

การปลูกและวัดลักษณะสมบัติของอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอตที่ซ้อนทับกันบนแผ่นฐานลาย
ตาราง

นายเฉลิมชัย ฮิมवास

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

GROWTH AND CHARACTERIZATION OF STACKED InAs QUANTUM DOTS ON
CROSS-HATCH SUBSTRATES

Mr. Chalermchai Himwas

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 2011

Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---------------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การปลูกและวัดลักษณะสมบัติของอินเดียมอาร์เซไนด์ ควอนตัมดอตที่ชั้นทับกันบนแผ่นฐานลายตาราง |
| โดย | นาย เฉลิมชัย ฮิมवास |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมไฟฟ้า |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | รองศาสตราจารย์ ดร. ทรงพล กาญจนชูชัย |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศศิริวงค์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ทรงพล กาญจนชูชัย)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สกฤตธรรม เสนาะพิมพ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ชัญชนา ธนชยานนท์)

เฉลิมชัย ฮิมवास : การปลูกและวัดลักษณะสมบัติของอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัม
ดอตที่ซ้อนทับกันบนแผ่นฐานลายตาราง. (GROWTH AND CHARACTERIZATION
OF STACKED InAs QUANTUM DOTS ON CROSS-HATCH SUBSTRATES)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร. ทงพล กาญจนชูชัย, 87 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการปลูกควอนตัมดอต InAs บนแผ่นฐานลายตาราง InGaAs หนึ่งชั้น
และหลายชั้น ด้วยระบบเอพิแทกซีแบบลำโมเลกุล (MBE) ชี้นำงาน as-grown ถูกศึกษาลักษณะด้วยกลอง
จุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) และการทดลองโฟโตลูมิเนสเซนส์ (PL) ที่อุณหภูมิต่ำ ชี้นำงานยังถูกออกแบบ *in
situ* และ *ex situ* และวัดสมบัติทางแสง ความเข้าใจพื้นฐานวิทยาพื้นผิวสามารถใช้อธิบายสมบัติทางแสง
ได้ นอกจากนี้ควอนตัมดอตที่ซ้อนทับกันหลายชั้นอาจปรับปรุงสมบัติทางแสงเนื่องจากการเพิ่มพาหะใน
โครงสร้าง หรืออาจขยายช่วงการเปล่งแสงจากการรวมกันของการเปล่งแสงแต่ละช่วง

ควอนตัมดอต InAs บนลายตาราง InGaAs แสดงการเปล่งแสงจากหลายค่ายอด ประกอบด้วย 5
สถานะพื้นตั้งนี้ ควอนตัมดอตในทิศทาง [1-10] และ [110], WL ทั้งสองตำแหน่ง และลายตาราง หลังจากอบ *in
situ* ด้วยอุณหภูมิ 700 °C พบว่าการเปล่งแสงลดลงอย่างรวดเร็วจากลายตารางที่เชื่อมสภาพลง อุณหภูมิ
ดังกล่าวจึงใช้เป็นขีดจำกัดบนของอุณหภูมิสำหรับการปลูกชั้น overlayer การอบ *ex situ* โดยผ่าน
ไฮโดรเจนที่อุณหภูมิต่ำที่ 350 °C ทำให้การเปล่งแสงโดยรวมดีขึ้น โดยเฉพาะ WL ที่พลังงานสูงมีสเปกตรัม
การเปล่งแสงแคบลงพร้อมกับเกิด blueshift เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนรักษาจุดบกพร่องและปลดปล่อย
ความเครียดบางส่วน

ควอนตัมดอต InAs บนลายตารางสองชั้นถูกปลูกด้วยสัดส่วนโมลของ In ที่ต่างกันในแต่ละชั้น
เพื่อศึกษาผลการเปล่งแสงโดย PL ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าชั้นงานเปล่งแสงจากชั้นบนเท่านั้น ในขณะที่
การเปล่งแสงจากชั้นล่าง (ถ้ามี) จะถูกดูดกลืนโดยชั้นลายตารางที่คั่นกลาง การเปล่งแสงจากควอนตัมดอต
InAs บนลายตารางหลายชั้นจึงไม่ทำให้ผลการเปล่งแสงดีไปกว่าโครงสร้างควอนตัมดอต InAs บนลาย
ตารางหนึ่งชั้น ในทางตรงกันข้าม โครงสร้างที่เป็นควอนตัมดอตหลายชั้นบนลายตารางโดยมี GaAs บางๆ
(20 nm) คั่นกลางระหว่างควอนตัมดอตให้ผลโพลาริเซชันที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม DOP กลับลดลงเมื่อปลูก
ควอนตัมดอตหลายชั้นเกินไป DOP ที่มากขึ้นเนื่องจากการเปล่งแสงที่ควบคู่กันของควอนตัมดอตขณะที่
การเปล่งแสงที่ลดลงของโครงสร้างที่มีควอนตัมดอตหลายชั้นเกินไปเกิดจากการเสื่อมสภาพของวัสดุ

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้าลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา 2554.....

5270665421 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : QUANTUM DOTS / CROSS-HATCH PATTERNS / PL / ANNEALING / AFM /
InAs / InGaAs /

CHALERMCHAI HIMWAS : GROWTH AND CHARACTERIZATION OF STACKED InAs
QUANTUM DOTS ON CROSS-HATCH SUBSTRATES.. THESIS ADVISOR : ASSOC.
PROF. SONGPOL KANJANACHUCHAI, DR., 87 pp.

This thesis reports the growth of single- and multi-stack InAs quantum dots (QDs) on InGaAs cross-hatch patterns (CHPs) by molecular beam epitaxy (MBE). As-grown samples are characterised by atomic force microscopy (AFM) and low-temperature (20 K) photoluminescence (PL). The samples are also subject to *in situ* and *ex situ* annealings. The understanding of surface morphology can be used to describe the optical properties. Furthermore, the stacked InAs QDs may improve the optical response due to increased carriers in the structure or enhance the spectral range due to the combination of individual spectrum.

InAs QDs on InGaAs CHPs exhibit rich optical features which comprise as many as five ground-state emissions from [1-10]- and [110]-aligned QDs, two wetting layers (WLs), and the CHPs. When subject to high-temperature *in situ* annealing at 700°C, the PL signals rapidly degrade due to the deterioration of the CHPs which sets the upper limit of overlayer growth temperature. *Ex-situ* hydrogen annealing at a much lower temperature of 350°C, however, results in an overall PL intensity increase with a significant narrowing and a small blueshift of the high-energy WL emission due to hydrogen bonding which neutralizes defects and relieves associated strains.

Stacked InAs QDs / CHPs with two different In molar fractions were grown and characterised by PL. The results indicate that emissions arise only from the uppermost stack, while those from the lower stack, if any, is likely reabsorbed by the intermediate CHP layer, rendering the structure ineffective at improving the optical properties of a single QDs/CHP stack. On the contrary, stacking InAs QDs on CHPs using a thin (20 nm) GaAs spacer between adjacent QD stacks proves to be useful at increasing the polarization of the PL spectra. The degree of polarization however degrades if the number of stacks is too high. The improvement is due to effective coupling among aligned QDs while the degradation at high stack number is due to material deterioration.

Department : Electrical Engineering Student's Signature

Field of Study : Electrical Engineering Advisor's Signature

Academic Year : 2011

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เนื่องจากได้รับการช่วยเหลือและสนับสนุนจากผู้มีพระคุณทั้งหลายในกองปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้เขียนขอขอบพระคุณบุคคลเหล่านั้นซึ่งประกอบด้วย

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร. ทงพล กาญจนชูชัย ที่สละเวลาอันมีค่า เพื่อช่วยเหลือดูแล ให้คำปรึกษาทั้งเรื่องการเขียนวิทยานิพนธ์ การเรียน ตลอดจนแนวการทำงานวิจัยอันมีประโยชน์ยิ่งแก่ข้าพเจ้าจนกระทั่งจบการศึกษาในระดับปริญญาโท

คณะกรรมการสอบอนุมัติหัวข้อวิทยานิพนธ์ และสอบจบการศึกษา ประกอบด้วย ศ. ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว, ผศ. ดร. สกฤตธรรม เสนาะพิมพ์ และ ดร. ชัญชนา ธนชยานนท์

พี่ๆ ห้องธุรการที่ให้ความช่วยเหลือด้านงานธุรการ อุปกรณ์ และงานเทคนิค ประกอบด้วย พี่ศุภโชค และพี่ขวัญเรือน ไทยน้อย พี่พรชัย ช่างม่วง และพี่พัฒนา พันธุ์วงศ์

สมาชิกห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ที่ให้การชี้แนะและความช่วยเหลืออย่างอบอุ่นเรื่อยมา

ศูนย์วิจัยร่วมเฉพาะทางด้านส่วนประกอบฮาร์ดแวร์ (I/UCRC in HDD Component) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น (CPN R&D 01-18-53) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (NANOTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (NSTDA) และทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนการศึกษาและทุนวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบคุณครอบครัวประกอบไปด้วย บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้อง ซึ่งเป็นกำลังใจ และคอยสนับสนุนจนกระทั่งผู้เขียนจบปริญญาโท

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ญ |
| สารบัญภาพ..... | ฎ |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้พื้นฐาน..... | 4 |
| 2.1 เอพิแทกซี..... | 4 |
| 2.2 ความไม่เข้ากันของโครงผลึก..... | 5 |
| 2.3 ความเครียดและการผ่อนคลายความเครียด..... | 6 |
| 2.4 Dislocations และ surface step..... | 6 |
| 2.5 ควอนตัมดอต (Quantum dots, QDs)..... | 9 |
| 2.6 แผ่นฐานลายตาราง (Cross-hatch pattern substrate)..... | 13 |
| 2.7 การจัดเรียงควอนตัมดอต..... | 15 |
| 2.7.1 การกำหนดลวดลายบนแผ่นฐานด้วยวิธีอื่น..... | 15 |
| 2.7.2 Strain engineering template..... | 17 |
| บทที่ 3 การสังเคราะห์และวัดลักษณะสมบัติของวัสดุ..... | 21 |
| 3.1 ระบบปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล..... | 21 |
| 3.1.1 เครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล..... | 22 |
| 3.1.2 การวัดความดันไอ..... | 25 |
| 3.1.3 RHEED..... | 26 |
| 3.1.4 QMS..... | 27 |
| 3.2 การเตรียมชิ้นงานและการกำหนดเงื่อนไขการปลูก..... | 28 |
| 3.2.1 กระบวนการ Pre-heat..... | 28 |

| | หน้า | |
|--|--|----|
| 3.2.2 | กระบวนการ De-gas..... | 29 |
| 3.2.3 | กระบวนการ De-ox..... | 29 |
| 3.2.4 | การสอบเทียบคุณสมบัติผิวหน้า..... | 30 |
| 3.2.5 | การสอบเทียบอัตราการปลูก..... | 31 |
| 3.3 | การปลูกชั้นผลึก..... | 33 |
| 3.3.1 | การปลูกชั้นก่อนผลึก..... | 33 |
| 3.3.2 | การปลูกชั้นลายตาราง..... | 34 |
| 3.3.3 | การปลูกชั้นควอนตัมดอต..... | 34 |
| 3.3.4 | การปลูกชั้นกลบทับ..... | 35 |
| 3.4 | ลักษณะสมบัติ..... | 36 |
| 3.4.1 | สัณฐานวิทยาพื้นผิว..... | 36 |
| 3.4.2 | สมบัติเชิงแสง..... | 37 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์..... | | 40 |
| 4.1 | สรุปผลการทดลองควอนตัมดอตบนลายตารางในอดีต..... | 40 |
| 4.1.1 | การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนโมลของ In (x) ที่มีผลต่อการจัดเรียงควอนตัมดอต..... | 41 |
| 4.1.2 | การเปลี่ยนแปลงความหนาชั้นลายตาราง (Y) ที่มีผลต่อการจัดเรียงควอนตัมดอต..... | 42 |
| 4.1.3 | การเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาขัดจังหวะการปลูกที่มีผลต่อการจัดเรียงควอนตัมดอต..... | 43 |
| 4.1.4 | วิวัฒนาการของการเกิดควอนตัมดอต (Z) บนลายตาราง..... | 43 |
| 4.2 | สัณฐานวิทยาพื้นผิวของควอนตัมดอตบนลายตาราง..... | 45 |
| 4.3 | สมบัติเชิงแสงของควอนตัมดอตบนลายตาราง..... | 48 |
| 4.3.1 | สมบัติเชิงแสงของชิ้นงาน as-grown..... | 49 |
| 4.3.2 | สมบัติเชิงแสงของควอนตัมดอตบนแผ่นฐานลายตารางหลังจากอบภายใต้ภาวะสุญญากาศสูงยิ่งโดย MBE และตู้อบ..... | 52 |
| 4.3.3 | สมบัติโพลาไรเซชันของควอนตัมดอตบนแผ่นฐานลายตาราง.... | 58 |

| | หน้า |
|---------------------------------|------|
| บทที่ 5 สรุป..... | 61 |
| รายการอ้างอิง..... | 64 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 74 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | | หน้า |
|----------|--|------|
| 2.1 | สมบัติของ InAs, GaAs และ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ | 5 |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 2.1 | ความไม่เข้ากันของโครงผลึก..... | 5 |
| 2.2 | ก. ลักษณะของ MD และ TD ที่เกิดขึ้นในการปลูกผลึก ข. dislocation vector (b) ซึ่งเกิดจากการรวมกันของ edge dislocation และ screw dislocation..... | 7 |
| 2.3 | กลไกการเกิดแผ่นฐานเสมือนลายตาราง..... | 9 |
| 2.4 | แผนภาพเฟสสมดุล (Equilibrium Phase Diagram) ในรูปของฟังก์ชันระหว่าง H(ความหนา) และ (ความเครียด) โดยภาพประกอบด้านบนและด้านล่างแสดงลักษณะผิวหน้าทั้ง 6 โหมด สามเหลี่ยมเล็กสีขาวแสดงเกาะที่มีเสถียรภาพ สามเหลี่ยมใหญ่ระบายสีแสดงเกาะที่โตเต็มที่ แต่ละโหมดถูกแบ่งด้วยเส้นขอบ ดังนี้ Hc1(E) : FM-R1, FM-SK1; Hc2(E) : SK1 – R2; Hc3(E) : SK2-SK1; Hc4(E) : VW-SK2, VW-R3..... | 9 |
| 2.5 | โครงสร้างทางกายภาพและความหนาแน่นสถานะของ (ก) ก้อนผลึก, (ข) ควอนตัมเวลล์, (ค) ควอนตัมไวร์ และ (ง) ควอนตัมดอต..... | 11 |
| 2.6 | (ก) การเปล่งแสงของก้อนผลึก (ข) การเปล่งแสงของควอนตัมดอต..... | 12 |
| 2.7 | การเกิดควอนตัมดอต InAs บนแผ่นฐาน GaAs..... | 13 |
| 2.8 | ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาวิกฤติของชั้น InGaAs (Monolayer) ที่ปลูกบนชั้น GaAs กับสัดส่วนของ In..... | 14 |
| 2.9 | ควอนตัมดอต InGaAs ที่ปลูกบนแผ่นฐานที่ถูกทำลายก่อนหน้าด้วย Ga ₂ O ₃ ช่องที่เกิดการวางตัวของควอนตัมดอตประมาณ 0.2x0.15µm..... | 16 |
| 2.10 | (ก) ภาพตัวอย่างแผ่นฐานที่เป็นชั้นเนื่องจากการตัดแบบพิเศษ, (ข) AFM ของควอนตัมดอตที่ปลูกบนแผ่นฐานที่มี index (311), (ค) (411), (ง) (511), (จ) (711) และ (ฉ) (911)..... | 16 |
| 2.11 | (ก) ภาพ SEM ของ Si หลังจากการสร้างรูนาโน (ข) ภาพ SEM แสดงนาโนดอตของ Si..... | 17 |
| 2.12 | ความเครียดบริเวณพื้นผิวของชั้นลายตาราง In _{0.15} Ga _{0.85} As เมื่อความหนาเป็น 12, 25, 50, และ 180 nm..... | 18 |

| ภาพที่ | หน้า |
|--------|--|
| 2.13 | รูปเปรียบเทียบควอนตัมดอตบน strain engineering template ระหว่างระบบ (ก) IV-IV และ (ข) III-V..... 19 |
| 2.14 | (ก) รูป AFM ของแผ่นฐานลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$, (ข) Line scan ผิวน้ำในทิศ [110], (ค) Line scan ผิวน้ำในทิศ [1-10]..... 19 |
| 3.1 | เครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล RIBER 32P..... 22 |
| 3.2 | (ก) วาล์วของก๊าซไนโตรเจน, (ข) วาล์วเชื่อมต่อห้องโหลดกับเทอร์โบปั๊ม และ (ค) เทอร์โบปั๊ม..... 23 |
| 3.3 | แผนภาพห้องปลูกผลึกอย่างง่ายของเครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล..... 24 |
| 3.4 | โครงสร้างของระบบ RHEED..... 26 |
| 3.5 | (ก) Streaky pattern (ข) ผิวน้ำที่เรียบ (ค) Spotty pattern (ง) ผิวน้ำที่มีควอนตัมดอต..... 27 |
| 3.6 | ภาพการทำงานของ Quadrupole mass analyze..... 27 |
| 3.7 | ขั้นตอนของกระบวนการ Pre-heat..... 28 |
| 3.8 | ขั้นตอนการ De-gas..... 29 |
| 3.9 | (ก) ขั้นตอนการ De-ox (ข) ลวดลายของ RHEED ขณะ De-ox..... 30 |
| 3.10 | การสอบเทียบอุณหภูมิผิวน้ำ..... 31 |
| 3.11 | (ก) การก่อตัวของ GaAs บน GaAs(001) จาก A ไป E ซึ่งสัมพันธ์กับ (ข) ความสว่างของ specular beam จาก A ไป E (ค) การสั่นของความสว่างของ specular beam ขณะปลูก GaAs ลงบน GaAs(001)..... 32 |
| 3.12 | ภาพ AFM ขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ แสดงนาโนโฮล..... 35 |
| 3.13 | (ก) ภาพจริงของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม และ (ข) แผนภาพการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม..... 36 |
| 3.14 | แผนภาพการทำงานของระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์..... 38 |
| 4.1 | ภาพตัดขวางชั้นงานสำหรับการทดลองควอนตัมดอตบนลายตารางในอดีต..... 41 |
| 4.2 | ภาพ AFM แสดงควอนตัมดอต InAs บนแผ่นฐานลายตาราง $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ เมื่อ x คือ (ก) 0.08, (ข) 0.10, (ค) 0.16 และ (ง) 0.20 ถูกแสดงทิศ [1-10]..... 42 |
| 4.3 | ภาพ AFM ของควอนตัมดอต InAs บนแผ่นฐานลายตาราง $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ ที่ความหนาชั้นลายตาราง (ก) 50 nm, (ข) 100 nm และ (ค) 150 nm ถูกแสดงทิศ [1-10]..... 42 |

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 4.4 | ภาพ AFM ของควอนตัมดอท InAs บนแผ่นฐานลายตาราง $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ ที่ GI (ก) 0, (ข) 30 และ (ค) 60 s..... | 43 |
| 4.5 | (ก) ภาพ AFM ของชิ้นงานควอนตัมดอทบนลายตารางขนาด $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ และภาพจากการใช้ image thresholding โดยสีขาวหมายถึงบริเวณที่มีความสูงน้อยกว่าค่า threshold และสีดำหมายถึงบริเวณที่มีความสูงมากกว่าค่า threshold ค่า threshold ของแต่ละภาพคือ (ข) 5.5-, (ค) 4.9-, (ง) 4.0- และ (จ) 3.0 nm..... | 44 |
| 4.6 | ภาพตัดขวาง (รูปบน) และภาพ AFM ขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ (รูปล่าง) ของชิ้นงาน (ก) C001, (ข) C003, (ค) C002 และ (ง) C008..... | 45 |
| 4.7 | ภาพตัดขวางของชิ้นงาน (ก) C012, (ข) C013, (ค) C014, C003 และ (ง) C008 | 49 |
| 4.8 | ผลตอบสนองทางแสงของชิ้นงาน C012, C013, C014 และ C003..... | 50 |
| 4.9 | ผลตอบสนองทางแสงของชิ้นงาน (ก) C003 และ (ข) C008..... | 51 |
| 4.10 | ผลตอบสนองทางแสงของชิ้นงานก่อนการอบและหลังการอบของชิ้นงาน (ก) C012, (ข) C013 และ (ค) C014..... | 53 |
| 4.11 | แผนภาพของตู้อบ..... | 55 |
| 4.12 | (ก) ผลตอบสนองทางแสง, (ข) FWHM และ (ค) Integrated Intensity ของชิ้นงาน C003 ก่อนและหลังการอบที่ 30, 60 และ 120 นาที..... | 56 |
| 4.13 | (ก) แผนภาพจำลองของสนามความเครียดของผลึกขณะไม่มีไฮโดรเจนอะตอม และ (ข) มีไฮโดรเจนอะตอม..... | 57 |
| 4.14 | ภาพตัดขวางของชิ้นงาน (ก) C009, (ข) C010, และ (ค) C011..... | 58 |
| 4.15 | (ก) ผลตอบสนองทางแสงของชิ้นงาน C009, C010 และ C011 (ข) การตอบสนองทางแสงที่จุดยอดเมื่อเปลี่ยนมุมของโพลาริซเซอร์ของชิ้นงาน C009, C010 และ C011..... | 59 |

บทที่ 1

บทนำ

สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการประยุกต์ใช้ในหลายสาขา โดยเฉพาะสาขาอิเล็กทรอนิกส์และออปโตอิเล็กทรอนิกส์ สิ่งประดิษฐ์ที่สร้างขึ้นจากโครงสร้างโฮโม (homostucture) ส่วนใหญ่จะมีข้อจำกัดบางประการเนื่องจากสมบัติทางธรรมชาติของวัสดุ จึงมีการประยุกต์ใช้โครงสร้างเฮเทอโร (heterostucture) เพื่อให้ได้สิ่งประดิษฐ์ที่มีคุณสมบัติดีขึ้น ตัวอย่างการประยุกต์ใช้โครงสร้างเฮเทอโรที่สำคัญได้แก่ เลเซอร์ ทำให้เลเซอร์มีกระแสขีดเริ่มต่ำ (low threshold current) เนื่องจากมีการเก็บกักพาหะในบริเวณไวงาน ([1]-[2]) นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้โครงสร้างเฮเทอโรในสิ่งประดิษฐ์อื่นๆ ได้แก่ LED [3], เซลล์แสงอาทิตย์ [4], ดีเทคเตอร์ [5] โครงสร้างเฮเทอโรทั้งหมดข้างต้นสามารถสังเคราะห์ได้โดยกระบวนการเอพิแทกซี

เอพิแทกซีเป็นเทคนิคการปลูกผลึกเดี่ยวโดยเป็นการปลูกฟิล์มบางลงบนแผ่นฐาน กรณีที่ชั้นฟิล์มที่ปลูกมีองค์ประกอบของสารเหมือนแผ่นฐานจะเรียกเทคนิคการปลูกว่า “homoepitaxy” แต่ถ้าชั้นฟิล์มที่ปลูกมีองค์ประกอบต่างจากแผ่นฐานจะเรียกเทคนิคการปลูกว่า “heteroepitaxy” เอพิแทกซีจำแนกออกเป็น 3 ประเภทหลัก ตามสถานะตั้งต้นของสารที่ปลูก ได้แก่ 1) การปลูกผลึกแบบสถานะไอ (Vapor Phase Epitaxy, VPE), 2) การปลูกผลึกแบบสถานะของเหลว (Liquid Phase Epitaxy, LPE) และ 3) การปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy, MBE) โดยการปลูกผลึกที่มีความละเอียดที่สุดคือการปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล เพราะเป็นเทคนิคที่สามารถควบคุมอัตราการปลูกได้ในระดับโมโนเลเยอร์ต่อวินาที นอกจากนี้ยังเป็นเทคนิคที่ให้ความบริสุทธิ์ของสารที่ปลูกได้มากกว่าการปลูกผลึกแบบสถานะไอ และสามารถปลูกฟิล์มบางได้ สม่่าเสมอว่าการปลูกผลึกแบบสถานะของเหลว เหตุผลเหล่านี้ทำให้การปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล ถูกใช้ในการสังเคราะห์วัสดุเพื่อให้ได้ ขนาด, รูปร่าง, สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางแสง รวมถึงโครงสร้างที่มีขนาดเล็กระดับนาโน (nanostructure) ตามที่ต้องการ

โครงสร้างนาโนที่สำคัญที่ถูกสังเคราะห์และประยุกต์ใช้ในสิ่งประดิษฐ์คือควอนตัมดอต (Quantum dot) การสังเคราะห์ควอนตัมดอตจึงมีการวิจัยอย่างกว้างขวางทั้งการสังเคราะห์แบบเทคนิค Top-down และเทคนิค Bottom-up เทคนิคแบบ Top-down เป็นการกำหนดลดขนาด

ให้กับแผ่นฐานโดยกระบวนการต่างๆ เช่น การทำลิโธกราฟี [6], การใช้มาสก์ ([6]-[8]), เทคนิค Anodic-membrane [9], ปลูกโดยใช้แผ่นฐาน vicinal [10], ใช้ป้อนอิเล็กตรอนในการสร้างลวดลายบนแผ่นฐาน [11] เป็นต้น จากนั้นจึงปลูกควอนตัมดอตด้านบนสุดทำให้ควอนตัมดอตจัดเรียงตัวตามลวดลายที่กำหนด ข้อดีของเทคนิค Top-down คือสามารถบังคับการจัดเรียงควอนตัมดอตได้แม่นยำ แต่เทคนิคนี้มีข้อเสียคือกระบวนการในการสร้างลวดลายอาจเพิ่มความไม่สมบูรณ์ของผลึก (Defect) ก่อให้เกิด Non-radiative recombination center ซึ่งลดทอนคุณสมบัติทางแสงและทางอิเล็กทรอนิกส์ของอุปกรณ์ที่ผลิต และมักเป็นเทคนิคที่ต้องลงทุนสูง ในขณะที่เทคนิค Bottom-up เป็นการสังเคราะห์ควอนตัมดอตโดยอาศัยความไม่เข้ากันของโครงผลึก (lattice mismatched) และการผ่อนคลายความเครียด (strain relaxation) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติของวัสดุ เมื่อมีความไม่เข้ากันของโครงผลึกและชั้นปลูกมีความหนาแน่นมากพอ ชั้นผลึกที่ปลูกจะเกิดการผ่อนคลายความเครียดเกิดเป็นโครงสร้าง 3 มิติขนาดเล็กและถูกเรียกว่าควอนตัมดอต โดยควอนตัมดอตที่เกิดขึ้นจัดเรียงตัวแบบสุ่มทั่วผิวหน้าของชิ้นงานซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับการประยุกต์ใช้ในสิ่งประดิษฐ์ที่ไม่ต้องการความถูกต้องของตำแหน่งหรือความเท่ากันของควอนตัมดอต ([3]-[5]) การปลูกควอนตัมดอตมีการวิจัยในหลายระบบของสารประกอบ เช่น ควอนตัมดอต InAs บนแผ่นฐาน GaAs ซึ่งเป็นควอนตัมดอตจากสารประกอบหมู่ III-V ([12]-[13]), ควอนตัมดอต Ge บนแผ่นฐาน Si ซึ่งเป็นควอนตัมดอตจากสารประกอบหมู่ IV-IV ([14]-[16]) และควอนตัมดอต CdSe บนแผ่นฐาน ZnSe ซึ่งเป็นควอนตัมดอตจากสารประกอบหมู่ II-VI ([17]-[19]) เป็นต้น สำหรับสิ่งประดิษฐ์บางประเภท ขนาดและการจัดเรียงที่แน่นอนของควอนตัมดอตมีความสำคัญ เช่น QCA [20] และ bit-patterned media [21] ฉะนั้นการสังเคราะห์ควอนตัมดอตให้มีขนาดที่สม่ำเสมอและมีการจัดเรียงตัวที่แน่นอนจึงมีความจำเป็น การสังเคราะห์แบบ Bottom-up สามารถจัดเรียงควอนตัมดอตได้โดยการปลูกบนแผ่นฐานเสมือนลายตาราง (cross-hatch virtual substrate) ซึ่งต่างจากแผ่นฐานโดยทั่วไปคือ ควอนตัมดอตสามารถจัดเรียงตัวได้ดีอยู่เพียงบางบริเวณของแผ่นฐาน

แผ่นฐานเสมือนลายตารางเตรียมได้โดยการปลูกผลึกที่มีค่าคงที่ผลึก (lattice constant) ต่างจากแผ่นฐาน ความไม่เข้ากันของโครงผลึกทำให้เกิดความผิดปกติ (Dislocation) 2 ประเภทคือ 1) Misfit Dislocation (MD) ซึ่งเป็น Dislocation ที่เกิดบริเวณรอยต่อของสารที่ปลูกกับแผ่นฐานโดยมีลักษณะเป็นเส้นยาวในแนวรอยต่อ และ 2) Treading Dislocation (TD) ซึ่งเป็น

Dislocation ที่มีผลสืบเนื่องมาจาก MD เคลื่อนที่ออกจากรอยต่อไปจนถึงผิวหน้า ทำให้ผิวหน้ามีสนามความเครียดแต่ละบริเวณไม่เท่ากัน เมื่อปลูกผลึกหนาจนเกินค่าวิกฤติจะเกิดการผ่อนคลายความเครียดที่ผิวหน้าในทิศทางที่ TD วิ่งมาถึง ส่งผลให้ผิวหน้ามีลักษณะเป็นลอน (undulation) ที่บริเวณนั้นๆ การเกิดลอนจะเกิดขึ้นทั่วทั้งผิวหน้าใน 2 แนวที่ตั้งฉากกัน (Orthogonal) ในทิศ $[1\ 1\ 0]$ และทิศ $[1\ -1\ 0]$ เมื่อมองจากด้านบนจะมีลวดลายคล้ายลายตาราง ชั้นเอพิแทกซีที่ปลูกขึ้นและแผ่นฐานตั้งต้นจึงถูกเรียกรวมกันว่า แผ่นฐานเสมือนลายตาราง แผ่นฐานเสมือนดังกล่าวสามารถนำไปใช้เป็นแม่แบบในการปลูกควอนตัมดอต เพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวที่แน่นอนเนื่องจากผลกระทบของสนามความเครียดของแผ่นฐานเสมือนลายตาราง ส่งผลต่อการจัดเรียงควอนตัมดอตที่ปลูกทับด้านบน

การจัดเรียงควอนตัมดอตบนแผ่นฐานเสมือนลายตารางสามารถทำได้โดยหลายเทคนิค เช่น การปลูกผลึกโดยไอของสารเคมี (Chemical Vapor Deposition, CVD) ([22]-[23]) และ การปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล เป็นต้น โดยการปลูกผลึกแบบลำโมเลกุลมีการวิจัยหลักๆ ใน 2 ระบบของสารประกอบ คือ สารประกอบจากหมู่ III-V เช่น ควอนตัมดอต InAs บนแผ่นฐานเสมือนลายตาราง $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ ([24]-[32]), และสารประกอบจากหมู่ IV-IV เช่น ควอนตัมดอต Ge บนแผ่นฐานเสมือนลายตาราง $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ ([33]-[34]) หลังจากการปลูกโครงสร้างควอนตัมดอตแล้วเพื่อเป็นการยืนยันโครงสร้างที่ปลูกและเข้าใจโครงสร้างได้ดีขึ้นจึงมีการวัดสมบัติทางกายภาพด้วยเครื่องมือต่างๆ เช่น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) ([35]-[36]), กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy, AFM) [37], เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffractometer) [36] และวัดการตอบสนองทางแสงโดยระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ (Photoluminescence, PL) ([38]-[42])

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ในการปลูกควอนตัมดอต InAs บนแผ่นฐานเสมือนลายตาราง $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ โดยเฉพาะการปลูกควอนตัมดอตมากกว่า 1 ชั้นโดยการปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่สังเคราะห์ได้ไปศึกษาโครงสร้างทางกายภาพและผลการตอบสนองเชิงแสง ซึ่งจะนำไปสู่ความเข้าใจเชิงธรรมชาติการเปล่งแสงของควอนตัมดอต InAs ที่ซ้อนทับกันบนแผ่นฐานเสมือนลายตารางเพื่อประโยชน์ในการประยุกต์เป็นสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ในลำดับต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและความรู้พื้นฐาน

เนื้อหาของบทนี้กล่าวถึงรายละเอียดเอพิแทกซี จากนั้นจะกล่าวถึงหัวข้อต่างๆอย่างเป็นลำดับเพื่อชี้ให้เห็นที่มาของการเกิดควอนตัมดอตและการเกิดแผ่นฐานลายตาราง ซึ่งเป็นโครงสร้างที่สำคัญในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้และต่างมีรากฐานการเกิดมาจากสิ่งเดียวกันคือ ความไม่เข้ากันของโครงผลึก และการผ่อนคลายความเครียด ตามทฤษฎีที่อธิบายโดยละเอียดในหัวข้อที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ ในส่วนท้ายของบทจะกล่าวเกี่ยวกับทฤษฎีการเกิดควอนตัมดอต และแผ่นฐานลายตารางโดยละเอียด และจบเนื้อหาของบทด้วยหัวข้อเกี่ยวกับการจัดเรียงควอนตัมดอตบนแผ่นฐานลายตารางดังหัวข้อที่ 2.7 ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการจัดเรียงควอนตัมดอตในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

