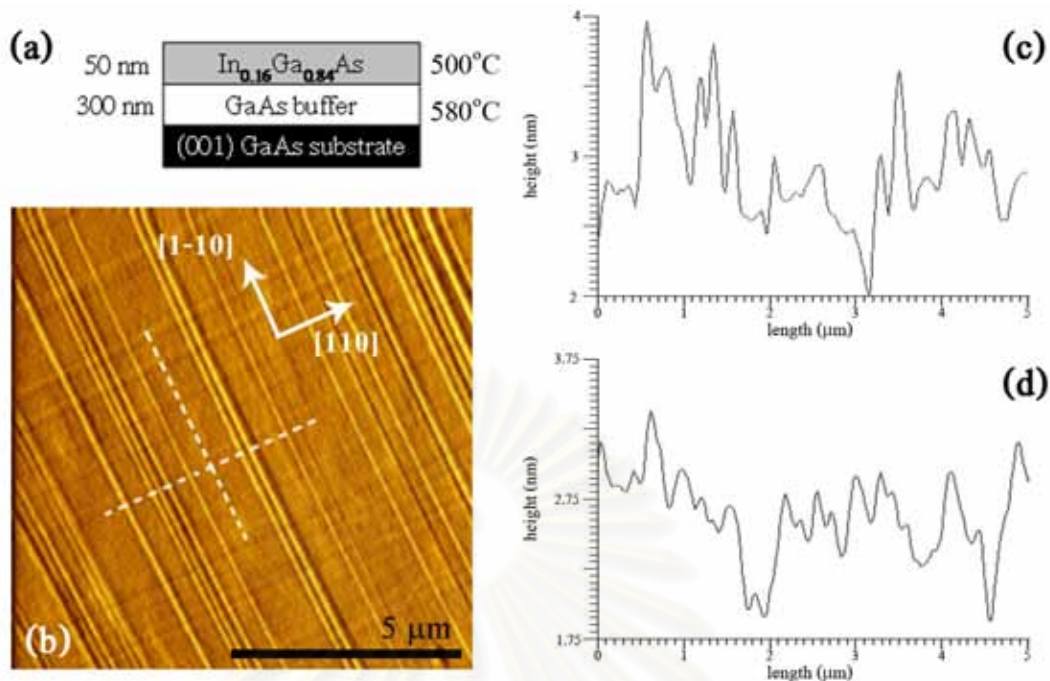
รูปที่ 4.5 (a) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมแสดงผิวหน้าชิ้นงานขนาด $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ และภาพจากใช้ Image thresholding โดยมีระดับ Threshold ที่ (b) 5.5-, (c) 4.9-, (d) 4.0- และ (e) 3.0 nm โดยสีขาวหมายถึงบริเวณที่มีความสูงต่ำกว่า และสีดำหมายถึงบริเวณที่มีความสูงสูงกว่าค่า Threshold

ข้อมูลดิบในรูปที่ 4.5 (a) จึงได้ถูกนำมาผ่านกระบวนการจัดการภาพ (Image processing) โดยผ่านการทำ Image thresholding เพื่อคัดกรองตำแหน่งที่มีความสูงมากกว่าค่าวิกฤติ (Threshold)

รูปที่ 4.5 (b) แสดงตำแหน่งของควอนตัมดอทที่มีความสูงมากกว่า 5.5 nm ซึ่งพบว่าเป็นควอนตัมดอทเฉพาะบนตำแหน่งจุดตัดของเส้นแนวที่ขนานกับทิศ [1-10] และ [110] เท่านั้น ส่วนรูปที่ 4.5 (c) นั้นแสดงตำแหน่งของควอนตัมดอทที่มีความสูงมากกว่า 4.9 nm ซึ่งพบว่าเป็นตำแหน่งเดิมที่ปรากฏในรูปที่ 4.5 (b) (เพราะ $5.5 > 4.9$ nm) และตำแหน่งใหม่ที่เพิ่มขึ้นมาจาก (b) ($4.9 < h < 5.5$ nm) ซึ่งตำแหน่งใหม่ดังกล่าวนี้เป็นควอนตัมดอทบนเส้นลายตารางที่ขนานกับทิศ [1-10] เท่านั้น สำหรับรูปที่ 4.5 (d) แสดงตำแหน่งของควอนตัมดอทที่มีความสูงมากกว่า 4.0 nm โดยส่วนที่เพิ่มมาจากรูปที่ 4.5 (c) ($4.0 < h < 4.9$ nm) คือควอนตัมดอทบนเส้นลายตารางที่ขนานกับทิศ [110] และสำหรับรูปที่ 4.5 (e) ซึ่งแสดงตำแหน่งของควอนตัมดอทที่มีความสูงมากกว่า 3.0 nm มีส่วนที่เพิ่มมาจากรูปที่ 4.5 (d) ($3.0 < h < 4.0$ nm) อยู่ในบริเวณพื้นเรียบที่ไม่มีลายตาราง

ข้อมูลข้างต้นเป็นตัวอย่างที่สำคัญที่ทำให้สันนิษฐานได้ว่าการเกิดควอนตัมดอทบนพื้นผิวลายตารางมีวิวัฒนาการการเกิดจากบริเวณจุดตัดของลายตาราง ไปสู่เส้นลายตารางที่ขนานกับทิศทาง [1-10] จากนั้นไปสู่เส้นลายตารางที่ขนานกับทิศทาง [110] และสุดท้ายไปสู่บริเวณพื้นเรียบที่ไม่มีลายตาราง ทั้งหมดนี้เป็นลักษณะร่วมของชั้นงานทุกชั้นงานที่มี InAs ควอนตัมดอทบนพื้นผิว $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} / \text{GaAs}$ เมื่อ X มีค่ามากพอและชั้น $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ สูงพอที่จะทำให้เกิดลายตารางแต่ไม่สูงเกินไปกว่าค่า h_p (คือ $h_c < h < h_p$)

ข้อมูลข้างต้นบ่งชี้ว่าเส้นแนวขนานที่เกิดจาก MD ในทิศ [1-10] และ [110] มีความแตกต่างกัน จึงจำเป็นต้องทำการศึกษารวมชาติของพื้นผิวลายตารางในทิศทั้งสองโดยละเอียด จึงได้ทำการปลูกชั้นงาน u0811 ซึ่งเป็นลายตารางเปล่าๆ ของ $\text{In}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}$ หนา 50 nm ปลูกที่ 500°C บนแผ่นฐาน GaAs (001) ดังรูปที่ 4.6 (a) โดยผิวหน้าของชั้นงานถูกแสดงในรูปที่ 4.6 (b) และ Line scan ของผิวหน้าในทิศทาง [1-10] และ [110] ถูกแสดงในรูปที่ 4.6 (c) และ (d) ตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้ว่าความสูงของลายตารางแนวที่ขนานกับทิศ [1-10] จะสูงกว่าแนวที่ขนานกับทิศ [110] ซึ่งไม่เหมือนกับลายตารางจากคู่สารประกอบหมู่ IV-IV ด้วยกันเอง เช่น SiGe / Si (100) [25] ซึ่งมีความสูงเท่ากัน ความแตกต่างนี้มาจากธาตุที่เป็น Core ที่แตกต่างกันตั้งแต่แรกของแผ่นฐาน GaAs (001) [12] ทำให้ส่งผลมาถึงเวลาปลูกชั้นลายตาราง โดยแสดงออกมาที่ผิวหน้าของชั้นลายตาราง

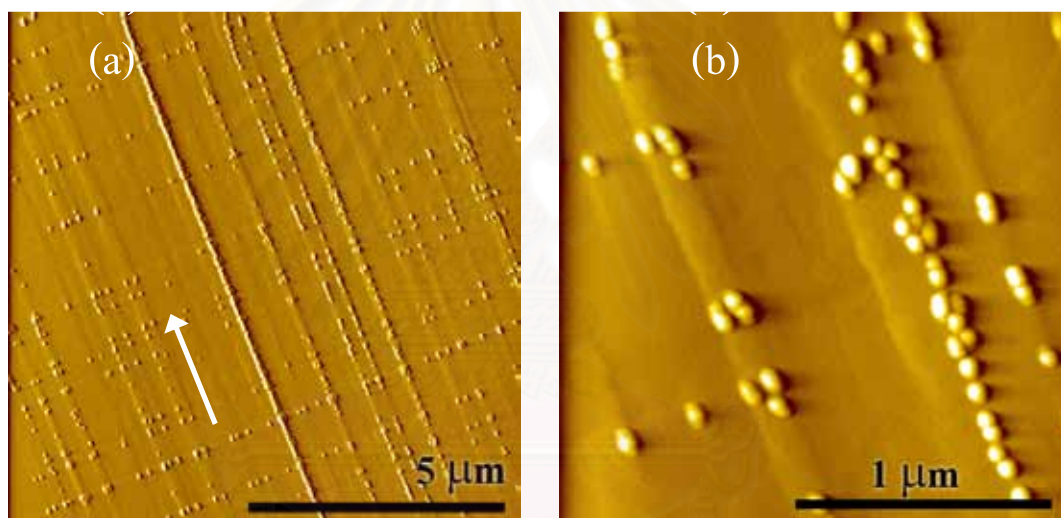


รูปที่ 4.6 ชั้นงาน u0811 : ชั้นลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ เปล่าๆบนแผ่นฐาน GaAs (a) โครงสร้าง ชั้นงาน (b) ผิวหน้าชั้นงานที่วัดจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ ทิศทางตามลูกศร (c) Line scan ผิวหน้าขนานกับทิศ [110] เพื่อวัดความสูงของเส้นลายตารางทิศ [1-10] (d) Line scan ผิวหน้าขนานกับทิศ [1-10] เพื่อวัดความสูงเส้นลายตารางทิศ [110]

เมื่อทราบเป็นที่แน่ชัดแล้วว่าเส้นลายตารางในแนวที่ขนานกับทิศ [1-10] และ [110] มีความไม่สมมาตรกันทั้งด้านความสูงและจำนวนเส้นต่อระยะทาง (จากรูปที่ 4.6) และจากข้อสันนิษฐาน วิวัฒนาการการเกิดควอนตัมดอตบนลายตาราง (จากรูปที่ 4.5) ทำให้ต้องทำการทดลองเพิ่มเติม โดยทำการปลูก InAs ควอนตัมดอตบนแผ่นฐานลายตารางแต่ต้องทำการหยุดการปลูกก่อนที่ควอนตัมดอตจะปกคลุมทุกบริเวณ ซึ่งสามารถทำได้สองวิธีคือ 1) ทำการปลูกชั้นควอนตัมดอตให้มีความหนาสม่ำเสมอและหยุดการปลูกก่อน RHEED pattern จะปรากฏเป็น Spotty pattern อย่างชัดเจน และ 2) ทำการปลูกควอนตัมดอตให้มีความไม่สม่ำเสมอบนชั้นงานเดียว (ด้วยการหยุดมอเตอร์จับ Manipulator ที่ใช้ในการหมุนแผ่นชั้นงาน เฉพาะในระหว่างการปลูกชั้นควอนตัมดอต) และหยุดการปลูกทันทีที่ RHEED pattern เปลี่ยนจาก Streaky pattern เป็น Spotty pattern ซึ่งทั้งสองวิธีข้างต้นมีรายละเอียดการดำเนินการและผลการทดลองดังนี้

4.2.1 วิธีที่ 1 (ชิ้นงาน u0817 และ u0815)

รูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าหากปลูกชั้น InAs ควอนตัมดอตที่ความหนา 0.8 ML จะมีความหนาแน่นของควอนตัมดอตไปทั่วบริเวณทำให้การศึกษาวิวัฒนาการการเกิดควอนตัมดอตสามารถกระทำได้โดยการสันนิษฐานจากเทคนิค Image thresholding เท่านั้น หากต้องการพิสูจน์ข้อสันนิษฐานดังกล่าวจริง จะต้องทำการปลูกควอนตัมดอตที่ความหนาน้อยกว่า 0.8 ML จึงได้ทดลองปลูกชิ้นงานที่มีการลดปริมาณ InAs ในชั้นควอนตัมดอต โดยปรับลดปริมาณจาก 0.8 ML ไปที่ประมาณ 0.76 ML โดยเป็นชิ้นงาน u0817 (InAs ควอนตัมดอต 0.76 ML ที่ 500°C บนชั้นลายตาราง $\text{In}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}$ หนา 50 nm ใช้แผ่นฐาน GaAs (001)) ซึ่งมีลักษณะผิวหน้าดังแสดงในภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมในรูปที่ 4.7