2.1 เอพิแทกซี

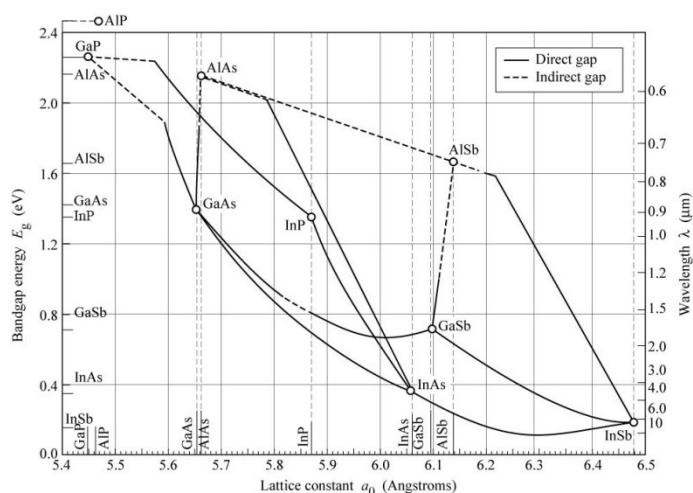
เอพิแทกซี คือ กระบวนการปลูกผลึกเดี่ยวลงบนแผ่นฐานซึ่งเป็นผลึกเดี่ยวเช่นกัน ชั้นที่ปลูกได้เรียกว่า ชั้นเอพิแทกซี (Epitaxial layer) ชั้นเอพิแทกซีสามารถปลูกได้หลายวิธี เช่น การปลูกผลึกแบบสถานะไอ, การปลูกผลึกแบบสถานะของเหลว และการปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล เป็นต้น โดยชั้นเอพิแทกซีที่ปลูกได้มีการจัดเรียงโครงสร้างผลึกตามแผ่นฐานที่ใช้ทำให้ได้โครงสร้างผลึกเดี่ยวที่มีคุณภาพสูง เอพิแทกซียังสามารถจำแนกตามความเหมือน-ต่างขององค์ประกอบของสารที่ปลูกกับแผ่นฐานได้เป็น 2 ชนิด คือ โฮโมเอพิแทกซี และเฮเทอโรเอพิแทกซี โฮโมเอพิแทกซีคือการปลูกสารที่มีองค์ประกอบของสารเช่นเดียวกับแผ่นฐาน ทำให้การปลูกเกิดการเข้ากัน (lattice matched) ระหว่างสารที่ปลูกและแผ่นฐาน การปลูกผลึกแบบโฮโมเอพิแทกซีมักใช้เพื่อปลูกสารชนิดเดียวกับแผ่นฐานที่ต้องการความบริสุทธิ์มากขึ้น หรือใช้กรณีที่สารปลูกมีสารเจือต่างจากแผ่นฐาน (different doping level) เฮเทอโรเอพิแทกซีคือการปลูกสารต่างชนิดจากแผ่นฐาน ทำให้ชั้นปลูกอาจเกิดความเข้ากันของผลึก หรือความไม่เข้ากันของผลึก (lattice mismatched) ก็ได้โดยขึ้นอยู่กับสารที่ปลูก สารที่มีความเข้ากันของผลึกจะจัดเรียงตัวแบบ 2 มิติ เช่นเดียวกับการปลูกแบบโฮโมเอพิแทกซี ในขณะที่ชั้นปลูกที่เกิดความไม่เข้ากันของโครงผลึกจะเกิดการก่อตัวของชั้นปลูกที่เปลี่ยนไปโดยกลายเป็นโครงสร้างนาโนแบบต่างๆ ทำให้สมบัติทางกายภาพเปลี่ยนไปด้วย โครงสร้างนาโนที่เกิดขึ้นมีสาเหตุจากความไม่เข้ากันของผลึกซึ่งจะอธิบายโดยละเอียดในหัวข้อ 2.2

2.2 ความไม่เข้ากันของโครงผลึก

ตารางที่ 1 สมบัติของ InAs, GaAs และ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ [43]

| Materials | Band Gap (eV) at 300 K | Lattice constant (\AA) |
|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| InAs | 1.424 | 5.6533 |
| GaAs | 0.354 | 6.0584 |
| $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ | $0.324+0.7(1-x)+0.41(1-x)^2$ | $5.6533+0.405(x)$ |

ธาตุและสารประกอบทุกชนิดต่างมีค่าคงที่ผลึก (lattice constant : a) เฉพาะตัว ทำให้การปลูกสารลงบนแผ่นฐานเกิดความเข้ากันและไม่เข้ากันของโครงผลึกได้ ในระบบโฮโมเอพิแทกซี การปลูกสารจะเกิดความเข้ากันของโครงผลึกเสมอเนื่องจากการปลูกสารชนิดเดียวกับแผ่นฐาน ในระบบเฮเทอโรเอพิแทกซีการปลูกสารจะเกิดได้ทั้งระบบที่มีความเข้ากันของโครงผลึก (เช่น การปลูก AlGaAs ลงบน GaAs) และระบบที่มีความไม่เข้ากันของโครงผลึก (เช่น การปลูก InGaAs ลงบน GaAs) เป็นการปลูกสารที่ต่างกับแผ่นฐานดังกล่าวข้างต้น ทำให้ค่าคงที่ผลึกของสารที่ปลูกกับค่าคงที่ของสารที่เป็นแผ่นฐานต่างกัน สำหรับระบบสารที่สนใจในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ InAs, GaAs และ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ซึ่งมีค่าคงที่ผลึกและช่องว่างแถบพลังงาน (Energy gap, E_g) ตามตารางที่ 1 จึงทำให้โครงสร้างที่ปลูกมีโครงสร้างที่มีความไม่เข้ากันของโครงผลึกเนื่องจากแผ่นฐานที่ใช้เป็น GaAs ซึ่งมีค่าคงที่ผลึกต่ำกว่าโครงสร้างที่ต้องการปลูก (InAs, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) ผลึกที่ปลูกจึงพยายามจัดเรียงตัวให้เข้ากับแผ่นฐานโดยการลดค่าคงที่ผลึกของตนเอง เกิดความเครียดขึ้นในชั้นปลูกและเกิดการผ่อนคลายความเครียดตามมาซึ่งอธิบายรายละเอียดในหัวข้อ 2.3



รูปที่ 2.1 ความไม่เข้ากันของโครงผลึก [44]

แผ่นฐานที่ใช้ในการทดลองมีหลายชนิด เช่น Si, GaAs และ InP เป็นต้น เมื่อเปรียบเทียบจากรูปที่ 2.1 พบว่า Si เป็นวัสดุประเภท Indirect band gap จึงไม่เหมาะในการทำการทดลองที่ต้องการศึกษาผลทางแสง ในขณะที่ GaAs และ InAs เป็นวัสดุประเภท Direct band gap ซึ่งพบการประยุกต์ใช้ในออปโตอิเล็กทรอนิกส์มากมาย สาเหตุของการเลือกใช้ GaAs มาทำการทดลองเนื่องจากเป็นแผ่นฐานราคาถูกลง การนำสิ่งประดิษฐ์จากการทดลองโดยใช้แผ่นฐาน GaAs มาสู่ภาคอุตสาหกรรมจึงใช้ต้นทุนต่ำกว่า InP ในการปลูกสารลงบนแผ่นฐาน GaAs เพื่อให้ได้ควอนตัมดอตซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีการประยุกต์หลากหลาย จำเป็นต้องทำให้ชั้นปลูกมีความเครียดแบบบีบอัด ซึ่งสามารถทำได้โดยปลูกสารที่มีค่าคงตัวมวลมากกว่า GaAs ซึ่งสารที่สนใจในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ InAs และ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ซึ่งสารทั้งหมดเป็นสาร Direct band gap

2.3 ความเครียดและการผ่อนคลายความเครียด

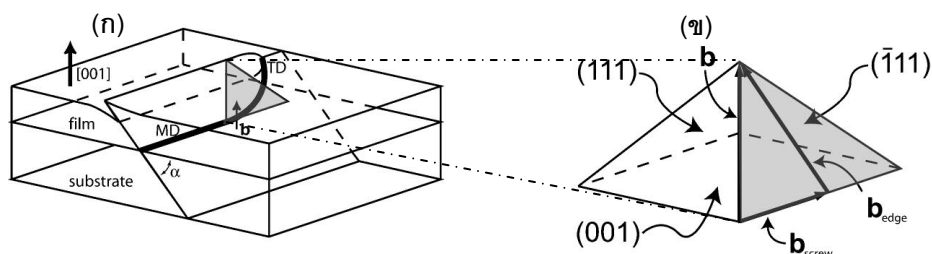
ความเครียดในวัสดุจะเกิดขึ้นเมื่อปลูกสารที่ต่างชนิดไปจากแผ่นฐาน โดยแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักคือ ความเครียดแบบบีบอัด (compressive strain) และความเครียดแบบขยายตัว (tensile strain) การปลูก InAs หรือ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ บน GaAs จะเกิดความเครียดบีบอัดสะสมอยู่ในชั้นปลูกและมีขนาดเพิ่มขึ้นตามความหนาที่ปลูก เมื่อความเครียดเกินกว่าค่าวิกฤติจะเกิดการผ่อนคลายความเครียด เช่น เกิดโครงสร้าง 3 มิติ (ควอนตัมดอต) กรณีที่ความเครียดสะสมในชั้นปลูกมีค่ามาก หรือ เกิดจุดบกพร่อง (defect) ซึ่งเป็นจุดที่อะตอมมีพันธะไม่สมบูรณ์บริเวณรอยต่อกรณีที่ความเครียดสะสมในชั้นปลูกมีค่าน้อย เป็นต้น จุดบกพร่องจะพัฒนามาเป็น dislocations และ surface step (ซึ่งอธิบายกลไกการเกิดในหัวข้อ 2.4) และเป็นต้นกำเนิดของแผ่นฐานลายตาราง (หัวข้อ 2.6)

2.4 Dislocations และ surface step

จุดบกพร่องในโครงผลึกแบ่งออกเป็น 4 ชนิด คือ จุดบกพร่องแบบจุด (point defect), แบบเส้น (line defect), แบบระนาบ (planar defect) และแบบปริมาตร (volume defect) จุดบกพร่องที่เป็นต้นกำเนิดของพื้นผิวลายตารางคือจุดบกพร่องแบบเส้น ในการปลูกผลึกจุดบกพร่องแบบเส้นเกิดขึ้นเมื่อชั้นปลูกและแผ่นฐานเป็นสารคนละชนิดกันจึงเกิดความเครียดขึ้น และมีอะตอมซึ่งสร้างพันธะไม่สมบูรณ์เรียงเป็นเส้นจึงจัดเป็นจุดบกพร่องแบบเส้นบริเวณรอยต่อ

ของชั้นปลูกและแผ่นฐาน เรียกจุดบกพร่องที่เป็นเส้นตามแนวของอะตอมที่มีพันธะไม่สมบูรณ์นี้ว่า misfit dislocation (MD)

ในการปลูก $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ บน GaAs ซึ่งเป็นระบบที่สนใจในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ MD จะเกิดในทิศ $[110]$ และ $[1-10]$ ความหนาแน่นของ MD จะแปรผันแบบเชิงเส้นตามสัดส่วนโมลของ In (x) และแปรผันตามแบบลอการิทึมตามความหนาของชั้น $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ [2] MD บริเวณรอยต่อจะเหนี่ยวนำให้เกิด threading dislocation (TD) ซึ่งเป็น dislocation แบบเส้นตามแนวของอะตอมที่มีพันธะไม่สมบูรณ์เช่นกัน แต่ต่างจาก MD คือทิศทางที่เกิด โดย TD เกิดในชั้นใน 2 ทิศคือ 1) ในทิศ $[001]$ เรียกว่า pure edge dislocation และ 2) ในทิศ $\langle 211 \rangle$ ซึ่งทำมุม 60° กับระนาบรอยต่อ ดังรูปที่ 2.2 รอยต่อเรียกว่า 60° dislocation TD ในทิศ $\langle 211 \rangle$ เกิดได้ง่ายกว่า pure edge dislocation เนื่องจากใช้พลังงานในการเกิดต่ำกว่า จึงมีจำนวนมากกว่า เมื่อก้าวถึง TD จึงมักหมายถึง 60° dislocation [45] TD ที่เกิดขึ้นมีผลมาจาก MD ซึ่งเป็นจุดบกพร่องแบบเส้นชนิด Edge dislocation และ Screw dislocation ดังรูปที่ 2.2 ทำให้เวกเตอร์ลัพธ์ของการเกิด TD มีทิศตามเวกเตอร์ \mathbf{b} [46]



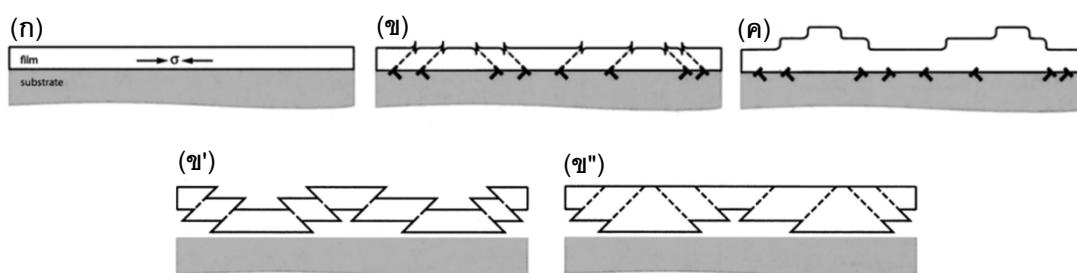
รูปที่ 2.2 ก. ลักษณะของ MD และ TD ที่เกิดขึ้นในการปลูกผลึก ข. dislocation vector (\mathbf{b}) ซึ่งเกิดจากการรวมกันของ edge dislocation และ screw dislocation [46]

ในกรณีที่ชั้นปลูกมีความต่างของค่าคงที่ผลึกมากหรือน้อย (สัดส่วนของ In สูงหรือต่ำ) จะส่งผลต่อชนิดของ TD ที่เกิดขึ้น M. Tamura et al., [47] แบ่งช่วงของสัดส่วนโมล In (x) ที่ส่งผลต่อชนิดของ TD ออกเป็น 3 ช่วงได้แก่ ช่วงที่ 1) $x < 0.2$ TD ที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบ 60° dislocation, ช่วงที่ 2) $x > 0.3$ TD จะเป็นแบบ pure edge dislocation และ ช่วงที่ 3) $0.2 < x < 0.3$ จะมี TD ทั้งแบบ 60° dislocation และ pure edge dislocation

TD เกิดจากการเปลี่ยนทิศทางการ glide ของ MD (จากทิศ [110] หรือ [1-10] เป็น [112] หรือ [11-2]) ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น หลังจากที่เกิด TD การ glide อาจเป็นไปในทิศทางเดิมจนถึงผิวหน้า หรืออาจเปลี่ยนทิศก็ได้ โดยทิศทางที่ TD เปลี่ยนไปได้ง่ายที่สุดคือทิศ [110] หรือ [1-10] ซึ่งเป็นทิศทางที่ขนานกับทิศของ MD บริเวณรอยต่อนั้นเอง เมื่อใช้ TEM จึงสามารถพบ MD ตลอดชั้นปลูก [47] TD ที่เกิดขึ้นนอกจากจะเกิดจากการเปลี่ยนทิศการ glide ของ MD แล้ว ยังเกิดจาก TD เดิมของแผ่นฐาน glide ผ่านรอยต่อขึ้นมาโดยไม่เปลี่ยนทิศทางกลายเป็น TD ที่ glide ผ่านชั้นปลูกได้ [48] เมื่อ TD glide ไปสู่ผิวหน้าจะทำให้บริเวณผิวหน้ามีลักษณะเป็นขั้น และเนื่องจาก TD ที่วิ่งขึ้นมาเป็นเส้นยาวที่เรียงตัวในทิศ [110] และ [1-10] ลักษณะขั้นบริเวณผิวหน้าจึงเป็นเส้นตัดกันในทิศ [110] และ [1-10] เมื่อปลูกชั้นฟิล์มให้หนามากขึ้นผิวหน้าจะกลายเป็นลอนในทั้ง 2 ทิศดังกล่าวและมีรูปร่างคล้ายลายตารางเมื่อมองจากด้านบน จึงถูกเรียกว่า ลายตาราง (cross-hatch pattern) ลายตารางจะเกิดขึ้นได้เมื่อควบคุมปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิด dislocation อย่างเหมาะสมเนื่องจาก TD ที่เกิดขึ้นและพัฒนาไปเป็นลอนที่ผิวหน้าได้คือ 60° dislocation เท่านั้น จึงจำเป็นต้องหาเงื่อนไขที่ pure edge dislocation เกิดน้อยที่สุด ซึ่งการเกิดขึ้นของลอนบริเวณผิวหน้ามีขั้นตอนการเกิดดังนี้ [49]

เมื่อชั้นปลูกบางโหมดการปลูกจะเป็นแบบ 2D ซึ่งมีความเครียดแบบบีบอัดสะสมอยู่ในชั้นฟิล์มดังรูปที่ 2.3 (ก) เมื่อปลูกต่อจนถึงค่าวิกฤติจะเกิดการผ่อนคลายความเครียด ทำให้เกิด TD ที่บริเวณ slip step และเกิด MD ขึ้นบริเวณรอยต่อดังรูปที่ 2.3 (ข) เมื่อเกิด step ที่ผิวหน้า จะเกิดกลไกในการกำจัด step โดยการขนถ่ายมวลในแนวระนาบ (lateral mass transport) จนผิวหน้ามีลักษณะเป็นลอนดังรูปที่ 2.3 (ค) กลไกในการกำจัด step เรียกว่า “Eshelby-like hypothetical process” มีขั้นตอนการเกิดขึ้นคือ MD ที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 2.3 (ข) ทำให้ระบบมีความเครียดลดลงแต่ในขณะเดียวกันก็สร้างความเครียดบริเวณรอยต่อให้มากขึ้น สมมุติฐานของ Eshelby อธิบายว่าฟิล์มที่มีความเครียดออกจากแผ่นฐานเนื่องจาก ความเครียดบริเวณรอยต่อมากขึ้นดังรูปที่ 2.3 (ข) จากนั้นบริเวณรอยต่อจะเปลี่ยนแปลงแบบยืดหยุ่นได้ (plastically) ทำให้ผิวหน้าเกิด surface step เมื่อปลูกต่อสารจะถูกปลูกลงบน step edge ก่อนและเกิด lateral mass transport ทำให้ผิวหน้าเรียบดังรูปที่ 2.3 (ข) จากนั้นรอยต่อจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอีกครั้งทำให้รอยต่อของชั้น

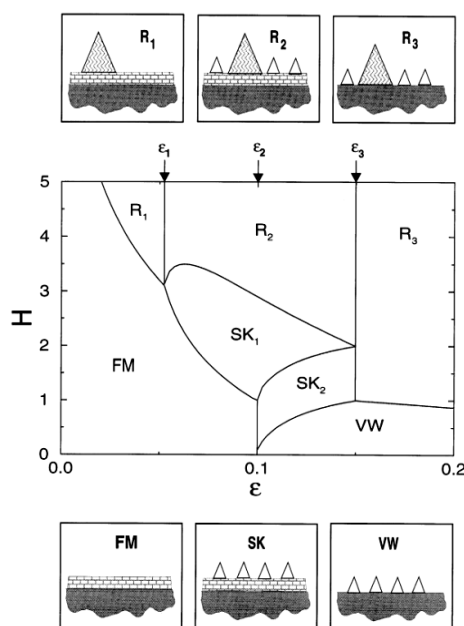
ปลูกติดกับแผ่นฐานเหมือนเดิมส่งผลให้ผิวหน้าบริเวณที่รอยต่อเปลี่ยนแปลงโดยเลื่อนต่ำลงจนผิวหน้ามีลักษณะเป็นลอนดังรูปที่ 2.3 (ค)



รูปที่ 2.3 กลไกการเกิดแผ่นฐานเสมือนลายตาราง [49]

2.5 ความคมตัด (Quantum dots, QDs)

การปลูกผลึกบนแผ่นฐานตั้งต้นสามารถเกิดเป็นโหมดต่างๆได้หลายโหมดซึ่งทำให้การก่อตัวของผลึกมีลักษณะแตกต่างกันออกไป ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อโหมดการปลูกมีสองประการ ได้แก่ 1) ความไม่เข้ากันของโครงผลึก (ϵ) ระหว่างสารที่ปลูก และ 2) ความหนาของชั้นผลึก (H)



รูปที่ 2.4 แผนภาพเฟสสมดุล (Equilibrium Phase Diagram) ในรูปของฟังก์ชันระหว่าง H (ความหนา) และ ϵ (ความเครียด) โดยภาพประกอบด้านบนและด้านล่างแสดงลักษณะผิวหน้าที่ 6 โหมด สามเหลี่ยมเล็กสีขาวแสดงเกาะที่มีเสถียรภาพ สามเหลี่ยมใหญ่ระบายสีแสดงเกาะที่โตเต็มที่ แต่ละโหมดถูกแบ่งด้วยเส้นขอบ ดังนี้ $H_{c1}(\epsilon) : FM-R_1, FM-SK_1$; $H_{c2}(\epsilon) : SK_1 - R_2$; $H_{c3}(\epsilon) : SK_2-SK_1$; $H_{c4}(\epsilon) : VW-SK_2, VW-R_3$ [50]

โหมดการปลูกที่เกิดจากความแตกต่างของความสัมพันธ์ระหว่าง ϵ -H ดังรูปที่ 2.4 (I. Daruka et., al) แบ่งเป็น 6 โหมดดังนี้

1. โหมด Frank–van de Merve (FM) เป็นโหมดของการปลูกชั้นฟิล์มแบบชั้นต่อชั้น (layer by layer) หรือแบบ 2 มิติ เนื่องจากความไม่เข้ากันของโครงผลึกมีค่าน้อย ($\epsilon < 0.1$) และชั้นผลึกบาง

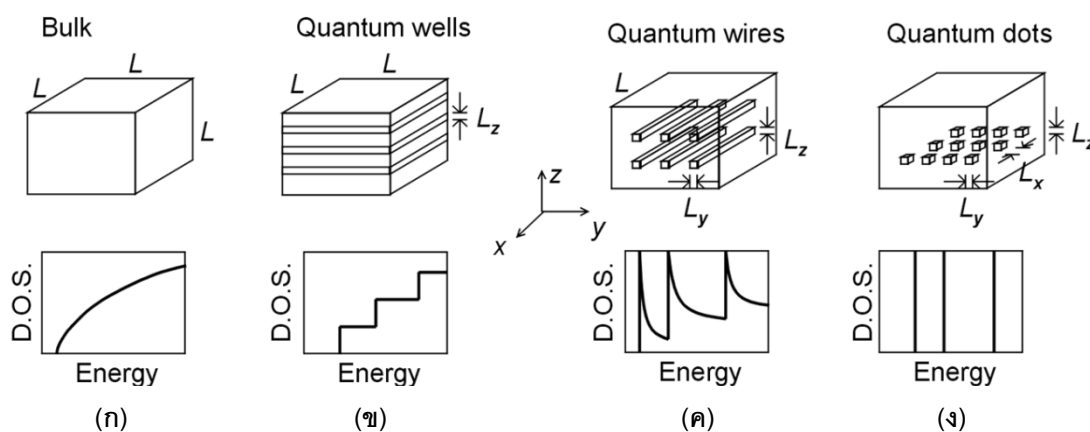
2. โหมด Volmer–Weber (VW) เป็นโหมดของการปลูกเกาะ (island growth) หรือแบบ 3 มิติ เนื่องจากความไม่เข้ากันของโครงผลึกมีค่ามาก ($\epsilon > 0.1$) เมื่อเริ่มปลูกผลึกจะคลายความเครียดก่อตัวเป็นเกาะทันที

3. โหมด Stranski–Krastanov (SK) เป็นโหมดของการปลูกเกาะและปลูกฟิล์มผสมกัน เนื่องจากความไม่เข้ากันของโครงผลึกมีค่าปานกลาง ($0.05 < \epsilon < 0.15$) โหมด SK เป็นโหมดการปลูกที่ชั้นที่ได้จะมีโครงสร้างแบบ 2 มิติ (โหมด FM) และ 3 มิติ (โหมด VW) รวมกัน โหมด SK สามารถแยกย่อยออกเป็น โหมด SK₁ และ SK₂ โหมด SK₁ เป็นโหมดที่ความเครียดเนื่องจากความไม่เข้ากันของโครงผลึกใกล้เคียงกับโหมด FM การก่อเริ่มต้นจากชั้นผลึกแบบ 2 มิติที่มีความเครียดอยู่ในโครงผลึกก่อน เรียกชั้นผลึก 2 มิตินี้ว่า Wetting layer (WL) เมื่อปลูกผลึกหนาขึ้นจึงเกิดการคลายความเครียดเป็นโครงสร้าง 3 มิติ ในขณะที่โหมด SK₂ เป็นโหมดที่ความเครียดเนื่องจากความไม่เข้ากันของโครงผลึกใกล้เคียงกับโหมด VW การก่อเริ่มต้นจากชั้นผลึกแบบ 3 มิติ เมื่อปลูกผลึกมากขึ้น สารที่ปลูกจะเกิดการก่อตัวแบบ 2 มิติในตำแหน่งที่ยังไม่มีโครงสร้าง 3 มิติอยู่ โครงสร้างสุดท้ายในโหมด SK₁ และ SK₂ จึงเหมือนกัน ต่างกันเพียงกลไกในการเข้าสู่รูปแบบสุดท้าย

4. โหมด R₁ เป็นโหมดที่ความเครียดเนื่องจากความไม่เข้ากันของโครงผลึกต่ำกว่า 0.05 ($\epsilon < \epsilon_1$, $\epsilon_1 = 0.05$) เป็นโหมดที่เกิดเนื่องจากการปลูกผลึกต่อจากโหมด FM จนความหนาที่ความเครียดหนึ่งๆมากกว่าความหนาวิกฤติ ($H > H_c(\epsilon)$) ชั้นผลึกจึงก่อตัวแบบ 3 มิติที่ใหญ่กว่าในโหมด SK และ VW เรียกว่าเกาะที่โตเต็มที่ (Ripening island) และมี WL อยู่ด้านล่างซึ่งเป็นโครงสร้างตัวต้นจากโหมด FM

5. โหมด R_3 เป็นโหมดที่ความเครียดเนื่องจากความไม่เข้ากันของโครงผลึกสูงกว่า 0.15 ($\epsilon > \epsilon_2$, $\epsilon_2 = 0.15$) เป็นโหมดที่เกิดเนื่องจากการปลูกผลึกต่อจากโหมด VW สารที่ปลูกใหม่ทำให้เกิดการรวมตัวเป็นเกาะที่โตเต็มที่ และมีเกาะเดิมขนาดเล็กอยู่ข้างๆ ซึ่งโครงสร้างตั้งต้นจากโหมด VW โหมด R_3 ไม่มี WL เนื่องจากเป็นการปลูกผลึกต่อเนื่องจากโหมด VW

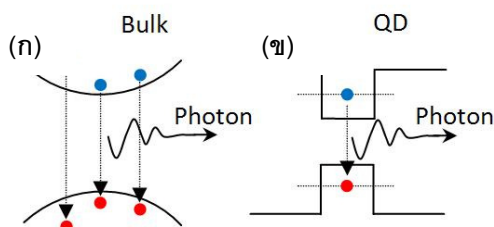
6. โหมด R_2 เป็นโหมดที่ความเครียดเนื่องจากความไม่เข้ากันของโครงผลึกมีค่าระหว่าง ϵ_1 ถึง ϵ_2 ($\epsilon_1 < \epsilon < \epsilon_2$, $\epsilon_1 = 0.05$, $\epsilon_2 = 0.15$) เป็นโหมดที่เกิดเนื่องจากการปลูกผลึกต่อจากโหมด SK ทำให้เกิดเกาะที่โตเต็มที่ นอกจากนี้ยังมีเกาะขนาดเล็กอยู่เคียงข้าง และมี WL อยู่ด้านล่าง เนื่องจากเป็นการปลูกผลึกต่อจากโหมด SK_1 หรือ SK_2/SK_1



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางกายภาพและความหนาแน่นสถานะของ (ก) ก้อนผลึก, (ข) ควอนตัมเวลล์, (ค) ควอนตัมไวร์ และ (ง) ควอนตัมดอต [51]

ควอนตัมดอตสารกึ่งตัวนำที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรจะมีสมบัติต่างๆ เช่น มิติความเป็นอิสระ, ความหนาแน่นสถานะ (Density of States, DOS) ต่างไปจากโครงสร้างแบบก้อนผลึก (Bulk) ของธาตุหรือสารประกอบชนิดเดียวกัน เมื่อใช้มิติความเป็นอิสระเป็นเกณฑ์จะสามารถจำแนกสารกึ่งตัวนำได้เป็นสี่กลุ่ม ได้แก่ 1) โครงสร้างแบบก้อนผลึกในรูปที่ 2.5 (ก) พหุจะมีมิติความเป็นอิสระในการเคลื่อนที่ 3 มิติ และมีความหนาแน่นสถานะแบบต่อเนื่อง 2) โครงสร้างแบบควอนตัมเวลล์ (Quantum well) ในรูปที่ 2.5 (ข) พหุจะมีมิติความเป็นอิสระในการเคลื่อนที่ 2 มิติ (เฉพาะ x และ y ในรูป) และมีความหนาแน่นสถานะแบบขั้นบันได 3) โครงสร้างแบบควอนตัมไวร์ (Quantum wire) ในรูปที่ 2.5 (ค) พหุจะมีมิติความเป็นอิสระในการเคลื่อนที่ 1 มิติ (เฉพาะ x ในรูป) และมีความหนาแน่นสถานะแบบไม่ต่อเนื่อง 4) โครงสร้างแบบควอนตัมดอต (Quantum dot)

ในรูปที่ 2.5 (ง) พาหะมีมิติความเป็นอิสระในการเคลื่อนที่ 0 มิติ และมีความหนาแน่นสถานะแบบไม่ต่อเนื่องโดยมีลักษณะเป็น Delta function ส่งผลให้ระดับพลังงานภายในของควอนตัมดอตถูกควอนไทซ์ (Quantized state)

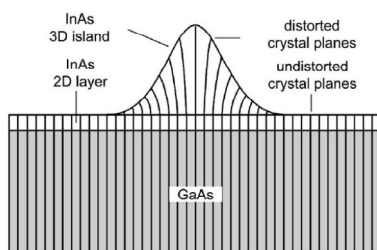


รูปที่ 2.6 (ก) การเปล่งแสงของก้อนผลึก (ข) การเปล่งแสงของควอนตัมดอต

การที่ควอนตัมดอตมีระดับพลังงานเพียงบางค่าทำให้มีลักษณะการเปล่งแสงแบบความเข้มสูงในช่วงความยาวคลื่นสั้นๆ ดังรูปที่ 2.6 (ข) ซึ่งต่างจากการเปล่งแสงของก้อนผลึกที่มีการเปล่งแสงในช่วงความยาวคลื่นกว้างแต่มีความเข้มน้อย เนื่องจากระดับพลังงานของก้อนผลึกนั้นพาหะสามารถมีได้ที่ระดับพลังงานสูงกว่า Conduction Band (สำหรับอิเล็กตรอน) และต่ำกว่า Valance Band (สำหรับโฮล) ดังรูปที่ 2.6 (ก) ทำให้ควอนตัมดอตสามารถประยุกต์ใช้ในสิ่งประดิษฐ์ทางแสงได้ นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมสมบัติของแสงที่เปล่งออกมา เช่น ความยาวคลื่นและสมบัติการโพลาไรซ์ของแสง โดยการเปลี่ยนลักษณะทางกายภาพของควอนตัมดอต เช่น ขนาดและการจัดเรียงตัวของควอนตัมดอต ตามลำดับ เป็นต้น

ควอนตัมดอตที่สนใจในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นควอนตัมดอต InAs ที่ประกอบตนเอง (Self-assembled) บนแผ่นฐาน GaAs ซึ่งเกิดจากวัสดุที่ปลูกและแผ่นฐานมีค่าคงตัวผลึกที่ต่างกันทำให้เกิดความไม่เข้ากันของผลึก ชั้น InAs ที่ปลูกจะเกิดความเครียดแบบบีบอัดเนื่องจาก ค่าคงตัวผลึกของ InAs ($6.0573 \text{ }^{\circ}\text{A}$) มากกว่าของ GaAs ($5.6533 \text{ }^{\circ}\text{A}$) การประกอบตนเองของควอนตัมดอตสามารถตรวจสอบได้จากแผนภาพสมดุลเฟสในรูปที่ 2.4 ความเครียดเนื่องจากการปลูก InAs ลงบน GaAs มีค่า 7.2 % หรือ $\epsilon = 0.072$ จึงจัดอยู่ในโหมด SK ซึ่งเป็นโหมดที่ประกอบด้วยโครงสร้างทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติเมื่อปลูก InAs หนามากกว่าความหนาวิกฤติ (critical thickness, H_c) จะได้ InAs ที่ก่อตัวใน 3 มิติหรือเป็น “ควอนตัมดอต” H_c ในทางทฤษฎีคือ 1.8 ML (จากรูปที่ 2.4) สอดคล้องกับค่าที่วัดได้จริงที่อุณหภูมิแผ่นฐาน 500°C คือ 1.7 ML

การจัดเรียงความตมดอตในแนวระนาบ (lateral alignment) ทำได้โดยหลายเทคนิค ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือ การปลูกควอนตัมดอตลงบนแผ่นฐานลายตาราง ควอนตัมดอตที่ปลูกจะจัดเรียงตัวตามเส้นลายตารางที่เกิดขึ้นทั่วทั้งผิวหน้า การเตรียมแผ่นฐานลายตารางให้มีความหนาแน่นของเส้นลายตารางตามที่ต้องการมีความสำคัญเนื่องจากจะกระทบต่อการจัดเรียงควอนตัมดอตด้านบน



รูปที่ 2.7 การเกิดควอนตัมดอต InAs บนแผ่นฐาน GaAs [52]

2.6 แผ่นฐานลายตาราง (Cross-hatch pattern substrate)

แผ่นฐานลายตารางเกิดจากการปลูกชั้นผลึกที่ค่าคงตัวผลึกแตกต่างจากแผ่นฐานเล็กน้อย (<1.5%) dislocations ที่ผิวรอยต่อของสารทั้งสองจะเคลื่อนที่ไปยังผิวหน้าของชั้นปลูกเกิดเป็นลายตารางทั่วผิวหน้า ธรรมชาติของการเกิด dislocation เป็นกระบวนการทางสถิติเกิดขึ้นแบบสุ่ม ความถี่และตำแหน่งของลายตารางบนผิวหน้าจึงไม่แน่นอน แต่ความหนาแน่นของลายตารางสามารถควบคุมอย่างหยาบได้จากกระบวนการปลูก โดยเฉพาะการควบคุมขนาดของความเครียด (โดยการควบคุมสัดส่วนโมลของ In ใน $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) และความหนาของชั้นปลูก ลายตารางจะเกิดขึ้นที่ผิวหน้าได้เมื่อความหนาของชั้นปลูกมากกว่าความหนาวิกฤติ กรณีที่ความหนาน้อยกว่าความหนาวิกฤติผลึกจะสะสมความเครียดและยังไม่เกิด dislocation ความหนาวิกฤติจะสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับสัดส่วนของ In เป็นสำคัญ สำหรับการปลูก InGaAs บน GaAs ความหนาวิกฤติของการเกิด 60° dislocation (h_{c60}) จะถูกกำหนดโดยตัวแปรต่างๆ ดังชุดสมการ [43]

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

เมื่อ

$$G = C_{44} - \frac{1}{3}(2C_{44} + C_{12} - C_{11}) \quad (2.3)$$

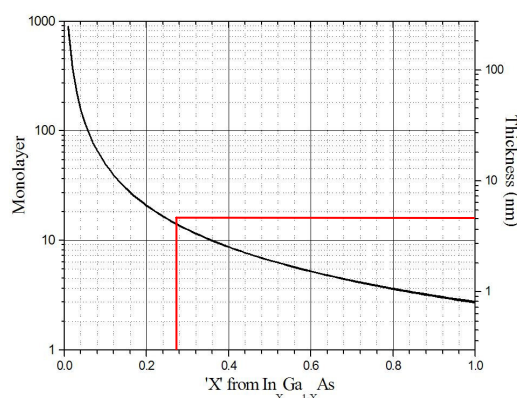
$$b = \frac{\sqrt{2}}{2} a_{\text{InGaAs}} \quad (2.4)$$

$$\nu = \frac{C_{12}}{C_{12}+C_{11}} \quad (2.5)$$

$$Y = C_{11} + C_{12} - 2 \frac{C_{12}^2}{C_{11}} \quad (2.6)$$

$$f = \frac{a_{InGaAs} - a_{GaAs}}{a_{InGaAs}} \quad (2.7)$$

โดย ν คือ Poisson ratio, G คือ Anisotropic factor, C คือ Elastic constant และ Y คือ Young's modulus ตัวอย่างการคำนวณความหนาวิกฤติ เช่น $In_{0.15}Ga_{0.85}As$ บน GaAs จะมีค่า $h_c = 8.75$ nm จากรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่าเมื่อสัดส่วน In ใน $In_xGa_{1-x}As$ สูงขึ้น ความหนาวิกฤติจะลดลง



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาวิกฤติของชั้น InGaAs (Monolayer) ที่ปลูกบนชั้น GaAs กับสัดส่วนของ In [71]

แผ่นฐานลายตารางนอกจากจะสร้างได้จากคู่ของสารประกอบในหมู่ III-V ดังกล่าวข้างต้นแล้ว ยังสามารถสร้างได้จากคู่ของสารประกอบ IV-IV เช่น SiGe/Si ([34]) เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อสารในระบบ III-V เกิดลายตารางจะมีสมบัติของเส้นลายใน 2 ทิศที่ต่างกัน เช่น ในระบบ InGaAs/GaAs เส้นลายตารางในทิศ [1-10] จะสูงกว่าในทิศ [110] เนื่องจากสารที่เป็นแกน (core) ต่างกัน [54] โดยสารแกนในทิศ [1-10] คือ As และสารแกนในทิศ [110] คือ Ga สมบัติของเส้นลายตารางจึงต่างกัน ในขณะที่เส้นลายตารางของสารในระบบ IV-IV จะเหมือนกันใน 2 ทิศทางที่ตั้งฉากกันเนื่องจากมีสารแกนเดียวกัน

2.7 การจัดเรียงควอนตัมดอต

การจัดเรียงควอนตัมดอตมีประโยชน์ในการนำสิ่งประดิษฐ์ไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ที่ต้องการการจัดเรียงที่แน่นอน เช่น QCA, bit-patterned media เป็นต้น ความพยายามในการจัดเรียงควอนตัมดอตจึงเป็นหัวข้อสำคัญในการทำวิจัย การจัดเรียงควอนตัมดอตสามารถทำได้หลายวิธี โดยวิธีที่ใช้ในการจัดเรียงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือการใช้แผ่นฐานซึ่งมีสนามความเครียดเฉพาะตัวมาบังคับตำแหน่งของควอนตัมดอตดังรายละเอียดในหัวข้อ 2.7.2 ส่วนการจัดเรียงควอนตัมดอตได้โดยวิธีอื่นๆ อีก ดังกล่าวรายละเอียดในหัวข้อ 2.7.1

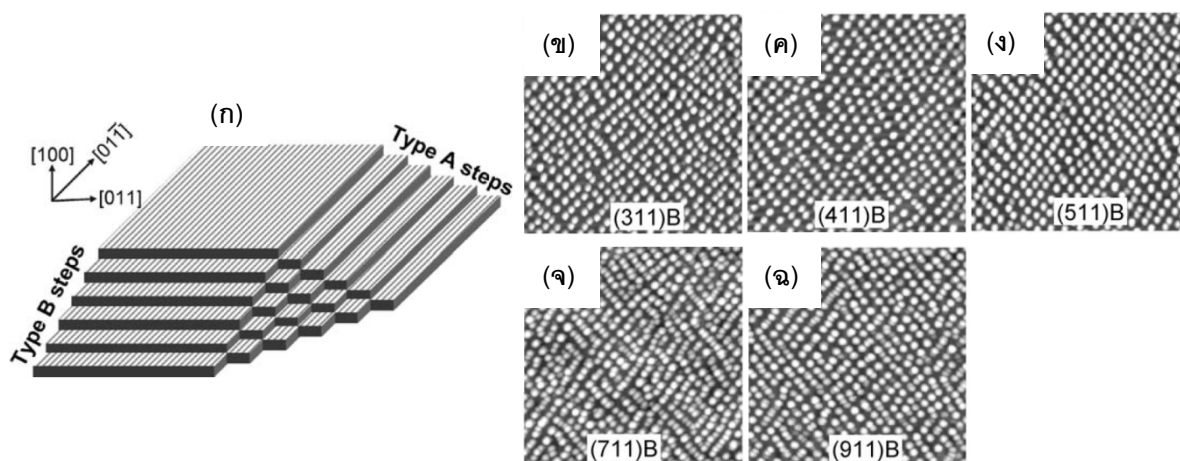
2.7.1 การกำหนดลวดลายบนแผ่นฐานด้วยวิธีอื่น

เทคนิคหรือวิธีจัดเรียงควอนตัมดอตในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว ยังมีเทคนิคอื่นที่สามารถจัดเรียงควอนตัมดอตได้อื่นๆ ที่สำคัญ ได้แก่ ก) pre-patterning substrate [6] ซึ่งจัดเป็นเทคนิค top-down โดยการจัดเรียงควอนตัมดอตด้วยวิธีนี้มีขั้นตอนดังนี้ 1) เคลือบ Ga_2O_3 ลงบนแผ่นฐาน GaAs หนา 40 nm ด้วยวิธี radio frequency sputtering 2) ใช้เทคนิค E-beam lithography เพื่อกำหนดลวดลายบนแผ่น Ga_2O_3 ตามที่ออกแบบไว้ เป็นการเสร็จกระบวนการ pre-patterning จากนั้นปลูกควอนตัมดอต InGaAs ลงบนแผ่นดังกล่าวด้วยเครื่อง MBE ควอนตัมดอต InGaAs จะจัดเรียงอยู่ในลวดลายที่วาดไว้ตามรูปที่ 2.9 ควอนตัมดอตที่ได้จากวิธีนี้เป็นควอนตัมดอตที่เกิดการรวมตัวกัน 2-3 ควอนตัมดอต อยู่ในช่องสี่เหลี่ยมที่วาดลวดลายไว้ การจัดเรียงควอนตัมดอตด้วยวิธีนี้จะได้รูปแบบการจัดเรียงที่แม่นยำมากกว่าวิธี strained engineering template เนื่องจากการจัดเรียงเป็นไปตามลวดลายที่วาดไว้ซึ่งไม่สามารถบังคับการเกิดได้ด้วยวิธี strained engineering template แต่เป็นวิธีที่มี defect จากขั้นตอน pre-patterning โดย E-beam นอกจากการจัดเรียงแบบ pre-patterning ในหมู่ III-V แล้ว ยังมีการจัดเรียงแบบเดียวกันในระบบสาร IV-IV ด้วยโดยใช้แผ่นฐาน Si ควบ SiO_2 ลงบนแผ่นฐาน จากนั้นทำลวดลายลงบน SiO_2 เมื่อเสร็จกระบวนการ pre-patterning จึงปลูกควอนตัมดอต Ge ลงบนแผ่นฐานที่ทำ pre-patterning แล้ว ส่งผลให้ควอนตัมดอต Ge จัดเรียงตัวตามลวดลายบน SiO_2 [7]



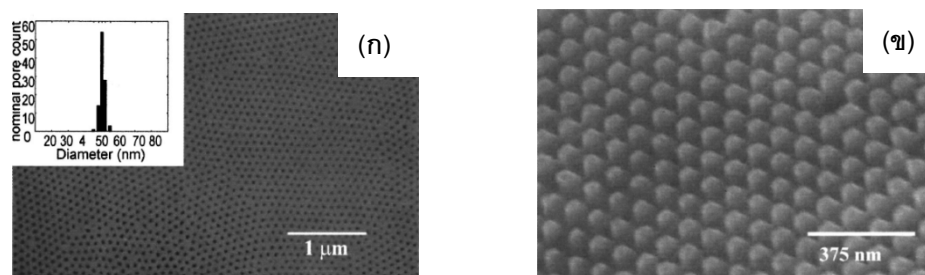
รูปที่ 2.9 ควอนตัมดอต InGaAs ที่ปลูกบนแผ่นฐานที่ถูกทำละลายก่อนหน้าด้วย Ga_2O_3 ช่องที่เกิดการวางตัวของควอนตัมดอตประมาณ $0.2 \times 0.15 \mu\text{m}$ [6]

ข) high index substrate เป็นวิธีในการจัดเรียงโดยใช้แผ่นฐาน GaAs ที่มีขั้นตอนการตัดแผ่นฐานแบบพิเศษทำให้ผลึกมีระนาบผิดจากปกติ [55] เช่น แผ่นฐานที่มี index เป็น (311), (411), (511), (711) และ (911) ส่งผลให้ควอนตัมดอตที่มีการจัดเรียงที่ดีขึ้นกว่าการปลูกบนแผ่นฐานปกติ (100) ดังรูปที่ 2.10 แต่เนื่องจากเป็นแผ่นฐานที่ต้องการขั้นตอนการตัดแบบพิเศษจึงทำให้มีราคาแพง ประกอบกับผลของการจัดเรียงควอนตัมดอตที่ไม่สามารถควบคุมได้สมบูรณ์จึงเป็นวิธีที่ไม่นิยมนัก



รูปที่ 2.10 (ก) ภาพตัวอย่างแผ่นฐานที่เป็นขั้นเนื่องจากการตัดแบบพิเศษ, (ข) AFM ของควอนตัมดอตที่ปลูกบนแผ่นฐานที่มี index (311), (ค) (411), (ง) (511), (จ) (711) และ (ฉ) (911) [55]

ค) Anodic membrane template เป็นวิธีที่ใช้ anodic aluminum oxide (AAO) เป็นแม่แบบสร้างโครงสร้างนาโนซึ่งประยุกต์ใช้ได้ทั้งในสารกึ่งตัวนำ, โลหะ และสารประกอบ (composite material) ขั้นตอนของการกำหนดลวดลายบนแผ่นฐานด้วยวิธีนี้เป็น 3 ขั้นตอน 1) ใช้เทคนิค anodization ในการสร้างรูนาโน (nanopore) โดยรูนาโนที่ได้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 nm ระยะห่างระหว่างรู 100 nm AAO ที่ได้มีลักษณะเป็นรูนาโนช่องเปิดหนึ่งด้านและเป็นส่วนที่ติดกับ Al_2O_3 สามารถกำจัดออกได้โดยกระบวนการกัด (etching) 2) นำ AAO ที่ได้ซึ่งเป็นรูเปิดทั้ง 2 ด้านไปวางบนแผ่นฐานที่ต้องการทำโครงสร้างนาโนจากนั้นกัด (etch) ทำให้แผ่นฐานที่ไม่มี AAO ปกคลุมอยู่โดนกัดเป็นหลุมและมีลวดลายเหมือน AAO หลังจากได้ลวดลายบนแผ่นฐานแล้วจึงนำแผ่น AAO ออก 3) ปลุกสารที่ต้องการลงบนแผ่นฐานที่ได้โดยสารที่ปลุกจะก่อตัวบนหลุมบริเวณผิวหน้าก่อนทำให้เกิดเป็นโครงสร้างควอนตัมดอตที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะห่างของนาโนดอตเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะห่างของรูนาโนบน AAO ซึ่งถูกใช้เป็นแม่แบบ [9]

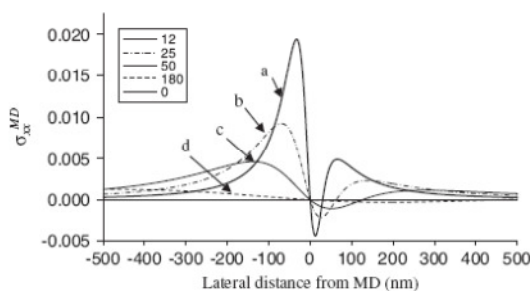


รูปที่ 2.11 (ก) ภาพ SEM ของ Si หลังจากการสร้างรูนาโน (ข) ภาพ SEM แสดงนาโนดอตของ Si [9]

2.7.2 Strain engineering template

แผ่นฐานที่มี profile ความเครียดแตกต่างกันที่บริเวณต่างๆ สามารถส่งผลต่อโครงสร้างที่ปลุกทับด้านบน กรณีที่ profile ความเครียดมีความเป็นระเบียบสามารถใช้แผ่นฐานดังกล่าวเป็นประโยชน์ในการบังคับโครงสร้างที่ปลุกทับด้านบนได้ แผ่นฐานลายตารางเป็นแผ่นฐานที่มี profile ความเครียดเฉพาะตัวเมื่อนำมาใช้บังคับควอนตัมดอตที่ปลุกทับด้านบนก็จะได้ควอนตัมดอตที่มีลักษณะการจัดเรียงเฉพาะตัวตามแผ่นฐานไปด้วย เมื่อปลุกโครงสร้าง $In_{0.15}Ga_{0.85}As$ ที่ความหนาต่างๆกัน คือ 12, 25, 50 และ 150 nm บน GaAs จะทำให้ profile ของความเครียดบริเวณพื้นผิวเปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 2.12 ที่ความหนาน้อยความเครียดที่พื้นผิวมีค่าต่างกันมาก dislocation ที่วิ่งขึ้นมาจนปรากฏที่ผิวหน้ามีฝั่งหนึ่งเป็น tensile strain และอีกฝั่งเป็น compressive strain ในขณะที่ปลุกอะตอมของ In อพยพไปบริเวณที่เป็น tensile strain และอะตอมของ Ga อพยพไป

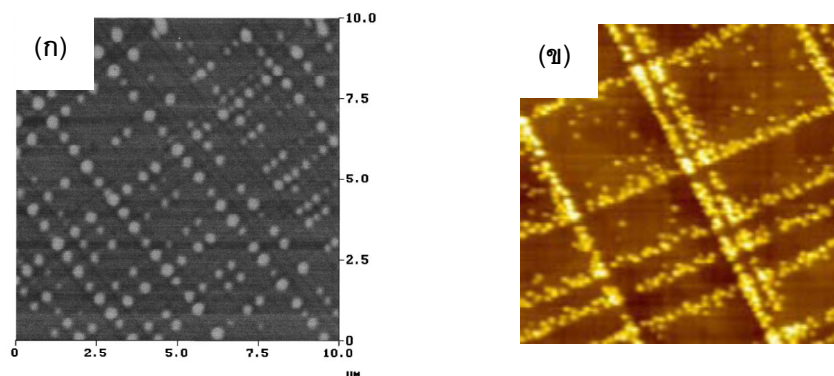
บริเวณที่เป็น compressive strain ทำให้บริเวณที่มี In มากเป็นเนินสูงขึ้นเนื่องจากอะตอมของ In มีขนาดใหญ่กว่า ส่วนบริเวณที่มี Ga มากจะเป็นแอ่งลงไป แต่เมื่อปลูกชั้น InGaAs หนาขึ้น ลักษณะของความเครียดจะตกลงอย่างรวดเร็วดังรูป ซึ่งเป็นลักษณะความเครียดของชั้นงานหนา 150 nm แทบไม่เห็นความต่างของความเครียดระหว่างฝั่งที่เป็น compressive strain และ tensile strain เนื่องจากเมื่อปลูก InGaAs หนาขึ้น ทำให้มีอะตอมของ In ในฝั่ง tensile strain มากและแผ่ ออกเป็นบริเวณกว้างส่งผลให้ tensile strain มีค่าน้อยลง และเกิดปรากฏการณ์นี้เช่นเดียวกับฝั่ง compressive strain ทำให้ความเครียดบนผิวหน้าลดลงมากเมื่อปลูก InGaAs หนาขึ้น ซึ่งส่งผล กระทบอย่างมากกับควอนตัมดอต InAs ที่จะปลูกด้านบน เนื่องจากเป็นควอนตัมดอต InAs จึง เลือกลง deposit บริเวณที่มีค่าคงที่ผลึกใกล้เคียงกับ InAs มากที่สุด เมื่อดูจาก profile จะเป็น ตำแหน่งสูงสุดของฝั่ง tensile strain ซึ่งมีลักษณะเด่นชัดในชั้นงาน 12 nm แต่ถ้าปลูกควอนตัม ดอต InAs ลงบนชั้นงานหนา 150 nm จะเกิดควอนตัมดอตเป็นแถบกว้างเนื่องจากไม่มีความ แตกต่างของ strain ที่ชัดเจน หรือสามารถกล่าวได้ว่ามีตำแหน่งที่ควอนตัมดอตเหมาะที่จะ deposit เป็นบริเวณกว้างจนไม่สามารถเห็นการเรียงตัวของควอนตัมดอตได้ ฉะนั้นการเลือก ความหนาในการทำแผ่นฐานเสมือนลายตารางให้เหมาะสมจึงสำคัญต่อการจัดเรียงควอนตัมดอต ในแนวระนาบ



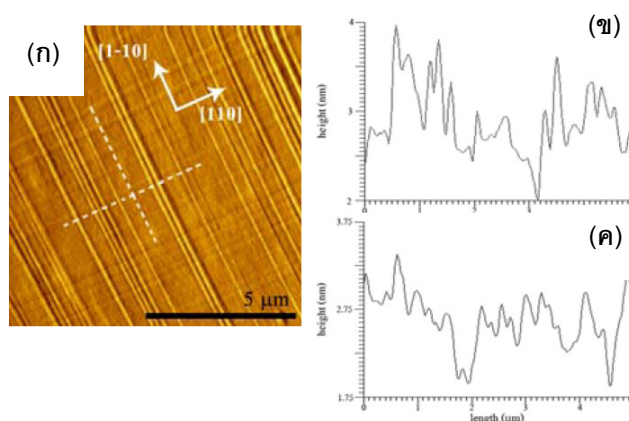
รูปที่ 2.12 ความเครียดบริเวณพื้นผิวของชั้นลายตาราง $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ เมื่อความหนาเป็น 12, 25, 50, และ 180 nm [56]

เมื่อปลูกควอนตัมดอต ลงบนแผ่นฐานลายตาราง ส่งผลให้ควอนตัมดอตมีการจัดเรียงตัว ใน 2 ทิศทางคือ [1-10] และ [110] เนื่องจากเป็นทิศที่มีความเครียดสูงดังรูปที่ 2.12 การวิจัยที่เป็น งานจุดประกายการจัดเรียงควอนตัมดอตคือ Shiryaev et., al [57] และ Xie et., al [34] โดยเป็น การการจัดเรียงควอนตัมดอต Ge บนแผ่นฐานลายตาราง SiGe ควอนตัมดอตที่ได้เป็นควอนตัม

ดอตที่จัดเรียงอย่างสมมาตรในทิศทาง [1-10] และ [110] เนื่องจากแผ่นฐานลายตารางมีลักษณะสมมาตรในทิศทั้งสองดังรูปที่ 2.13 (ก) ในขณะที่การปลูกควอนตัมดอต InAs บนแผ่นฐานลายตาราง InGaAs ให้ลักษณะควอนตัมดอตที่มีความไม่สมมาตรในทิศทั้งสองดังรูปที่ 2.13 (ข) เนื่องจาก diffusion length ของ In ในทิศ [1-10] และ [110] ไม่เท่ากัน [37] ทำให้ความสูงของลอนในทิศ [1-10] มากกว่าทิศ [110] ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 รูปเปรียบเทียบควอนตัมดอตบน Strain engineering template ระหว่างระบบ(ก) IV-IV [33] และ(ข) III-V [54]



รูปที่ 2.14 (ก) รูป AFM ของแผ่นฐานลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$, (ข) Line scan ผิวหน้าในทิศ [110], (ค) Line scan ผิวหน้าในทิศ [1-10] [54]

งานวิจัยการปลูก InAs ที่จัดเรียงตนเองบนแผ่นฐานลายตารางของห้องปฏิบัติการสารวิจัยกึ่งตัวนำ ได้เริ่มมาตั้งแต่ C. C. Thet ซึ่งได้แสดงว่าควอนตัมดอต InAs ที่ปลูกบนแผ่นฐานลายตาราง $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ ซึ่งมีความหนาของชั้นลายตารางที่ต่างกัน (50, 100 และ 150 nm) ส่งผลต่อการจัดเรียงของควอนตัมดอตด้านบน โดยควอนตัมดอตที่มีลักษณะเป็นเส้นมากที่สุดคือควอนตัม

ดอตที่ปลูกบนชั้นลายตารางหนา 50 nm [58] นอกจากนี้การขัดจังหวะการปลูก (growth interruption) ก็ส่งผลต่อการจัดเรียงของควอนตัมดอตเช่นกัน โดยพบว่าเวลาในการขัดจังหวะการปลูกที่เหมาะสมคือ 30 s. [32] ต่อมา T. Limwongse ได้แสดงให้เห็นเพิ่มเติมถึงวิวัฒนาการของการเกิดควอนตัมดอต InAs บนแผ่นฐานลายตารางโดยมีลำดับขั้นการเกิดดังนี้ 1) จุดตัดระหว่างเส้นลายตารางทิศ [1-10] และ [110], 2) บนแนวเส้นลายตารางในทิศ [1-10] 3), บนแนวเส้นลายตารางในทิศ [110] และ 4) บริเวณพื้นที่ว่าง [54] ตามมาด้วย M. Maitreeboiraks ซึ่งได้ศึกษาการจัดเรียงควอนตัมดอต InAs หลังจากการกลบชั้นลายตารางด้วย GaAs เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงของความเครียดบริเวณพื้นผิว [59] แต่ทั้งหมดยังมีได้ศึกษาสมบัติเชิงแสงของควอนตัมดอตอย่างละเอียด อีกทั้งยังมีได้ศึกษาผลของการอบ annealing วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แตกต่างจากงานในอดีตใน 2 ประเด็นหลักคือ 1) การศึกษาสมบัติเชิงแสง และ 2) ศึกษาผลจากการอบ (annealing)

บทที่ 3

การสังเคราะห์และวัดลักษณะสมบัติของวัสดุ

ชิ้นงานถูกสังเคราะห์ขึ้นโดยเครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy, MBE) ซึ่งทำงานโดยปล่อยลำโมเลกุลของสารที่ต้องการลงบนผิวหน้าชิ้นงานที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดการก่อตัวของสารนั้นบนผิวหน้าชิ้นงาน เครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุลสามารถควบคุมปริมาณของสารที่ต้องการสังเคราะห์ได้อย่างแม่นยำ ทำให้ชิ้นงานมีความหนา, สัดส่วนโมลของสารประกอบ และอัตราการปลูกตามการทดลองที่ออกแบบไว้ นอกจากนี้ชิ้นงานที่ได้ยังมีคุณภาพดีเนื่องจากเป็นการปลูกภายใต้ภาวะสุญญากาศสูงยิ่ง (Ultra-high vacuum) ทำให้เทคนิคการปลูกผลึกแบบลำโมเลกุลได้รับความนิยมในการปลูกโครงสร้างที่ต้องการความละเอียดสูง เช่น โครงสร้างนาโนต่างๆ โดยเฉพาะโครงสร้างควอนตัมดอทบนลายตารางซึ่งเป็นแก่นของงานในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

เนื้อหาในบทนี้แบ่งออกเป็น 4 หัวข้อ ได้แก่ 3.1) ระบบปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล กล่าวถึงรายละเอียดและวิธีการใช้งานเครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุลรวมถึงเครื่องวัดแบบติดตั้งภายในระบบ (in-situ) 3.2) การเตรียมชิ้นงานและกำหนดเงื่อนไขการปลูก กล่าวถึงกระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นก่อนการปลูกและขณะทำการปลูกว่ามีลำดับขั้นและวิธีดำเนินการอย่างไร 3.3) การปลูกชั้นผลึก กล่าวถึงรายละเอียดการปลูกผลึกที่สำคัญและใช้ในการปลูกโครงสร้างที่ทำวิทยานิพนธ์ และหัวข้อ 3.4) ลักษณะสมบัติซึ่งเป็นหัวข้อสุดท้ายในบทนี้ กล่าวเกี่ยวกับการวัดลักษณะสมบัติโดยเครื่องวัดภายนอก (ex-situ) โดยเครื่องวัดลักษณะสมบัติภายนอกที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แก่ การวัดสัณฐานวิทยาพื้นผิว (Atomic Force Microscopy, AFM) และการวัดสมบัติเชิงแสง (Photoluminescence, PL)

3.1 ระบบปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล

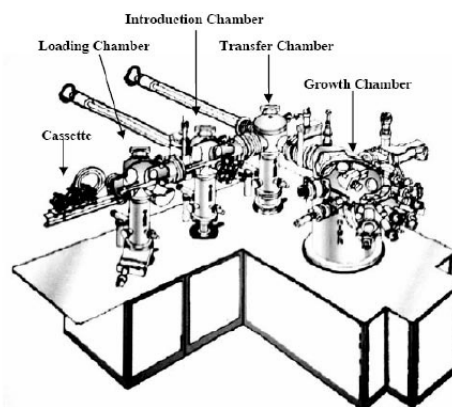
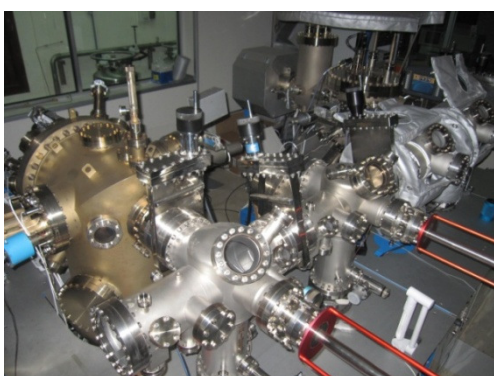
การปลูกชั้นผลึกเดี่ยว (Epitaxial growth) เป็นการสังเคราะห์สารโดยใช้แผ่นฐานตั้งต้นเป็นผลึกเดี่ยว ทำให้โครงสร้างที่ได้เป็นผลึกเดี่ยวและมีการจัดเรียงตัวเช่นเดียวกับแผ่นฐาน การสังเคราะห์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การปลูกผลึกแบบสถานะของเหลว (Liquid Phase Epitaxy, LPE) แบบสถานะไอ (Vapor Phase Epitaxy) และแบบลำโมเลกุล เป็นต้น การสังเคราะห์แต่ละแบบมีข้อดี-ข้อเสียต่างกัน แต่การปลูกผลึกแบบลำโมเลกุลจัดเป็นการสังเคราะห์ที่

มีความละเอียดสูงสุดเนื่องจากสามารถควบคุมอัตราการปลูกได้ในระดับชั้นโมโนต่อวินาที (ML/s) จึงเหมาะกับการปลูกสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์และทางแสงที่ต้องการความแม่นยำและมีความบริสุทธิ์สูง แต่การปลูกผลึกด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่ทำงานภายใต้ภาวะสุญญากาศสูงยิ่ง ซึ่งมีขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงานหลายขั้นตอนที่ต้องระมัดระวังด้านความสะอาดอย่างเคร่งครัด

ระบบปลูกผลึกแบบลำโมเลกุลที่ใช้สังเคราะห์ชิ้นงานประกอบด้วย เครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุลรุ่น RIBER 32P เป็นเครื่องมือหลักในการสังเคราะห์ชิ้นงาน ในขณะที่สังเคราะห์จำเป็นต้องมีเครื่องมือวัดแบบติดตั้งภายในเพื่อตรวจสอบสถานะของสารในห้องปลูก และสถานะผิวหน้าของชิ้นงาน เครื่องมือตรวจสอบสถานะของสารในห้องปลูก คือ เกจวัดความดันไอ และ Quadrupole Mass Spectrometer (QMS) ส่วนเครื่องมือตรวจสอบลักษณะผิวหน้าขณะสังเคราะห์ คือ Reflection high-energy electron diffraction (RHEED)

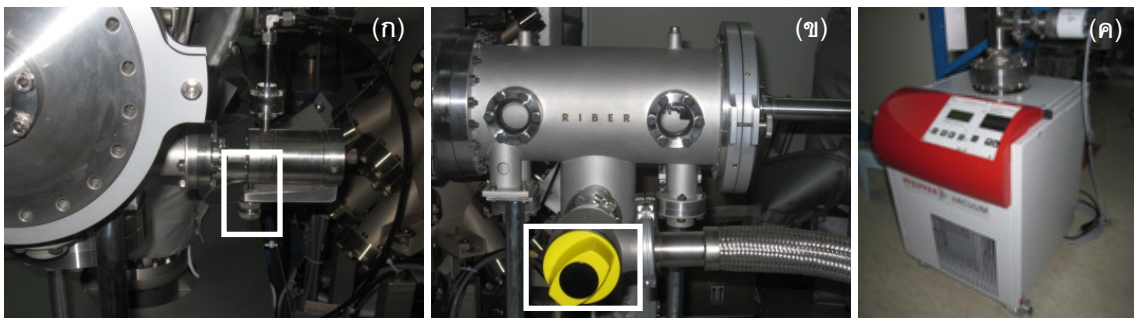
3.1.1 เครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล

เครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล ประกอบด้วยห้อง (Chamber) 4 ห้องดังแสดงในรูปที่ 3.1 ทุกห้องจะแยกออกจากกันโดยมีประตู (Gate) กั้น ทำให้มีระบบสุญญากาศที่เป็นอิสระต่อกัน โดยห้องทั้ง 4 ห้องมีรายละเอียดในการทำงานแตกต่างกันดังนี้



รูปที่ 3.1 เครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล RIBER 32P

1) ห้องโหลด (Loading Chamber) เป็นห้องเดียวของระบบที่มีทั้งภาวะที่เป็นบรรยากาศและสุญญากาศ ห้องโหลดจะเป็นภาวะบรรยากาศเมื่อต้องการรับรถเข้าสู่หรือส่งรถออกจากระบบ และเป็นภาวะสุญญากาศเมื่อต้องการขนถ่ายรถระหว่างห้องโหลดกับห้องอินโทรดักชัน (Introduction Chamber)



รูปที่ 3.2 (ก) วาล์วก๊าซไนโตรเจน, (ข) วาล์วเชื่อมต่อห้องไหลดกับเทอร์โบปั๊ม และ (ค) เทอร์โบปั๊ม

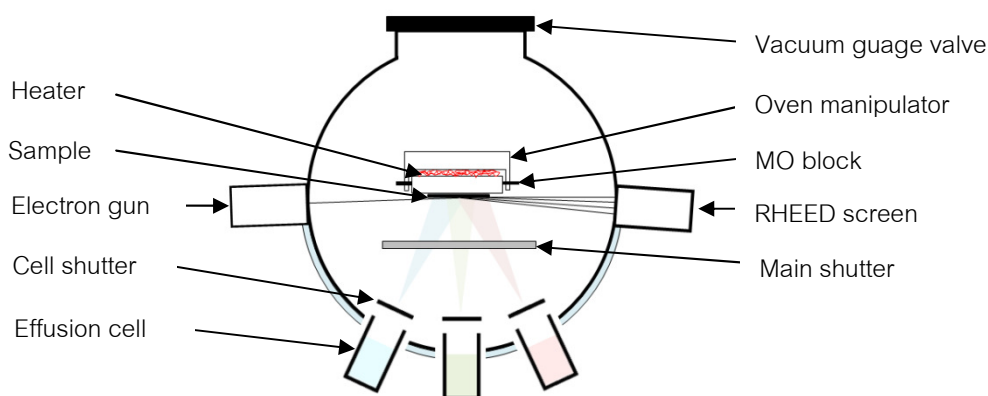
การเปลี่ยนจากภาวะสุญญากาศเป็นภาวะบรรยากาศเพื่อเชื่อมต่อห้องไหลดกับอากาศภายนอกทำโดยเปิดวาล์วของก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่ห้องไหลดดังรูปที่ 3.2 (ก) เพื่อเพิ่มความดันของห้องให้เท่ากับความดันบรรยากาศ ในขณะที่เปิดก๊าซไนโตรเจนห้ามเปิดประตูสำหรับเชื่อมต่อระหว่างห้องไหลดและห้องอินโทรดักชัน รวมถึงห้ามเปิดวาล์วของเทอร์โบปั๊ม (turbo pump) ดังรูปที่ 3.2 (ข) ในขณะที่การเปลี่ยนจากภาวะอากาศเป็นภาวะสุญญากาศเพื่อเชื่อมต่อห้องไหลดและห้องอินโทรดักชันทำโดยเปิดวาล์วของเทอร์โบปั๊มและเปิดปั๊ม ควรตรวจสอบก๊าซไนโตรเจนและจุดเชื่อมต่อกับอากาศภายนอกว่าปิดสนิทก่อนเปิดปั๊ม

เทอร์โบปั๊มที่ใช้เพื่อให้ห้องไหลดเป็นสุญญากาศจะมีปั๊มไดอะแฟรม (diaphragm pump) อยู่ในตัว ขั้นตอนแรกของการลดความดันทำโดยการเปิดปั๊มไดอะแฟรมก่อน จนกระทั่งความดันอากาศลดลงเหลือ 1 torr ซึ่งความดันขนาดนี้ยังคงสูงเกินไปในการเชื่อมต่อห้องไหลดกับห้องอินโทรดักชัน จึงต้องใช้เทอร์โบปั๊มช่วยในการลดความดันอากาศลงมาอีก โดยเริ่มเปิดเมื่อความดันในห้องไหลดมีขนาด 1 torr หลังจากที่เปิดเทอร์โบปั๊มแล้วรอจนกระทั่งความดันอากาศของห้องไหลดมีขนาดประมาณ 5×10^{-6} torr จึงปิดวาล์วของเทอร์โบปั๊มและเปิดประตูเชื่อมต่อห้องไหลดกับห้องอินโทรดักชันได้ จากนั้นลำเลียงชิ้นงานที่อยู่บนรถผ่านเข้าสู่ห้องอินโทรดักชันโดยมีระบบสายพานเป็นตัวส่ง การควบคุมสายพานสามารถทำได้โดยหมุนเฟืองขับสายพานจากภายนอก หลังจากชิ้นงานผ่านเข้าสู่ห้องอินโทรดักชันแล้วควรปิดประตูเชื่อมระหว่างห้องไหลดและห้องอินโทรดักชันทันทีเพื่อไม่ให้ระบบดูดอากาศของห้องอินโทรดักชันทำงานหนักเกินไป