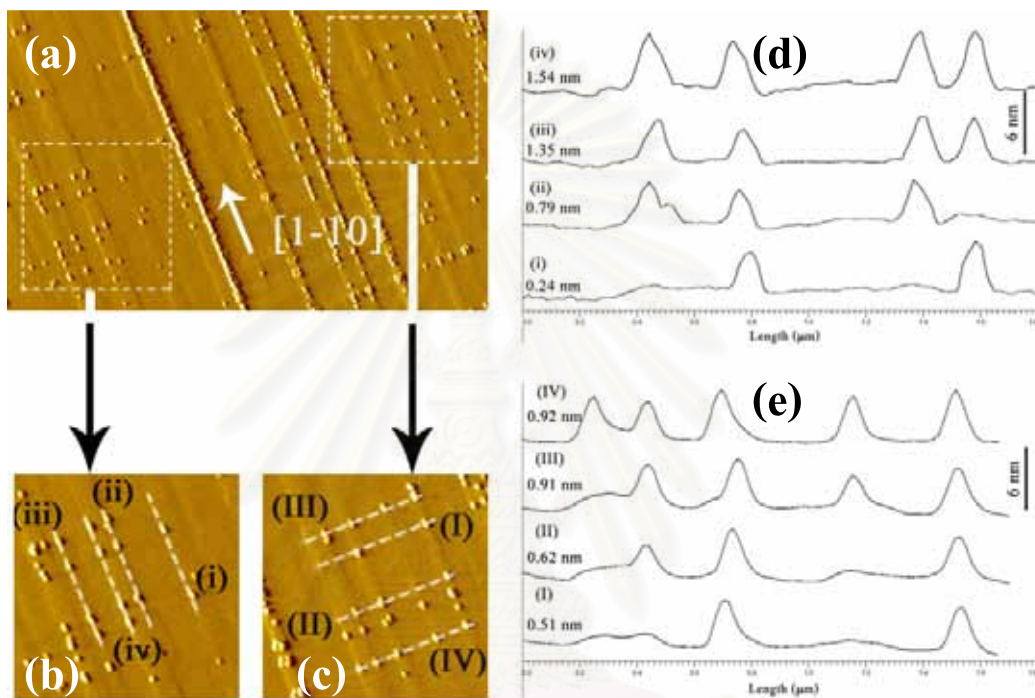


รูปที่ 4.7 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมแสดงผิวหน้าของชิ้นงาน u0817 ขนาด

(a) $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ และ (b) $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ โดยลูกศรแสดงทิศทาง [1-10]

เมื่อเปรียบเทียบผิวหน้าชิ้นงาน u0702 (InAs 0.8 ML) กับ u0817 (InAs 0.76 ML) ในรูปที่ 4.5 (a) กับ รูปที่ 4.7 (b) ตามลำดับพบว่าชิ้นงาน u0817 (InAs ปริมาณ 0.76 ML) จะเป็นสถานะที่อยู่ระหว่างรูปที่ 4.5 (c) และ (d) เนื่องจากบนพื้นเรียบไม่มีควอนตัมดอตเลย และมีควอนตัมดอตเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากบนเส้นลายตารางที่ขนานกับทิศ [1-10] แต่เกิดขึ้นเป็นจำนวนน้อยในแนวที่ขนานกับทิศ [110] การที่กลุ่มของควอนตัมดอตที่ก่อตัวบนเส้นลายตารางที่ขนานกับทิศ [1-10] มีความหนาแน่นมากกว่าที่ก่อตัวบนเส้นลายตารางที่ขนานกับทิศ [110] อย่างชัดเจน และกลุ่มควอนตัมดอตเกือบทั้งหมดที่ก่อตัวบนเส้นลายตารางที่ขนานกับทิศ [110] นั้นเป็นควอนตัมดอตที่

ก่อนตัวบนเส้นลายตารางที่ขนานกับทิศ [1-10] ด้วย เป็นหลักฐานสำคัญที่ทำให้สรุปได้ว่าควอนตัมดอทที่ก่อตัวบนเส้นลายตารางที่ขนานกับทิศ [1-10] เกิดขึ้นก่อนควอนตัมดอทที่ก่อตัวบนเส้นลายตารางที่ขนานกับทิศ [110] ตามที่สันนิษฐานไว้ อย่างไรก็ตามเพื่อให้ได้ข้อสรุปการเกิดก่อน-หลังของควอนตัมดอทจึงต้องทำการวิเคราะห์ความสูงของควอนตัมดอทบนเส้นลายตารางทั้งสองทิศทางโดยละเอียด



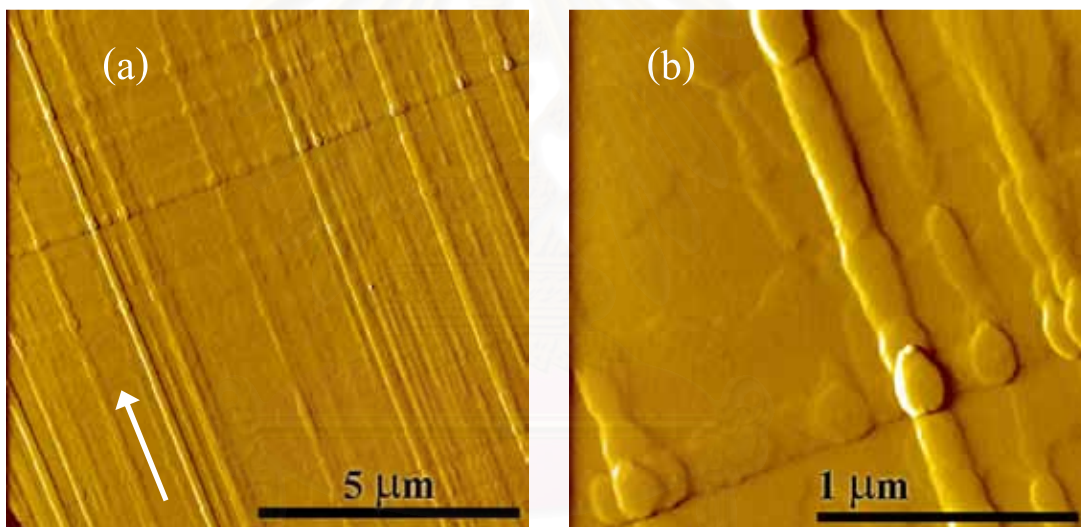
รูปที่ 4.8 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมแสดง (a) ผิวหน้าชิ้นงาน u0817 กับรูปที่ 4.7 ขนาด $8 \times 5 \mu\text{m}^2$ และ (b), (c) ส่วนขยายขนาด $2.5 \times 2.5 \mu\text{m}^2$ ของบริเวณที่ถูกรอบเส้นประใน (a) โดย Line scans ในทิศทางขนานกับ [1-10] และ [110] ในรูป (b) และ (c) ถูกแสดงในรูป (d) และ (e) ตามลำดับ

เมื่อทำ Line scan ผิวหน้าของชิ้นงาน u0817 ดังรายละเอียดในรูปที่ 4.8 (b) และ (c) ได้ผลออกมาดังรูปที่ 4.8 (d) และ (e) ตามลำดับพบว่าเมื่อพิจารณารูปที่ 4.8 (b) และ (d) ในแถว (i) มีควอนตัมดอท 2 ตำแหน่ง และมีความสูงของลายตารางที่ควอนตัมดอทก่อตัวอยู่ข้างบน 0.24 nm (วัดเทียบขึ้นมาจากบริเวณพื้นเรียบ), ในแถว (ii) มีควอนตัมดอท 3 ตำแหน่ง และมีความสูงของลายตารางที่ควอนตัมดอทก่อตัวอยู่ข้างบน 0.79 nm, ในแถว (iii) มีควอนตัมดอท 4 ตำแหน่ง และมีความ

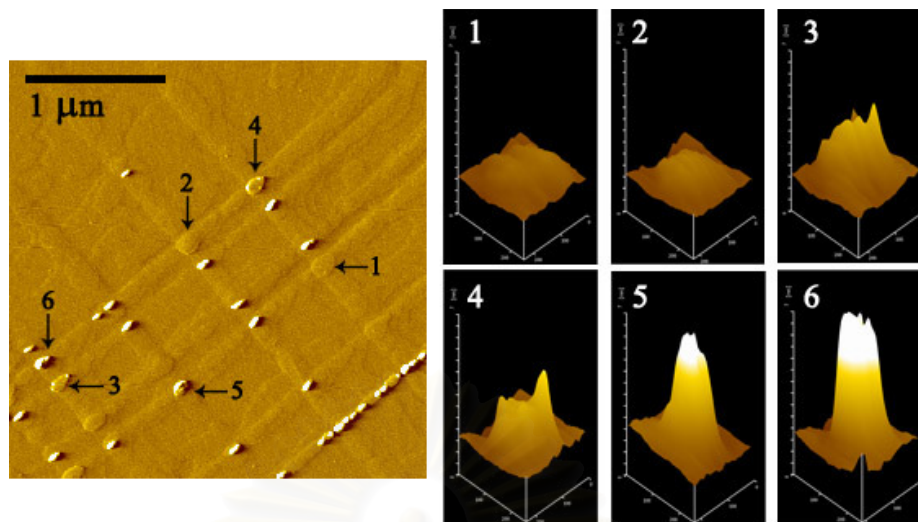
สูงของลายตารางที่ควอนตัมคอตก่อตัวอยู่ข้างบน 1.35 nm, ในแถว (iv) มีควอนตัมคอต 4 ตำแหน่ง และมีความสูงของลายตารางที่ควอนตัมคอตก่อตัวอยู่ข้างบน 1.54 nm

แม้ว่าที่แถว (iii) และ (iv) จะมีจำนวนควอนตัมคอตเท่ากัน แต่ความสูงของควอนตัมคอตบนแถว (iv) มีความสูงมากกว่าแถว (iii) ซึ่งบ่งชี้ได้ว่าควอนตัมคอตบนแถว (iv) นั้นก่อตัวขึ้นมา ก่อน

ผลการวิเคราะห์ Line scan ในแนวทิศ [110] จากรูปที่ 4.8 (c) และ (e) พบว่าให้ผลในลักษณะเดียวกันกับแนวทิศ [1-10] นั่นคือที่ความสูงของลายตาราง 0.51 nm ของแถว (I), 0.62 nm ของแถว (II), 0.91 nm ของแถว (III) และ 0.92 nm ของแถว (IV) มีจำนวนควอนตัมคอตอยู่ 2, 3, 4 และ 5 คอตตามลำดับ [16]



รูปที่ 4.9 สภาพของผิวหน้าของชิ้นงานที่ลดปริมาณ InAs ลงไปเป็นก่อนที่จะก่อตัวเป็นควอนตัมคอตจาก 0.8 ML เหลือ 0.72 ML วัดจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมที่ (a) $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ และ (b) $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ ถูกสรแสดงทิศ [1-10]



รูปที่ 4.10 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมขนาด $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ ของชั้นงาน 27n (InAs ควอนตัมดอตที่มีความหนาต่ำกว่า 0.8 ML บน $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ หน้า 50 nm) และภาพแสดงวิวัฒนาการการเกิดควอนตัมดอตที่จุดของตัดลายตาราง จากทั้ง 6 จุดที่ทำเครื่องหมายไว้

ข้อมูลข้างต้นที่ได้จากชั้นงาน u0817 เป็นการยืนยันข้อสันนิษฐานของวิวัฒนาการระหว่างรูปที่ 4.5 (c) และ (d) ซึ่งควอนตัมดอตได้เกิดบนเส้นแนวนานในทั้งสองทิศแล้วเท่านั้น จึงยังไม่สามารถพิสูจน์เงื่อนไขการเกิดควอนตัมดอตตั้งแต่ต้นคือในรูปที่ 4.5 (b) ได้ เพื่อให้ข้อสรุปวิวัฒนาการของควอนตัมดอตบนลายตารางเป็นไปอย่างสมบูรณ์ จึงได้ทำการปลูกชั้นงานเพิ่มเติมคือ u0815 โดยทำการปลูกชั้น InAs ควอนตัมดอตที่มีความหนาน้อยกว่าชั้นงาน u0817 ลงไปอีกคือปลูกเพียง 0.72 ML เท่านั้นและเนื่องจากที่ความหนาในระดับนี้ยังต่ำกว่าความหนาวิกฤติของการเกิดควอนตัมดอตจึงต้องหยุดปลูกโดยการจับเวลา (ไม่สามารถสังเกตจาก RHEED ดังเช่นชั้นงาน u0702 ได้) โดยขณะที่ทำการปลูกนั้น RHEED pattern ยังไม่ทันปรากฏเป็น Spotty pattern ก็ต้องหยุดการปลูกชั้นควอนตัมดอตก่อน หาก RHEED pattern ยังไม่เป็น Spotty pattern หมายความว่าควอนตัมดอตแบบ SK นี้ยังไม่ก่อตัวเป็นควอนตัมดอตสมบูรณ์ ผลจากการหยุดเวลาที่ความหนาของชั้น InAs เทียบเท่า 0.72 ML ทำให้ได้ผิวหน้าชั้นงานดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งพบว่าผิวหน้าชั้นงานนี้อยู่ในสถานะที่กำลังจะเกิดการก่อตัวเป็นควอนตัมดอต จุดที่มีลักษณะที่กำลังจะเป็นควอนตัมดอตและมีความสูงมากที่สุด คือจุดที่เป็นจุดตัดของเส้นลายตารางที่ขนานกับทิศ [1-10] และ [110] ส่วนบริเวณอื่น ๆ นั้น ไม่มีบริเวณใดเลยที่มีลักษณะเข้าใกล้ลักษณะของควอนตัมดอต หากพิจารณาเส้นลายตารางทั้งสองแนว พบว่าแนวที่ขนานกับทิศ [1-10] มีแนวโน้มจะเกิดการก่อตัวของควอนตัมดอตก่อนแนวที่ขนานกับทิศ [110] และเมื่อวิเคราะห์บริเวณที่เป็นจุดตัดหลาย ๆ บริเวณ

ที่มีความสูงแตกต่างกันเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งเป็นของชิ้นงาน 27n [41]วิเคราะห์จากภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมโดยผู้เขียน จะพบว่าการเกิดควอนตัมดอตจะเกิดที่จุดตัดที่มีความสูงมากกว่าก่อนจุดตัดที่มีความสูงน้อยกว่า (เรียงต่ำไปสูงจาก 1 ถึง 6) ซึ่งเป็นข้อมูลที่สามารถยืนยันข้อสันนิษฐานวิวัฒนาการดังที่ปรากฏในรูปที่ 4.5 (b) ได้อย่างชัดเจน

จากที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นนั้นทั้งชิ้นงาน u0815 และ u0817 สามารถยืนยันวิวัฒนาการการเกิดควอนตัมดอตบนลายตารางตามข้อสันนิษฐานในรูปที่ 4.5 ได้จริง อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวมีข้อด้อยคือในหนึ่งชิ้นงานสามารถพิสูจน์สถานะและวิวัฒนาการการเกิดควอนตัมดอตบนลายตารางเพียงหนึ่งสถานะจากทั้งหมดสี่สถานะ (ดังรูปที่ 4.5 (b) ถึง (e)) เท่านั้น เพื่อให้สามารถศึกษาวิวัฒนาการของสถานะทั้งสี่ได้อย่างต่อเนื่องในชิ้นงานเดียวกัน จึงต้องทำการทดลองเพิ่มเติมโดยใช้วิธีที่ 2 ดังรายละเอียดในลำดับต่อไป

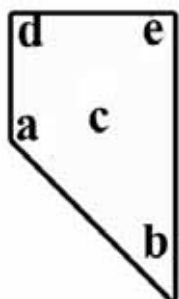
4.2.2 วิธีที่ 2 (ชิ้นงาน u0840)

การปลูกชิ้นงานในหัวข้อนี้ (u0840) จะใช้วิธีการหยุดมอเตอร์ในขณะที่ปลูก (Motor-stop growth) โดยปกติแล้วลำโมเลกุลที่ออกมาจากเซลล์สารถูกปล่อยออกมาโดนผิวหน้าอย่างไม่สม่ำเสมอทั้งแผ่นชิ้นงาน [29] เพื่อให้การปลูกมีความสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นฐานจึงต้องมีมอเตอร์มาหมุนแทนชิ้นงานเพื่อให้ได้รับ Flux อย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นหากหยุดมอเตอร์ขณะปล่อยลำโมเลกุลสารใดๆ จะทำให้ชิ้นงานที่หยุดมอเตอร์ระหว่างปลูกมีอัตราปลูกไม่สม่ำเสมอทั้งชิ้นงาน เมื่อนำวิธีนี้มาใช้กับการปรับปริมาณ InAs ในชั้นควอนตัมดอตก็มีข้อดีคือสามารถปลูกชิ้นงานเดี่ยวแต่ศึกษาผลของปริมาณ InAs ได้หลายค่าจากตำแหน่งต่างๆกันบนชิ้นงาน เพราะแต่ละตำแหน่งได้รับอัตราการปลูกไม่เท่ากันในเวลาเท่ากัน ทำให้ปริมาณ InAs ไม่เท่ากันด้วย ข้อเสียคือการจะหาปริมาณที่แน่นอนของแต่ละตำแหน่งทำได้ยาก เนื่องจากมีโอกาสผิดพลาดจากความไม่แน่นอนของจุดศูนย์กลางของลำโมเลกุลแต่ละลำและความไม่เป็นอุดมคติจากอีกหลายตัวแปร

ชิ้นงาน u0840 คือชิ้นงานที่หยุดมอเตอร์ในขณะที่ปลูกชั้นควอนตัมดอตในขณะที่ชั้นอื่นๆ ยังคงหมุนมอเตอร์ตามปกติ เพราะว่าการแปรค่าเฉพาะปริมาณ InAs ในชั้นควอนตัมดอตเท่านั้น โครงสร้างชั้นนี้ยังคงคล้ายกับชั้นอื่นๆที่ผ่านมา คือเป็นควอนตัมดอตทับบนชั้นลายตาราง $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ หนา 50 nm บนแผ่นฐาน GaAs (001) ซึ่งในระหว่างปลูกชั้น InAs ควอนตัมดอตได้ทำการหยุดมอเตอร์และหยุดการปลูกเมื่อ RHEED pattern เปลี่ยนจาก Streaky เป็น Spotty pattern

ผลจากการปลูกด้วยวิธีนี้ทำให้ผิวหน้าชิ้นงานอาจมีหรือไม่มีควอนตัมดอตก็ได้ ขึ้นอยู่กับตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งผลที่ได้ก็สนับสนุนข้อสรุปที่ได้จากวิธีที่ 1 พิจารณาจากจุด e ซึ่งเป็นจุดที่ได้รับ Flux สูงที่สุด หมายถึงมีปริมาณ InAs ในชั้นควอนตัมดอตมากที่สุด จึงมีควอนตัมดอตบนพื้นเรียบและบนเส้น ในขณะที่จุด d มีปริมาณ InAs น้อยกว่าจุด e อยู่ 1 ชั้น มีเฉพาะควอนตัมดอตบนเส้น ซึ่งบนเส้นลายตารางที่ขนานกับทิศ [1-10] มีควอนตัมดอตหนาแน่นมากกว่าบนเส้นลายตารางที่ขนานกับทิศ [110] สำหรับจุด c ซึ่งมีปริมาณ InAs น้อยกว่าที่จุด d อีก 1 ชั้น พบว่าควอนตัมดอตบนจุดตัดของเส้นลายตารางทั้งสองแนวมีขนาดใหญ่กว่าบนแต่ละเส้น ในขณะที่จุด b พบจุดที่กำลังจะก่อตัวเป็นควอนตัมดอตบนจุดตัดเส้นลายตารางทั้งสองแนว และได้ข้อมูลเพิ่มเติมว่าในตำแหน่งสิ้นสุดของเส้นลายตารางมีลักษณะคล้ายควอนตัมดอต และจุดที่ได้รับ InAs น้อยที่สุดในชิ้นงานคือจุด a ซึ่งที่จุดนี้ แม้แต่ที่จุดตัดของเส้นลายตารางทั้งสองแนว ก็ไม่มีลักษณะที่ควอนตัมดอตกำลังก่อตัวอยู่เลย อย่างไรก็ตาม พบว่าจุดที่ TD ที่เป็นส่วนปลายของ MD ซึ่งมาปรากฏที่ผิวหน้ากลับมีลักษณะที่คล้ายกับที่กำลังจะก่อตัวเป็นควอนตัมดอต คล้ายกับผลที่ได้จากจุด b จึงสรุปได้ว่าควอนตัมดอตจะก่อตัวที่ TD ก่อน หลังจากนั้นจึงก่อตัวที่จุดตัดของเส้นลายตารางทั้งสองแนว

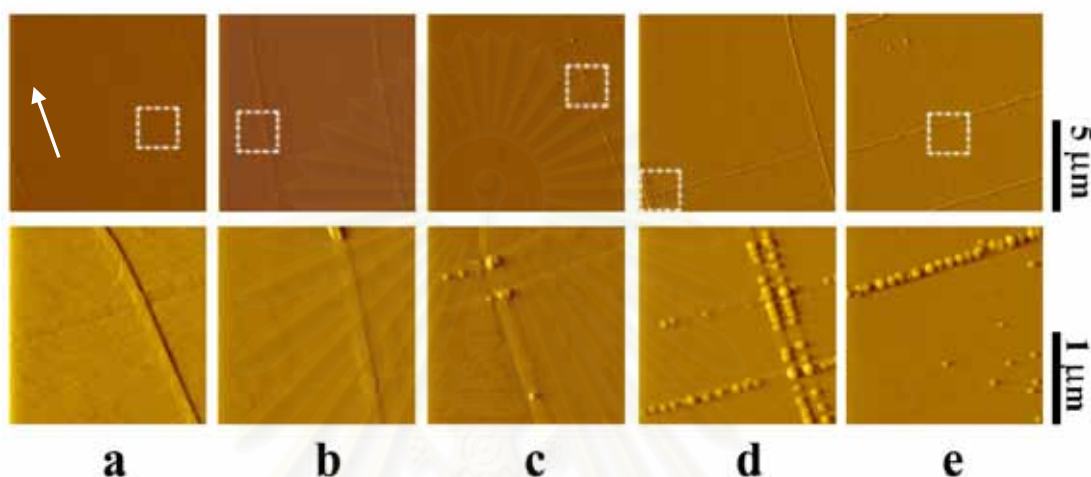
จากผลการทดลองทั้งสองวิธีในหัวข้อ 4.2.1 และ 4.2.2 ข้างต้น ทำให้ได้ข้อสรุปชัดเจนถึงวิวัฒนาการการก่อตัวของควอนตัมดอตบนพื้นผิวลายตารางว่า ควอนตัมดอตจะก่อตัวที่ TD ก่อนตามด้วยที่จุดตัดของเส้นลายตารางทั้งสองแนว ตามด้วยบนเส้นลายตารางที่ขนานกับทิศ [1-10] ตามด้วยบนเส้นลายตารางที่ขนานกับทิศ [110] และบนพื้นเรียบตามลำดับ สำหรับเหตุผลของการเกิดวิวัฒนาการเช่นนี้มาจากสาเหตุหลักคือ Strain field ที่ไม่เท่ากันของแต่ละตำแหน่งบนพื้นผิวลายตารางดังรายละเอียดในหัวข้อถัดไป



InAs layer.