2) ห้องอินโทรดักชัน (Introduction Chamber) เป็นห้องที่ใช้สำหรับกระบวนการ Pre-Heat เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนที่อยู่บริเวณผิวหน้าชิ้นงาน หลังจากที่ชิ้นงานอยู่ในห้องนี้แล้ว หยิบ

ชิ้นงานออกจากรถโดยใช้แขนจับแม่เหล็ก (Magnetic arm) เพื่อใส่เข้าไปในตำแหน่ง Pre-Heat และเริ่มกระบวนการ Pre-Heat หลังจากเสร็จกระบวนการ Pre-Heat ชิ้นงานจะถูกส่งต่อไปยังห้องทรานสเฟอร์ (Transfer Chamber) โดยใช้แขนจับแม่เหล็กจับชิ้นงานออกมาจากตำแหน่ง Pre-Heat ใส่เข้าไปในรถคันที่สองซึ่งเป็นรถสำหรับเคลื่อนย้ายชิ้นงานระหว่างห้องอินโทรดักชันและห้องทรานสเฟอร์ ห้องอินโทรดักชันเป็นห้องที่มีระบบดูดอากาศได้แก่ ไอออนปั๊ม (Ion pump) และไททาเนียมปั๊ม (Titanium pump) ทำงานตลอดเวลาเพื่อให้อยู่ในภาวะสุญญากาศ

3) ห้องทรานสเฟอร์ (Transfer Chamber) เป็นห้องพักชิ้นงานเพื่อรอปลูก หรือรอทำการ Pre-Heat ในขณะ Pre-Heat ความดันของห้องอินโทรดักชันจะสูงขึ้นเนื่องจากสิ่งสกปรกที่หลุดออกมาจากผิวหน้า และอาจกระทบต่อความดันของห้องข้างเคียง ห้องทรานสเฟอร์จึงเป็นห้องที่ลดผลกระทบดังกล่าวที่จะเกิดขึ้นกับห้องปลูก เนื่องจากห้องปลูกเป็นห้องที่สำคัญที่สุดในการปลูกผลึก ภายในห้องทรานสเฟอร์มีแขนจับแม่เหล็กอีก 1 แขนเพื่อใช้หยิบชิ้นงานจากรถคันที่สอง ใส่เข้าไปในห้องปลูก หรือหยิบชิ้นงานที่ปลูกเสร็จแล้วออกจากห้องปลูก และมีระบบดูดอากาศเช่นเดียวกับห้องอินโทรดักชัน



รูปที่ 3.3 แผนภาพห้องปลูกผลึกอย่างง่ายของเครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล

4) ห้องปลูก (Growth Chamber) เป็นห้องที่ใช้ทำการปลูกผลึก มีอุปกรณ์สำคัญ คือ Manipulator (สำหรับใส่ Mo Block), เภจวัดแรงดันไอ, Heater (สำหรับปรับอุณหภูมิของชิ้นงาน), ระบบดูดอากาศ (เช่นเดียวกับห้องอินโทรดักชันและห้องทรานสเฟอร์), ระบบตรวจวัดแบบติดตั้งภายใน ได้แก่ QMS และ RHEED

ชิ้นงานที่เข้าสู่ห้องปลูกจะถูกใส่ใน Manipulator ซึ่งมี Heater ติดอยู่ด้านหน้าสำหรับเพิ่มอุณหภูมิชิ้นงานและมี เกจวัดความดันไอ (Ionization gauge) ติดอยู่ด้านหลังเพื่อวัดความดันไอ Manipulator สามารถหมุนได้โดยควบคุมจากมอเตอร์กระแสตรงเพื่อให้ลำโมเลกุลกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งผิวหน้าของชิ้นงานขณะปลูก ก่อนการปลูกชัตเตอร์หลัก (Main Shutter) และชัตเตอร์ของเซลล์บรรจุมวลสาร (Effusion Cell) ถูกปิดอยู่เพื่อป้องกันไม่ให้มีอนุภาคที่ไม่ต้องการมาเกาะที่ชิ้นงาน เมื่อเริ่มปลูกจึงเปิดเฉพาะชัตเตอร์หลัก และชัตเตอร์ของสารที่ต้องการปลูก โดยปริมาณลำโมเลกุลของสารแต่ละชนิดสามารถควบคุมโดยปรับอุณหภูมิเตา (Crucible) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นลำโมเลกุลจะถูกปล่อยออกมามากขึ้น และส่งผลให้มีความดันมากขึ้นด้วย ปริมาณสารที่ปล่อยออกมาที่อุณหภูมิหนึ่งๆ จึงสามารถตรวจสอบได้โดยอ่านจากเกจวัดความดันไอ ในขณะที่ปลูกระบบตรวจวัดแบบติดตั้งภายในที่สำคัญคือ QMS และ RHEED โดย QMS เป็นเครื่องวิเคราะห์มวลเพื่อตรวจสอบปริมาณของสารที่ปลูก ตลอดจนสารแปลกปลอมที่อยู่ในห้องปลูกขณะทำการปลูก และ RHEED เป็นเครื่องมือในการตรวจสอบลักษณะผิวหน้าขณะปลูก ระบบดูดอากาศของห้องปลูกเป็นเช่นเดียวกับ ห้องทรานสเฟอรัลและห้องอินโทรดักชัน คือ บัมไอออนซึ่งเปิดตลอดเวลา และบัมไททาเนียมซึ่งเปิดเฉพาะเวลาที่ไม่มีการปลูกผลึกเท่านั้น เนื่องจากการลดความดันโดยบัมไททาเนียมมีหลักการ คือ การผ่านกระแสไปในหลอดไททาเนียมส่งผลให้ไททาเนียมระเหิดออกและกระจายตัวทั่วห้องปลูกเพื่อให้ไททาเนียมซึ่งทำปฏิกิริยาได้ง่ายจับกับก๊าซอื่นๆ ที่เหลืออยู่ภายในห้องปลูกกลายเป็นของแข็งและถูกดูดออกนอกระบบ การเปิดบัมไททาเนียมระหว่างการปลูกผลึกจึงทำให้โครงสร้างที่ได้มีไททาเนียมเจือปนอยู่

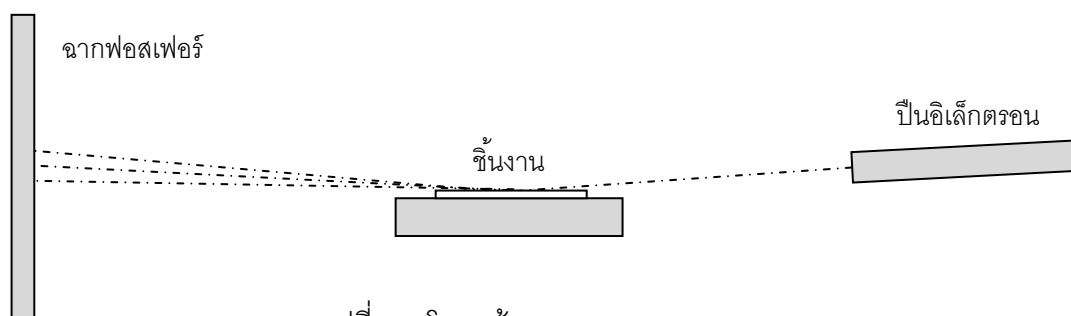
3.1.2 การวัดความดันไอ

ความดันไอของสารจะแปรผันตามอุณหภูมิ การวัดค่าความดันไอจึงทำให้เราทราบว่าจะใช้อุณหภูมิขณะปลูกเท่าไรเพื่อให้ได้ปริมาณสารตามที่ต้องการ การวัดสามารถทำได้โดยหมุน Manipulator ให้ด้านที่มีเกจวัดความดันไอติดอยู่ให้เข้าใกล้เซลล์ของสารมากที่สุด มุมที่ใช้วัดความดันไออยู่ประมาณ 225° เมื่อเกจวัดความดันไออยู่ตำแหน่งวัดความดันไอแล้วจึงเปิดชัตเตอร์ของสารที่ต้องการวัดและชัตเตอร์หลัก ซึ่งสารที่ใช้ในการปลูกโครงสร้างคือ In, Ga และ As_4 จากนั้นบันทึกค่าเป็นคู่อันดับระหว่างอุณหภูมิของสารและความดันไอของสารนั้น คู่อันดับของอุณหภูมิและความดันไอที่ได้เป็นข้อมูลในการตัดสินใจเลือกใช้ขณะปลูกผลึก และ/หรือขณะทำการเปรียบเทียบอัตราการปลูก (growth rate calibration) ต่อไป การวัดความดันไอมีเงื่อนไขคือ ต้องวัด

In และ Ga ก่อนเนื่องจากเมื่อเปิด-ปิดชุดเตอร์ความดันไอจะเปลี่ยนแปลงทันที ต่างจาก As_4 ซึ่งต้องรอให้ไอของสารกระจายตัวทั่วห้องปลูกก่อนจึงสามารถวัดความดันไอได้

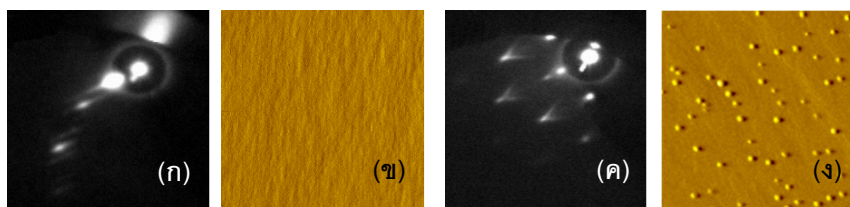
3.1.3 RHEED

RHEED เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ผิวหน้าชิ้นงานแบบตามเวลาจริงขณะปลูก (real time) ทำให้เป็นเครื่องมือในการตัดสินใจและสามารถแก้ไขสถานการณ์ได้อย่างทันที มีหลักการทำงาน คือ ยิงลำอิเล็กตรอนให้ตกกระทบบริเวณผิวหน้าชิ้นงานด้วยมุมตกกระทบน้อยๆ (ประมาณ $1-3^\circ$) ลำอิเล็กตรอนที่เกิดการสะท้อนและแทรกสอดจากผิวหน้าชิ้นงานจะวิ่งมากระทบฉากฟอสเฟอร์ (phosphor screen) ซึ่งอยู่ฝั่งตรงข้ามกับปืนอิเล็กตรอนตามรูปที่ 3.4 ทำให้ฉากฟอสเฟอร์เกิดแสงสว่างตามลักษณะของลำอิเล็กตรอนที่มากกระทบ เมื่อลักษณะของผิวหน้าชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไปทำให้ลำอิเล็กตรอนที่เกิดการสะท้อนและแทรกสอดมาจากผิวหน้าเปลี่ยนแปลงไป เป็นสาเหตุให้ฉากฟอสเฟอร์ปรากฏเป็นลวดลาย (pattern) ต่างๆ ตามลักษณะของผิวหน้าชิ้นงาน ภาพที่ปรากฏบนฉากฟอสเฟอร์เป็นภาพที่ต้องอาศัยการตีความเพื่อเปรียบเทียบกับลักษณะผิวหน้าชิ้นงานจริง ดังนั้น ก่อนการใช้งาน RHEED จำเป็นต้องรู้ก่อนว่าลวดลายบนฉากฟอสเฟอร์แบบต่างๆ สื่อถึงลักษณะผิวหน้าชิ้นงานจริงอย่างไร



รูปที่ 3.4 โครงสร้างของระบบ RHEED

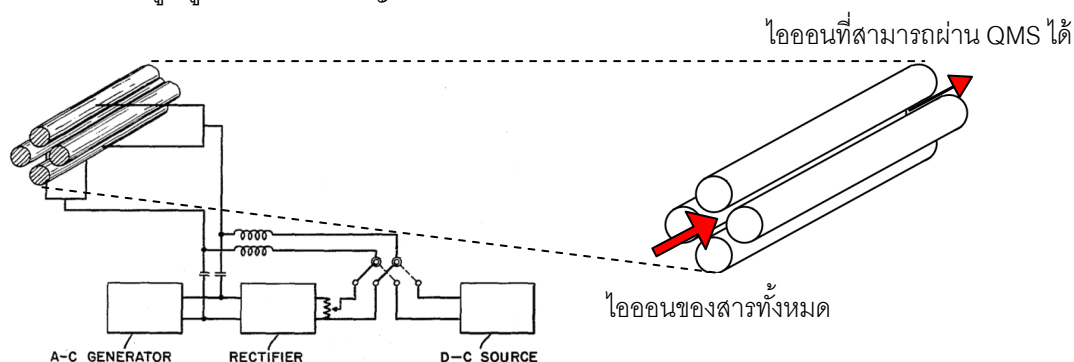
ลวดลายที่สำคัญ ได้แก่ ลวดลายเส้น (streaky pattern ดังรูปที่ 3.5 (ก) สื่อถึงผิวหน้าชิ้นงานที่เรียงดังภาพ AFM ในรูปที่ 3.5 (ข) และ ลวดลายจุด (spotty pattern) ดังรูปที่ 3.5 (ค) สื่อถึงผิวหน้าชิ้นงานที่ขรุขระโดยเฉพาะเมื่อผิวหน้าเป็นควอนตัมดอตดังภาพ AFM ในรูปที่ 3.5 (ง) นอกจาก RHEED จะใช้วิเคราะห์ลักษณะของผิวหน้าแล้ว ยังสามารถใช้สอบเทียบคุณสมบัติจริงของผิวหน้า และสอบเทียบอัตราการปลูก ซึ่งกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อ 3.2.4 และ 3.2.5 ตามลำดับ



รูปที่ 3.5 (ก) Streaky pattern (ข) ผิวขี้ผึ้งงานที่เรียบ (ค) Spotty pattern (ง) ผิวขี้ผึ้งงานที่มี
ควอนตัมดอต

3.1.4 QMS

QMS เป็นเครื่องวิเคราะห์มวลสารชนิดหนึ่ง ทำงานโดยคัดกรองไอออนของสารเพียงบางชนิดที่มีค่ามวลต่อประจุ (m/z) ที่เหมาะสม ให้ผ่านไปสู่เครื่องตรวจจับ (detector) ได้ QMS มีลักษณะเป็นแท่งโลหะทรงกระบอก 4 แท่งที่ขนานกัน โดยแท่งตรงข้ามเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าดังรูปที่ 3.6 ขณะทำงานแรงดันที่คลื่นความถี่วิทยุ (RF voltage) จะถูกจ่ายพร้อมแรงดันกระแสตรงให้กับแท่งโลหะแต่ละคู่ ทำให้สนามไฟฟ้าระหว่างแท่งโลหะเปลี่ยนไป ไอออนของสารที่มีอยู่ในห้องปลุกจะเคลื่อนที่ผ่านแท่งโลหะและถูกเหนี่ยวนำโดยสนามไฟฟ้าทำให้เคลื่อนที่ชนกับแท่งโลหะ มีเพียงไอออนที่มีค่ามวลต่อประจุที่สอดคล้องกับความถี่ของแรงดันคลื่นความถี่วิทยุที่สามารถเคลื่อนที่ผ่านแท่งโลหะได้ กรณีที่ความถี่ของแรงดันคลื่นความถี่วิทยุคงที่จะมีไอออนของสารเพียงชนิดเดียวที่เคลื่อนที่ผ่านแท่งโลหะไปสู่เครื่องตรวจจับ การใช้งานจริงจะทำการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแรงดันคลื่นความถี่วิทยุอย่างต่อเนื่องทำให้ไอออนที่ถูกตรวจจับได้เป็นไอออนของสารที่ค่ามวลต่อประจุต่อเนื่องเช่นกัน นอกจากนี้ปริมาณไอออนของสารแต่ละชนิดที่ตรวจจับได้ยังสามารถบอกได้ว่าในขณะนั้นห้องปลุกมีสารแต่ละชนิดมากน้อยเพียงใด มีสารที่ไม่ต้องการอยู่ในห้องปลุกหรือไม่ ช่วยให้ผู้ใช้ปลุกสามารถแก้ปัญหาได้อย่างทันที



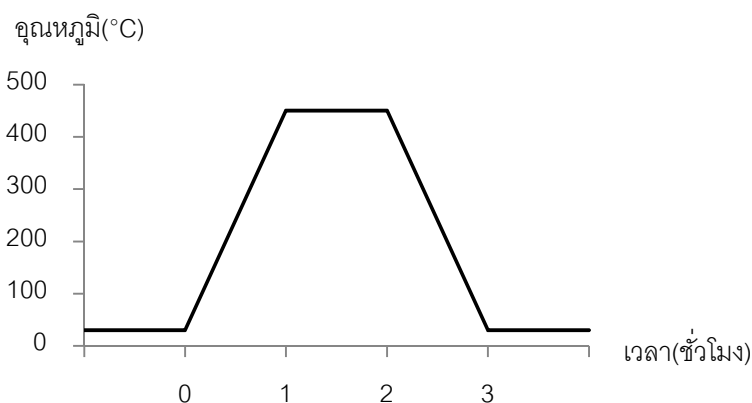
รูปที่ 3.6 ภาพการทำงานของ Quadrupole mass analyze [60]

3.2 การเตรียมชิ้นงานและการกำหนดเงื่อนไขการปลูก

การเตรียมชิ้นงานและกำหนดเงื่อนไขการปลูกจะมีขั้นตอนเหมือนกันสำหรับทุกชิ้นงานแม้ปลูกโครงสร้างที่ปลูกจะต่างกัน นับเป็นขั้นตอนที่สำคัญเพราะเป็นการเตรียมชิ้นงานและสารต่างๆ ที่ต้องการใช้ให้อยู่ในสภาพพร้อมทำการปลูก หากเกิดข้อผิดพลาดขึ้นในขั้นตอนนี้อาจทำให้ชิ้นงานที่ได้ไม่เป็นไปตามโครงสร้างที่ต้องการ หรืออาจทำให้ชิ้นงานเสียได้ การเตรียมชิ้นงานและกำหนดเงื่อนไขการปลูกสามารถแยกเป็นกระบวนการย่อยได้คือ กระบวนการ Pre-heat, กระบวนการ De-gas, กระบวนการ De-ox, การสอบเทียบอุณหภูมิผิวหน้า และการสอบเทียบอัตราการปลูก

3.2.1 กระบวนการ Pre-heat

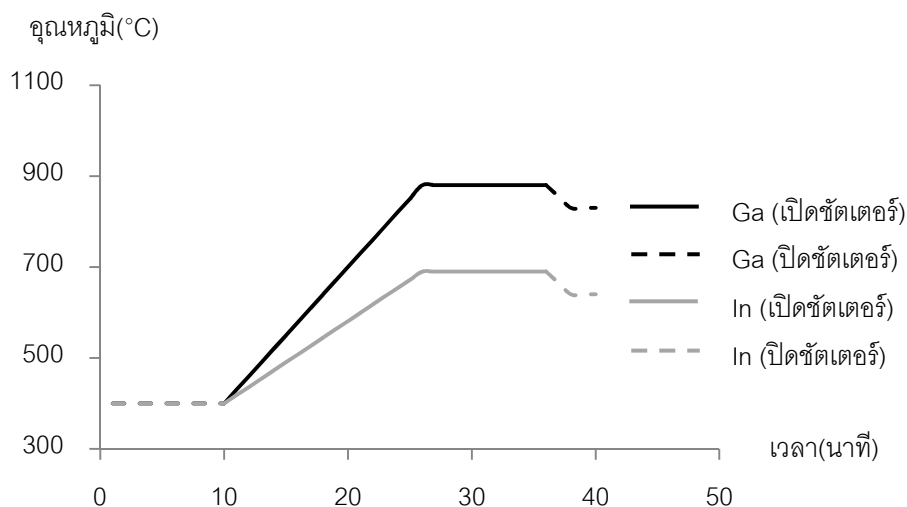
Pre-heat เป็นขั้นตอนในการกำจัดไอน้ำและสิ่งสกปรกต่างๆ ให้ออกจากผิวหน้าชิ้นงานโดยใช้ความร้อน เพื่อให้ผิวหน้าชิ้นงานสะอาดมากขึ้น ขั้นตอนนี้ทำที่ห้องอินโทรดักชัน โดยเมื่อชิ้นงานอยู่ในตำแหน่ง Pre-heat แล้วจึงเริ่มโปรแกรม Pre-heat ซึ่งเป็นการเพิ่มอุณหภูมิของชิ้นงานจาก 30°C ไปที่ 450°C ในเวลา 1 ชั่วโมง หยุดอุณหภูมิไว้ที่ 450°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิลงมาที่ 30°C ในเวลา 1 ชั่วโมงดังรูปที่ 3.7 ขณะทำการ Pre-heat ไอน้ำและสิ่งสกปรกต่างๆ จะหลุดออกจากผิวหน้าชิ้นงานทำให้ความดันภายในห้องอินโทรดักชันสูงขึ้น ไอน้ำและสิ่งสกปรกที่ออกมาจะถูกกำจัดโดยระบบดูดอากาศของห้องอินโทรดักชัน หลังจากเสร็จขั้นตอน Pre-heat จึงย้ายชิ้นงานไปสู่ห้องทรานสเฟอร์และห้องปลูกตามลำดับเพื่อทำตามขั้นตอนถัดไป



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนของกระบวนการ Pre – heat

3.2.2 กระบวนการ De-gas

De-gas เป็นการทำความสะอาดสารที่ต้องการปลูกเพื่อกำจัดอนุภาคและสิ่งสกปรกต่างๆ ที่เกาะอยู่กับสารและผนังเซลล์ ทำให้วัตถุดิบบริสุทธิ์ขึ้น และถูกปลูกด้วยอัตราที่สัมพันธ์กับ อุณหภูมิ กระบวนการ De-gas เป็นขั้นตอนที่ต้องทำทุกครั้งก่อนเริ่มปลูกผลึกจึงจำเป็นต้องรู้ก่อนว่าการปลูกผลึกในครั้งนั้นต้องการใช้สารใดบ้างและแต่ละสารใช้ที่อุณหภูมิสูงสุดเท่าใด เนื่องจากการ De-gas จำเป็นต้องทำที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิสูงสุดที่ต้องการใช้ 50°C เริ่มจากการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิเก็บรักษาสาร (standby temperature) ไปที่อุณหภูมิสูงสุดของการทำ De-gas ด้วยอัตรา $30^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ชัตเตอร์ของสารที่ต้องการ De-gas จะเปิดทันทีเมื่อเริ่มเพิ่มอุณหภูมิ เพื่อให้สิ่งสกปรกซึ่งอาจถูกกำจัดที่อุณหภูมิต่างกัน ค่อยๆ หลุดออกมาจากเซลล์โดยไม่ไปเกาะที่ชัตเตอร์ เมื่ออุณหภูมิถึงค่าสูงสุดแล้วหยุดไว้ที่ค่านั้นเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นปิดชัตเตอร์ของสารที่ต้องการ De-gas และลดอุณหภูมิลงสู่ค่าที่ใช้งานจริง สำหรับสารที่จำเป็นในการปลูกโครงสร้างควอนตัมดอตบนแผ่นฐานลายตารางและต้องการ De-gas ได้แก่ Ga, In ซึ่งมีขั้นตอนการ De-gas ตามรูปที่ 3.8

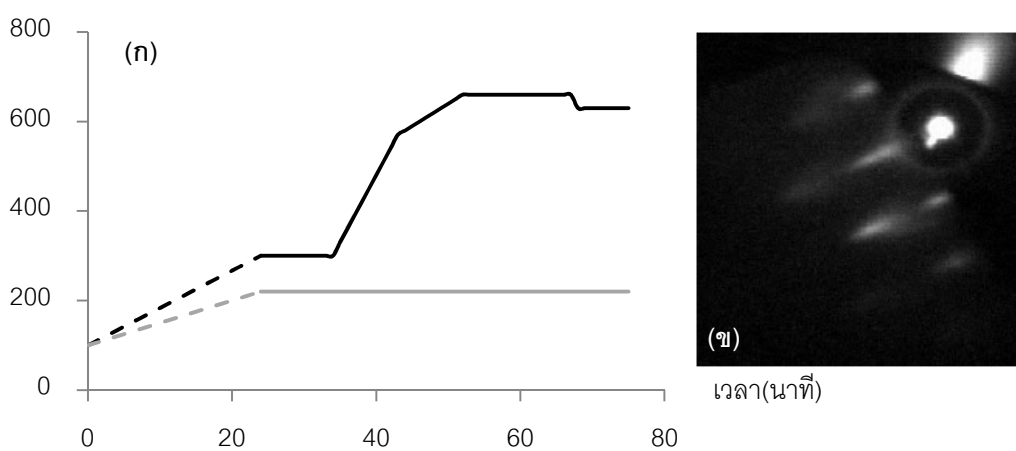


รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการ De – gas

3.2.3 กระบวนการ De-ox

กระบวนการ De-ox ในห้องปลูกเป็นการทำความสะอาดผิวหน้าเป็นครั้งสุดท้ายก่อนปลูกโครงสร้างจริง เนื่องจากการทำความสะอาดโดยกระบวนการ Pre-heat จะกำจัดไอน้ำและสิ่งสกปรกออกไปบางส่วนแต่ไม่สามารถขับออกไฮดรอกไซด์ธรรมชาติที่ผิวหน้าของชิ้นงานออกไปได้ ก่อนเริ่ม

กระบวนการ De-ox ต้องเพิ่มอุณหภูมิของ As_4 และอุณหภูมิของ Mo Block จากอุณหภูมิเก็บรักษาขึ้นมาจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการใช้ และ $300^\circ C$ ตามลำดับ จากนั้นจึงเปิดชัตเตอร์หลักและชัตเตอร์ของ As_4 พร้อมๆกัน (อุณหภูมิที่ใช้ของ As_4 มีค่าไม่แน่นอนโดยอุณหภูมิที่เหมาะสมจะสังเกตจากเกจวัดฟลักซ์ให้มีค่าประมาณ 8×10^{-6} torr และ Peak ของ As_4 ที่ QMS มีความสูงประมาณ 2 ช่องเมื่อใช้สเกล 10 mV/div) เนื่องจาก As_4 เป็นสารที่กระจายตัวในบรรยากาศซ้ำจึงต้องหยุดรอประมาณ 10 นาทีเพื่อสังเกตความเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ของ As_4 เมื่อฟลักซ์คงที่แล้วจึงเพิ่มอุณหภูมิของ Mo Block เพื่อเข้าสู่กระบวนการ De-ox



รูปที่ 3.9 (ก) ขั้นตอนการ De - ox (ข) ลวดลายของ RHEED ขณะ De-ox

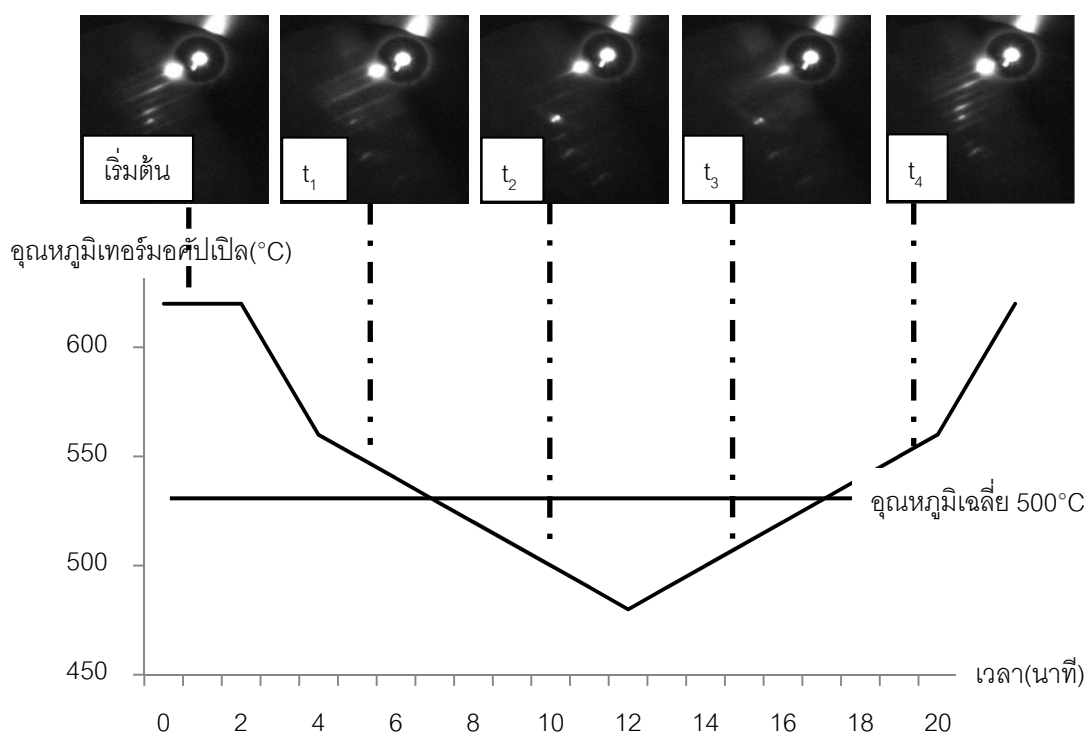
กระบวนการ De-ox เป็นขั้นตอนที่ออกไซด์ของชิ้นงานถูกขับออกมาโดยมีค่าประมาณ $580^\circ C$ จึงควรเริ่มเปลี่ยนอัตราการเพิ่มอุณหภูมิของ Mo Block ให้ช้าลงเป็น $10^\circ C/min$ เพื่อดู De-ox pattern จาก RHEED ได้ละเอียดขึ้น ที่อุณหภูมิ De-ox RHEED จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.9 (ข) เพิ่มอุณหภูมิมากกว่า De-ox $30^\circ C$ แล้วหยุดรอเป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้ออกไซด์ออกจากผิวหน้า พร้อมกับสังเกต Peak ของออกไซด์ที่ QMS ว่าลดลงจึงลดอุณหภูมิ Mo Block ลงมาที่อุณหภูมิ De-ox เพื่อปลูกโครงสร้างบัฟเฟอร์ตามรายละเอียดหัวข้อที่ 3.3.1 ด้วยความหนาประมาณ 100 nm หลังจากปลูกบัฟเฟอร์แล้วผิวหน้าจะมีความเรียบเพื่อใช้ในการสอบเทียบอุณหภูมิผิวหน้าในหัวข้อถัดไป

3.2.4 การสอบเทียบอุณหภูมิผิวหน้า

อุณหภูมิที่ได้จาก Mo Block เป็นอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์มอคัปเปิลที่ด้านหลัง Mo Block ซึ่งจะแตกต่างจากอุณหภูมิที่ผิวหน้าของชิ้นงาน จึงต้องสอบเทียบอุณหภูมิที่อ่านได้ว่าต่าง

จากอุณหภูมิจริงเท่าไร การสอบเทียบอุณหภูมิจะอาศัยข้อมูลป้อนกลับจากระบบ RHEED เนื่องจากลักษณะผิวหน้าที่อุณหภูมิ 500 °C มีลักษณะของ RHEED pattern เฉพาะตัวโดยมีอุณหภูมิ 4 ค่าที่ลักษณะผิวหน้ามีการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 3.10

การสอบเทียบอุณหภูมิของผิวหน้ามักเริ่มจากอุณหภูมิของ Mo block ที่มีค่าสูงเนื่องจากเพิ่งปลูกบัพเฟอร์เสร็จโดยผลเฉลยของ RHEED มีลักษณะเป็น streaky pattern ชัดเจนดังรูปที่ 3.10 (ก) อุณหภูมิจะถูกลดลงอย่างต่อเนื่องจนเส้นกลางของ streaky pattern หายไป (ดังรูปที่ 3.10 (ข) ที่อุณหภูมินี้ถูกบันทึกเป็นค่า t_1) และกลับมา (ดังรูปที่ 3.10 (ค) ที่อุณหภูมินี้ถูกบันทึกเป็นค่า t_2) เมื่อได้ค่า t_1 และ t_2 แล้วอุณหภูมิจะถูก Mo block จะถูกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนเส้นกลางของ streaky pattern หายไป (ดังรูปที่ 3.10 (ง) ที่อุณหภูมินี้ถูกบันทึกเป็นค่า t_3) และกลับมาอีกครั้ง (ดังรูปที่ 3.10 (จ) ที่อุณหภูมินี้ถูกบันทึกเป็นค่า t_4) ค่าเฉลี่ยของ t_1 , t_2 , t_3 และ t_4 คือค่าอุณหภูมิของเทอร์มอคัปเปิลซึ่งมีค่าเทียบเท่ากับอุณหภูมิของผิวหน้าที่ 500°C



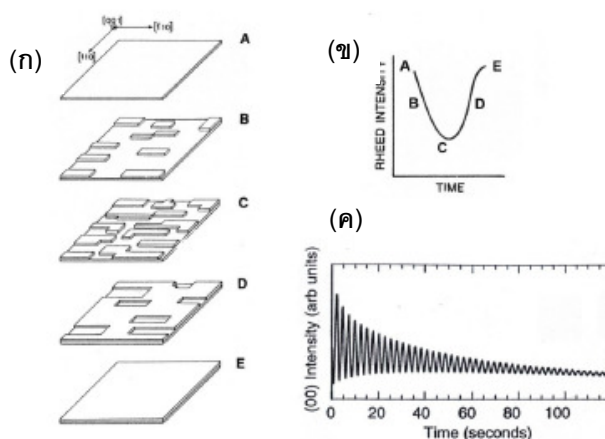
รูปที่ 3.10 การสอบเทียบอุณหภูมิผิวหน้า

3.2.5 การสอบเทียบอัตราการปลูก

การสอบเทียบอัตราการปลูกเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารนั้นกับปริมาณของสารที่ปล่อยออกมาจากเซลล์ เพื่อใช้อุณหภูมิดังกล่าวในการกำหนดเงื่อนไขการปลูก

ก่อนการสอบเทียบอัตราการปลูกจึงจำเป็นต้องรู้ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและปริมาณของสารอย่างคร่าวๆ จากการปลูกครั้งก่อนหน้า เพื่อกำหนดอุณหภูมิที่จะสอบเทียบให้แม่นยำมากขึ้น สารที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้และต้องถูกสอบเทียบอัตราการปลูก ได้แก่ GaAs และ InAs

3.2.5.1 การสอบเทียบอัตราการปลูกของ GaAs



รูปที่ 3.11 (ก) การก่อตัวของ GaAs บน GaAs(001) จาก A ไป E ซึ่งสัมพันธ์กับ (ข) ความสว่างของ specular beam จาก A ไป E (ค) การสั่นของความสว่างของ specular beam ขณะปลูก GaAs ลงบน GaAs(001) [61]