ปริมาณของ InAs ที่ตำแหน่ง

$$a < b < c < d < e$$

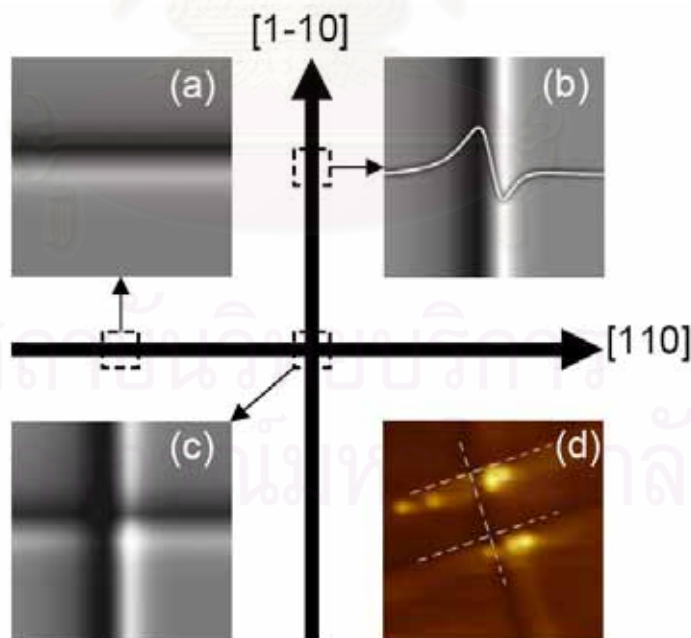


รูปที่ 4.11 ผิวหน้าชิ้นงาน u0840 ที่ตำแหน่งต่าง ๆ กันแสดงถึง InAs ควอนตัมดอทบนชั้นลายตาราง ที่ปริมาณ InAs ต่าง ๆ กัน ลูกศรแสดงทิศ $[1-10]$ ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมแฉกบนเป็น ภาพขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ และแฉกต่างมีขนาด $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ เป็นส่วนขยายจากบริเวณที่ติกรอบในภาพบน

4.3 สาเหตุการเกิดควอนตัมดอทบนพื้นผิวลายตาราง

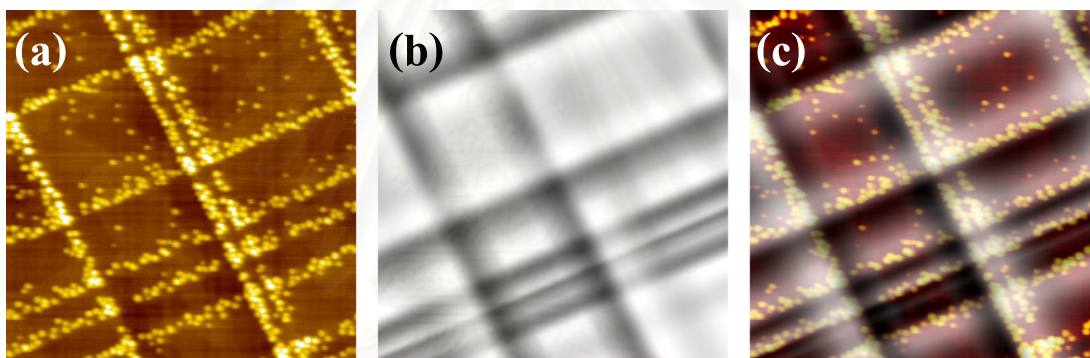
แบบจำลองที่นำมาอธิบายวิวัฒนาการการเกิดควอนตัมดอทบนลายตารางนั้นอาศัยหลักการของการกระจายตัวของความเค้นที่ผิวหน้าของฟิล์ม (Stress distribution, σ_{xx}^{MD}) ของ Surface step ที่ผิวหน้าที่เกิดจาก MD [13,42] ทั้งของลายตารางแนวทิศ $[1-10]$ และ $[110]$ ดังรูปที่ 4.12 ซึ่งแสดงแบบจำลองการกระจายตัวของความเค้นที่ผิวหน้าของฟิล์มแบบสองมิติ (รูปที่ 4.12 (c)) จากการซ้อนทับ (Superimpose) ของการกระจายตัวในหนึ่งมิติของแนว $[110]$ (รูปที่ 4.12 (a)) และ $[1-10]$ (รูปที่ 4.12 (b)) ซึ่งสื่อถึงด้วยระดับความเข้มของสีใน (a), (b) และ (c) โดยสีดำหมายถึงบริเวณที่มีความเค้นมาก สีขาวหมายถึงบริเวณที่มีความเค้นน้อย จะเห็นว่าความเค้นจากทั้งสองแนวมีลักษณะคล้ายกัน แต่การกระจายตัวและปริมาณความเค้นที่ต่างกันจากเส้นลายตารางชนิด α -type และ β -type จากเส้นแนว $[1-10]$ และ $[110]$ ตามลำดับที่มีคุณสมบัติต่างกัน [3,43] ในแบบจำลองนี้ให้

เส้นลายตารางในแนวขนานกับทิศ [1-10] มีลักษณะการกระจายตัวของความเค้นที่ผิวหน้าฟิล์มที่เหมาะสมแก่การก่อตัวของ InAs ควอนตัมดอทมากกว่าแนว [110] สังเกตได้จากสี โดยที่ InAs มีโอกาสก่อตัวบนสีอ่อนมากกว่าสีเข้ม (หรือมีโอกาสก่อตัว ณ บริเวณที่มีสีอ่อนกว่าก่อนหากทำการปลูกพร้อมกัน) ดังนั้นเมื่อพิจารณาว่าความเค้นสามารถรวมกันแบบเชิงเส้นได้ จึงสามารถทำการซ้อนทับภาพ Grayscale ในรูปที่ 4.12 (a) และ (b) โดยตรงให้ผลดังในรูปที่ 4.12 (c) โดยส่วนที่เป็นสีอ่อนที่สุดจึงเกิด ณ จุดที่แถบสีอ่อนของทั้งสองแนวพาดผ่านกัน ซึ่งบริเวณที่สีอ่อนที่สุดในรูปที่ 4.12 (c) จะอ่อนมากกว่าบริเวณแถบสีอ่อนจากแต่ละแนวในรูปที่ 4.12 (a) และ (b) ด้วย เมื่อพิจารณาความเค้นของพื้นผิวซึ่งสะท้อนให้เห็นได้จากความเข้มของระดับ Grayscale ในรูปที่ 4.12 (c) แล้วพบว่า บริเวณที่ความเค้นอัดต่ำที่สุด (สีอ่อน) คือจุดตัดของแถบความเค้นอัดต่ำที่สุดจากทั้งสองแนว ส่วนที่มีความเค้นอัดสูงขึ้นมาอีกระดับคือบริเวณที่ความเค้นอัดต่ำที่สุดบนแนวเส้นที่ขนานกับทิศ [1-10] ความเค้นอัดมากขึ้นในระดับต่อมาก็คือบริเวณที่ความเค้นอัดต่ำที่สุดบนแนวเส้นที่ขนานกับทิศ [110] ส่วนที่ความเค้นอัดมากจนเป็นสีเทาเกือบบนพื้นเรียบ ซึ่งแบบจำลองนี้อธิบายได้ตรงตามผลการทดลองที่ทำมาข้างต้น เนื่องจากลำดับการเกิดควอนตัมดอทของการทดลองเรียงจากก่อนไปหลัง สอดคล้องกับแบบจำลองที่เรียงความเค้นอัดจากน้อยไปมาก



รูปที่ 4.12 ภาพแสดงแบบจำลองของการกระจายตัวของความเค้นบนผิวหน้าสองมิติของชั้นลายตาราง (a) ของแนว [110] (b) ของแนว [1-10] และ (c) ของจุดตัดของทั้งสองแนว (d) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ขนาด $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ แสดงผิวหน้าและเส้นประหมายถึงบริเวณที่แบบจำลองเป็นสีเข้มที่สุด

อย่างไรก็ตามจากแบบจำลองพบว่ายังมีบริเวณที่ควอนตัมคอตมีโอกาสก่อตัวน้อยกว่าหรือก่อตัวขึ้นช้ากว่าบริเวณพื้นเรียบ (สี่เหลี่ยม) คือบริเวณอีกด้านหนึ่งของลายตาราง (สี่เหลี่ยมที่มืด) ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (d) บริเวณที่เป็นเส้นประคือบริเวณที่ควอนตัมคอตมีโอกาสก่อตัวขึ้นน้อยที่สุดหรืออีกนัยหนึ่งคือหากทำการปลูกควอนตัมคอตพร้อมกันทั่วทั้งผิวหน้า บริเวณดังกล่าวจะเกิดควอนตัมคอตเป็นบริเวณสุดท้าย ข้อเสนอพื้นฐานนี้สามารถยืนยันได้จากผิวหน้าของชิ้นงาน u0702 ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (a) เมื่อพิจารณาพร้อมกับแบบจำลองแบบเดียวกับรูปที่ 4.12 โดยการทับซ้อนกันเพื่อให้เห็นชัดเจนดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.13 (c) บริเวณสีอ่อนจะมีควอนตัมคอตก่อตัวอยู่และจะลดหลั่นกันไปตามสีที่เข้มขึ้น และบริเวณที่เป็นสีเข้มที่สุดจะไม่มีควอนตัมคอตอยู่เลย ซึ่งสรุปได้ว่าแบบจำลองการกระจายตัวของความเค้นที่ผิวหน้าฟิล์มสามารถใช้พิจารณาวิวัฒนาการการเกิดควอนตัมคอตบนลายตารางได้จริง



รูปที่ 4.13 (a) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมขนาด $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ แสดงผิวหน้าชิ้นงาน u0702 (b) การกระจายตัวของความเค้นอัดที่ผิวหน้าฟิล์มจาก Surface step แต่ละเส้นของ u0702 ทับซ้อนกัน ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับที่ใช้ในรูปที่ 4.12 โดยสีอ่อนหมายถึงความเค้นอัดต่ำ สีเข้มหมายถึงความเค้นอัดสูง (c) นำ b ไปซ้อนทับบน a แสดงถึงโอกาสที่แต่ละบริเวณจะมีการก่อตัวของควอนตัมคอต

แบบจำลองในรูปที่ 4.12 (a), (b) และ (c) สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีของความเค้นอัด (Compressive stress) ความเค้นยืด (Tensile stress) และการอพยพของอะตอมที่ผิวหน้า (Surface atom migration) เมื่อเริ่มแรกการปลูกชั้นลายตาราง InGaAs ถูกปลูกขึ้นบน GaAs ระนาบ (001) ชั้นอะตอมชั้นแรกของ InGaAs บน GaAs ก่อตัวอย่างบีบอัดกันอยู่ โดยก่อตัวด้วยค่าคงที่ผลึกแนวขนานกับผิวหน้า (a_{\parallel}) ที่เท่ากับกับ GaAs และค่าคงที่ผลึกแนวตั้งฉากกับผิวหน้า (a_{\perp}) จะสูงกว่าของ InGaAs ทำให้เกิดความเครียดสะสม เมื่อก่อตัวไปหนาขึ้นเรื่อยๆจนถึงค่าความหนาวิกฤติ (h_c)