GaAs จะถูกปลูกลงบนผิวหน้าที่ละชั้นๆ เนื่องจากเป็นสารชนิดเดียวกับแผ่นฐาน ก่อนการสอบเทียบต้องแน่ใจว่าพื้นผิวของชิ้นงานเรียบโดยสังเกตได้จาก streaky pattern ของ RHEED การสอบเทียบทำโดยปรับอุณหภูมิของ Ga ไปที่อุณหภูมิที่ต้องการสอบเทียบ หยุดมอเตอร์จากนั้นหมุนมอเตอร์ด้วยมือจนได้ตำแหน่งที่ specular beam บน RHEED มีความเข้มสูงสุด เนื่องจากเป็นจุดที่ต้องสังเกตการเปลี่ยนแปลงขณะสอบเทียบ จากนั้นเปิดชัตเตอร์ Ga เพื่อปลูก GaAs ลงบนผิวหน้าชิ้นงาน ในขณะที่ปลูก specular beam จะเปลี่ยนแปลงความเข้มโดยมีลักษณะมืด-สว่างสลับกันเรียกว่า "oscillate" เนื่องจากการปลูก GaAs เป็นไปทีละชั้น การ oscillate ของ RHEED จากสว่างไปมืดและกลับมาสว่างอีกครั้งเทียบเท่ากับการปลูก 1 ML ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ฉะนั้นถ้านำจำนวนครั้งของการ oscillate หารด้วยเวลาที่จับได้ในหน่วยวินาที จะได้อัตราการปลูกในหน่วย ML/s เทียบอัตราการปลูกที่ได้กับอัตราการปลูกที่ต้องการว่าเท่ากันหรือไม่ กรณีที่อัตราการปลูกน้อยกว่าหรือมากกว่าอัตราการปลูกที่ต้องการจำเป็นต้องเพิ่มหรือลดอุณหภูมิ Ga ตามลำดับ และสอบเทียบอีกครั้ง ในระหว่างการสอบเทียบอัตราการปลูก GaAs ทุกครั้ง

จำเป็นต้องปลูกบัพเฟอร์ GaAs ด้วยความหนา 20-30 nm เพื่อให้ผิวหน้าเรียบและไม่กระทบต่อการสอบเทียบโดยดูจาก streaky-pattern

3.2.5.2 การสอบเทียบอัตราการปลูกของ InAs

การสอบเทียบอัตราการปลูกของ InAs ไม่สามารถใช้วิธีเดียวกับ GaAs ได้ เนื่องจาก InAs มีค่าคงตัวผลึกต่างจากแผ่นฐาน GaAs ถึง 7.2% ทำให้การก่อตัวไม่เป็นแบบ 2 มิติ และเกิดความเครียดบนชั้นปลูก เมื่อปลูกมากขึ้นจะกลายเป็นโครงสร้าง 3 มิติ (ควอนตัมดอต) ในที่สุด ฉะนั้นการสอบเทียบจึงเป็นการสอบเทียบอัตราการปลูกควอนตัมดอต ซึ่งความหนาปกติของควอนตัมดอต InAs บนแผ่นฐาน GaAs คือ 1.7 ML การสอบเทียบอัตราการปลูก InAs ทำได้โดยการเปิดชัตเตอร์ In ขณะที่มอเตอร์หมุนพร้อมกับจับเวลา จนกระทั่งเกิดควอนตัมดอตบนผิวหน้า โดยสังเกตจาก spotty pattern บน RHEED จึงหยุดเวลาพร้อมกับปิดชัตเตอร์ In เนื่องจากควอนตัมดอตมีความสูง 1.7 ML เมื่อหารด้วยเวลาที่จับได้ในหน่วยวินาที จะได้อัตราการปลูก InAs ซึ่งมีหน่วย ML/s เทียบอัตราการปลูกที่ได้กับอัตราการปลูกที่ต้องการว่าเท่ากันหรือไม่ กรณีที่อัตราการปลูกน้อยกว่าหรือมากกว่าอัตราการปลูกที่ต้องการจำเป็นต้องเพิ่มหรือลดอุณหภูมิ In ตามลำดับ และสอบเทียบอีกครั้ง ระหว่างสอบเทียบอัตราการปลูก InAs ต้องเพิ่มอุณหภูมิ Mo Block ไปที่ T_{deox} ก่อน เพื่อให้ควอนตัมดอตที่อยู่บนผิวหน้าสลาย จากนั้นปลูกบัพเฟอร์หนา 100 nm เนื่องจากควอนตัมดอตส่งผลให้ผิวหน้ามีความขรุขระ จึงจำเป็นต้องทำให้ผิวหน้าเรียบก่อนสอบเทียบครั้งถัดไป

3.3 การปลูกชั้นผลึก

การปลูกชั้นผลึกจากสารที่สนใจในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะได้เป็นสารประกอบ III-V ซึ่งจำแนกตามสัณฐานวิทยาของผลึกได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่ 1) ชั้นก้อนผลึก, 2) ชั้นลายตาราง, 3) ชั้นควอนตัมดอต และ 4) ชั้นกลบทับ ซึ่งการปลูกชั้นผลึกแต่ละประเภทมีรายละเอียดดังนี้

3.3.1 การปลูกชั้นก้อนผลึก

การปลูกชั้นผลึกเป็นการปลูกโครงสร้างที่ละชั้นก่อตัวแบบ 2 มิติโดยมีความสูงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกลายเป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ มักเป็นการปลูกสารชนิดเดียวกันกับแผ่นฐาน เช่น การปลูก GaAs ลงบนแผ่นฐาน GaAs โดยชั้นก้อนผลึก GaAs ที่ถูกปลูกอาจเรียกว่า “ชั้นบัพเฟอร์” ซึ่งเป็นชั้นที่ปลูกขึ้นเพื่อทำให้ผิวหน้าชั้นงานมีความเรียบ เหมาะที่จะปลูกโครงสร้างต่อไป

การปลูกชั้นบัฟเฟอร์ GaAs สามารถทำได้โดยการเปิดชุดเตอร์ของ Ga เพื่อให้ไอของ Ga จับกับ As_4 ซึ่งเป็นบรรยากาศรอบชิ้นงานขณะนั้น กลายเป็น GaAs และเกาะลงบนผิวหน้า โดยปกติแล้วการปลูกชั้นบัฟเฟอร์จะทำที่อุณหภูมิแผ่นฐาน $580^{\circ}C$ ด้วยอัตราการปลูก 0.6 ML/s เนื่องจากเป็นอัตราที่เทียบระหว่างเวลาที่ใช้ปลูกและความหนาได้ง่าย คือเมื่อใช้อัตราการปลูกนี้จะปลูก GaAs ได้ 10 nm ในเวลา 1 นาที นอกจากนี้การปลูกที่ $580^{\circ}C$ จะทำให้ได้ชั้นบัฟเฟอร์ที่มีความเป็นผลึกค่อนข้างสมบูรณ์ สามารถเปล่งแสงได้ดี

3.3.2 การปลูกชั้นลายตาราง

ชั้นลายตาราง (cross-hatch) จัดเป็นชั้นก่อนผลึกชนิดหนึ่งแต่มีความต่างจากชั้นบัฟเฟอร์ คือ สารที่ปลูกเป็นสารต่างชนิดกับแผ่นฐานตั้งต้น โดยชั้นลายตารางที่สนใจในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ ชั้น InGaAs บน GaAs เนื่องจากเป็นสารต่างชนิดกัน ทำให้ค่าคงตัวผลึกของสารไม่เท่ากัน ส่งผลให้เกิดความเครียดกับระบบสารที่ปลูกใหม่ โดยสารที่จะเกิดเป็นชั้นลายตารางได้ต้องเป็นสารที่มีค่าคงตัวผลึกไม่ต่างจากแผ่นฐานมากจนเกินไป เพื่อให้ชั้นผลึกที่ปลูกยังคงก่อตัวแบบ 2 มิติอยู่ เมื่อปลูกชั้นผลึก InGaAs หนาขึ้น ความเครียดจะสะสมในระบบมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งความหนาของชั้นลายตารางมากกว่าความหนาวิกฤติ จะเกิด dislocation ที่ผิวหน้าเพื่อเป็นการคลายความเครียดของระบบ dislocation (สำหรับผลึก Zincblend เช่น InGaAs) จะเกิดง่ายที่สุดในทิศ $[1-10]$ และ $[110]$

ชั้นลายตาราง InGaAs สามารถปลูกได้โดยเปิดชุดเตอร์ของ In และ Ga พร้อมกัน เพื่อให้อะตอมของ In สลับกันสร้างพันธะกับ As_4 และจัดเรียงลงบนผิวหน้ากลายเป็น $In_xGa_{1-x}As$ โดยมีอัตราส่วนของ In และ Ga ตามที่คำนวณและตั้งค่าอุณหภูมิของทั้งสองสารไว้ก่อนเปิดชุดเตอร์ การปลูกชั้นลายตารางมีข้อควรระวังคือ สัดส่วนของ In ไม่ควรมากเกินไป 20% เพราะจะทำให้ค่าคงตัวผลึกของสารที่ปลูกมากเกินไปเมื่อเทียบกับชั้นบัฟเฟอร์ส่งผลให้ชั้นปลูกก่อตัวแบบ 3 มิติทำให้ไม่ได้ชั้นลายตารางตามต้องการ

3.3.3 การปลูกชั้นควอนตัมดอต

ชั้นควอนตัมดอตเป็นชั้นที่มีลักษณะเป็นการก่อตัวแบบ 3 มิติเกิดขึ้นได้กับสารที่ปลูกเป็นสารต่างชนิดกันกับแผ่นฐานเช่นเดียวกับการเกิดชั้นบัฟเฟอร์ ต่างกันที่ความต่างของค่าคงตัวผลึกมีค่ามากกว่าทำให้เมื่อเกิดการคลายความเครียดจะเกิดเป็นควอนตัมดอตแทนการเกิดเส้นลาย

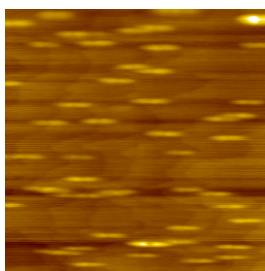
ตาราง ในชั้นแรกๆ ของการปลูกสารจะเกิดการจัดเรียงตัวของผลึกในลักษณะ 2 มิติก่อน ทำให้มีลักษณะคล้ายควอนตัมเวลล์เรียกชั้นนี้ว่า Wetting layer, WL

การปลูกชั้นควอนตัมดอตบนชั้นลายตารางทำได้โดยเปิดชุดเตอร์ In ให้อะตอมสร้างพันธะกับ As_4 และเกาะลงบนผิวหน้าจนกระทั่งเกิดควอนตัมดอตจึงปิดชุดเตอร์ การเกิดควอนตัมดอตสามารถสังเกตได้จาก RHEED pattern ก่อนเปิดชุดเตอร์ ผิวหน้าของชิ้นงานเป็น InGaAs เป็นผิวหน้า 2 มิติที่มีลอนอยู่ pattern ของ RHEED จึงเป็น streaky pattern ที่มีความคมของเส้นน้อยกว่าผิวหน้าของแผ่นฐาน GaAs เมื่อปลูก InAs ลงไป pattern ของ RHEED จะเปลี่ยนไปเรื่อยๆจนกลายเป็น spotty pattern เมื่อมีควอนตัมดอตเกิดขึ้นบนผิวหน้า

3.3.4 การปลูกชั้นกลบทับ

ชั้นกลบทับ (capping layer) เป็นชั้นบนสุดของโครงสร้าง เนื่องจากชั้นบนสุดของชิ้นงานเป็น surface state มีอะตอมของสารที่พันธะเป็นอิสระ เรียกว่า dangling bonds เมื่อพาหะเดินทางมาถึงจุดนี้ทำให้เกิดการรวมตัวแบบไม่เปล่งแสง (non-radiative recombination) เพื่อให้ผลตอบสนองทางแสงดีขึ้น จึงจำเป็นต้องกลบด้วย GaAs ความหนา 50-100 nm เพื่อลดผลกระทบจาก surface state ดังกล่าว

การกลบทับอาจมีจุดประสงค์อย่างอื่นอีก เช่น การกลบทับแบบบาง (thin capping) บนควอนตัมดอตโดยมีความสูงเพียงบางส่วนของควอนตัมดอต มีผลทำให้ควอนตัมดอตเกิดการยึดตัวออกในทิศ $[1-10]$ ในขณะเดียวกัน In บริเวณกลางควอนตัมดอตเกิดการแพร่สู่บริเวณรอบๆ เนื่องจากมีความเครียดจากความต่างของค่าคงที่ผลึกระหว่างควอนตัมดอตกับชั้นกลบทับมากกว่าทำให้เกิดโครงสร้างที่เรียกว่านาโนโฮล (nanohole) ดังรูปที่ 3.12 โครงสร้างดังกล่าวใช้ประโยชน์ในการปลูกโครงสร้างที่ซับซ้อน เช่น ควอนตัมดอตโมเลกุล หรือ ควอนตัมดอตความหนาแน่นสูง ต่อไป



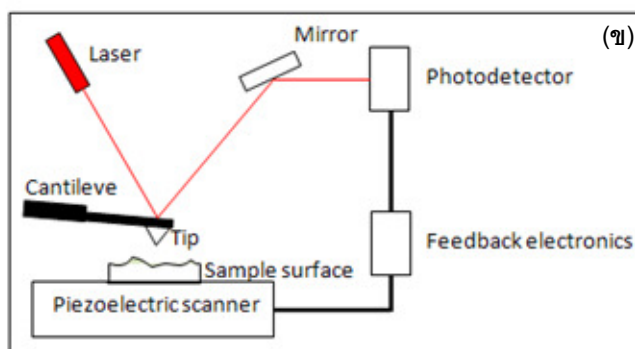
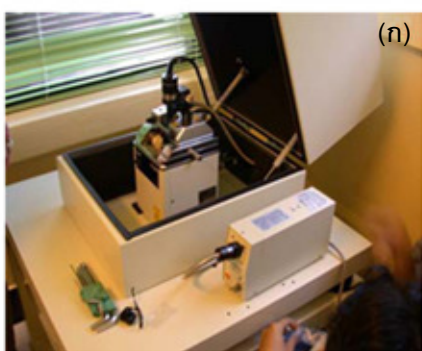
รูปที่ 3.12 ภาพ AFM ขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ แสดงนาโนโฮล [62]

3.4 ลักษณะสมบัติ

ชิ้นงานที่ปลูกเสร็จแล้วจะถูกนำมาตรวจสอบลักษณะสมบัติด้วยระบบวัดแบบติดตั้งภายนอก (ex-situ) โครงสร้างของสารที่ปลูกมีความต่างกันตามทีออกแบบการปลูกไว้ การตรวจสอบพื้นผิวจึงเป็นสิ่งสำคัญในการยืนยันว่าชิ้นงานที่ปลูกมีพื้นฐานตรงกันกับสิ่งที่ออกแบบไว้จริง เครื่องมือในการวิเคราะห์พื้นฐานพื้นผิวที่สำคัญคือ กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope, AFM) ชิ้นงานที่ปลูกทั้งหมดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด Direct Band gap ซึ่งสามารถเปล่งแสงได้ที่ความยาวคลื่นต่างๆ ตามโครงสร้างที่ปลูก การวัดสมบัติทางแสงจึงเป็นประโยชน์โดยเฉพาะสารที่ปลูกเพื่อใช้ในงานประยุกต์เชิงแสง สมบัติทางแสงของชิ้นงานทั้งหมดถูกวัดโดยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนส์ (Photoluminescence, PL)

3.4.1 สัณฐานวิทยาพื้นผิว

กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดลักษณะโครงสร้างผิวหน้าในระดับนาโนเมตร ซึ่งการวัดด้วยเทคนิคนี้ให้ข้อมูลที่สำคัญต่างๆ เช่น ลักษณะการกระจายตัวของควอนตัมดอต ความหนาแน่นของควอนตัมดอต ความสูงของควอนตัมดอต เป็นต้น ข้อมูลเหล่านี้สื่อถึงสมบัติทางแสง หรือ ทางไฟฟ้าของชิ้นงาน



รูปที่ 3.13 (ก) ภาพจริงของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม และ (ข) แผนภาพการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

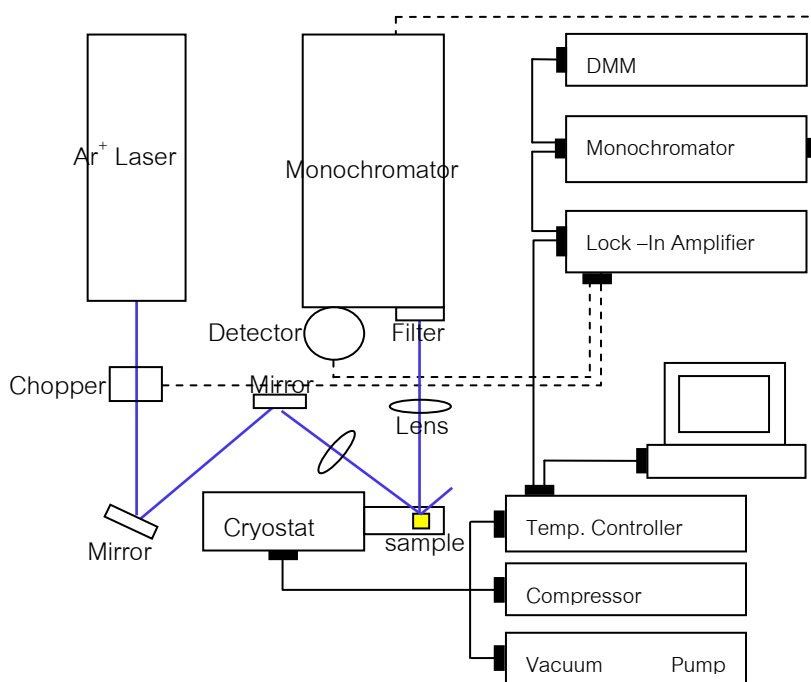
หลักการการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม คือ เมื่อเล็อนเข็ม (Tip) เข้าใกล้ชิ้นงานจะเกิดแรงวันเดอร์วาล์วระหว่างปลายเข็มกับชิ้นงาน ทำให้ระยะห่างระหว่างเข็มกับชิ้นงานมีค่าค่าหนึ่ง เมื่อเล็อนตำแหน่งชิ้นงานในแนวระนาบ (x, y) ส่งผลให้เข็มขยับในแนวตั้ง (z) ตามลักษณะผิวหน้าของชิ้นงานเนื่องจากพยายามรักษาแรงวันเดอร์วาล์วให้คงที่ เข็มถูกออกแบบให้ยึดติดกับคานยื่น (Cantilever) ในขณะที่เข็มขยับจะทำให้ความโค้งงอของคานยื่นเปลี่ยนแปลงไป กล้อง

จุลทรรศน์แรงอะตอมทำงานโดยการวัดความโค้งของคานยื่นจากการยิงแสงเลเซอร์ตกกระทบด้านหลังของคานยื่น (ซึ่งมีคุณสมบัติในการสะท้อนแสงได้ดี) และเบี่ยงเบนแสงสะท้อนเข้าสู่ตัวตรวจจับแสง (Photodetector) สัญญาณจากตัวตรวจจับแสงจะเป็นข้อมูลของชั้นงานในแนวตั้ง (z) เมื่อรวมกับพิกัดการสแกนในแนวระนาบ (x, y) จะได้ชุดข้อมูลซึ่งเป็นพื้นผิวเสมือนของชั้นงาน

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมแบ่งออกเป็น 3 โหมด คือ 1) โหมดสัมผัส (contact mode) 2) โหมดไม่สัมผัส (non-contact mode) และ 3) โหมดกึ่งสัมผัส (tapping mode) โหมดสัมผัสทำงานโดยแรงที่เกิดขึ้นกับคานเป็นแรงผลึก และอาจทำให้เข็มกระทบชั้นงานทำให้โครงสร้างชั้นงานเปลี่ยน โหมดไม่สัมผัสปลายเข็มจะอยู่ห่างจากชั้นงาน ขนาดของแรงดึงดูดจึงต่ำ ทำให้ต้องให้วงจรรขยายที่มีอัตราขยายสูง นอกจากนี้เข็มที่อยู่ห่างจากชั้นงานขณะวัดจะทำให้ความละเอียด (resolution) ต่ำด้วย โหมดกึ่งสัมผัสเป็นการรวมข้อดีของสองโหมดก่อนหน้า โดยขณะทำงานคานจะเกิดการแกว่ง (oscillation) การวัดทำในขณะที่เข็มสัมผัสผิวชั้นงาน (ทำให้ความละเอียดสูง) แต่ระยะเวลาในการสัมผัสน้อยทำให้ผิวชั้นงานไม่เปลี่ยนแปลง โดยความละเอียดของภาพที่ทำการสแกนนอกจากจะขึ้นอยู่กับโหมดในการสแกนแล้ว ยังขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิวของชั้นงาน และโครงสร้างทางกายภาพของเข็มที่ใช้สแกนเช่นกัน กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมที่ใช้งานในห้องวิจัยคือ Seiko รุ่น SPA-400 ดังรูปที่ 3.13 โดยโหมดที่ใช้คือโหมดไดนามิก (dynamic mode) ซึ่งตรงกับโหมดกึ่งสัมผัสของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมทั่วไป

3.4.2 สมบัติเชิงแสง

สารกึ่งตัวนำชนิด Direct band gap มีคุณสมบัติในการคายพลังงานในรูปของโฟตอน (photon) เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีพลังงานมากกว่า band gap ของสารนั้น โฟตอนที่ถูกปล่อยออกมาจะมีปริมาณไม่เท่ากันที่ความยาวคลื่นต่างกันโดยเป็นลักษณะการตอบสนองเฉพาะของชั้นงาน การวัดปริมาณโฟตอนจึงจำเป็นต้องระบุให้ชัดเจนว่าปริมาณโฟตอนที่วัดได้ถูกปล่อยออกมาที่ความยาวคลื่นเท่าไรซึ่งการวัดปริมาณโฟตอน (ความเข้มแสง) สามารถทำได้โดยระบบโฟโตลูมิเนสเซนส์



รูปที่ 3.14 แผนภาพการทำงานของระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์

การทำงานของระบบโฟโตลูมิเนสเซนส์เริ่มจากยิงแสงเลเซอร์ผ่าน Chopper เพื่อเปลี่ยนแสงเลเซอร์ซึ่งจากเดิมเป็นสัญญาณ DC ให้เป็นสัญญาณ AC ที่ความถี่ 330 Hz เพื่อลดสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่ายไฟ 50 Hz จากนั้นแสงเลเซอร์จะวิ่งผ่านเลนส์รวมแสงให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงแต่มีความเข้มแสงสูงขึ้นเพื่อกระตุ้นชิ้นงานซึ่งบรรจุอยู่ภายในห้องสุญญากาศซึ่งควบคุมอุณหภูมิโดยภาชนะเย็นเย็ดยิ่ง (cryostat) พลังงานจากโฟตอน (แสงเลเซอร์) ที่ตกกระทบชิ้นงานมีพลังงาน 2.6 eV (476.5 nm) ซึ่งสูงกว่าช่องว่างพลังงานที่สูงที่สุดของโครงสร้างที่ปลูกคือ GaAs ซึ่งมีช่องว่างพลังงาน 1.43 eV (300 K) หรือ 1.52 eV (20K) เมื่อชิ้นงานดูดกลืนพลังงานจะสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล จากนั้นอิเล็กตรอนจะรวมกับโฮล ผลต่างของพลังงานจะถูกคาย กรณีที่ชิ้นงานเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด Direct band gap พลังงานที่คายออกมาจะอยู่ในรูปของโฟตอน แต่หากเป็นชนิด Indirect band gap จะอยู่ในรูปของการสั่นหรือโฟนอน (phonon) หรือความร้อน แสงที่เปล่งออกมาจากชิ้นงานจะถูกรวมโดยเลนส์ก่อนที่จะผ่านเข้าสู่โมโนโครมาเตอร์ซึ่งคัดกรองแสงที่มีหลายความยาวคลื่นให้เหลือเพียงความยาวคลื่นเดียวที่ต้องการโดยการหมุนเกรตติงภายใน แสงที่ถูกเลือกความยาวคลื่นแล้วจะตกกระทบโฟโตดีเทคเตอร์ซึ่งจะแปลงความเข้มแสงให้อยู่ในรูปของความต่างศักย์ จากนั้นนำสัญญาณที่ได้จากโฟโตดีเทคเตอร์เข้าสู่เครื่อง LIA (lock-in amplifier) ซึ่งเป็นเครื่องขยายสัญญาณโดยจะขยายสัญญาณที่มีความถี่และเฟสที่ตรงกับ Chopper เท่านั้น สัญญาณที่ได้จะถูกเก็บข้อมูลในคอมพิวเตอร์เป็นคู่อันดับของความยาวคลื่นกับความเข้มแสง

เมื่อวัดครบทุกความยาวคลื่นที่ต้องการจะสามารถนำผลของชุดข้อมูลที่ได้มาแสดงกราฟการตอบสนองของทางแสงของชิ้นงาน

การวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ในวิทยานิพนธ์นี้จะกระทำ 2 รูปแบบ คือ 1) แบบขึ้นกับกำลังของแสงกระตุ้น (Power Dependent) เป็นการเปลี่ยนกำลังของเลเซอร์ในการวัดเพื่อศึกษาว่ากำลังของแสงที่กระตุ้นมีผลต่อความเข้มแสงที่เกิดขึ้นจากสารกึ่งตัวนำอย่างไร และ 2) แบบขึ้นกับอุณหภูมิ (Temperature Dependent) เป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อสเปกตรัมโดยรักษา กำลังของแสงกระตุ้นให้คงที่ขณะเปลี่ยนอุณหภูมิ

ในการวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ การรักษากำลังของแสงกระตุ้นและอุณหภูมิให้มีความแม่นยำ จึงเป็นเรื่องสำคัญ โดยการควบคุมอุณหภูมิจะใช้ภาชนะเย็นยวดยิ่ง ที่สามารถเลือกอุณหภูมิที่ต้องการได้ในช่วง 20–300 K ระบบทำงานโดยเริ่มจากดูดอากาศและไอน้ำออกจากห้องสุญญากาศโดย Vacuum pump เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเปิดระบบหมุนเวียนฮีเลียม (Helium Compressor) ซึ่งทำหน้าที่ลดอุณหภูมิโดยถ่ายความร้อนจากห้องสุญญากาศสู่ระบบน้ำเย็นภายนอก และอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) โดยให้ความร้อนเพื่อให้ได้ อุณหภูมิตามต้องการ

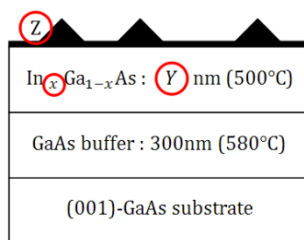
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

การทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาพื้นฐานวิทยาของควอนตัมดอทบนลายตารางชั้นเดียวและสองชั้น ผลตอบสนองทางแสงของควอนตัมดอทบนลายตารางชั้นเดียวและสองชั้น สมบัติโพลาไรเซชัน (polarization) ของควอนตัมดอทบนลายตาราง และผลของการอบ (annealing) ต่อการเปล่งแสงของโครงสร้างควอนตัมดอทบนลายตาราง การทดลองทั้งหมดจัดเป็นการทดลองที่ต่อเนื่องจากการเปลี่ยนตัวแปรในการปลูกโครงสร้างเพื่อให้ได้ควอนตัมดอทบนลายตารางที่เป็นระเบียบและให้เข้าใจสมบัติทางกายภาพของมัน ส่วนแรกของบทจึงได้สรุปผลในอดีตทั้งหมดที่เกิดขึ้นในห้องปฏิบัติการวิจัยสารกึ่งตัวนำ (SDRL) ที่เกี่ยวข้องกับการปลูกควอนตัมดอทบนลายตารางในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แก่ 4.1.1) การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนโมล $\text{In}_x(\text{x})$ ที่มีผลต่อการจัดเรียงควอนตัมดอท, 4.1.2) การเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นลายตารางที่มีผลต่อการจัดเรียงของควอนตัมดอท, 4.1.3) การเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาขัดจังหวะการปลูก (Growth Interruption, GI) ที่มีผลต่อการจัดเรียงของควอนตัมดอท และ 4.1.4) วิวัฒนาการของการเกิดควอนตัมดอทบนลายตาราง หลังจากนั้นจึงเป็นการอธิบายผลการทดลองและการวิเคราะห์ที่ต่อยอดจากผลการทดลองในอดีต ได้แก่ 4.2) พื้นผิวของควอนตัมดอทบนลายตาราง, 4.3) สมบัติเชิงแสงของควอนตัมดอทบนลายตาราง โดยแบ่งเป็นหัวข้อย่อย คือ สมบัติเชิงแสงของชั้นงาน as-grown ของชั้นงานที่ผ่านการอบ และสมบัติโพลาไรเซชันของควอนตัมดอทบนลายตาราง ตามลำดับ

4.1 สรุปผลการทดลองควอนตัมดอทบนลายตารางในอดีต

โครงสร้างชั้นงานที่ทำการทดลองควอนตัมดอทบนลายตารางในอดีตเป็นดังรูปที่ 4.1 แผ่นฐานที่ใช้เป็นแผ่นฐาน GaAs จากนั้นปลูกชั้นลายตาราง $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ด้วยสัดส่วนโมลของชั้นลายตาราง (ตัวแปร X ในรูปที่ 4.1) ที่เหมาะสม ด้วยความหนาชั้นลายตาราง (ตัวแปร Y ในรูปที่ 4.1) ที่มากพอ ที่จะทำให้เกิดลายตารางบนผิวหน้า เมื่อเกิดลายตารางขึ้นจะทำให้สนามความเครียดบนผิวหน้าแต่ละบริเวณไม่เท่ากันและส่งผลต่อการจัดเรียงของควอนตัมดอท InAs (ตัวแปร Z ในรูปที่ 4.1) ที่ปลูกทับชั้นลายตารางด้านบน

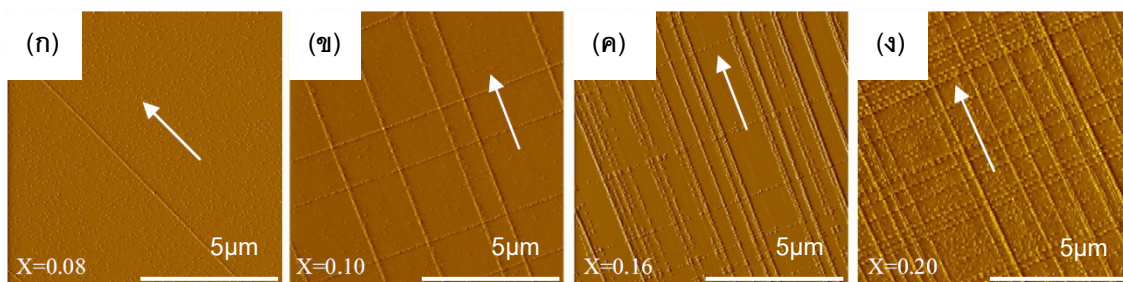


รูปที่ 4.1 ภาพตัดขวางชิ้นงานสำหรับการทดลองควอนตัมดอตบนลายต่างในอดีด

การทดลองตามหัวข้อที่ 4.1.1 เป็นการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนโมล (X) ของชั้นลายตาราง โดยพบว่าสัดส่วนโมลที่เหมาะสมต่อการปลูกชั้นลายตารางต้องน้อยกว่า 0.2 และการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนโมลส่งผลต่อความถี่ของลายตาราง, หัวข้อที่ 4.1.2 เป็นการเปลี่ยนแปลง (Y) ความหนาของชั้นลายตาราง ความหนาที่เหมาะสมคือ 50 nm การปลูกชั้นลายตารางที่ความหนามากกว่านี้ทำให้ความชัดเจนของลายตารางน้อยลงเนื่องจากการทับซ้อนกันของ dislocations, หัวข้อที่ 4.1.3 เป็นการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาขัดจังหวะปลูกของควอนตัมดอต (Z) ช่วงเวลาขัดจังหวะปลูกที่เหมาะสมคือ 30 s ส่งผลให้ควอนตัมดอตจัดเรียงบนลายตารางเป็นระเบียบที่สุด และหัวข้อที่ 4.1.4 เป็นการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นควอนตัมดอต InAs เพื่อศึกษาวิวัฒนาการของการเกิดควอนตัมดอต

4.1.1 การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนโมลของ In (x) ที่มีผลต่อการจัดเรียงควอนตัมดอต [53]

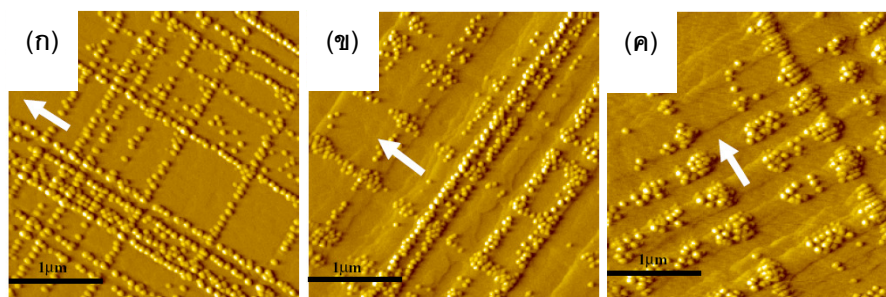
สัดส่วนโมล In (x) ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้การก่อตัวของลายตารางเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากความเครียด (ϵ) คำนวณจากความต่างของค่าคงที่ผลึกระหว่าง GaAs และ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ เมื่อค่า x มากขึ้นทำให้ค่าคงที่ผลึกทั้งสองมีความต่างมากขึ้น ส่งผลให้ ϵ มากขึ้นด้วย รูปที่ 4.2 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงค่า x โดยมีค่าเป็น 0.08, 0.10, 0.16 และ 0.20 ตามลำดับ เมื่อชั้น InGaAs หนา 50 nm ค่า x ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาวิกฤติของการเกิด dislocations ลดลงตามกราฟในรูปที่ 2.8 MD ณ รอยต่อ InGaAs/GaAs และ TD ในชั้น InGaAs จึงเกิดเร็วขึ้นส่งผลให้ผิวหน้ามีลายตารางถี่ขึ้น และในบางบริเวณ ผิวหน้ามีลักษณะเป็นลายทาง (stripes) ทำให้เกิดปืนสายโซ่ควอนตัมดอต (Quantum dot chains) ดังเห็นได้ชัดในรูปที่ 4.2 (ก)



รูปที่ 4.2 ภาพ AFM แสดงควอนตัมดอต InAs บนแผ่นฐานลายตาราง 50-nm $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ เมื่อ x คือ (ก) 0.08, (ข) 0.10, (ค) 0.16 และ (ง) 0.20 ลูกศรแสดงทิศ [1-10] [53]

4.1.2 การเปลี่ยนความหนาชั้นลายตาราง (Y) ที่มีผลต่อการจัดเรียงควอนตัมดอต [58]