ความเครียดสะสมถูกผ่อนคลายลง (Strain relaxation) ด้วยการเกิดของ MD และ TD แม้ว่าความเครียดจะถูกปลดโดย Dislocation ที่เกิดขึ้นดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.2 แต่ความความเค้นตามแนว MD นั้นสูงมาก [13] โดยด้านหนึ่งของ MD จะเป็นความเค้นอัด อีกด้านจะเป็นความเค้นยึด เมื่อความเค้นทั้งสองชนิดดังกล่าวเกิดขึ้นในสองฝั่งของ MD ทำให้เกิดการอพยพของอะตอม In เมื่อการปลูกชั้น InGaAs ดำเนินต่อไป การอพยพของอะตอม In จะเกิดขึ้นในลักษณะที่ทำให้พลังงานรวมของระบบต่ำที่สุด ดังนั้นอะตอม In จึงพยายามอพยพไปด้านที่มีการเกาะกันของ In ให้มีความเครียดน้อยที่สุด ก็คือด้านที่มีค่าคงที่ผลึกใหญ่ (เนื่องจาก InAs มีค่าคงที่ผลึกที่สูงกว่า GaAs) หรือด้านที่เป็นความเค้นยึดนั่นเอง จึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่สนับสนุนว่า ลายตารางที่ผิวหน้าจึงมีด้านหนึ่งที่ InAs ควอนตัมดอตสามารถก่อตัวได้เร็วกว่าอีกด้านหนึ่ง และเร็วกว่าบริเวณอื่น ซึ่งเป็นที่มาของรูปแบบความเค้นที่ผิว (σ_{xx}) ที่สัมพันธ์กับระยะบนระนาบผิวหน้าดังแสดงในรูปที่ 4.12 (b)

ควอนตัมดอต InAs มีแถบช่องว่างพลังงานแบบ Direct ดังนั้นหากมีการกระตุ้นพาหะภายในควอนตัมดอตให้มีพลังงานมากขึ้นจนเปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้น (Ground state) ไปอยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited state) ได้ เมื่อพาหะคายพลังงานออกมาเพื่อกลับสู่สถานะพื้น พลังงานที่ออกมาจะอยู่ในรูปโฟตอน ซึ่งการเปล่งแสงเมื่อมีการกระตุ้นพาหะนั้นสามารถวัดได้ด้วยระบบวัดการเปล่งแสงโฟโตลูมิเนสเซนส์ (Photoluminescence) ซึ่งได้กล่าวถึงในหัวข้อ 3.2.2 การเปล่งแสงของควอนตัมดอตที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนกว่าปกติ เช่นควอนตัมดอตโมเลกุล จะให้ผลการเปล่งแสงออกมามีค่ายอดหลายค่าและยังแปรตามพลังงานที่ใช้กระตุ้นด้วย (Power dependence) [2,34] การพิจารณาหาต้นตอของค่ายอดแต่ละค่าและระดับพลังงานของสถานะภายในโครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุลจึงต้องอาศัยการจำลองโครงสร้างเสมือนจริงด้วยคอมพิวเตอร์ช่วย ดังที่จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

4.4 คุณสมบัติเชิงแสงของควอนตัมดอตโมเลกุล

ควอนตัมดอตโมเลกุล (Quantum Dot Molecules: QDMs) เป็นผลมาจากความพยายามในการปลูกควอนตัมดอตความหนาแน่นสูง (High density) ซึ่งปลูกได้ด้วยวิธีการกลบทับแบบบาง-ปลูกทับซ้ำ (Thin-capped-and-regrowth) บนแผ่นฐานเรียบคือ GaAs (100) [34] แต่ก็ยังสามารถปลูกบนแผ่นฐานลายตารางได้ด้วย ควอนตัมดอตโมเลกุลมีลักษณะเฉพาะของการเรียงตัว กล่าวคือควอนตัมดอตโมเลกุลประกอบด้วยควอนตัมดอตสองขนาด คือขนาดใหญ่ที่เป็นศูนย์กลาง (Center

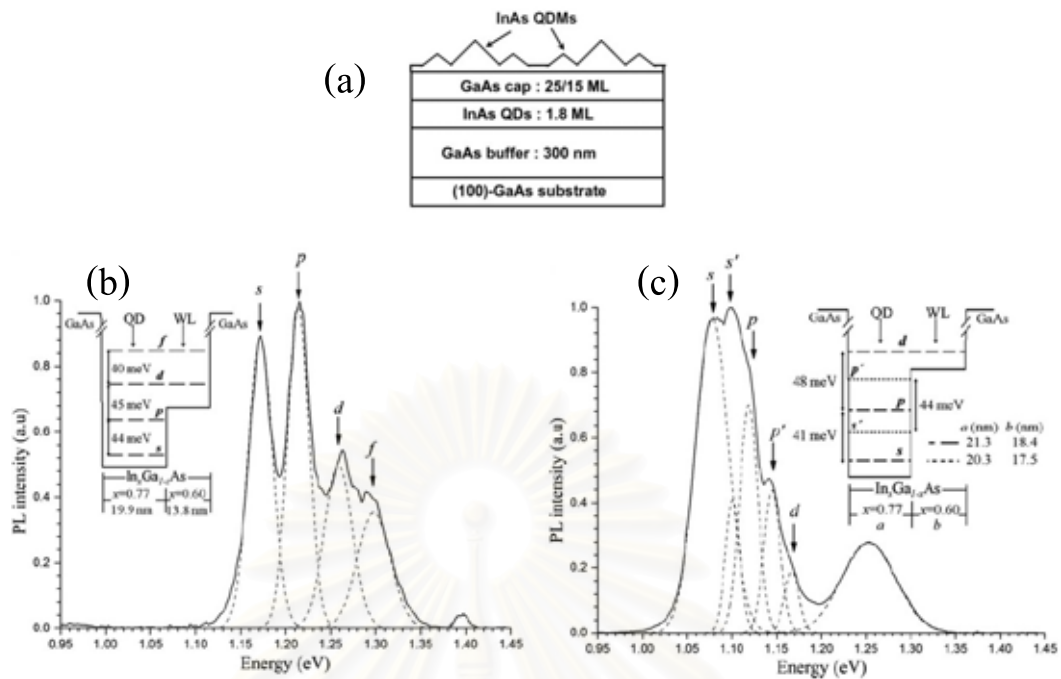
dot) และควอนตัมคอตขนาดเล็กที่ล้อมรอบ (Satellite dot) ในปริมาณที่มากกว่า ซึ่งควอนตัมคอตโมเลกุลนี้ถูกใช้ในโครงสร้าง Photovoltaic เพื่อเพิ่มปริมาณการดูดซับแสง

คุณสมบัติในการจับแสงและเปล่งแสงเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของควอนตัมคอตและถูกใช้ในสิ่งประดิษฐ์ทางแสงมากมาย การปรับคุณสมบัติเกี่ยวกับแสงนี้สามารถทำการปรับปรุงได้โดยเพิ่มความหนาแน่นของควอนตัมคอตและให้ควอนตัมคอตทั้งหมดมีขนาดที่เป็นขนาดเดียวกันหรือใกล้เคียงที่สุด (Uniformity)

การศึกษาถึงผลการเปล่งแสงของชิ้นงานที่มีโครงสร้างควอนตัมคอตโมเลกุลในอดีตที่ผ่านมา ยังไม่ได้มีการศึกษาให้เข้าใจอย่างถ่องแท้เท่าไรนัก จึงได้มีการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเปล่งแสงของโครงสร้างควอนตัมคอตโมเลกุลโดยการใช้การจำลอง (Simulation) โครงสร้างเสมือนจริงและการคำนวณทางฟิสิกส์ด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้สมการ Schrödinger-Poisson แบบหนึ่งมิติเป็นพื้นฐานในการจำลอง (ใช้โปรแกรม 1D-Poisson ในการจำลองโครงสร้างและระดับพลังงาน)

การจำลองโครงสร้างเสมือนจริงภายในคอมพิวเตอร์นั้นใช้ข้อมูลทางกายภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของชิ้นงานจริงที่นำมาวัด ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองโครงสร้างเสมือนจริงของโครงสร้างควอนตัมคอตโมเลกุลได้ออกมาในรูปของระดับพลังงานทั้งหมดที่เป็นไปได้ที่พาหะทั้งอิเล็กตรอนและโฮลสามารถอยู่ได้ ตรงนี้จะนำไปสู่ผลการเปล่งแสงด้วยเช่นกัน

นอกจากข้อมูลทางกายภาพของชิ้นงานแล้วยังต้องใช้ผลการเปล่งแสงที่วัดได้จากชิ้นงานด้วยเพื่อให้การศึกษาผลการเปล่งแสงของโครงสร้างควอนตัมคอตโมเลกุลจากการจำลองโครงสร้างเสมือนจริงแบบหนึ่งมิติเป็นไปอย่างสมบูรณ์ สำหรับผลการเปล่งแสงที่วัดได้จากชิ้นงานนั้นจะออกมาเป็นรูปของ Spectral response ซึ่งสามารถนำผลการเปล่งแสงจริงไปผ่านเครื่องมือที่สร้างขึ้นมาเอง เพื่อให้ได้ผลออกมาในรูปของผลบวกของ Gaussian function ที่ค่ายอด (Peak) และความกว้างแถบที่ค่าครึ่งเดียวของค่ายอด (Full-width-at-half-maximum: FWHM) ต่างๆกัน ทำให้สามารถจำแนกผลการเปล่งแสงของชิ้นงานจริงได้เป็น Peak และ FWHM หลายๆค่า ซึ่งสามารถนำค่าที่ได้ดังกล่าวทำการปรับแต่งโครงสร้างเสมือนจริงให้สามารถอธิบายผลการเปล่งแสงดังกล่าวได้



รูปที่ 4.14 (a) ภาพตัดขวางของโครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุลผลและผลการเปล่งแสงที่วัดได้จาก
 ชิ้นงานจริง (เส้นทึบ) และผลจากการใช้เครื่องมือเพื่อจำแนกออกเป็น Gaussian functions
 (เส้นประ) ของชิ้นงานที่มีการกลบทับแบบบาง (a) 15 และ (b) 25 ML รูปเล็กที่แทรกอยู่แสดงถึง
 โครงสร้างที่สามารถอธิบายผลการเปล่งแสงที่แสดงไว้ได้ [35]

ประโยชน์ที่ได้รับจากการทดลองนี้คือสามารถขยายผลจากควอนตัมดอทโมเลกุลไปเป็นผล
 สำหรับควอนตัมดอทบนลายตารางได้ เพราะว่าควอนตัมดอทบนลายตารางนั้นแต่ละตำแหน่งจะมี
 ควอนตัมดอทที่มีความสูงไม่เท่ากัน ซึ่งเหมือนกับกรณีควอนตัมดอทโมเลกุล แต่ความควอนตัมดอท
 บนลายตารางมีความซับซ้อนในการจำลองโครงสร้างมากกว่า การจำลองโครงสร้างเสมือนจริงจึง
 ทำได้ยากกว่า การทดลองในส่วนนี้จึงเป็นเหมือนการเก็บนำไปสู่การวัดผลการเปล่งแสงจริงๆของ
 โครงสร้างควอนตัมดอทบนลายตารางด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุป

วิวัฒนาการของการเกิดควอนตัมดอท InAs ที่ปลูกบนแผ่นฐานลายตาราง InGaAs เป็นปฐมบทสู่การพัฒนาการศึกษาด้านการเกิดของควอนตัมดอท และแผ่นฐานลายตาราง ควอนตัมดอทที่ปลูกบนชั้นลายตารางมีความแตกต่างจากควอนตัมดอทบนแผ่นฐานธรรมดาที่เห็นได้ชัดที่สุดคือ ปริมาณของ InAs ที่ใช้ในการก่อตัวขึ้นเป็นควอนตัมดอทบนแผ่นฐานลายตารางนั้นใช้เพียง 0.8 ML ต่างจาก 1.8 ML ของการปลูกบนแผ่นฐาน GaAs ปกติ นอกจากนี้ควอนตัมดอทที่ปลูกบนแผ่นฐานลายตารางยังถูกก่อตัวขึ้นในเวลาที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนด้วย

หัวข้อวิทยานิพนธ์นี้เกิดขึ้นมาจากการสังเกตลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวของควอนตัมดอทบนแผ่นฐานลายตารางที่มีลักษณะร่วมคือ ควอนตัมดอทบนแผ่นฐานลายตารางสามารถแบ่งตามเกณฑ์ความสูงได้เป็นสี่กลุ่ม ได้แก่ 1) กลุ่มควอนตัมดอทที่ก่อตัวบนจุดตัดของเส้นลายตารางทั้งสองแนว 2) กลุ่มควอนตัมดอทที่ก่อตัวบนเส้นลายตารางที่ขนานกับทิศ [1-10] 3) กลุ่มควอนตัมดอทที่ก่อตัวบนเส้นลายตารางที่ขนานกับทิศ [110] และ 4) กลุ่มควอนตัมดอทที่ไม่ได้ก่อตัวบนเส้นลายตาราง ความสูงที่ต่างกันดังกล่าวบ่งชี้ได้ว่าควอนตัมดอทถูกก่อตัว ณ เวลาที่ต่างกัน ซึ่งข้อมูลด้านวิวัฒนาการการเกิดควอนตัมดอทบนแผ่นฐานลายตารางยังไม่เคยปรากฏมาก่อน

การทดลองเพื่อหาวิวัฒนาการของการเกิด InAs ควอนตัมดอทบนแผ่นฐานลายตารางนำไปสู่การปลูกโครงสร้างที่มีการปรับค่าตัวแปรต่างๆ แบ่งออกเป็นการปรับตัวแปรในการปลูกชั้นลายตารางและการปรับตัวแปรในการปลูกชั้นควอนตัมดอท สำหรับการปรับตัวแปรในการปลูกชั้นลายตารางได้ศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของ In ในชั้นลายตาราง InGaAs ตั้งแต่ 8% ไปถึง 20% ทำให้ทราบจากผลการวัดผิวหน้าว่าสัดส่วนของ In ที่น้อยลงมีผลให้ลายตารางทั้งสองแนวมีปริมาณน้อยลงไปด้วย ส่วนการปรับตัวแปรในชั้นควอนตัมดอทเพื่อสังเกตและวิเคราะห์วิวัฒนาการการเกิดควอนตัมดอทบนลายตารางทำได้สองวิธี วิธีแรกคือการลดปริมาณการปลูก InAs ในชั้นควอนตัมดอท ซึ่งได้ทำการปลูกชั้นงานอีกสองชั้นที่ลดความหนาของชั้น InAs ลงจาก 0.8 ML เหลือ 0.76 และ 0.72 ML และวิธีที่สองคือการหยุดมอเตอร์ขณะปลูกชั้นควอนตัมดอท ซึ่งสามารถปรับปริมาณ InAs ให้มากหรือน้อยได้ในชั้นงานเดียวกัน โดยแต่ละตำแหน่งบนชั้นงานจะได้รับ InAs ไม่เท่ากัน เมื่อวัดผิวหน้าที่ตำแหน่งต่างกันก็จะได้ผลของ InAs ควอนตัมดอทในปริมาณ

ต่างกัน ผลที่ได้จากการทดลองทั้งสองวิธีสามารถยืนยันข้อสันนิษฐานเกี่ยวกับลำดับการเกิดก่อนหลังได้และสามารถสรุปวิวัฒนาการของการเกิดควอนตัมดอทบนผิวหน้าลายตารางได้ดังนี้ คือ InAs ควอนตัมดอทจะเกิดที่ Threading dislocation ก่อน, ตามด้วยตำแหน่งที่เป็นจุดตัดของเส้นลายตารางทั้งสองแนว, ตามด้วยบนแนวเส้นลายตารางที่ขนานกับทิศ $[1-10]$, ตามด้วยบนแนวเส้นลายตารางที่ขนานกับทิศ $[110]$ และตามด้วยบนบริเวณพื้นเรียบ โดยปัจจัยที่เป็นแรงผลักดันให้เกิดวิวัฒนาการดังกล่าวคือ ความเค้นอัด, ความเค้นยืด และการอพยพของอะตอม In ที่ผิวหน้า ซึ่งพิสูจน์ให้เห็นโดยการ Simulation ระดับความเค้นบนผิวหน้าลายตารางและเปรียบเทียบกับผลจริงจากภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

ผลที่ได้จากการศึกษาวิวัฒนาการและเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาวิวัฒนาการการเกิดควอนตัมดอทบนลายตารางที่น่าเสนอไว้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับวิวัฒนาการของโครงสร้างนาโนชนิดอื่นได้ไม่ว่าจะเป็น ควอนตัมดอทโมเลกุลหรือควอนตัมริง เป็นต้น โดยไม่จำกัดว่าจะต้องเป็นวัสดุในตระกูล InGaAs / GaAs เท่านั้น นอกจากนี้ข้อมูลด้านวิวัฒนาการของควอนตัมดอทบนผิวหน้าลายตารางนี้ ยังมีประโยชน์ต่อความเข้าใจในโครงสร้างทางกายภาพของควอนตัมดอทที่ถูกปลูกบนผิวที่ไม่ใช่ระนาบ (100) หรือบนแผ่นฐานชนิด offcut ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเปล่งแสงของโครงสร้างดังกล่าว

รายการอ้างอิง

- [1] D. Bimberg, M. Grundmann, and N. N. Ledentsov. Quantum Dot Heterostructure. Chichester : Wiley, 1998.
- [2] N. Siripitakchai, Control of The Number of Dots In InAs Quantum Dot Molecules for Quantum Computing. Master's thesis. Department of Electrical Engineering. Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2006.
- [3] C. C. Thet. Growth and Characterisation of Ordered InAs Quantum Dots on Cross-hatch Virtual Substrate. Ph. D.'s thesis. Department of Electrical Engineering. Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2006.
- [4] S. Kiravittaya. Homogeneity Improvement of InGaAs/GaAs Self-assembled Quantum Dots Grown by Molecular Beam Epitaxy. Ph. D.'s thesis. Department of Electrical Engineering. Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2002.
- [5] S. Suraprapich. Self-assembled Quantum Dot Molecules by Molecular Beam Epitaxy and Their Potential Applications. Ph. D.'s thesis. Department of Electrical Engineering. Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2003.
- [6] L. Jacak, P. Hawrylak, and A. Wójs. Quantum Dots. Berlin, Germany : Springer-Verlag, 1998.
- [7] S. Suhikonen, O. Svensk, T. Lang, H. Lipsanen, et al. The Effect of InGaN/GaN MQW Hydrogen Threading Dislocation Optimization on GaN LED Efficiency. Journal of Crystal Growth 298 (2007) : 740-743.
- [8] C. Huh, W. J. Schaff, L. F. Eastman, and S. J. Park. Temperature Dependence of Performance of InGaN/GaN MQW LEDs With Different Indium Compositions. IEEE Electron Device Letter 25 (2004) : 61-63.

- [9] S. Suraprapapich, S. Kanjanachuchai, S. Thainoi, and S. Panyakeow. Self-assembled lateral InAs Quantum Dot Molecules: Dot ensemble control and polarization dependent photoluminescence. Microelectronic engineering 83 (2006) : 1526-1529.
- [10] P. Bhattacharya, et al. Properties of Lattice matched and Strained Indium Gallium Arsenide. London : INSPEC, 1993.
- [11] A. M. Andrews, J. S. Speck, A. E. Romanov, M. Bobeth, and W. Pompe. Modeling Cross-hatch Surface Morphology in Growing Mismatched Layer. Journal of Applied Physics 91 (2002) : 1933-1943.
- [12] K. Samonji, H. Yonezu, Y. Takagi, and N. Ohshinma. Evolution Process of Cross-hatch Patterns and Reduction of Surface Roughness in $(\text{InAs})_m(\text{GaAs})_n$ Strained Short-period Superlattices and InGaAs Alloy Layers Grown on GaAs. Journal of Applied Physics 86 (1999) : 1331-1339.
- [13] A. M. Andrews, J. S. Speck, A. E. Romanov, M. Bobeth, and W. Pompe. Modeling Cross-hatch Surface Morphology in Growing Mismatched Layer. Journal of Applied Physics 91 (2002) : 1933-1943.
- [14] A. E. Romanov, W. Pompe, S. Mahtis, G. E. Beltz, and J. S. Speck. Threading Dislocation Reduction in Strained Layers. Journal of Applied Physics 85 (1999) : 182-192.
- [15] C. C. Thet, S. Sanorpim, S. Panyakeow, and S. Kanjanachuchai. The Effect of Relaxed InGaAs Virtual Substrates on the Formation of Self-Assembled InAs Quantum Dots. Semiconductor Science and Technology 23 (2008) : 055007.
- [16] T. Limwongse, S. Panyakeow, and S. Kanjanachuchai. Evolution of InAs Quantum Dots Grown on Cross-Hatch Substrates. Physica Status Solidi. (Submitted).

- [17] S. J. Ahn, K. H. Kim, and K. H. Yoon. Cu(In,Ga)Se₂ Thin Film Solar Cell from Nanoparticle Precursors. Current Applied Physics 8 (2008) : 766-769.
- [18] I. Daruka and A. L. Barabasi. Dislocation-free island formation in heteroepitaxial growth: A study at equilibrium. Physical Review Letters 79 (1997) : 3708-3711.
- [19] B. G. Streetman, and S. Banerjee. Solid State Electronic Devices. : 5th edition Prentice hall, 2000.
- [20] S. Kayali, G. Ponchak, and R. Shaw. GaAs MMIC Reliability Assurance Guideline for Space Application : Jet Propulsion Laboratory, 1996.
- [21] S. Adachi. Physical Properties of III-V Semiconductor Compounds. Canada : Wiley, 1992.
- [22] O. G. Schmidt, S. Kiravittaya, Y. Nakamura, et al. Self-assembled Semiconductor Nanostructures : Climbing up The Ladder of Order. Surface Science 514 (2002) : 10-18.
- [23] S. Franchi, G. Trevisi, L. Seravalli, and P. Frigeri. Quantum Dot Nanostructures and Molecular Beam Epitaxy. Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials 47 (2003) : 166-195.
- [24] E. A. Fitzgerald, S. B. Samavedam, Y. H. Xie, and L. M. Giovane. Influence of Strain on Semiconductor Thin Film Epitaxy. Journal of Vacuum Science Technology A 15 (1997) : 1048-1056.
- [25] Y. H. Xie, S. B. Samavedam, M. Bulsara, T. A. Lango, and E. A. Fitzgerald. Relaxed Template of Fabricating Regularly Disturbed Quantum Dot Arrays. Applied Physics Letter 71 (1997) : 3567-3568.

- [26] C. Ferrari, G. Rossetto, and E. A. Fitzgerald. Misfit Dislocation and Threading Dislocation Distributions in InGaAs and GeSi/Si Partially Relaxed Heterostructure. Material Science and Engineering B 91-92 (2002) : 437-440.
- [27] W. Braun. Applied RHEED : Reflection High-Energy Electron Diffraction During Crystal Growth. Berlin, Germany : Springer-Verlag, 1999.
- [28] A. Ichimiya, and Philip, I. Cohen. Reflection High-Energy Electron Diffraction. Cambridge : University of Cambridge, 2004.
- [29] M. B. Panish, and H. Temkin. Gas Source Molecular Beam Epitaxy. Berlin, Germany : Springer-Verlag, 1993.
- [30] Paul. Apparatus For Separating Charged Particles Of Different Specific Charges, Patent number: 2939952 : 1960.
- [31] M. Luysberg, H. Sohn, A. Prasad, et al. Effect of The Growth Temperature and As/Ga Flux Ratio on The Incorporation of Excess As into Low Temperature Grown GaAs. Journal of Applied Physics 83 (2008) : 561-566.
- [32] P. B. Joyce, T. J. Krzyzewski, P. H. Steans, et al. Shape and Surface Morphology Changes During The Initial Stages of Encapsulation of InAs/GaAs Quantum Dots. Surface Science 492 (2001) : 345-353.
- [33] J. W. Lee, D. Schuh, M. Bichler, and G. Abstreiter. Advanced Study of Various Characteristics Found in RHEED Patterns During The Growth of InAs Quantum Dots on GaAs (001) Substrate by Molecular Beam Epitaxy. Applied Surface Science 228 (2004) : 306-312.
- [34] S. Suraprapapich, S. Thainoi, S. Kanjanachuchai, and S. Panyakeow. Self-Assembled Quantum Dot Molecules by Molecular-Beam Epitaxy. Journal of Vacuum Science Technology B 23 (2005) : 1217-1220.