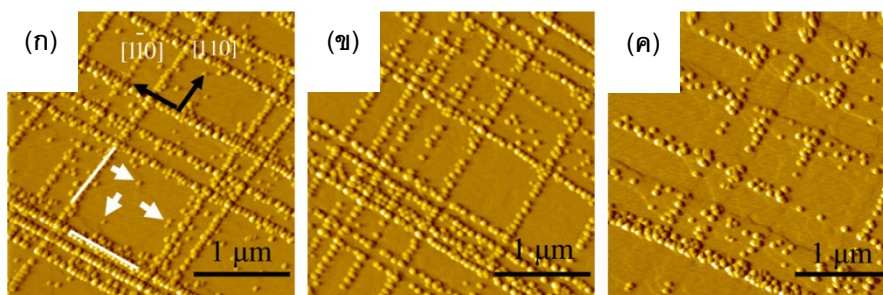
เมื่อเพิ่มความหนามากกว่าความหนาวิกฤติของการเกิดชั้นลายตารางทำให้ความเครียดของชั้นฟิล์มลดลง และส่งผลให้การกระจายตัวของความเครียดบริเวณผิวหน้าไม่เด่นชัดดังรูปที่ 2.12 ทำให้ผิวหน้ามีลักษณะสูงต่ำ เมื่อใช้เป็นแม่แบบในการปลูกควอนตัมดอตจะได้ควอนตัมดอตที่มีความเป็นระเบียบเชิงเส้นลดลงดังรูปที่ 4.3 (ข) และ (ค) ซึ่งแสดงความเป็นระเบียบของควอนตัมดอตบนลายตารางที่ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อความหนาของชั้นลายตารางเพิ่มขึ้นจาก 50 เป็น 100 และ 150 nm ตามลำดับ ทำให้สรุปได้ว่า ความหนาที่เหมาะสมแก่การปลูกชั้นลายตารางเพื่อใช้เป็นแม่แบบในการจัดเรียงควอนตัมดอตให้เป็นระเบียบในระบบ InAs/InGaAs ควรมีค่าอยู่ระหว่างค่าความหนาวิกฤติถึง 50 nm โดยประมาณ



รูปที่ 4.3 ภาพ AFM ของควอนตัมดอต InAs บนแผ่นฐานลายตาราง $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ ที่ความหนาชั้นลายตาราง (ก) 50 nm, (ข) 100 nm และ (ค) 150 nm ลูกศรคือทิศ [1-10] [58]

4.1.3 การเปลี่ยนช่วงเวลาขัดจังหวะการปลูกที่มีผลต่อการจัดเรียงควอนตัมดอท [32]

นอกจากสัดส่วนโมลของ In และความหนาของชั้นลายตารางแล้ว ปัจจัยที่มีผลต่อการจัดเรียงควอนตัมดอทอีกปัจจัยหนึ่งคือ ช่วงเวลาขัดจังหวะการปลูก (Growth Interruption, GI) หรือช่วงเวลานับตั้งแต่ปิดชัตเตอร์ของสาร (In) จนกระทั่งดำเนินการปลูกในชั้นตอนถัดไปหรือลดอุณหภูมิผิวหน้า สำหรับควอนตัมดอท InAs บนผิวเรียบ GaAs GI ที่ทำให้ผลตอบสนองทางแสงของควอนตัมดอทที่ดีที่สุด มี FWHM ต่ำสุดคือ 30 s [63] และสำหรับควอนตัมดอท InAs บนลายตาราง GI ที่ทำให้ควอนตัมดอทจัดเรียงตัวเฉพาะบนลายตารางจะมีค่าโดยประมาณ 30 s เช่นกัน [32] ในกรณีที่ GI สั้นไปควอนตัมดอทบางส่วนจะอยู่บนเส้นลายตาราง (ดังรูปที่ 4.4 (ก) ลูกศรสีขาว) ควอนตัมดอทส่วนนี้สามารถเคลื่อนย้ายตำแหน่งไปยังเส้นลายตารางกรณีที่ยังไม่ลดพลังงานของระบบ (โดยการลดอุณหภูมิผิวหน้า) ในกรณีที่ GI นานเกินไปควอนตัมดอทจะมีรูปร่างที่ผิดปกติเนื่องจาก In บางส่วนระเหยออกจากผิวหน้า (ดังรูปที่ 4.4 (ค))

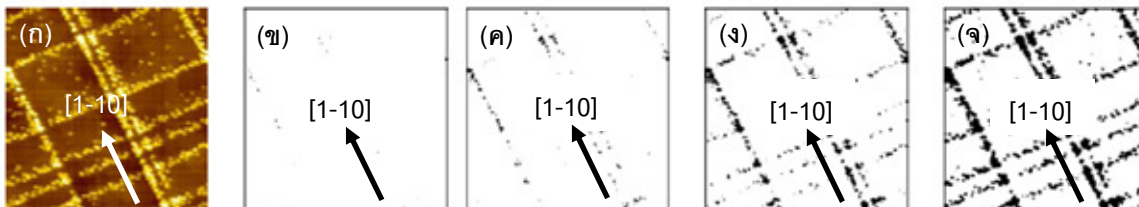


รูปที่ 4.4 ภาพ AFM ของควอนตัมดอท InAs บนแผ่นฐานลายตาราง $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ ที่ GI (ก) 0, (ข) 30 และ (ค) 60 s [32]

4.1.4 วิวัฒนาการของการเกิดควอนตัมดอท (Z) บนลายตาราง ([53]-[54])

ควอนตัมดอท InAs บนแผ่นฐานลายตารางมีความสูงไม่เท่ากันในแต่ละตำแหน่ง ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงลำดับก่อน-หลังของการเกิดควอนตัมดอท จากการศึกษาของ T. Limwongse [54] โดยการทำ image threshold จากภาพ AFM ของชั้นงานควอนตัมบนลายตาราง (สัดส่วนโมลของ In ในชั้นลายตารางคือ $x=0.2$, ความหนาชั้นลายตาราง 50 nm) สามารถสรุปวิวัฒนาการของควอนตัมดอทที่ตำแหน่งต่างๆ บนแม่แบบลายตารางเรียงลำดับจากก่อนไปหลังดังนี้ 1) ควอนตัมดอทบริเวณจุดตัดของเส้นลายตารางในทิศ $[1-10]$ และ $[110]$ ดังรูปที่ 4.5 (ข), 2) ควอนตัมดอทบนเส้นลายทางในทิศ $[1-10]$ ดังรูปที่ 4.5 (ค), 3) ควอนตัมดอทที่เรียงตัวบนเส้นลายทางในทิศ

[110] ดังรูปที่ 4.5 (ง) และควอนตัมดอตที่อยู่บนพื้นที่เรียบดังรูปที่ 4.5 (จ) สาเหตุของการก่อตัวของควอนตัมดอตบนตำแหน่งต่างๆ ที่เวลาต่างกันเกิดจากพลังงานความเครียดบนผิวหน้าลายตารางที่ตำแหน่งต่างๆ ไม่เท่ากัน



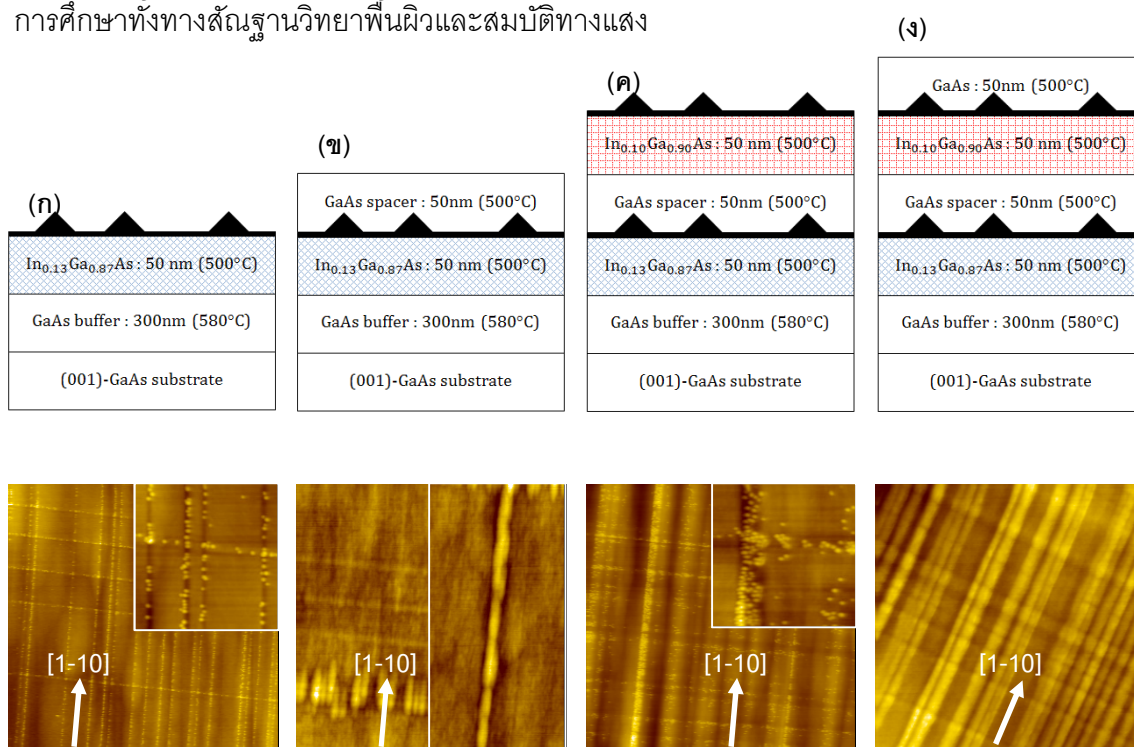
รูปที่ 4.5 (ก) ภาพ AFM ของชิ้นงานควอนตัมดอตบนลายตารางขนาด $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ และภาพจากการใช้ image thresholding โดยสีขาวหมายถึงบริเวณที่มีความสูงน้อยกว่าค่า threshold และสีดำหมายถึงบริเวณที่มีความสูงมากกว่าค่า threshold ค่า threshold ของแต่ละภาพคือ (ข) 5.5-, (ค) 4.9-, (ง) 4.0- และ(จ) 3.0 nm [54]

แม้ข้อมูลที่สรุปข้างต้นจะทำให้เข้าใจธรรมชาติของควอนตัมดอตบนชั้นลายตาราง ทั้งทางด้านสัณฐานวิทยาผิวหน้า, พารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการปลูก และวิวัฒนาการของการเกิดลายตาราง ควอนตัมดอต และควอนตัมดอตบนลายตารางก็ตาม แต่ในกรณีของควอนตัมดอตบนลายตารางยังไม่มีการศึกษาสมบัติทางแสงโดยละเอียด อีกทั้งยังไม่มีการศึกษาผลของการอบชิ้นงานซึ่งเป็นขั้นตอนมาตรฐานในการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุอิเล็กทรอนิกส์โดยทั่วไปอีกด้วย

ผลการทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกแบ่งออกเป็นหัวข้อต่างๆ ดังนี้ หัวข้อที่ 4.2 สัณฐานวิทยาพื้นผิวของควอนตัมดอตบนลายตาราง หัวข้อที่ 4.3 สมบัติของชิ้นงาน as-grown ชิ้นงานที่ผ่านการอบภายใต้ภาวะสุญญากาศสูงยิ่งโดย MBE และตู้อบ (annealer) และสมบัติโฟลโรเซชันของชิ้นงานตามลำดับดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.2 สัณฐานวิทยาพื้นผิวของควอนตัมดอตบนลายตาราง

ควอนตัมดอตเป็นโครงสร้างที่สามารถเปล่งแสงที่มีความเข้มสูงและมี FWHM แคบจึงมีการประยุกต์ใช้กับสิ่งประดิษฐ์ทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์อย่างหลากหลาย การทำให้ควอนตัมดอตในโครงสร้างมีจำนวนมากจึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับสิ่งประดิษฐ์วิธีหนึ่งซึ่งพบการประยุกต์ใช้ในเลเซอร์ ([64],[65]), โซลาเซลล์ [66] การเพิ่มจำนวนของควอนตัมดอตสามารถทำได้ทั้งในแนวระนาบโดยการทำเป็นควอนตัมดอตหนาแน่นสูง (high-density quantum dots) และการเพิ่มในแนวตั้งโดยทำเป็นควอนตัมดอตหลายชั้น (stacked quantum dots) นอกจากนี้การทำควอนตัมดอตหลายชั้นยังสามารถทำให้การเปล่งแสงของควอนตัมแต่ละชั้นมีค่ายอดที่ต่างกัน โดยการควบคุมลักษณะของควอนตัมดอตแต่ละชั้น ทำให้การเปล่งแสงโดยรวมมีลักษณะเป็นช่วงกว้าง (broad band) ซึ่งมีการประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ มีชื่อเรียกเฉพาะของแสงว่า OCT (Optical Coherence Tomography) [67] การปลูกควอนตัมดอตหลายชั้นยังอาจทำให้เกิดโครงสร้างใหม่ที่ที่น่าสนใจเช่น ควอนตัมดอตโมเลกุล (molecular quantum dots) โดยเทคนิค thin-cap and regrowth จากเหตุผลดังกล่าวการปลูกควอนตัมดอตบนลายตารางหลายชั้นจึงมีความน่าสนใจต่อการศึกษาทั้งทางสัณฐานวิทยาพื้นผิวและสมบัติทางแสง



รูปที่ 4.6 ภาพตัดขวาง (รูปบน) และภาพ AFM ขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ (รูปล่าง) ของชิ้นงาน (ก) C001, (ข) C003, (ค) C002 และ (ง) C008

ผิวหน้าของชิ้นงาน C001 คือควอนตัมดอต InAs ที่ถูกปลูกด้วยเทคนิค MEE 10/10 หมายความว่า แต่ละรอบเปิดซัดเตอร์ In 10 วินาทีและปิด 10 วินาที (ควอนตัมดอตเกิดขึ้นในรอบที่ 8) ด้วยอัตราการปลูก InAs ที่ 0.01 ML/s ควอนตัมดอตจึงเกิดขึ้นที่ความหนา 0.80 ML จากรูปที่ 4.6 (ก) ควอนตัมดอตเกือบทั้งหมดเรียงตัวบนแนวลายตาราง ควอนตัมดอตที่เรียงตัวในทิศ [1-10] สูงประมาณ 3 nm ซึ่งสูงกว่าควอนตัมดอตที่เรียงตัวในทิศ [110] ซึ่งสูงประมาณ 1 nm เส้นผ่านศูนย์กลางของควอนตัมดอตทั้งที่เรียงตัวในทิศ [1-10] และทิศ [110] วัดระหว่างจุดต่ำสุดสองจุดที่ติดกันมีขนาดประมาณ 90 nm ซึ่งเป็นขนาดปรากฏ (apparent size) ที่สูงเกินจริงจากผลของ convolution effects [68] ขนาดปรากฏจะถูกจำกัดโดยความแหลมของหัวเข็มที่ใช้วัดความสูงต่ำของผิวหน้าของชิ้นงาน เส้นผ่านศูนย์กลางจริงของควอนตัมดอตจึงต่ำกว่า 90 nm

ชิ้นงาน C003 เป็นการกลับทับควอนตัมดอตของชิ้นงาน C001 ด้วยชั้นกลับ GaAs หนา 50 nm ทำให้ควอนตัมดอตที่เรียงตัวในทิศ [110] ยึดตัวออกในทิศ [1-10] กลายเป็นควอนตัมแคช [69] ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ข) ซ้าย บริเวณควอนตัมแคชที่เกิดขึ้นสูงประมาณ 1 nm ซึ่งใกล้เคียงกับความสูงของควอนตัมดอตในชิ้นงาน C001 ในขณะที่ความกว้างและความยาวจะมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของควอนตัมดอตในชิ้นงาน C001 โดยมีค่าประมาณ 0.3 μm และ 1.2 μm ตามลำดับ ส่วนควอนตัมดอตที่เรียงตัวในทิศ [1-10] จากชิ้นงาน C001 ยึดตัวในทิศเดิมจึงเกิดการรวมตัวกันของควอนตัมดอตเกิดเป็นเส้นควอนตัมในทิศ [1-10] ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ข) ขวา เส้นควอนตัมที่เกิดขึ้นสูง 2 nm ซึ่งต่ำกว่าความสูงของควอนตัมดอตในชิ้นงาน C001 และมีความกว้างประมาณ 0.5 μm ซึ่งมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของควอนตัมดอตในชิ้นงาน C001 สันฐานวิทยาพื้นผิวที่เปลี่ยนแปลงไปของควอนตัมดอตหลังจากกลับด้วย GaAs ไม่ได้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของควอนตัมดอตแต่เกิดจาก GaAs ที่ปลูกทับไม่มีความเป็นระนาบ (non-planar) รอบๆ ควอนตัมดอต ทำให้ชิ้นงานหลังจากกลับมีลักษณะเป็นควอนตัมแคชในทิศ [110] และควอนตัมไวร์ในทิศ [1-10] [70]

ชิ้นงาน C002 เป็นการปลูกเพิ่มจาก C003 ด้วยการกลับทับชั้น GaAs ด้วย $\text{In}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{As}$ หนา 50 nm ตามด้วยควอนตัมดอตที่ถูกปลูกโดยเทคนิค MEE 4/10 หมายความว่า แต่ละรอบเปิดซัดเตอร์ In 4 วินาทีและปิด 10 วินาที โดยใช้อัตราการปลูก InAs 0.01 ML/s ทั้งชั้นแรกและชั้นที่สอง ควอนตัมดอตชั้นแรก (บนลายตาราง $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$) เกิดขึ้นที่รอบที่ 18 ควอนตัมดอตจึง

เกิดขึ้นที่ความหนา 0.72 ML ในขณะที่ชั้นที่สอง (บนลายตาราง $\text{In}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{As}$) เกิดขึ้นที่รอบที่ 23 ความดันมัดดอตจึงเกิดขึ้นที่ความหนา 0.92 ML ความหนาของความดันมัดดอต InAs บนชั้นลายตาราง $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ ของชั้นงาน C001 (0.80 ML) และชั้นงาน C002 (0.72 ML) ไม่เท่ากันเนื่องจากหลายสาเหตุ เช่น อุณหภูมิของ In และ As ในขณะปลูกอาจไม่คงที่ทำให้อัตราการปลูกจริงเบี่ยงเบนไปจาก 0.01 ML/s ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดไว้ (nominal), การดู Rheed pattern อาจเกิดความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความชัดของ pattern ขณะปลูกไม่เท่ากัน, เวลาในการคำนวณเป็นเวลาที่ครบรอบการปลูกโดยเทคนิค MEE ซึ่งต่างจากเวลาที่เกิดความดันมัดดอตจริง เป็นต้น

ความดันมัดดอตที่ปลูกบนชั้นลายตาราง $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ จะเกิดขึ้นที่รอบต่ำกว่าบนชั้น $\text{In}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{As}$ เนื่องจากความดันมัดดอตชอบจัดเรียงตัวบนแนว dislocation ของชั้นลายตารางซึ่งมีทิศ [1-10] และ [110] มากกว่าบริเวณอื่นๆ [8] และการกระจายตัวของ In และ Ga บนผิวหน้าของชั้นลายตารางไม่สม่ำเสมอโดยบริเวณที่เป็นแหล่งสะสม In คือตำแหน่งค่ายอดของสนามความเครียด [56] ซึ่งตรงกับตำแหน่ง dislocation ทำให้ลายตาราง $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ มีปริมาณ In สะสมที่ dislocation อยู่มากกว่า $\text{In}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{As}$ จึงใช้ปริมาณ InAs น้อยกว่าเพื่อปลูกความดันมัดดอต การปลูกความดันมัดดอตบนชั้นลายตาราง $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ จึงใช้เวลาน้อยกว่าการปลูกบนชั้นลายตาราง $\text{In}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{As}$ จากภาพ AFM ในรูปที่ 4.6 (ค) ความดันมัดดอตส่วนใหญ่อยู่ในทิศ [1-10] และเกาะกลุ่มกันมากกว่าความดันมัดดอตที่เรียงตัวในทิศ [110] เพราะการจัดเรียงตัวของความดันมัดดอตได้รับผลกระทบจากทั้งชั้นลายตารางบน ($\text{In}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{As}$) และล่าง ($\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$) เนื่องจากชั้นงานนี้เสมือนปลูกชั้นลายตาราง $\text{In}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{As}$ บนชั้นงาน C003 ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นความดันมัดดอตในทิศ [1-10] และมีลักษณะเป็นความดันมัดดอตในทิศ [110] ส่งผลให้ผิวหน้าของชั้นลายตาราง $\text{In}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{As}$ มีลักษณะเป็น dislocation ในทิศ [1-10] มาก ส่วนความดันมัดดอตในทิศ [110] ก่อนชั้นลายตาราง $\text{In}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{As}$ จะส่งผลต่อผิวนาน้อยทำให้ dislocation ที่อยู่ในทิศ [110] บนผิวหน้าของชั้นลายตารางมีความถี่น้อยเมื่อเทียบกับทิศ [1-10] และจากเหตุผลที่ความดันมัดดอตชอบจัดเรียงตัวอยู่บนแนว dislocation มากกว่าที่อื่น ทำให้ความดันมัดดอตบนชั้นงาน C002 ส่วนใหญ่จัดเรียงตัวตามทิศ [1-10] เช่นเดียวกับรูปที่ 4.3 (ข) และ (ค) ซึ่งมีการจัดเรียงตัวหลักในทิศ [1-10] เช่นกัน เนื่องจากการปลูก GaAs ด้วยความหนา ทำให้ dislocation ทับซ้อนกัน

ชิ้นงาน C008 เป็นการปลูกเพิ่มจาก C002 ด้วยการกลบทับควอนตัมดอตของชิ้นงาน C002 ด้วยชั้นกลบ GaAs หนา 50 nm ควอนตัมดอตชั้นแรก (บนลายตาราง $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$) เกิดขึ้นที่รอบที่ 26 หรือที่ความหนา 1.04 ML ในขณะที่ชั้นที่สอง (บนชั้นลายตาราง $\text{In}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{As}$) เกิดขึ้นที่รอบที่ 31 หรือที่ความหนา 1.24 ML ความหนาสัมบูรณ์ของควอนตัมดอตชั้นแรกและชั้นที่สองของชิ้นงาน C008 หนากว่าชิ้นงาน C002 ประมาณ 0.3 ML ซึ่งอาจเกิดจากความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ต่างๆ ขณะปลูก เนื่องจากชิ้นงานทั้งสองปลูกบน Mob ที่ต่างกัน ชิ้นงาน C008 ปลูกบน Mob#7 ซึ่งมี $T_{\text{deox}} = 630^\circ\text{C}$ ต่างจากชิ้นงาน C002 ซึ่งปลูกบน Mob#5 และมี $T_{\text{deox}} = 600^\circ\text{C}$ อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ (relative) ระหว่างควอนตัมดอตชั้นแรกและชั้นที่สองเท่ากัน ในทั้งสองชิ้นงาน ชิ้นงาน C008 เกิดควอนตัมดอตในชั้นแรกที่ 1.04 ML ก่อนชั้นที่สองที่ 1.24 ML เป็นความหนาประมาณ 0.20 ML ในขณะที่ชิ้นงาน C002 เกิดควอนตัมดอตในชั้นแรกที่ 0.72 ML ก่อนชั้นที่สองที่ 0.92 ML เป็นความหนาประมาณ 0.20 ML เช่นกัน

การเรียงตัวของควอนตัมดอตบนลายตารางชั้นแรกและชั้นที่สองจะแตกต่างกันรูปที่ 4.6 (ก) แสดงให้เห็นว่าควอนตัมดอตบนลายตารางชั้นแรก (ชิ้นงาน C001) เรียงตัวบน dislocation ของชั้นลายตารางในทิศ $[1-10]$ และ $[110]$ เป็นอย่างดี ในขณะที่รูปที่ 4.6 (ค) แสดงให้เห็นว่าควอนตัมดอตบนลายตารางชั้นที่สอง (ชิ้นงาน C002) เกาะกลุ่มกันอยู่บริเวณ dislocation ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า dislocation ของชิ้นงาน C001 เนื่องจากการซ้อนทับกันของ dislocation ด้านล่างและบน ควอนตัมดอตแต่ละชั้นมีโครงสร้างทางกายภาพต่างกันเช่น ความสูง, ความถี่ของลายตาราง, ความหนาแน่น สมบัติการดูดซับและเปล่งแสงจึงต่างกัน

ความเข้าใจโครงสร้างทางกายภาพของควอนตัมดอตในชั้นต่างๆ จะนำไปสู่การจำลองโครงสร้างเสมือนจริงในรูปของระดับพลังงานที่เป็นไปได้และผลการตอบสนองทางแสงของควอนตัมดอตบนลายตารางแต่ละชั้น ฉะนั้นการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการเปล่งแสงที่วัดได้จากชิ้นงานจริง และการจำลองโครงสร้างเสมือนจากความเข้าใจโครงสร้างทางกายภาพจึงเป็นสิ่งจำเป็นเนื่องจากจะนำไปสู่การออกแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสงต่อไป

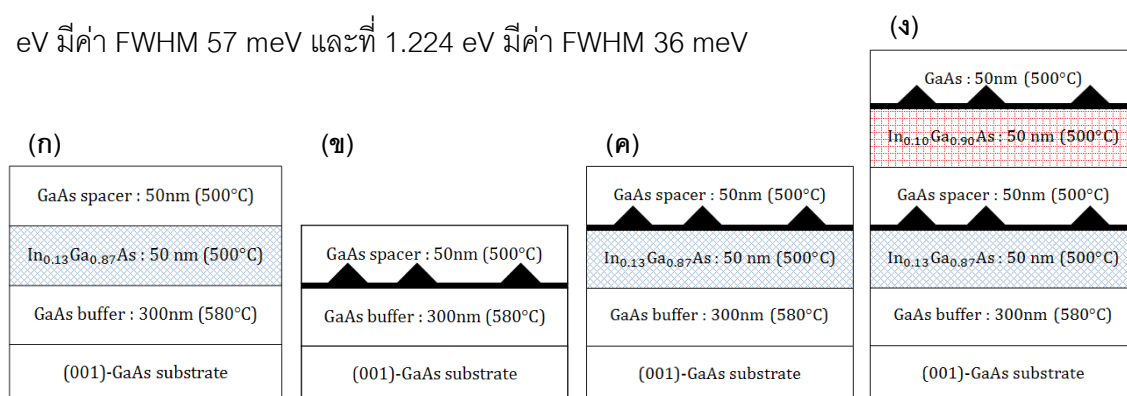
4.3 สมบัติเชิงแสงของควอนตัมดอตบนลายตาราง

สมบัติเชิงแสงของชิ้นงานควอนตัมดอตบนลายตารางก่อนและหลังการอบถูกวัดโดยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนส์ (PL) เพื่อให้เข้าใจธรรมชาติการเปล่งของมัน การศึกษาสมบัติทางแสง

แบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยดังนี้ 4.3.1 สมบัติเชิงแสงของชั้นงาน as-grown, 4.3.2 สมบัติเชิงแสงของควอนตัมดอตบนแผ่นฐานลายตารางหลังจากอบภายใต้ภาวะสุญญากาศสูงยิ่งโดย MBE และ ตู้อบ (annealer) และ 4.3.3 สมบัติโพลาไรเซชันของชั้นงานควอนตัมดอตบนแผ่นฐานลายตารางตามลำดับ

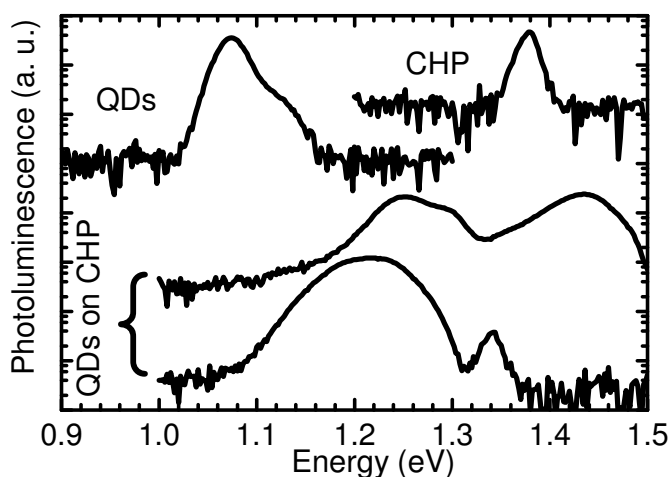
4.3.1 สมบัติเชิงแสงของชั้นงาน as-grown

ชั้นงาน as-grown ที่วัดสมบัติเชิงแสงได้แก่ 1) ชั้นงานลายตารางควมคุม $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ หนา 50 nm (C012) ดังแสดงในภาพตัดขวางรูปที่ 4.7 (ก) เปล่งแสงที่ค่ายอด 1.377 eV มีค่า FWHM 21 meV, 2) ชั้นงานควอนตัมดอตควบคุม (C013) ดังแสดงในภาพตัดขวางรูปที่ 4.7 (ข) ชั้นงานเปล่งแสงที่ค่ายอดสองค่าคือที่ 1.075 eV มีค่า FWHM 31 meV และที่ 1.117 eV มีค่า FWHM 49 meV 3) ชั้นงานควอนตัมดอตบนลายตาราง $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ หนา 50 nm (C014, C003) ดังแสดงในภาพตัดขวางรูปที่ 4.7 (ค) โครงสร้างนี้ถูกปลูกสองชั้นงานเนื่องจากเพื่อทดสอบผลกระทบของการอบสองวิธี ชั้นงาน C014 ใช้ทดสอบการอบภายใต้ภาวะสุญญากาศสูงยิ่งโดย MBE (หัวข้อที่ 4.3.2.1) และชั้นงาน C003 ใช้ทดสอบการอบโดยตู้อบ (annealer) (หัวข้อที่ 4.3.2.2) ชั้นงาน C003 และ C014 มีโครงสร้างเดียวกันแต่มีผลตอบสนองทางแสงและความหนาของชั้นควอนตัมดอต InAs ที่ต่างกันดังจะได้อธิบายในลำดับถัดไป และ 4) ชั้นงานควอนตัมดอตบนลายตารางสองชั้นดังแสดงในภาพตัดขวางรูปที่ 4.7 (ง) เปล่งแสงที่ค่ายอดสองค่าคือที่ 1.206 eV มีค่า FWHM 57 meV และที่ 1.224 eV มีค่า FWHM 36 meV



รูปที่ 4.7 ภาพตัดขวางของชั้นงาน (ก) C012, (ข) C013, (ค) C014, C003 และ (ง) C008

ชั้นงานลายตารางควบคุม $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ (C012) เปรียบเสมือนเป็นโครงสร้างควอนตัมเวลล์ที่ประกอบด้วยชั้นบัฟเฟอร์และชั้นกลบ GaAs ความหนาของชั้นลายตาราง (50 nm) มากกว่าค่าความหนาวิกฤติ (ความหนาวิกฤติสำหรับ $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ ประมาณ 15 nm [71]) ทำให้เกิดการผ่อนคลายความเครียดโดยเกิด MD ชั้นและประพุดิตัวเป็น non-radiative recombination center ทำให้มีผลตอบสนองทางแสงต่ำโดยมีค่ายอดที่ 1.377 eV มีค่า FWHM 21 meV

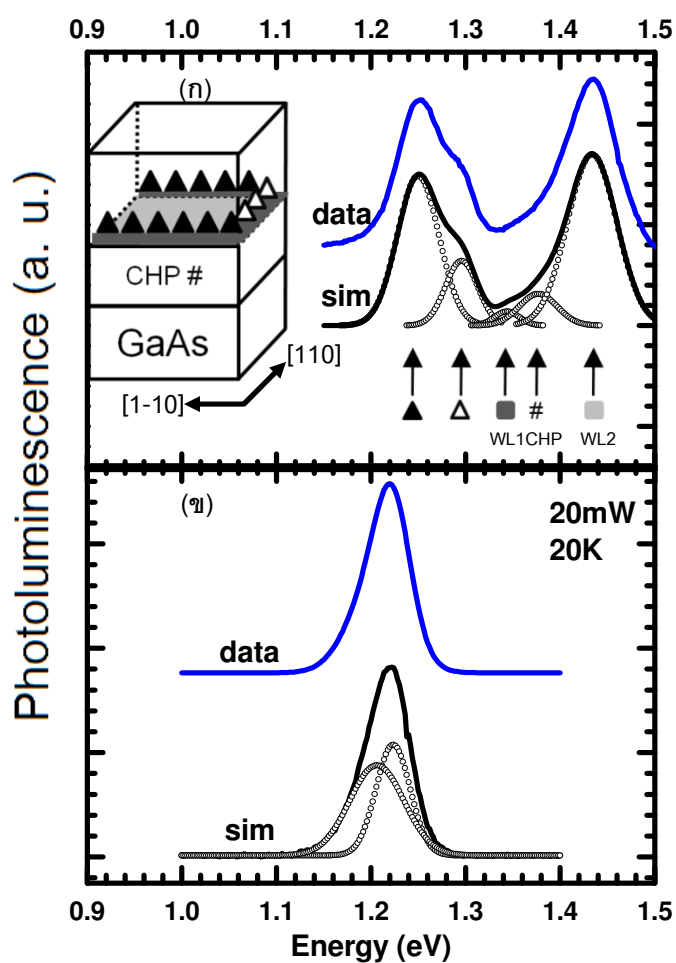


รูปที่ 4.8 ผลตอบสนองทางแสงของชั้นงาน C012 (CHP), C013 (QDs), C014 และ C003 (QDs on CHP)

ชั้นงานควอนตัมดอตควบคุม (C013) เป็นโครงสร้างควอนตัมดอต InAs หนา 1.7 ML ให้ผลการตอบสนองทางแสงที่มี 2 ยอดคือ 1.075 eV มีค่า FWHM 31 meV และ 1.117 eV มีค่า FWHM 49 meV จึงจัดเป็นโครงสร้างที่มีการกระจายตัวของควอนตัมดอต 2 กลุ่ม (Bimodal size distribution) ซึ่งมีรายงานทั่วไปที่พบการกระจายตัวของควอนตัมดอตเป็น 2 กลุ่ม ([72]-[73]) สเปกตรัมของชั้นงาน C013 ในรูปที่ 4.8 เกิดจากการกระตุ้นชั้นงานด้วยเลเซอร์กำลังต่ำจึงเป็นสเปกตรัมในสถานะพื้น

ชั้นงานควอนตัมดอตบนลายตาราง $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ (C014) ผลการตอบสนองทางแสงมี 2 ค่ายอด ค่ายอดแรกอยู่ที่ 1.222 eV มีค่า FWHM 82 meV ซึ่งเป็นผลตอบสนองทางแสงของควอนตัมดอตบนลายตาราง (ควอนตัมดอต InAs หนา 0.96 ML) เนื่องจากมี FWHM กว้างและขาขึ้น-ขาลงของค่ายอดที่มีความชันต่างกันจึงสรุปได้ว่าเป็นผลรวมจากการเปล่งแสงของควอนตัมดอตมากกว่าหนึ่งกลุ่ม (เป็นผลรวมของการเปล่งแสงของควอนตัมดอตในทิศ [1-10] และ [110])

แต่ไม่สามารถแยกเป็นสองค่ายอดได้เนื่องจากวัดในระบบ macro PL ค่ายอดที่สองอยู่ที่ 1.344 eV ซึ่งเป็นผลการเปล่งแสงของ WL ระหว่างควอนตัมดอตและลายตาราง $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ ค่ายอดของ WL ต่างจากค่า WL ของควอนตัมดอต InAs ที่ปลูกบน GaAs โดยตรงซึ่งมีค่ายอดที่ 1.42 eV [74] ชิ้นงาน C012, C013 และ C014 ถูกนำไปอบโดยภายใต้ภาวะสุญญากาศสูงยิ่งโดย MBE และรายงานผลการอบในหัวข้อที่ 4.3.2.1



รูปที่ 4.9 ผลตอบสนองทางแสงของชิ้นงาน (ก) C003 และ (ข) C008

ชิ้นงานควอนตัมดอตบนลายตาราง $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ (C003) เป็นชิ้นงานที่มีโครงสร้างเดียวกันกับชิ้นงาน C014 แต่มีชั้นควอนตัมดอต InAs หนาน้อยกว่าจึงมีการเปล่งแสงที่พลังงานสูงกว่าดังรูปที่ 4.8 การเปล่งแสงของชิ้นงานมีต้นกำเนิดมาจากตำแหน่งต่างๆในโครงสร้างดังรูปที่ 4.9 (ก) ดังนี้ ค่ายอดที่ 1.250 eV มีค่า FWHM 52 meV หรือ \blacktriangle ในรูป เป็นของควอนตัมดอตในทิศ [1-10], ค่ายอดที่ 1.296 eV มีค่า FWHM 42 meV หรือ \triangle ในรูป เป็นของควอนตัมดอตในทิศ [110], ควอนตัมดอตที่เกิดขึ้นใน 2 ทิศไม่สมมาตรกันเนื่องจากควอนตัมดอตในทิศ [1-10] ก่อตัวขึ้นก่อน

[53] ทำให้มีขนาดโดยเฉลี่ยใหญ่กว่าจึงมีค่ายอดที่ต่ำกว่าในแกนพลังงาน ค่ายอดของควอนตัมดอตในทิศทั้งสองสามารถแยกได้ชัดเจนในชั้นงานนี้เนื่องจากควอนตัมดอตในทั้งสองทิศกำลังโตอยู่ทำให้มีขนาดต่างกัน ซึ่งต่างจากชั้นงาน C014 ควอนตัมดอตในทิศ [1-10] อิมตัวแล้วในขณะที่ควอนตัมดอตในทิศ [110] กำลังโตทำให้ควอนตัมดอตทั้งสองทิศมีขนาดใกล้เคียงกันส่งผลให้แยกค่ายอดของผลตอบสนองทางแสงได้ยาก ค่ายอดการตอบสนองทางแสงถัดมาของชั้นงานนี้อยู่ที่ 1.344 eV มีค่า FWHM 31 meV หรือ ■ ในรูป ซึ่งเปล่งจาก WL ระหว่างควอนตัมดอตกับลายตารางเฉพาะส่วนที่เหนือ MD เท่านั้น ค่ายอด 1.377 eV มีค่า FWHM 64 meV หรือ # ในรูป เปล่งจากลายตาราง $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ และค่ายอดสุดท้าย (ที่ 1.42 eV มีค่า FWHM 61 meV หรือ ■ ในรูป) เปล่งจาก WL ที่ก่อตัวในพื้นที่ว่างระหว่าง InAs 2 มิติและชั้นกลบ GaAs ชั้นงาน C003 ถูกนำไปอบโดยตู้อบและรายงานผลการอบในหัวข้อที่ 4.3.2.2

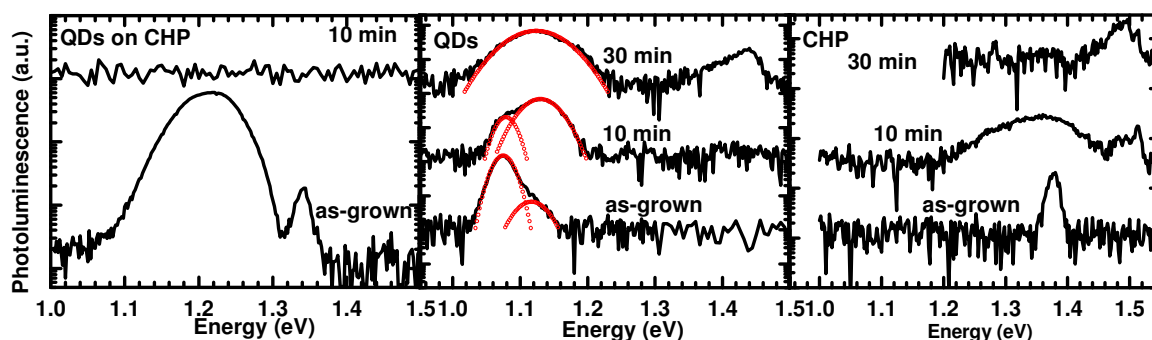
ผลการเปล่งแสงของชั้นงานควอนตัมดอตบนลายตาราง 2 ชั้น (C008) ในรูปที่ 4.9 (ข) แสดงค่ายอดสองค่าคือ 1.206 eV มีค่า FWHM 57 meV และ 1.224 eV มีค่า FWHM 36 meV ซึ่งเป็นการเปล่งแสงของควอนตัมดอตบนลายตาราง $\text{In}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{As}$ ในทิศ [1-10] และ [110] ตามลำดับ เนื่องจากทิศ [1-10] เป็นทิศที่ควอนตัมดอตเกิดก่อนจึงมีขนาดใหญ่กว่า และมีการกระจายตัวทางขนาดของควอนตัมดอตมากกว่าทิศ [110] จากภาพ AFM รูปที่ 4.6 (ค) เนื่องจากผลการซ้อนทับกันของ dislocation จากผลตอบสนองทางแสงรูปที่ 4.9 ไม่พบการเปล่งแสงของควอนตัมชั้นล่างซึ่งควรพบค่ายอดระหว่าง 1.250-1.420 eV ตามผลจากชั้นงาน C003 หรืออาจมีการเปล่งแสงแต่ถูกดูดกลืนโดยชั้นลายตาราง $\text{In}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{As}$ ซึ่งอยู่ด้านบนและประพุดิตัวเป็น non-radiative recombination center เนื่องจากเป็นชั้นที่มีจุดบกพร่อง ผลจากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า โครงสร้างที่มีการซ้อนทับของลายตารางมากกว่าหนึ่งชั้นจะไม่เกิดประโยชน์อย่างใด เนื่องจากการเปล่งแสงของควอนตัมดอตที่ปลูกบนลายตารางชั้นล่างถูกดูดกลืนโดยลายตารางที่อยู่ชั้นบน

4.3.2 สมบัติเชิงแสงของควอนตัมดอตบนแผ่นฐานลายตารางหลังจากอบภายใต้ภาวะสุญญากาศสูงยิ่งโดย MBE และตู้อบ (annealer)

การอบสามารถทำให้ผลตอบสนองทางแสงเปลี่ยนแปลง โดยอาจมีสัญญาณที่มากขึ้น-น้อยลง, FWHM ที่กว้างขึ้น-แคบลง หรือค่ายอดของสัญญาณในแกนพลังงานที่มากขึ้น-น้อยลง

สำหรับชิ้นงานควอนตัมดอตบนลายตารางเป็นชิ้นงานที่มีจุดบกพร่องที่จำเป็นในชั้นลายตารางซึ่งใช้เป็นแม่แบบในการจัดเรียงตัวของควอนตัมดอต จุดบกพร่องยังสามารถเกิดจากการปลูกผลึกที่อุณหภูมิไม่เหมาะสมเนื่องจากข้อจำกัดบางประการ จุดบกพร่องเหล่านี้สามารถรักษาโดยการอบ นอกจากนี้การอบที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากเป็นเงื่อนไขใกล้เคียงกับการปลูกชั้น overlayer เพื่อสร้างอุปกรณ์ ทำให้สามารถคาดการณ์ผลตอบสนองของแสงของอุปกรณ์ว่ามีความต่างกับชั้น active layer อย่างไร วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาผลการอบชิ้นงานควอนตัมดอตบนลายตารางโดย 2 วิธีคือ อบภายใต้ภาวะสุญญากาศสูงยิ่งโดย MBE (หัวข้อ 4.3.2.1) และตู้อบ (annealer) (หัวข้อ 4.3.2.2)

4.3.2.1 การอบภายใต้ภาวะสุญญากาศสูงยิ่งโดย MBE



รูปที่ 4.10 ผลตอบสนองของทางแสงของชิ้นงานก่อนและหลังการอบของชิ้นงาน (ก) C014 (QDs on CHP), (ข) C013 (QDs) และ (ค) C012 (CHP)

ผลการตอบสนองของทางแสงของชิ้นงานควอนตัมดอตบนลายตาราง (C014) ลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากการอบ จนไม่สามารถสังเกตเห็นได้จากกราฟดังรูปที่ 4.10 (ก) แม้ที่เวลาอบน้อยที่สุด (10 นาที) การลดลงอย่างรวดเร็วของสัญญาณ ให้ผลคล้ายกับชิ้นงานลายตาราง (C012) ในรูปที่ 4.10 (ค) แต่ต่างจากชิ้นงานควอนตัมดอต (C013) ในรูปที่ 4.10 (ข) ที่สัญญาณลดลงอย่างช้าๆ จึงเป็นข้อสันนิษฐานว่าสัญญาณที่ลดลงของชิ้นงานควอนตัมดอตบนลายตารางเกิดจากการเสื่อมสภาพของชั้นลายตารางหลังจากการอบมากกว่าการเสื่อมสภาพของควอนตัมดอต

ผลการตอบสนองของทางแสงของชิ้นงานควอนตัมดอต (C013) หลังจากการอบที่ 700°C นาน 0, 10 และ 30 นาที ดังรูปที่ 4.10 (ข) พบว่าก่อนอบและหลังจากอบ 10 นาที สัญญาณของควอนตัมดอตมีค่ายอด 2 ค่า ในขณะที่หลังจากอบ 30 นาที สัญญาณของควอนตัมดอตมีค่ายอดเพียง 1 ค่า จึงบอกได้ว่าชิ้นงานมีการกระจายตัวของขนาดควอนตัมดอตก่อนการอบและหลังการ

อบในระยะเวลาสั้นๆ เป็น 2 กลุ่ม (bimodal) แต่เมื่ออบนานขึ้นการกระจายตัวของขนาดควอนตัมดอตลดลงเหลือ 1 กลุ่ม (monomodal) การอบ 10 นาที ยังส่งผลให้เกิด blueshift ขึ้นโดยเปลี่ยนค่ายอดพลังงานต่ำจาก 1.075 เป็น 1.079 eV และค่ายอดพลังงานสูงจาก 1.117 เป็น 1.130 eV ดังรูปที่ 4.10 (ข) โดย blueshift ที่เกิดขึ้นค่าต่างจากรายงานทั่วไปซึ่งมีค่าสูงถึง 140-250 eV ([75]-[79]) แต่กลไกการเกิด blueshift ยังคงมาจาก interdiffusion หรือ intermixing เหมือนกัน

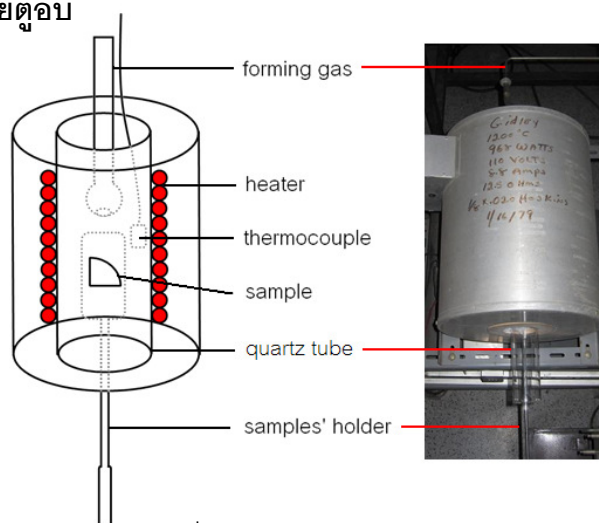
Intermixing มีกลไกการเกิดคือ อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ควอนตัมมีปริมาตรขยายกว้างขึ้นจึงทำให้ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนและโฮลห่างกันมากขึ้น ทำให้โฟตอนที่เกิดจาก recombination มีการปลดปล่อยพลังงานสูงขึ้น (blueshift) การอบที่ 30 นาทีทำให้ผลตอบสนองทางแสงลดลงมากและเปลี่ยนเป็น monomodal ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเกิด intermixing จนกระทั่งขนาดของควอนตัมดอตมีขนาดเท่าๆ กันขนาดเดียวจากที่มีการกระจายตัวเป็น bimodal ในตอนเริ่มต้น เมื่อพิจารณา FWHM พบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างการอบที่เงื่อนไข 10 และ 30 นาที โดยที่การอบ 10 นาทีที่ค่ายอดทั้งสองค่ามี FWHM 31 และ 57 meV เมื่อรวม FWHM ของค่ายอดทั้ง 2 จะมีค่าใกล้เคียงการอบที่ 30 นาทีซึ่งมี FWHM 87 meV จากการทดลองทำให้เราทราบว่าควอนตัมดอตจะเปลี่ยนการกระจายตัวจาก bimodal เป็น monomodal ระหว่างการอบ 10-30 นาทีที่ 700°C

ผลตอบสนองทางแสงของชั้นงานลายตาราง (C012) ซึ่งมีค่ายอดก่อนการอบอยู่ที่ 1.377 eV ดังรูปที่ 4.10 (ค) ซึ่งเป็นสัญญาณของลายตาราง หลังจากอบ 10 นาที ค่ายอดที่ 1.377 eV มี FWHM มากขึ้น มีสัญญาณลดลงและเกิด redshift สำหรับค่ายอดที่ 1.5 eV เกิดขึ้นจาก exciton recombination ของ GaAs ซึ่งเป็นสัญญาณที่แรงขึ้นเนื่องจากการอบ เกิดขึ้นหลังจากการอบเนื่องจาก GaAs ถูกปลูกที่ 500°C ทำให้ความเป็นผลึกไม่เท่าที่ควร การอบจะช่วยปรับปรุงความเป็นผลึกให้สมบูรณ์มากขึ้น ส่งผลให้สัญญาณของ GaAs หลังอบดีขึ้นด้วย การอบ 30 นาที ทำให้สัญญาณของ GaAs ดีขึ้นกว่าการอบ 10 นาที แต่ทำให้สัญญาณของลายตารางลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากลายตารางเป็นชั้น compressive strain ในขณะอบ ความเครียดจะถูกผ่อนคลายโดยการสร้าง MD และ TD ในโครงสร้างของชั้นลายตารางโดย MD จะเกิดในแนวระนาบของชั้นปลูก ขณะที่ TD สามารถแทรกผ่านชั้นปลูกได้ MD และ TD ที่เกิดขึ้นเป็น non-radiative recombination center จึงทำให้สัญญาณลดลง สำหรับชั้น InGaAs บางๆ ที่ถูกประกบด้วย GaAs ที่ความเครียดจะน้อย ในขณะอบจะเกิด blueshift เนื่องจาก interdiffusion และไม่เกิดการ

ลดทอนของผลตอบสนองทางแสง [80] ซึ่งต่างจากการทดลองนี้เนื่องจากโครงสร้างที่ปลูกมีความเครียดในชั้น InGaAs มาก เนื่องจากจำเป็นในการเหนี่ยวนำให้เกิดลายตารางเพื่อใช้จัดเรียงควอนตัมดอททำให้มีผลจากการผ่อนคลายความเครียดมาเกี่ยวข้องและส่งผลให้สัญญาณต่ำลงและไม่เป็น blueshift

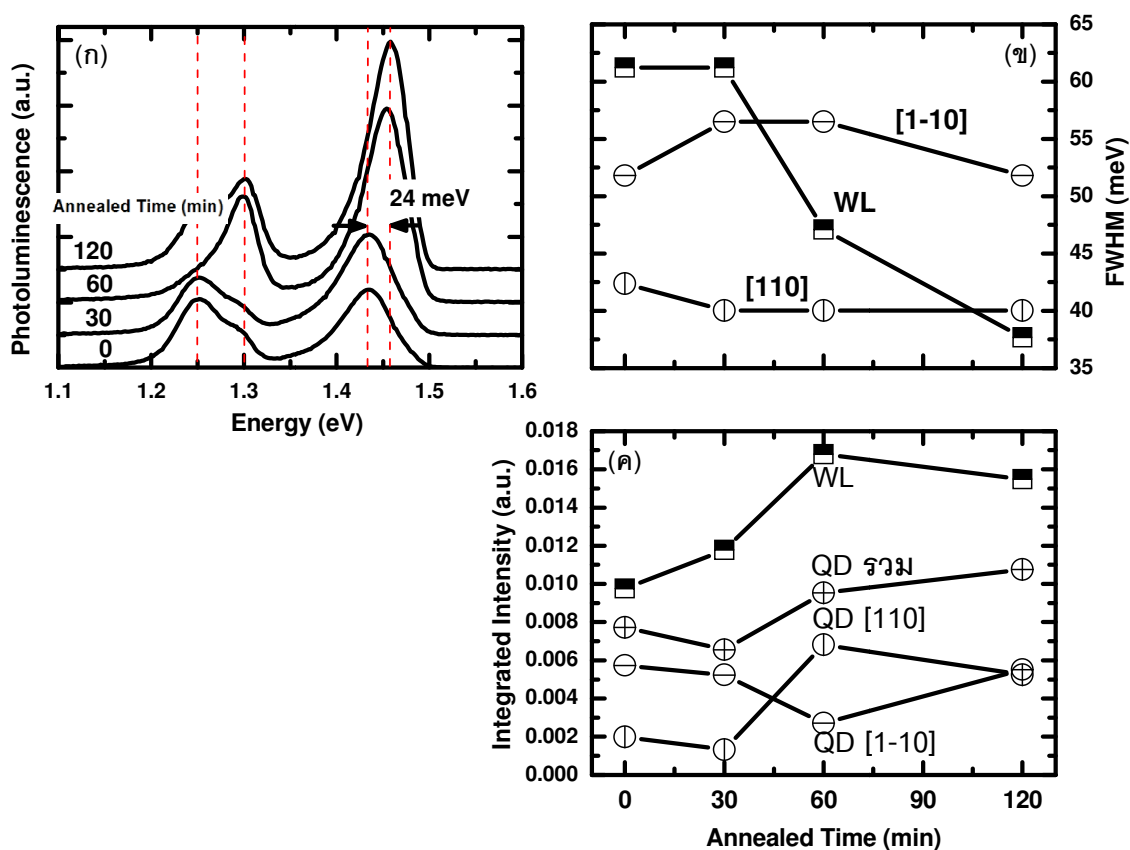
MD และ TD ที่เกิดในโครงสร้างลายตาราง (C012) ก็เกิดในชั้นงานควอนตัมดอทบนลายตาราง (C014) เช่นกัน เนื่องจากเป็นชั้นลายตารางที่มีเงื่อนไขเดียวกัน จึงกล่าวได้ว่าสาเหตุสำคัญของการลดทอนสัญญาณของชั้นงาน C014 เกิดขึ้นจากพาหะถูกจับโดย non-radiative recombination center (MD และ TD) ที่เกิดขึ้นหลังจากการอบ ไม่ได้มาจากควอนตัมดอทที่เสื่อมสภาพลง โดยพิสูจน์ได้จากชั้นงานควอนตัมดอท (C013) หลังการอบที่อุณหภูมิและเวลาเดียวกัน (700°C 10 นาที) หรือแม้กระทั่งนานกว่า (30 นาที) ก็ยังมีผลตอบสนองทางแสงที่ดีอยู่ การอบที่อุณหภูมิสูงของการทดลองนี้เพื่อการคาดการณ์ผลตอบสนองทางแสงของวัสดุหลังจากปลูกชั้น overlayer ทำให้ทราบว่าอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ปลูกชั้น overlayer ของแต่ละโครงสร้างไม่เท่ากัน โดยอุณหภูมิที่มีโครงสร้างลายตารางอยู่ควรต่ำกว่าโครงสร้างทั่วไปเพื่อหลีกเลี่ยงผลจากการผ่อนคลายความเครียดของชั้นลายตาราง ข้อเสนอแนะนี้อาจใช้เป็นข้อมูลในการตัดสินใจในการปลูกชั้น overlayer ในอนาคต โครงสร้างควอนตัมดอทบนลายตารางถูกปลูกด้วยเงื่อนไขเดียวกันเพื่ออบที่อุณหภูมิต่ำด้วยตู้อบและผ่าน forming gas ผลจากการอบด้วยวิธีนี้ทำให้การตอบสนองทางแสงมีของสัญญาณแรงขึ้นและ FWHM แคบลง ดังรายงานหัวข้อที่ 4.3.2.2

4.3.2.2 การอบโดยตู้อบ

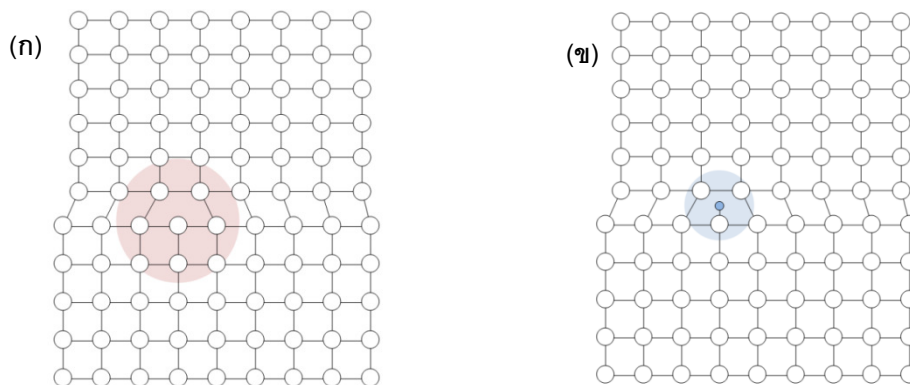


รูปที่ 4.11 แผนภาพของตู้อบ

ชิ้นงานควอนตัมดอทบนลายตาราง (C003) ถูกตัดแบ่งออกเป็นชิ้นเล็กๆ เพื่ออบด้วยตู้อบ (รูปที่ 4.11) เงื่อนไขที่ใช้คืออุณหภูมิ 350°C ที่เวลา 30, 60 และ 120 นาที ขณะอบ forming gas (N_2+H_2) เข้าสู่ระบบ การอบทำให้ผลตอบสนองทางแสงดีขึ้นดังรูปที่ 4.12 (ก) และ FWHM ของ WL แคบลงดังรูปที่ 4.12 (ข) ผลตอบสนองทางแสงที่ดีขึ้นไม่มีสาเหตุมาจากการปรับปรุงคุณภาพของผลึกเพราะอุณหภูมิที่ใช้ต่ำเกินไป (350°C) จนไม่สามารถส่งผลต่อคุณภาพผลึกได้ แต่มีสาเหตุมาจากก๊าซไฮโดรเจนที่ปล่อยเข้าสู่ระบบจำนวนมาก ประกอบกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบเพียงพอที่จะทำให้ไฮโดรเจนแตกตัวออกจาก forming gas กลายเป็นอะตอมของไฮโดรเจนและแทรกซึมผ่านโครงสร้างเพื่อจับกับ dangling bonds ที่เกิดบริเวณ MD ส่งผลให้มีพาหะเพิ่มขึ้น การปรับปรุงคุณภาพของชิ้นงานด้วยวิธีเดียวกันนี้เป็นกระบวนการมาตรฐานที่ใช้ในแผ่นฐาน Si ซึ่งมีรายงานว่าคุณภาพของชิ้นงานดีขึ้นโดยการลดประจุของบริเวณรอยต่อผิวหน้า (neutralizes interface-trapped charged) [81] โดยไฮโดรเจน เนื่องจากไฮโดรเจนสามารถแพร่ผ่าน Si ได้หลายไมโครเมตร [82]



รูปที่ 4.12 (ก) ผลตอบสนองทางแสง, (ข) FWHM และ (ค) Integrated Intensity ของชิ้นงาน C003 ก่อนและหลังการอบที่ 30, 60 และ 120 นาที



รูปที่ 4.13 (ก) แผนภาพจำลองของสนามความเครียดของผลึกขณะไม่มี และ (ข) มีไฮโดรเจน อะตอม

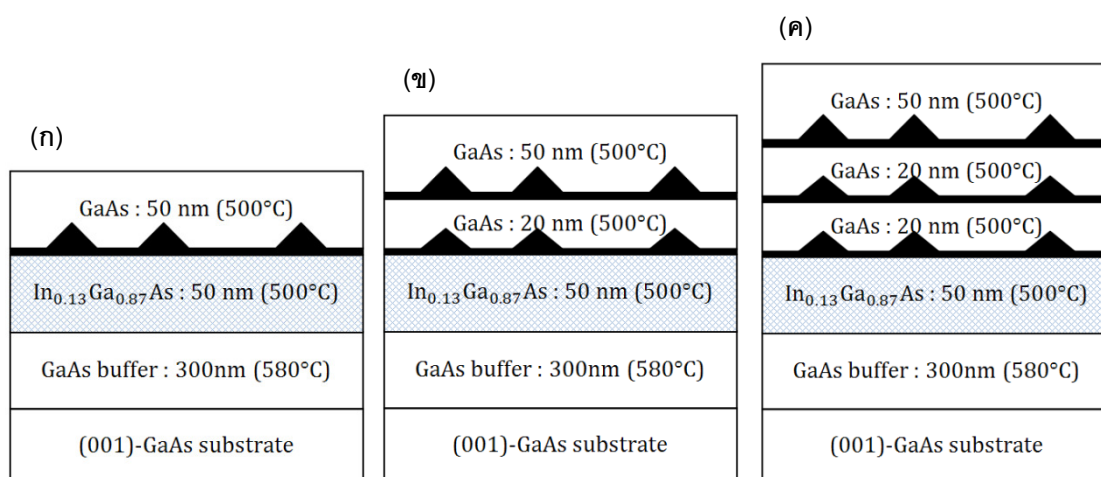
Integrated intensity ของ WL และ ควอนตัมดอตตามเวลาที่ใช้ในการอบ WL ที่ 1.42 eV เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะเวลา 1 ชั่วโมงแรกของการอบ และเริ่มคงที่หลังจากการอบที่ 2 ชั่วโมง ดังแสดงใน รูปที่ 4.12 (ก) ผลตอบสนองทางแสงเกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอน-โฮลใน โครงสร้างเอง และพาหะที่เกิดจากโครงสร้างใกล้เคียงที่ถูกจับ (trap) ซึ่งในที่นี้พาหะที่ถูกจับมาจาก ชั้นกลบ GaAs สัญญาณที่สูงขึ้นของ WL เนื่องจากชั้นกลบ GaAs ปลูกด้วยอุณหภูมิ 500 °C บน โครงสร้างที่เป็น lattice mismatched ส่งผลให้เกิดจุดบกพร่องและความเครียดขึ้นในโครงสร้าง และพื้นผิวด้านบนของ GaAs ไม่ตอบสนองทางแสงเนื่องจากเป็น surface state การอบภายใต้ ไฮโดรเจนส่งผลให้อะตอมของไฮโดรเจนซึมผ่านไปยังจับกับ dangling bonds ซึ่งส่งผลสำคัญ 2 ประการ คือ 1) พาหะในชั้นกลบมากขึ้นและถูกจับลงที่ WL ก่อนที่จะเปล่งแสงที่ WL 2) ปลดปล่อยความเครียดบางส่วนที่เกิดจาก defect และส่งผลให้เกิดการบิดเบี้ยวของผลึก (lattice distortion) ดังรูปที่ 4.13 ความเครียดบริเวณรอยต่อที่เปลี่ยนไปทำให้เกิดการเปลี่ยนระดับ พลังงาน (band offsets) จากรูปที่ 4.12 (ก) พบว่าสัญญาณทางแสงที่เพิ่มขึ้นของ WL เกิดขึ้น พร้อมกับ blueshift 24 meV สอดคล้องกับผลของ Ryu et al., ซึ่งพบ blueshift หลังจากการอบที่ 900 °C [80] จากผลการทดลองจึงสรุปได้ว่าความเครียดและการผ่อนคลายส่งผลต่อการเกิด blueshift ของโครงสร้างมากกว่า interdiffusion

การเปล่งแสงของควอนตัมดอตเกิดจากควอนตัมดอตที่เรียงตัวในทิศ [1-10] และ [110] ความแรงของสัญญาณควอนตัมดอตเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหลังจากอบ 1 ชั่วโมง กลไกการเพิ่มขึ้นของ การเปล่งแสงของควอนตัมดอตเป็นเช่นเดียวกันกับการเปล่งแสงที่เพิ่มขึ้นของ WL คือมีพาหะที่ เพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของสัญญาณน้อยกว่ามากและไม่พบ blueshift เมื่อเปรียบเทียบผลทาง แสงของควอนตัมดอตที่จัดเรียงตัวในทิศ [1-10] และ [110] ในแต่ละเงื่อนไขการอบพบว่าไม่

สามารถเปรียบเทียบสัญญาณทั้งสองค่ายอดได้เนื่องจาก PL ที่ใช้เป็นชนิด macro PL ทำให้ไม่สามารถเลือกบริเวณที่ต้องการวัด PL ได้

FWHM ของ WL มีความกว้างลดลงจาก 61 meV เป็น 38 meV ในขณะที่ FWHM ของควอนตัมดอตที่เรียงตัวในทั้งสองทิศเปลี่ยนแปลงน้อยและไม่เป็นทิศทางเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 4.12 (ข) จึงมีความเป็นไปได้สูงว่า การอบไม่มีผลกระทบต่อ FWHM ของควอนตัมดอตแต่การเปลี่ยนแปลงของ FWHM เกิดจากความไม่สม่ำเสมอของผิวหน้า ในขณะที่การลดลงของ FWHM ของ WL ชัดเจนเนื่องจาก dangling bonds ลดลงทำให้ชั้นกลบ GaAs มีสมบัติสม่ำเสมอมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบการเปล่งแสงที่ต่ำลงของ WL และสูงขึ้นของควอนตัมดอตหลังจากอบที่ 120 นาที ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าพาหะของ WL เคลื่อนที่สู่ควอนตัมดอตโดยมี InGaAs 1.377 eV เป็นทางผ่านของพาหะ

4.3.3 สมบัติโพลาริเซชันของชั้นงานควอนตัมดอตบนแผ่นฐานลายตาราง

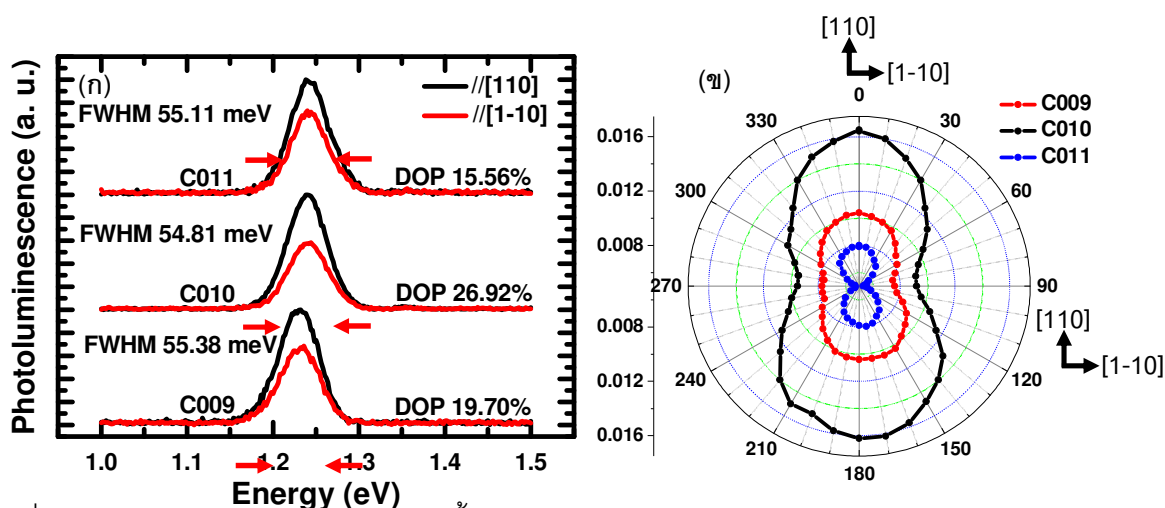


รูปที่ 4.14 ภาพตัดขวางของชั้นงาน (ก) C009, (ข) C010, และ (ค) C011

การเปล่งแสงของชั้นงานโดยทั่วไปอาจมีหรือไม่มีสมบัติโพลาริเซชันก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของโครงสร้างซึ่งมักพบสมบัติโพลาริเซชันในโครงสร้างที่จัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ จากภาพ AFM ดังรูปที่ 4.6 (ก) และ (ค) พบว่า ควอนตัมดอตบนแผ่นฐานลายตารางจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบในทิศ $[1-10]$ และ $[110]$ จึงอาจเปล่งแสงโพลาริเซชันได้ในทิศทั้งสอง

ชั้นงานที่ปลูกเพื่อศึกษาสมบัติโพลาริเซชันมี 3 ชั้นคือ C009, C010 และ C011 ชั้นงาน C009 เป็นควอนตัมดอตชั้นเดียวบนแผ่นฐานลายตาราง $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ ชั้นงาน C010 และ C011