- [35] N. Thudsalingkarnsakul, T. Limwongse, N. Siripitakchai, S. Panyakoew, and S. Kanjanachuchai. Effective One-dimensional Electronic Structure of InGaAs Quantum Dot Molecule. Microelectronic Engineering 85 (2008) : 1225-1228.
- [36] O. G. Schmidt, Efforts toward a Deterministic Quantum Dot Technology. The 5th International Conference on Semiconductor Quantum Dots, pp 47. South Korea : 2008.
- [37] B. Pérez, Rodríguez, J. Mirecki Millunchick. The Role of Morphology in The Relaxation of Strain in InGaAs/GaAs. Journal of Crystal Growth 264 (2004) 64-69.
- [38] P. I. Gaiduk, A. N. Larsen, and J. L. Hansen. Strained-relaxed SiGe/Si Heteroepitaxial Structures of Low Threading-dislocation Density. Thin Solid Film 367 (2000) : 120-125.
- [39] A. M. Andrew, A. E. Romanov, J. S. Speck, et al. Development of Cross-hatch Morphology During Growth of Lattice Mismatched Layer. Applied Physics Letter 77 (2000) : 3740-3742.
- [40] C. C. Thet, S. Panyakeow, and S. Kanjanachuchai. Growth of InAs Quantum-dot Hatches on InGaAs/GaAs Cross-hatch Virtual Substrates. Microelectronic Engineering 84 (2007) : 1562-1565.
- [41] ชิ้นงานที่ปลูกโดย Cho Cho Thet มีโครงสร้างคือ InAs ควอนตัมดอต < 0.8 ML บน $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As} / \text{GaAs} (001)$
- [42] C. L. Zhang, L. Tang, Y. L. Wang, et al. Influence of Dislocation Stress Filed on Distribution of Quantum Dots. Physica E 33 (2006) : 130-133.
- [43] J. Wu, W. Li, T. W. Fan, et al. Breaking up of Misfit Dislocation in GaAs/ $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ /GaAs Heterostructure. Applied Physics Letter 67 (1995) : 846-847.



ภาคผนวก

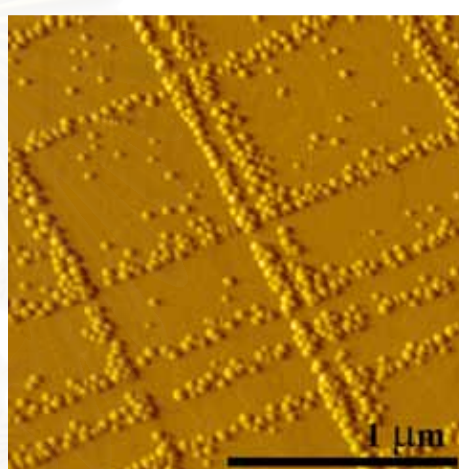
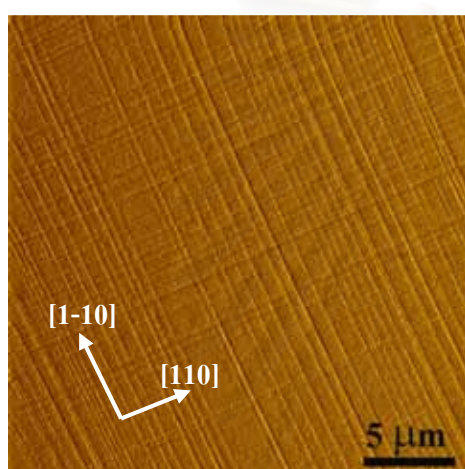
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

รายละเอียดโครงสร้างแต่ละชั้นงาน

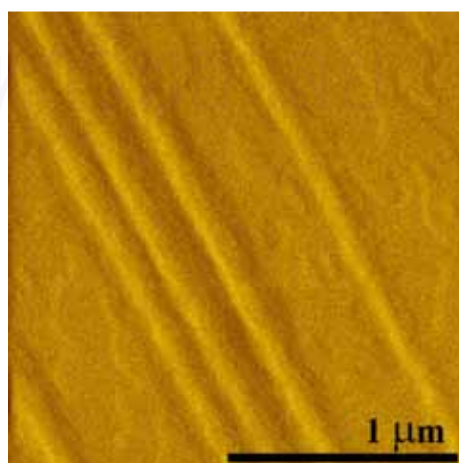
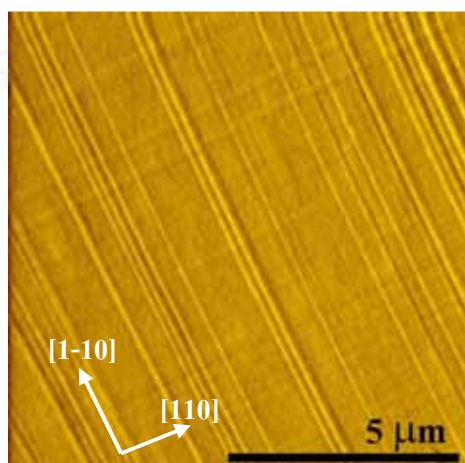
ชิ้นงาน u0702

| | | |
|--------|--|-------|
| 0.8 ML | InAs QDs | 500°C |
| 50 nm | $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ VS | 500°C |
| 300 nm | GaAs buffer | 580°C |
| | (001) GaAs substrate | |

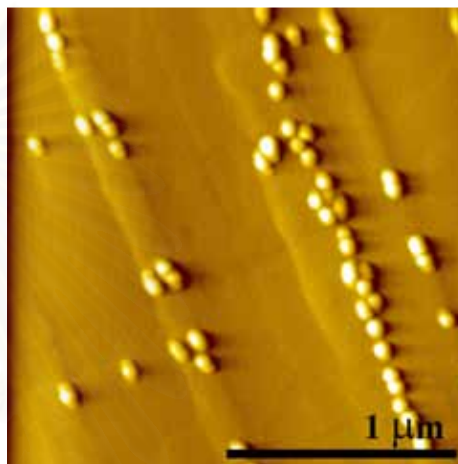
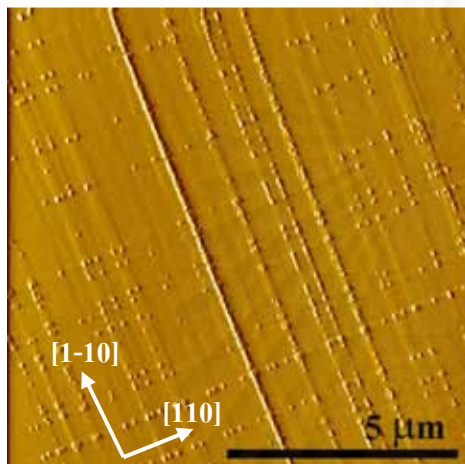
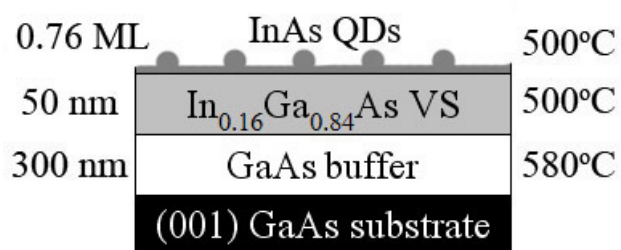


ชิ้นงาน u0811

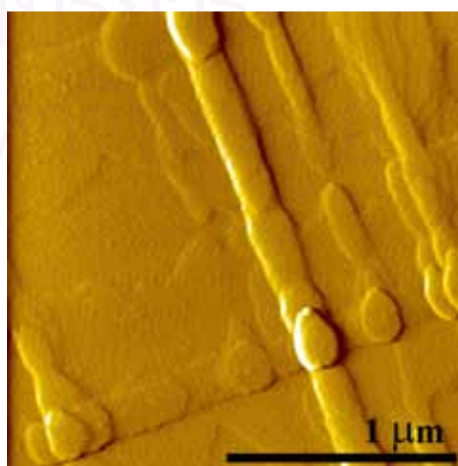
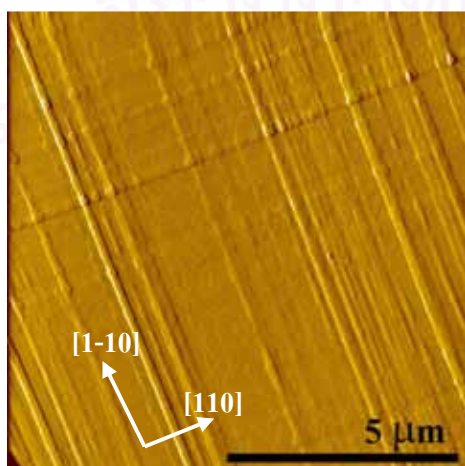
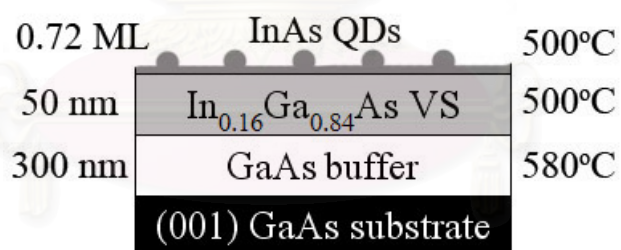
| | | |
|--------|--|-------|
| 50 nm | $\text{In}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}$ VS | 500°C |
| 300 nm | GaAs buffer | 580°C |
| | (001) GaAs substrate | |



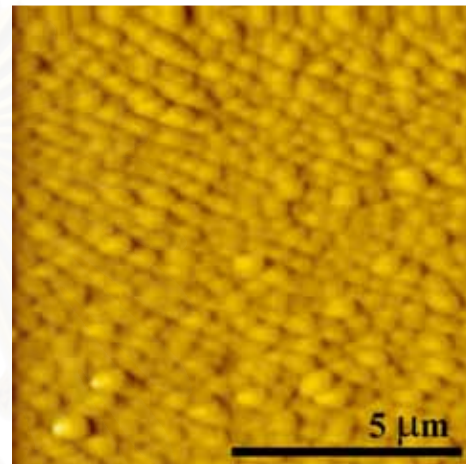
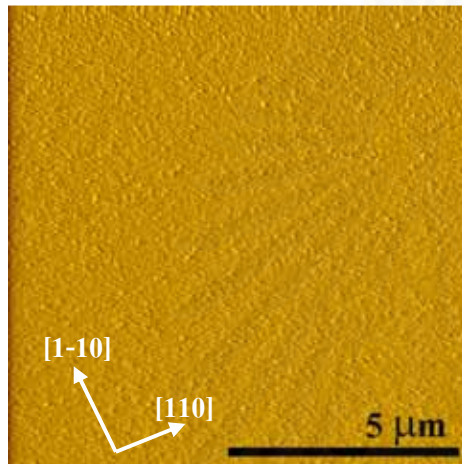
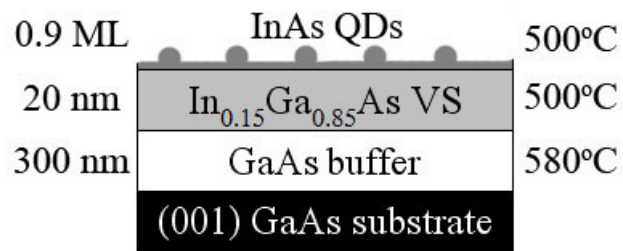
ชิ้นงาน u0817