เป็นชั้นงานที่ปลูกต่อจากชั้นงาน C009 โดยเป็นควอนตัมดอต 2 และ 3 ชั้นตามลำดับ มีชั้นแทรก GaAs ระหว่างควอนตัมดอตหนา 20 nm เนื่องจากการกลบด้วย GaAs 20 nm สูงเพียงพอที่จะกลบควอนตัมดอตได้ทั้งหมด แต่ไม่มากพอที่จะทำให้ผิวหน้าเรียบ ผิวหน้าที่ได้จากการกลบมีลักษณะเป็นควอนตัมไวร์ในทิศทาง $[1-10]$ และเป็นควอนตัมแคชในทิศ $[110]$ (เพราะการกลบ GaAs ด้วยความหนา 50 nm ยังส่งผลต่อผิวหน้าดังรูป AFM รูปที่ 4.6 (ข)) ทำให้ผิวหน้ายังมีผลของความเครียดหลงเหลืออยู่และส่งผลให้ควอนตัมดอตที่ปลูกในชั้นที่ 2 และ 3 มีการจัดเรียงตามความเครียดที่หลงเหลือนั้นโดยผลของการเปล่งแสงชั้นแรก, ชั้นที่สอง และสาม อาจส่งผลแบบเสริมกันทำให้แสงที่เปล่งออกมามีความเข้มสูงขึ้น และ/หรือมีสมบัติโพลาไรเซชันที่เด่นชัดขึ้น หรืออาจส่งผลหักล้างกันทำให้แสงที่เปล่งออกมามีความเข้มลดลง และ/หรือมีสมบัติโพลาไรเซชันที่ต่ำลง การวัดโพลาไรเซชันในการทดลองนี้ทำที่อุณหภูมิ 20 K ด้วยกำลังเลเซอร์กระตุ้น 20 mW และให้ผลการเปล่งแสงของชั้นงาน C009, C010 และ C011 ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 (ก) ผลตอบสนองทางแสงของชั้นงาน C009, C010 และ C011 (ข) การตอบสนองทางแสงที่จุดยอดเมื่อเปลี่ยนมุมของโพลาไรเซชันของชั้นงาน C009, C010 และ C011

การวัดโพลาไรเซชันทำโดยใช้โพลาไรเซอร์วางกั้นแนวแสงที่เปล่งจากชั้นงานก่อนที่จะเข้าโมโนโครมาเตอร์ จากนั้นหมุนโพลาไรเซอร์ไปที่มุมต่างๆ พร้อมสังเกตผลตอบสนองทางแสงว่ามี การเปลี่ยนแปลงอย่างไร ความเข้มของแสงที่มีโพลาไรเซชันจะเปลี่ยนแปลงขึ้น-ลงเมื่อหมุนโพลาไรเซอร์ ส่วนแสงที่ไม่มีโพลาไรเซชันจะไม่เปลี่ยนแปลงความเข้มแสงเมื่อหมุนโพลาไรเซอร์ โพลาไรเซชันของแสงจะมากหรือน้อยสามารถหาได้จากค่าโพลาไรเซชัน (Degree of Polarization, DOP) ดังความสัมพันธ์ 4.1

$$DOP = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (4.1)$$

เมื่อ I_{max} และ I_{min} คือ ความเข้มแสงที่มากที่สุดและน้อยที่สุดหลังจากผ่านที่โพลาริเซออร์ ตามลำดับ

จากกราฟรูปที่ 4.15 (ก) ชี้นำงานทั้งหมดมีค่ายอดพลังงานอยู่ระหว่าง 1.234-1.242 eV โดยค่ายอดพลังงานมาจากการเปล่งแสงของโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวแน่นอน (ควอนตัมดอต) เนื่องจากมีความแตกต่างของผลตอบสนองทางแสงเมื่อปรับมุมโพลาริเซออร์ โดยพบว่าผลของโพลาริเซชันของชี้นำงาน C009 มีค่าโพลาริเซชันที่ 19.70%, มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 26.92% สำหรับชี้นำงานที่เป็นควอนตัมดอต 2 ชั้นบนลายตาราง และมีค่าลดลงเหลือ 15.56% สำหรับชี้นำงานที่เป็นควอนตัมดอต 3 ชั้นบนลายตาราง โดยสูตรที่ใช้หา DOP เป็นดังสมการที่ 4.1 ชี้นำงานที่มีโพลาริเซชันดีที่สุดคือชี้นำงาน C010 จึงสามารถสรุปว่าควอนตัมดอตทั้งสองชั้นเปล่งแสงแบบเสริมกันในขณะที่ชี้นำงาน C011 ซึ่งเป็นควอนตัมดอต 3 ชั้นกลับเกิดการหักล้างของการเปล่งแสงทำให้มีผลตอบสนองทางแสงที่ด้อยลง และมีโพลาริเซชันที่ต่ำลง

บทที่ 5

สรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้รายงานผลการศึกษสมบัติของควอนตัมดอท InAs บนแผ่นฐานลายตาราง InGaAs ที่ปลูกโดยเทคนิคเอพิแทกซี (MBE) หัวข้อหลักในการศึกษาได้แก่ 1) สัณฐานวิทยาพื้นผิวของควอนตัมดอทบนลายตาราง 1 ชั้นและ 2 ชั้น ทำให้เข้าใจถึงความเรียบ ความขรุขระของพื้นผิว เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการปลูกโครงสร้างที่มีหลายชั้น 2) สมบัติทางแสงและสมบัติโพลาไรเซชันของชั้นงานควอนตัมดอทบนลายตารางชนิด as-grown และ 3) สมบัติทางแสงของชั้นงานที่ถูกอบภายใต้ภาวะสุญญากาศสูงยิ่งโดยระบบ MBE และการอบโดยตู้อบ

ผลทางสัณฐานวิทยาของควอนตัมดอทบนลายตาราง $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ ได้ควอนตัมดอทที่มีการกระจายตัวของขนาด 2 กลุ่ม คือ ควอนตัมดอทที่เรียงตัวในทิศ $[1-10]$ สูงประมาณ 3 nm และเรียงตัวในทิศ $[110]$ สูงประมาณ 2 nm เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยต่ำกว่า 90 nm เมื่อกลบควอนตัมดอทด้วย GaAs หนา 50 nm ควอนตัมดอทจะยึดตัวในทิศ $[1-10]$ ทำให้ผิวหน้ามีลักษณะเป็นควอนตัมไวร์ในทิศ $[1-10]$ และควอนตัมแคชในทิศ $[110]$ ซึ่งเป็นผิวหน้าที่ส่งผลต่อโครงสร้างที่จะปลูกถัดไป กรณีที่ต้องการปลูกชั้นงานที่มีโครงสร้างหลายชั้นจึงควรปลูกชั้นแทรก GaAs หนากว่า 50 nm เพื่อให้มีผลทางสัณฐานวิทยาเป็นอิสระต่อกันระหว่างชั้น ชั้นงานที่เป็นควอนตัมดอทบนลายตาราง 2 ชั้น มีลักษณะเป็นกลุ่มของควอนตัมดอทที่เรียงตัวชัดเจนในทิศ $[1-10]$ และเป็นกลุ่มควอนตัมดอทเป็นเส้นแบบไม่ชัดเจนเรียงตัวในทิศ $[110]$ ควอนตัมดอทจับกันเป็นกลุ่มในชั้นที่สองไม่เรียงตัวแบบเดียวเหมือนชั้นแรกเนื่องจากผลของผิวหน้าของชั้นแทรก GaAs ซึ่งเปรียบเป็นแผ่นฐานใหม่ของโครงสร้างชั้นที่สองมีลักษณะเป็นควอนตัมไวร์และควอนตัมแคชในทิศ $[1-10]$ และ $[110]$ ตามลำดับ โดยกลุ่มควอนตัมดอทด้านบนในทิศ $[1-10]$ มีความกว้างใกล้เคียงกับความกว้างของควอนตัมไวร์ และกลุ่มควอนตัมดอทที่เรียงตัวเป็นเส้นไม่ต่อเนื่องในทิศ $[110]$ มีลักษณะใกล้เคียงกับควอนตัมแคช สัณฐานวิทยาพื้นผิวที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากกลบด้วย GaAs เกิดจาก GaAs ที่ปลูกทับไม่มีความเป็นระนาบ (non-planar) รอบๆควอนตัมดอท ทำให้ชั้นงานหลังจากกลบมีลักษณะเป็นควอนตัมแคช และควอนตัมไวร์ดังกล่าว

การเปล่งแสงของชั้นงานควอนตัมดอทบนลายตารางชั้นเดียวที่อุณหภูมิ 20 K มีสเปกตรัมกว้างในช่วง 1.250-1.420 eV ซึ่งเป็นผลมาจากการเปล่งแสงโดยส่วนต่างๆของโครงสร้าง

เรียงลำดับจากพลังงานต่ำไปสูงดังนี้ 1) ควอนตัมดอตที่เรียงตัวในทิศ [1-10] มีค่ายอดที่ 1.250 eV และมี FWHM 52 meV, 2) ควอนตัมดอตที่เรียงตัวในทิศ [110] มีค่ายอดที่ 1.296 eV และมี FWHM 42 meV, 3) WL ระหว่างควอนตัมดอตและลายตารางเฉพาะตำแหน่งเหนือ MD มีค่ายอดที่ 1.344 eV และมี FWHM 31 meV, 4) ลายตาราง $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ มีค่ายอดที่ 1.377 eV และมี FWHM 64 meV และ 5) WL บริเวณที่ว่างมีค่ายอดที่ 1.42 eV และมี FWHM 61 meV ส่วนการเปล่งแสงของชั้นงานควอนตัมดอตบนลายตารางสองชั้นการเปล่งแสงมีสเปกตรัมที่แคบกว่าซึ่งอยู่ในช่วง 1.206-1.224 eV อีกทั้งยังมีความซับซ้อน หรือมีจำนวนค่ายอดน้อยกว่าชั้นงานควอนตัมดอตบนลายตารางชั้นเดียว ผลการทดลองแสดงค่ายอดเพียง 2 ค่าจากควอนตัมดอตบนลายตาราง $\text{In}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{As}$ เท่านั้น ได้แก่ 1) ควอนตัมดอตที่เรียงตัวในทิศ [1-10] มีค่ายอด 1.206 eV และมี FWHM 58 meV และ 2) ควอนตัมดอตที่เรียงตัวในทิศ [110] มีค่ายอดที่ 1.224 eV และมี FWHM 36 meV ควอนตัมดอตบนลายตารางชั้นที่สองมีความหนาประสิทธิผลมากกว่าชั้นแรกถึง 0.2 ML จึงมีขนาดเฉลี่ยที่ใหญ่กว่า ทำให้มีค่ายอดที่มีพลังงานต่ำกว่า เนื่องจากการเปล่งแสงของควอนตัมดอตชั้นล่างถูกจับโดยชั้นลายตารางที่สองก่อนออกมาจากชั้นงาน

การเปล่งแสงของชั้นงานควอนตัมดอต 1, 2 และ 3 ชั้นบนลายตาราง $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ โดยมี GaAs หนา 20 nm คั่นกลางระหว่างควอนตัมดอตมี DOP คือ 19.70%, 26.92% และ 15.56% ตามลำดับ สมบัติโพลาไรเซชันของควอนตัมดอต 2 ชั้นบนลายตารางมีการเปล่งแสงโพลาไรซ์ที่เด่นชัดขึ้นเนื่องจากควอนตัมดอตชั้นที่สองเรียงตัวสอดคล้องกับควอนตัมดอตชั้นแรกทำให้การเปล่งแสงมีโพลาไรซ์ที่เสริมกัน ในขณะที่การปลูกควอนตัมดอต 3 ชั้นกลับมีแสงที่โพลาไรซ์ลดลงเนื่องจากควอนตัมดอตชั้นบนสุดจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบน้อยทำให้สมบัติโพลาไรเซชันไม่เด่นชัดและลดสมบัติโพลาไรซ์โดยรวมของชั้นงาน

การเปล่งแสงของชั้นงานควอนตัมดอตบนลายตาราง $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ เสื่อมลงอย่างเห็นได้ชัดหลังการอบ 10 นาทีที่อุณหภูมิ 700 °C เนื่องจากสาเหตุที่เป็นไปได้ 2 ประการคือ การเสื่อมของควอนตัมดอตหรือลายตาราง ข้อสันนิษฐานถูกทดสอบโดยการอบชั้นงานควอนตัมดอตควบคุมที่อุณหภูมิ 700 °C นาน 10 นาที พบว่าเกิด blueshift เนื่องจากการขยายปริมาตรของควอนตัมดอต (interdiffusion) แต่ความแรงของสัญญาณไม่ลดลงมากนัก ในขณะที่การอบชั้นงานลายตารางควบคุม $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ ที่อุณหภูมิและเวลาเดียวกัน ทำให้ชั้นงานมีสัญญาณลดลงมากพร้อมกับ

FWHM ที่กว้างขึ้น จึงสรุปได้ว่าสัญญาณที่ลดลงของชั้นงานควอนตัมดอตบนลายตารางมาจากชั้นลายตารางเสื่อมคุณภาพลง เนื่องจากในชั้นลายตารางมีความเครียดแบบบีบอัด เมื่อชั้นงานถูกอบ ความเครียดจะถูกผ่อนคลายผ่านการสร้าง MD และ TD ซึ่งประพฤติตัวเป็น non-radiative recombination center ซึ่งสามารถจับพาหะอิสระได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ไม่พบสัญญาณ ดังนั้นชั้นงานที่มีชั้นลายตารางในโครงสร้างจึงเป็นชั้นงานที่ได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิสูงกว่า โครงสร้างควอนตัมดอตและเป็นข้อมูลในการตัดสินใจในการประดิษฐ์วัสดุทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการปลูกชั้น overlayer

ชั้นงานควอนตัมดอตบนชั้นลายตาราง $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ มีการเปล่งแสงที่ดีขึ้นตามลำดับหลังจากอบ 30, 60 และ 120 นาทีโดยดูบที่อุณหภูมิ 350°C ภายใต้ forming gas (N_2+H_2) ค่ายอดสัญญาณที่ดีขึ้นที่สุดคือ WL 1.42 eV โดยมีสัญญาณเพิ่มขึ้น 3-4 เท่าและเกิด blueshift 24 meV พร้อมกับ FWHM ลดลง 23 meV สัญญาณที่ดีขึ้นเนื่องมาจากก๊าซไฮโดรเจนใน forming gas ที่ปล่อยเข้าสู่ระบบแตกตัวเป็นอะตอม และแทรกซึมผ่านโครงสร้างเพื่อจับตัวกับ dangling bonds ส่งผลให้มีพาหะอิสระมากขึ้น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำให้เข้าใจพื้นฐานวิทยาพื้นผิวและสมบัติการเปล่งแสงของควอนตัมดอตบนลายตารางดีขึ้น ทำให้เข้าใจถึงขีดจำกัดทางอุณหภูมิในกระบวนการสังเคราะห์ และสาธิตให้เห็นเบื้องต้นว่าควอนตัมดอตที่ซ้อนทับกันบนลายตารางโดยมี GaAs บางๆ คั่นแยก สามารถเปล่งแสงโพลาไรซ์ได้ งานที่ควรค่าแก่การศึกษาในลำดับถัดไปคือการวัดสมบัติโพลาไรซ์ของแสงที่เปล่งออกมาจากควอนตัมดอตบนลายตาราง (cross-hatch pattern) และบนลายทาง (stripes pattern) เมื่อเทียบกับควอนตัมดอตบนพื้นผิวเรียบที่อุณหภูมิต่างๆ และกลไกที่เกี่ยวข้อง

รายการอ้างอิง

- [1] P. Sundgren, J. Berggren, P. Goldman, and M. Hammar. Highly strained InGaAs/GaAs multiple quantum-wells for laser applications in the 1200–1300 nm wavelength regime. Applied Physics Letters. 87 (2005): 071104
- [2] G. Adolfsson, S. M. Wang, M. Sadeghi, A. Larsson. High-performance long-wavelength InGaAs/GaAs multiple quantum-well lasers grown by molecular beam epitaxy. IEEE Journal of Electronics 8 (2007): 454-456.
- [3] C. Y. Ngo, S. F. Yoon, W. J. Fan and S. J. Chua. Tuning InAs quantum dots for high areal density and wideband emission. Applied Physics Letters. 90 (2007): 113103.
- [4] S. Suraprapapich, S. Thainoi, S. Kanjanachuchai, S. Panyakeow. n-GaAlAs on p-GaAs heterostructure solar cells grown by molecular beam epitaxy. Solar Energy Materials and Solar Cells 90 (2006): 2968-2974.
- [5] B. S. Passmore, J. Wu, M. O. Manasreh and G. J. Salamo, Dual broadband photodetector based on intraband and intersubband transitions in InAs quantum dots embedded in graded InGaAs quantum wells. Applied Physics Letters. 91 (2007): 233508.
- [6] C. K. Hahn, Y. J. Park, E. K. Kim, S. K. Min, S. K. Jung and J. H. Park [Selective formation of one- and two-dimensional arrayed InGaAs quantum dots using Ga₂O₃ thin film as a mask material. Applied Physics Letters 73 (1998): 2479-2481.
- [7] T. S. Yoon, H. M. Kim, D. Y. Ryu, T. P. Russell, Z. Zhao, J. Liu, Y. H. Xie, Study of growth behavior and microstructure of epitaxially grown self-assembled Ge quantum dots on nanometer-scale patterned SiO₂/Si(001) substrates. Physica status solidi B 246 (2009): 721-724.

- [8] Yoshiaki Nakamura, Akiyuki Murayama, Ryoko Watanabe, Tomokazu Iyoda and Masakazu Ichikawa. Self-organization and self-repair of a two-dimensional nanoarray of Ge quantum dots epitaxially grown on ultrathin SiO₂-covered Si substrate. Nanotechnology. 21 (2010): 095305.
- [9] J. Liang, H. Chik, A. Yin and J. Xu. Two-dimensional lateral superlattices of nanostructures: Nonlithographic formation by anodic membrane template. Journal of Applied Physics. 91 (2002): 2544.
- [10] J. Brault, S. Tanaka, E. Sarigiannidou, J.-L. Rouviere, B. Daudin, G. Feuillet, H. Nakagawa. Linear alignment of GaN quantum dots on AlN grown on vicinal SiC substrates. Journal of Applied Physics. 93 (2003): 3108.
- [11] M. Borgström, V. Zela and W. Seifert. Arrays of Ge islands on Si(001) grown by means of electron-beam pre-patterning. Nanotechnology. 14 (2003): 264.
- [12] D. Leonard, M. Krishnamurthy, C. M. Reaves, S. P. Denbaars and P. M. Petroff. Direct formation of quantum-sized dots from uniform coherent islands of InGaAs on GaAs surfaces. Applied Physics Letters. 63 (1993): 3203-3205.
- [13] V. A. Shchukin, N. N. Ledentsov, P. S. Kop'ev and D. Bimberg. Spontaneous ordering of arrays of coherent strained islands. Physics Review Letters. 75 (1995): 2968-2971.
- [14] G. Jin, J. L. Liu and K. L. Wang. Regimented placement of self-assembled Ge dots on selectively grown Si mesas. Applied Physics Letters. 76 (2000): 3591-3593.
- [15] R. M. Tromp. Instability-Driven SiGe Island Growth. Physics Review Letters. 84 (2000): 4641-4644.

- [16] H. J. Kim and Y. H. Xie. Influence of the wetting-layer growth kinetics on the size and shape of Ge self-assembled quantum dots on Si(001). Applied Physics Letters. 79 (2001): 263-265.
- [17] S. H. Xin, P. D. Wang, A. Yin, C. Kim, M. Dobrowolska, J. L. Merz and J. K. Furdana. Formation of self-assembling CdSe quantum dots on ZnSe by molecular beam epitaxy. Applied Physics Letters. 69 (1996): 3884-3886.
- [18] R. Rinaldi, C. Turco, N. Lovergeni, R. Cingolani, L. Vasanelli, E. Difabricio, L. Grilla, M. Gentili, L. Decaro and L. Temfer. Free-standing ZnSe/ZnS quantum wires with high luminescence intensity . Applied Physics Letters. 71 (1997): 3770-3772.
- [19] T. Tawara, S. Tanaka, H. Kumano and I. Suemune. Growth and luminescence properties of self-organized ZnSe quantum dots. Applied Physics Letters. 75 (1999): 235-237.
- [20] Christopher R. Graunke, David I. Wheeler, Douglas Tougaw and Jeffrey D. Will. Implementation of crossbar network using quantum – dot cellular automata. IEEE transactions on nanotechnology 4 (2005): 435-440.
- [21] B. D. Terris and T. Thomson. Nanofabricated and self-assembled magnetic structures as data storage media. Journal of Physics D: Applied Physics. 38 (2005): R199-R222.
- [22] R. Beanland, M. Aindow, T. B. Joyce, P. Kidd, M. Lourenco and P. J. Goodhew. A study of surface cross-hatch and misfit dislocation structure in $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ grown by chemical beam epitaxy. Journal of Crystal Growth. 149 (1995): 1-11.
- [23] T. S. Yeoh et al. Epitaxy of InAs quantum dots on self-organized two-dimensional InAs islands by atmospheric pressure metalorganic chemical vapor deposition. Applied Physics Letters. 79 (2) 2001: 221-223.

- [24] F. Hiwatashi and K. Yamaguchi. Selective growth of self-organizing InAs quantum dots on strained InGaAs surfaces. Applied Surface Science. 130-132 (1998): 737-741.
- [25] A. M. Andrews, A. E. Romanov, J. S. Speck, M. Bobeth and W. Pompe. Development of cross-hatch morphology during growth of lattice mismatched layers. Applied Physics Letters. 77 (2000): 3740-3742.
- [26] A. M. Andrews, A. E. Romanov, J. S. Speck, M. Bobeth and W. Pompe. Modeling cross-hatch surface morphology in growing mismatched layers. Journal of Applied Physics. 91 (2002): 1933-1943.
- [27] K. M. Kim et al. Alignment of InAs quantum dots on a controllable strain-relaxed substrate using an InAs/GaAs superlattice. Journal of Applied Physics. 92 (2002): 5453-5456.
- [28] O. Yastrubchak, T. Wosinski, T. Figielski, E. Lusakowska, B. Pecz and A. L. Tolt, Misfit dislocations and surface morphology of lattice-mismatched InAs/InGaAs heterostructures. Physica E. 17 (2003): 561-563.
- [29] K. M. Kim, Y. J. Park, S. H. Hyon, S. H. Lee, J. I. Lee, J. H. Park and S. K. Park. Artificial array of InAs quantum dots on a strain-engineered superlattice. Physica E. 24 (2004): 148-152.
- [30] Z. M. Wang, K. Holmes, Yu. I. Mazur and G. J. Salamo. Fabrication of (In,Ga)As quantum-dot chains on GaAs(100). Applied Physics Letters. 84 (2004): 1931-1933.
- [31] C. L. Zhang, B. Xu, Z. G. Wang, P. Jin and F. A. Zhao. Development of cross-hatch grid morphology and its effect on ordering growth of quantum dots. Physica E. 25 (2005): 592-596.
- [32] C. C. Thet, S. Panyakeow, S. Kanjanachuchai. Growth of InAs quantum-dot hatches on InGaAs/GaAs cross-hatch virtual substrates. Microelectronic Engineering. 84 (2007): 1562-1565.

- [33] Y.H. Xie, S. B. Samavedam, M. Bulsara, T.A. Langdo and E. A. Fitzgerald. Relaxed template for fabricating regularly distributed quantum dot arrays. Applied Physics Letters. 71 (1997): 3567-3568.
- [34] H. J.Kim, Z. M. Zhao and Y. H. Xie. Three-stage nucleation and growth of Ge self-assembled quantum dots grown on partially relaxed SiGe buffer layers. Physical Review B. 68 (2003): 205312.
- [35] K. Rajan, R. Devine, W. T. Moore and P. Maigne. Dislocation structure in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ strained-layer superlattices. Journal of Applied Physics. 62 (1987): 1713-1716.
- [36] K. Samonji, H. Yonezu, Y. Takagi and N. Ohshima. 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.
- [37] T. S. Yeoh, R. B. Swint, V. C. Elarde, J. J. Coleman. The role of the InGaAs surface in selective area epitaxy of quantum dots by indium segregation. Applied Physics Letters. 84 (2004): 3031-3033.
- [38] R. Leon, S. Chaparro, S. R. Johnson, C. Navarro, X. Jin, Y. H. Zhang, J. Siegert, S. Marcinkevicius, X. Z. Liao and J. Zou. Dislocation-induced spatial ordering of InAs quantum dots: Effects on optical properties. Journal of Applied Physics. 91 (2002): 5826-5830.
- [39] H. An and J. Motohisa. Optical properties of InAs quantum dots formed on GaAs pyramids. Applied Physics Letters. 77 (2000): 385-387.
- [40] Dong Pan, Xian Ju, Elias Towe, Qin Xu and J. W. Hsu. Self-organization of $(\text{In,Ga})\text{As}/\text{GaAs}$ quantum dots on relaxed $(\text{In,Ga})\text{As}$ films. Applied Physics Letters. 73 (1998): 2164-2166.

- [41] S. Kiravittaya, Y. Nakamura and O. G. Schmidt. Photoluminescence linewidth narrowing of InAs/GaAs self-assembled quantum dots. Physica E. 13 (2002): 224-228.
- [42] H. Welsch, T. Kipp, T. Koppen, Ch. Hayne and W. Hansen. Spatially and energetically resolved optical mapping of self-aligned InAs quantum dots. Semiconductor Science and Technology. 23 (2008): 045016.
- [43] P. Bhattacharya. Properties of Lattice matched and Strained Indium Gallium Arsenide. London: INSPEC, 1993.
- [44] *Zh. I. Alferov and N. O. N. Ledentsov, Semiconductor heterostructures. Available from: http://www.fhberlin.mpg.de/th/lectures/materialscience2004/vorlesung_2004/Introduction_to_Semiconductor_Nanostructures. [2011, October]
- [45] K. L. Kavangh et al. Asymmetries in dislocation densities, surface morphology, and strain of GaInAs/GaAs single heterolayers. Journal of applied physics (1988): 4843-4852.
- [46] A. M. Andrews, R. LeSar, M. A. Kerner, J. S. Speck, A. E. Romanov, A. L. Kolesnikova, M. Bobeth and W. Pompe. Modeling crosshatch surface morphology in growing mismatched layers Part II: Periodic boundary conditions and dislocation groups. Journal of applied physics 95 (2004): 6032-6047.
- [47] M. Tamura, A. Hashimoto and Y. Nakatsugawa. Threading dislocations in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ heterostructure. Journal of Applied Physics 72 (1992): 3398-3405.
- [48] A. E. Ramanov, W. Pompe, S. Mathis, G. E. Beltz, J. S. Speck. Threading dislocation reduction in strained layers. Journal of applied physics 85 (1999):182-192.

- [49] A. M. Andrews, J. S. Speck, A. E. Romanov, M. Bobeth and W. Pompe. Modeling cross-hatch surface morphology in growing mismatched layers. Journal of Applied Physics 91 (2002): 1933-1943.
- [50] I. Dakura and A. L. Barabasi. Dislocation free island formation in heteroepitaxial growth: A study at equilibrium. Physical Review Letters. 79 (1997): 3708-3711.
- [51] Sugawara, M. 1999. Theoretical based of the optical properties of semiconductor quantum nano-structures. In M. Sugawara (ed.). Semiconductors and Semimentals: Self-assembled InGaAs/GaAs quantum dots. pp. 1-116, San Diego: Academic Press.
- [52] S. Franchi, G. Trevisi, L. Saravalli, and P. Frigeri. Quantum Dot Nanostructures and Molecular Beam Epitaxy. Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials 47(2003): 166-195.
- [53] T. Limwongse. Evolution of InAs Quantum Dots Grown on Cross-hatch Substrates. Master's thesis, Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2008
- [54] T. Limwongse, S. Panyakeow, S. Kanjanachuchai. Evolution of InAs Quantum Dots Grown on Cross-hatch Substrates. Physica Status Solidi C 6 (2009): 806-809.
- [55] Z. M. Wang, G. J. Salamo. Lateral Alignment of Epitaxial Quantum dots. pp. 325-345. Springer, 2007: 325-345.
- [56] C. Zhang, L. Teng, Y. Wang, Z. Wang and B. Xu. Influence of dislocation stress field on distribution of quantum dots. Physica E 33 (2006): 130-133.
- [57] S. Yu. Shiryayev, F. Jensen, J. Lundsgaard Hansen, J. Wulff Petersen and A. Nylandsted Larsen. Nanoscale structuring by misfit dislocations in $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ Epitaxial Systems., Physical review letters 78 (1997): 503-506.

- [58] C. C. Thet, S. Panyakeow and S. Kanjanachuchai. The Effects of relaxed InGaAs virtual substrates on the formation of self-assembled InAs Quantum Dots. Semiconductor Science Technology 23 (2008): 055007.
- [59] S. Kanjanachuchai, M. Maitreeboriraks, C. C. Thet, T. Limwongse and S. Panyakeow. Self-assembled InAs quantum dots on cross-hatch InGaAs templates: Excess growth, growth rate, capping and preferential alignment. Microelectronic Engineering 86 (2009): 844-849.
- [60] W. Paul and H. Steinwedel. Apparatus for Separating Charged Particles of Different Specific Charges. Patent number: 2939952: 1960.
- [61] M. B. Panish, and H. Temkin. Gas Source Molecular Beam Epitaxy. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1993
- [62] N. Patanasemakul. Optical emission from InAs quantum dot molecules. Master's thesis, Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2011.
- [63] S. Kiravittaya. Homogeneity improvement of InAs/GaAs self-assembled quantum dots grown by molecular beam epitaxy. Doctoral dissertation, Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2002.
- [64] D. L. Huffaker and D. G. Deppe. Electroluminescence efficiency of 1.3 μm wavelength InGaAs/GaAs quantum dots. Applied Physics Letters. 73 (1998): 520-522
- [65] D. L. Huffaker, G. Park, Z. Zou, O. B. Shchekin, and D. G. Deppe. 1.3 μm room-temperature GaAs-based quantum-dot laser. Applied Physics Letters. 73 (1998): 2564-2566

- [66] D. Guimard et al. Fabrication of InAs/GaAs quantum dot solar cells with enhanced photocurrent and without degradation of open circuit voltage. Applied Physics Letters. 96 (203507) 2010: 1-3
- [67] S. Haffouz et al. Growth and fabrication of quantum dots superluminescent diodes using the indium flush technique: A new approach in controlling the bandwidth. Journal of Crystal Growth. 331 (2009): 1803-1806
- [68] J.O. Tegenfeldt. Image widening not only a question of tip sample convolution. Applied Physics Letters. 66 (1995): 1068-1070.
- [69] D.Bimberg, M Grundmann, N.N. Ledentsov, Quantum Dot Heterostructures. Wiley: Chichester, 1999.
- [70] S. J. Lee, J. O. Kim, S. K. Noh, J. W. Choe, K. S. Lee. Evolution of structural and optical characteristics in InAs quantum dots capped by GaAs layers comparable to dot height. Journal of Crystal Growth. 284 (2005): 39-46.
- [71] J. W. Matthews, A. E. Blanksee. Defects in epitaxial multilayers* i. misfit dislocations. Journal of Crystal Growth. 27 (1974): 118-125.
- [72] H. Lee, R. L. Webb, W. Yang and P. C. Sercel. Determination of self-organized InAs/GaAs quantum dots by reflection high energy electron diffraction. Applied Physics Letters. 72 (1998): 812-814.
- [73] G. G. Tarasov, Yu. I. Mazur and Z. Ya. Zhuchenko. Carrier transfer in self-assembled coupled InAs/GaAs quantum dots. Journal of Applied Physics. 88 (2000): 7162-7170.
- [74] M. Gérard, J. B. Génin, J. Lefebvre, J. M. Moison, N. Lebouché, F. Barthe. Optical investigation of self-organized growth of InAs/GaAs quantum boxes. Journal of Crystal Growth. 150 (1995): 351-356.

- [75] A. O. Kosogov, P. Werner, U. Gosele, N. N. Ledentsov, D. Bimberg, V. M. Ustinov, A. Y. Egorov, A. E. Zhukov, P. S. Kop'ev, N. A. Bert and Z. I. Alferov. Structural and optical properties of InAs-GaAs quantum dots subjected to high temperature annealing. Applied Physics Letters. 69 (1996): 3072-3074.
- [76] R. Leon, Y. Kim, C. Jagadish, M. Gal, J. Zou and D. J. H. Cockayne. Effects of interdiffusion on the luminescence of InGaAs/GaAs quantum dots. Applied Physics Letters. 69 (1996): 1888-1890.
- [77] S. Malik, C. Roberts, R. Murray and M. Pate. Tuning self-assembled InAs quantum dots by rapid thermal annealing. Applied Physics Letters. 71 (1997): 1987-1989.
- [78] S. J. Xu, X. C. Wang, S. J. Chua, C. H. Wang, W. J. Fan, J. Jiang and X. G. Xie. Effects of rapid thermal annealing on structure and luminescence of self-assembled InAs/GaAs quantum dots. Applied Physics Letters. 72 (1998) : 3335-3337.
- [79] A. Babinski, J. Jasinski, R. Bozek, A. Szepielow and J. M. Baranowski. Rapid thermal annealing of InAs/GaAs quantum dots under a GaAs proximity cap. Applied Physics Letters. 79 (2001): 2576-2578.
- [80] S.-W. Ryu, I. Kim, B.-D. Choe and W. G. Jeong. The effect of strain on interdiffusion in InGaAs/GaAs quantum wells. Applied Physics Letters. 67 (1995): 1417-1419.
- [81] S. M. Sze, VLSI Technology, pp.127. 2nd ed New York: McGraw-Hill, 1988.
- [82] D. K. Schroder, Semiconductor material and device characterization, pp. 68. 3rd ed.: Wiley-IEEE Press, 2006.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย เฉลิมชัย ฮิมวาส อาศัยอยู่บ้านเลขที่ 16/260 หมู่ 8 ซอยเอกชัย 62/1 ถนนเอกชัย แขวงบางบอน เขตบางบอน กรุงเทพมหานคร จบการศึกษาระดับมัธยมจากโรงเรียนอิสลามศรีอยุธยามูลนิธิ สำเร็จการศึกษาระดับมหาวิทยาลัย จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปีการศึกษา 2548 และทำงานในตำแหน่ง Equipment Engineer ณ บริษัทยูแทคไทยเป็นเวลา 3 ปี จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีผลงานตีพิมพ์และผลงานนำเสนอคือ

ผลงานตีพิมพ์ทางวิชาการระดับนานาชาติ

Optical properties of as-grown and annealed InAs quantum dots on InGaAs cross-hatch patterns. Chalermchai Himwas, Somsak Panyakeaw, and Songphol Kanjanachuchai. Nanoscal Research Letters (2011), 6:496, doi:10.1186/1556-276x-6-496

ผลงานตีพิมพ์ทางวิชาการระดับชาติ

Surface morphology of stacked InAs quantum dots on cross-hatch substrates. Chalermchai Himwas, Somsak Panyakeaw, and Songphol Kanjanachuchai. Proceeding of the 33th Electrical Engineering Conference (2010), Chiangmai, Thailand

Oral presentation

Luminescence properties of as-grown and annealed InGaAs quantum dots on cross-hatch patterns. C. Himwas, S. Panyakeow, S. Kanjanachuchai, the 4th IEEE International Nanoelectronics Conference (2011), Tao-Yuan, Taiwan