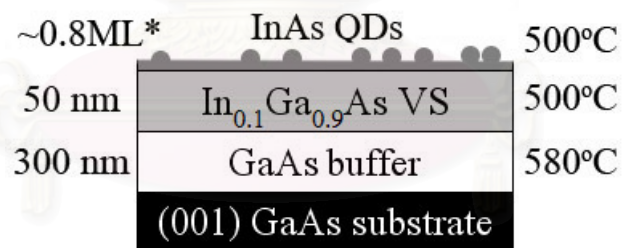
ชิ้นงาน u0815



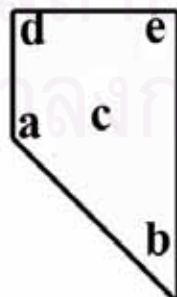
ชิ้นงาน u0842



ชิ้นงาน u0840



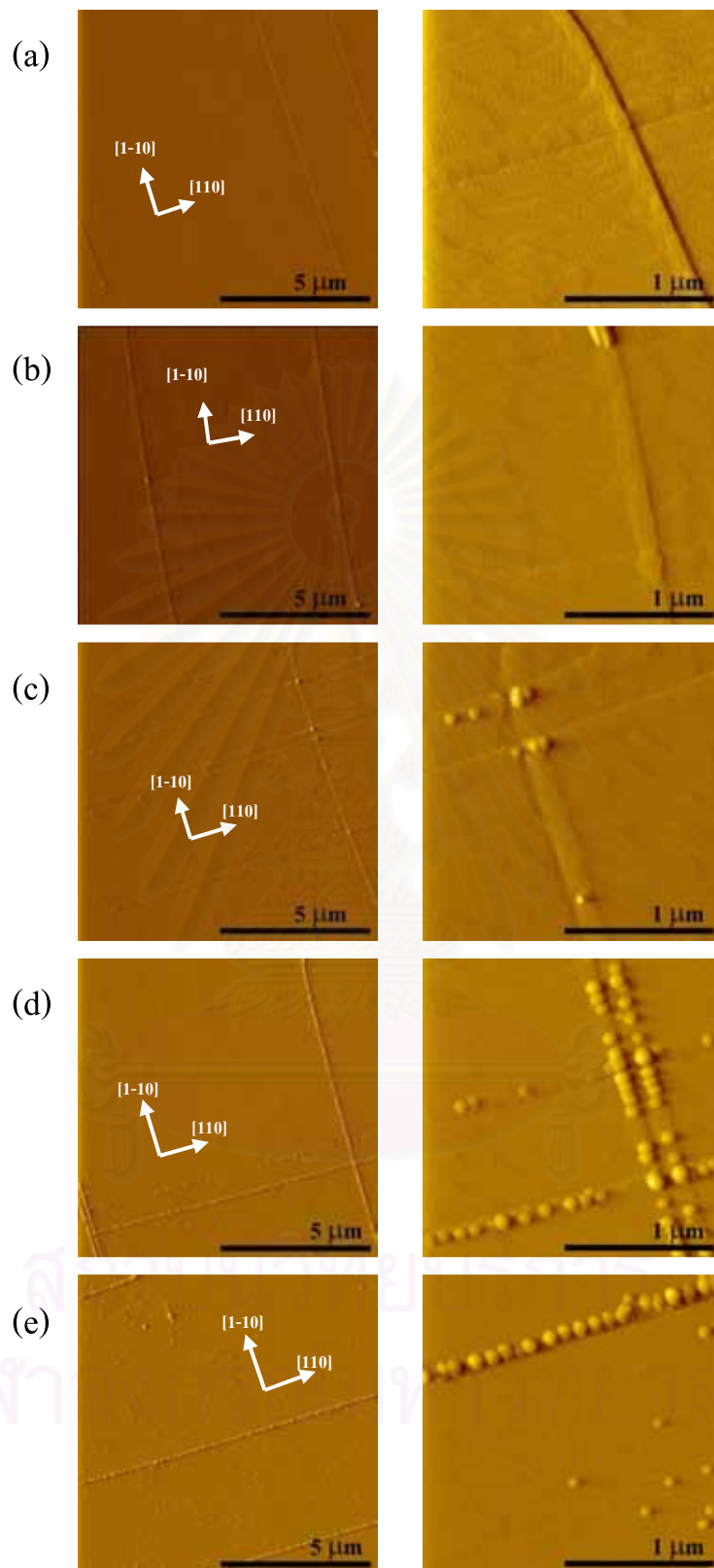
* Motor stop



InAs layer.

ปริมาณของ InAs ที่ตำแหน่ง

$$a < b < c < d < e$$



ภาคผนวก ข

โปรแกรมที่ใช้ประกอบในหัวข้อ 4.4 มีสองโปรแกรมดังนี้

1. 1D-Poisson

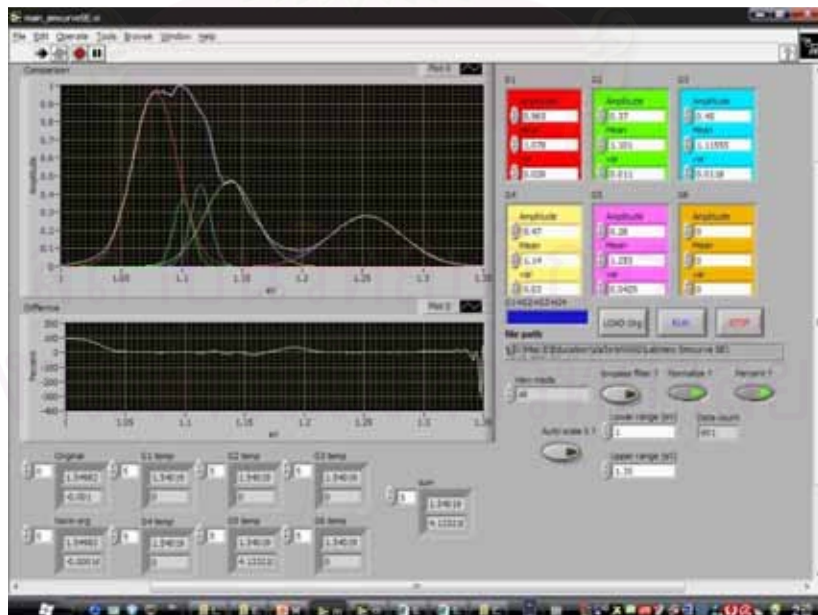
โปรแกรมนี้เป็นโปรแกรมที่ใช้จำลองโครงสร้างแบบหนึ่งมิติ โดยการป้อนข้อมูลของชั้นผลึกแต่ละชั้นในโครงสร้าง เช่น ข้อมูลความหนา, ข้อมูลการโคป, ข้อมูลชนิดสาร และอัตราส่วนของสารประกอบ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดคุณสมบัติของผลึกอีกด้วย

พื้นฐานของสมการ Poisson-Schrödinger แบบหนึ่งมิติเป็นส่วนประกอบหลักของโปรแกรม ดังนั้นโปรแกรมจึงสามารถจำลองโครงสร้างได้หนึ่งมิติเท่านั้น

2. LabView

เป็นโปรแกรมหลักที่ใช้สร้างโปรแกรมย่อยสำหรับการจำแนก Gaussian function จากผลการแปลงแสงที่ป้อนเข้าสู่คอมพิวเตอร์

หลักการของโปรแกรมคือเมื่อป้อนข้อมูลของผลการแปลงแสงเข้าไปรวมทั้งข้อมูลของ Gaussian function ที่คาดว่าจะเป็นส่วนหนึ่งของระดับพลังงาน โปรแกรมจะแจ้งผลความแตกต่างระหว่างผลรวมของ Gaussian functions ที่ป้อนเข้าไปและผลการแปลงแสงจริง เมื่อปรับค่า Gaussian function จนได้ความผิดพลาดน้อยที่สุดแล้ว จะทำให้สามารถแยกผลการแปลงแสงจริงออกเป็นผลรวมของแต่ละ Gaussian function และค่าที่ได้ไปคำนวณและออกแบบโครงสร้างใน 1D-Poisson ต่อไปเพื่อให้ได้โครงสร้างเสมือนจริง 1 มิติที่จำลองขึ้นมา



รูปแสดงการหา Gaussian function ที่เป็นส่วนประกอบของผลการแปลงแสง

ผลงานตีพิมพ์

ในวารสารต่างประเทศ

- “Effective One-dimensional Electronic Structure of InGaAs Quantum Dot Molecule”, Nitidet Thudsalingkarnsakul, **Teeravat Limwongse**, Naparat Siripitakchai, Somsak Panyakeow, and Songphol Kanjanachuchai. Microelectronic Engineering. 85 (2008) : 1225-1228.

ประชุมทางวิชาการระดับนานาชาติ

- “Effective One-dimensional Electronic Structure of InGaAs Quantum Dot Molecule”, Nitidet Thudsalingkarnsakul, **Teeravat Limwongse**, Naparat Siripitakchai, Somsak Panyakeow, and Songphol Kanjanachuchai. Proceedings of the 33rd Micro and Nano Engineering (2007), Copenhagen, Denmark.
- “Effects of Overgrowth and Capping of InAs Quantum Dots Grown on Cross-hatch Surfaces”, Songphol Kanjanachuchai, **Teeravat Limwongse**, Cho Cho Thet, and Somsak Panyakeow. Proceedings of the 34th Micro and Nano Engineering (2008), Greece.
- “Evolution of InAs Quantum Dots Grown on Cross-hatch Substrates”, **Teeravat Limwongse**, Somsak Panyakeow, and Songphol Kanjanachuchai. Proceeding of the 5th Quantum Dots Conference (2008), Gyeong-ju, South Korea.

ประชุมทางวิชาการระดับชาติ

- “Degradation Characteristics of Blue Light-Emitting Diode under Accelerated DC Aging Process”, **Teeravat Limwongse**, Supachok Thainoi, and Songphol Kanjanachuchai. Proceeding of the 4th Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information technology (2007), Chiang-rai, Thailand : 149-152.
- “Correlation Between Luminescence Properties and Geometry of InAs Quantum Dots”, **Teeravat Limwongse**, Nitidet Thudsalingkarnsakul, Somsak Panyakeow, and Songphol Kanjanachuchai. Proceeding of the 30th Electrical Engineering Conference (2007), Kanjanaburi, Thailand.

ผลงานนำเสนอ

Oral presentations

1. “Degradation Characteristics of Blue Light-Emitting Diode under Accelerated DC Aging Process”, **Teeravat Limwongse**, Supachok Thainoi, and Songphol Kanjanachuchai. The 4th ECTI (2007), Maefahluang University, Chiang-rai, Thailand, 9-12 May, 2007.
2. “Correlation Between Luminescence Properties and Geometry of InAs Quantum Dots”, **Teeravat Limwongse**, Nitidet Thudsalingkarnsakul, Somsak Panyakeow, and Songphol Kanjanachuchai. The 30th EECON (2007), River Kwai Resort, Kanjanaburi, Thailand, 25-26 October, 2007.

Poster presentations

1. “Effective One-dimensional Electronic Structure of InGaAs Quantum Dot Molecule”, Nitidet Thudsalingkarnsakul, **Teeravat Limwongse**, Napat Siripitakchai, Somsak Panyakeow, and Songphol Kanjanachuchai. The 33th MNE (2007), Copenhagen, Denmark, 23-26 September, 2007.
2. “Evolution of InAs Quantum Dots Grown on Cross-hatch Substrates”, **Teeravat Limwongse**, Somsak Panyakeow, and Songphol Kanjanachuchai. The 5th QD conference (2008), Hyundai hotel, Gyeong-ju, South Korea, 11-16 May, 2008.
3. “Effects of Overgrowth and Capping of InAs Quantum Dots Grown on Cross-hatch Surfaces”, Songphol Kanjanachuchai, **Teeravat Limwongse**, Cho Cho Thet, and Somsak Panyakeow. The 34th MNE (2008), Athens, Greece, 15-18 September, 2008.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธีรวัฒน์ ถิ่นวงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 27 มีนาคม พุทธศักราช 2527 อาศัยอยู่ที่ บ้านเลขที่ 123 หมู่ 4 ซอยจามจรี 4 แขวงท่าแร้ง เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปทุมวัน ปีการศึกษา 2544 และสำเร็จการศึกษาระดับมหาวิทยาลัย ระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จาก จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2548



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย