

สมบัติโพลาริไซไฟโตลูมิเนสเซนซ์ของอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอทบนพื้นผิวลายตารางที่ปลูก
ซ้อนทับหลายชั้น



นายรัฐติพงษ์ โชคอำนวย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

POLARIZED PHOTOLUMINESCENCE OF VERTICALLY STACKED InAs QUANTUM DOTS
ON CROSS-HATCH PATTERNS

Mr. Thitipong Chokamnuai



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

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 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

สมบัติโพลาริไซไฟโตลูมิเนสเซนซ์ของอินเดียมอาร์เซไนด์
ควอนตัมดอทบนพื้นผิวลายตารางที่ปลูกซ้อนทับหลายชั้น

โดย

นายฐิติพงษ์ โชคอำนวย

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.ทรงพล กาญจนชูชัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.ทรงพล กาญจนชูชัย)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.นพดล นันทวงศ์)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ฐิติพงษ์ โชคอำนวย : สมบัติโพลาริซไฟฟลูออเรสเซนซ์ของอินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอทบนพื้นผิวลายตารางที่ปลูกซ้อนทับหลายชั้น. (POLARIZED PHOTOLUMINESCENCE OF VERTICALLY STACKED InAs QUANTUM DOTS ON CROSS-HATCH PATTERNS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.ทรงพล กาญจนชูชัย, 70 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการปลูกควอนตัมดอท $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ซ้อนทับ 1,3 และ 5 ชั้นที่มีชั้นแทรก GaAs บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ด้วยระบบปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล (MBE) วัดและวิเคราะห์สัณฐานวิทยาพื้นผิวและสมบัติเชิงแสงโดยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) และระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (PL) ที่อุณหภูมิต่ำตามลำดับ การเพิ่มจำนวนชั้นซ้อนทับของควอนตัมดอท $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ มีผลต่อรูปร่าง ขนาด ความหนาแน่น และอัตราส่วนของความกว้างพื้นฐานในทิศ [1-10] ต่อ [110] (Aspect ratio) ของควอนตัมดอท ผลการวัดโพลาริซไฟฟลูออเรสเซนซ์ (PPL) จะแปรตามเศษส่วนโมลของอินเดียม (x) และจำนวนชั้นซ้อนทับ

ในกรณีที่ $x = 1$ หรือเป็นควอนตัมดอท InAs การเพิ่มชั้นควอนตัมดอทซ้อนทับจาก 1 เป็น 3 ส่งผลให้ค่า aspect ratio ของควอนตัมดอทเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญและความสูงเฉลี่ยเพิ่มขึ้นประมาณ 2 nm ทำให้ผลการเปล่งแสงมีค่าระดับโพลาริซ (DOP) เพิ่มขึ้น 38% เมื่อวัดจากกระบวนการโพลาริซไฟฟลูออเรสเซนซ์ (PPL) แต่เมื่อเพิ่มชั้นซ้อนทับเป็น 5 ค่า aspect ratio จะลดลงเล็กน้อยและความสูงเฉลี่ยลดลงประมาณ 2 nm ส่งผลให้ค่า DOP ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเหลือเพียง 3% ซึ่งบ่งชี้ถึงความสำคัญของความสูงที่ผลต่อสมบัติโพลาริซเหนือกว่าผลกระทบจาก aspect ratio เมื่อพิจารณาถึงค่า DOP ประสิทธิภาพจากโครงสร้าง

ในกรณีที่ $x = 0.5$ หรือเป็นควอนตัมดอท $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ การเพิ่มชั้นควอนตัมดอทซ้อนทับจาก 1 เป็น 3 ค่า aspect ratio ของควอนตัมดอทจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและความสูงเฉลี่ยลดลง 3.5 nm ส่งผลให้ค่า DOP เพิ่มขึ้น 25% แต่เมื่อเพิ่มชั้นซ้อนทับเป็น 5 ทั้ง aspect ratio ความสูงเฉลี่ย และค่า DOP ยังคงมีค่าประมาณเท่าเดิม

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2556

5570541521 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: QUANTUM DOTS / INAS / INGAAS / CROSS-HATCH PATTERNS / GAAS
SPACER/ AFM / PHOTOLUMINESCENCE / POLARIZATION

THITIPONG CHOKAMNUAI: POLARIZED PHOTOLUMINESCENCE OF
VERTICALLY STACKED INAS QUANTUM DOTS ON CROSS-HATCH PATTERNS.
ADVISOR: ASSOC. PROF. SONGPHOL KANJANACHUCHAI, Ph.D., 70 pp.

This thesis reports the growth of multi-stack $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ quantum dots (QDs) with GaAs spacer on $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ cross-hatch patterns (CHPs) by molecular beam epitaxy (MBE). The surface morphology and optical property are characterized by atomic force microscopy (AFM) and low-temperature photoluminescence (PL), respectively. Increasing the number of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ QD stacks affects the shape, size, density and aspect ratio of QDs. Polarized PL is found to depend on the molar fraction of In (x) and the number of stack.

In the case of $x = 1$, or the QDs are InAs, increasing the number of stacked QDs from 1 to 3 causes the aspect ratio of QDs to significantly increase and the average height of QDs to increase by approximately 2 nm, resulting in emission with increased degree of polarization (DOP) of approximately 38 %, as measured by polarized photoluminescence (PPL). But when the number of stacks increases to 5, the aspect ratio decreases slightly and the average height of QDs decreases by approximately 2 nm, resulting in a significant drop of DOP to 3 % which indicates the relative importance of height over aspect ratio in determining the effective DOP of the structures.

In the case of $x = 0.5$, or the QDs are $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$, increasing the number of stacks from 1 to 3 causes the aspect ratio of QDs to increase slightly and the average height of QDs to decrease by approximately 3.5 nm, resulting in the increase of DOP by about 25 %. But when the number of stacks increases to 5, the aspect ratio, the average height of QDs and the DOP remain almost the same.

Department: Electrical Engineering Student's Signature

Field of Study: Electrical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2013

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้จากความช่วยเหลือและการสนับสนุนจากผู้มีพระคุณทั้งหลาย จากห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการเสียสละเวลาอันมีค่าในการสอนสั่งการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือ สำหรับทำวิจัย

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รศ. ดร. ทรงพล กาญจนชูชัย ที่สละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำปรึกษา แนะนำ และสอนสั่งในความรู้และประสบการณ์อันมีค่าที่เป็นคุณต่อผู้เขียนทั้งเรื่องการเรียนรู้และการสนับสนุนต่างๆทั้งทางตรงและทางอ้อมจนกระทั่งผู้เขียนจบการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบอนุมัติหัวข้อวิทยานิพนธ์ และสอบจบการศึกษา ประกอบไปด้วย ศ. ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว และ ดร. นพดล นันทวงศ์

ขอขอบคุณบรรดารุ่นพี่และรุ่นน้อง สมาชิกห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ที่สละเวลาอันมีค่าให้คำแนะนำ ปรึกษาและความช่วยเหลือต่างๆทั้งทางตรงและทางอ้อม ระหว่างที่ผู้เขียนใช้เวลาในการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

ขอขอบคุณพี่จากห้องธุรการและห้องอุปกรณ์ที่สละเวลาอันมีค่า ให้ความช่วยเหลือด้านงานธุรการ อุปกรณ์ งานเทคนิค ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ประกอบไปด้วย พี่ศุภโชคและพี่ขวัญเรือน ไทน้อย พี่พัฒนา พันธวงศ์ และพี่พรชัย ช่างม่วง

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยร่วมเฉพาะด้านส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ (I/UCRC in HDD component) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น (CPN R&D 01-18-53), ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC), ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (NANOTEC) และสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (NSTDA)

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบคุณครอบครัวประกอบไปด้วย บิดา มารดา และน้องชาย ที่คอยให้กำลังใจ และสนับสนุนอย่างดีต่อผู้เขียนตลอดมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้พื้นฐาน.....	4
2.1) กระบวนการปลูกแบบเอพิแทกซี	4
2.2) ความไม่เข้ากันของโครงผลึกและการคลายความเครียดในชั้นปลูก	4
2.3) จุดบกพร่องที่เป็น Dislocations และ Surface step	6
2.4) ควอนตัมดอต (Quantum dots, QDs).....	8
2.5) พื้นผิวลายตาราง (Cross-hatch surface) และพื้นผิวลายทาง (Stripe surface).....	10
2.6) การจัดเรียงควอนตัมดอตด้วยกระบวนการสร้าง Strain engineering template	12
2.7) กระบวนการเปล่งแสงของโครงสร้างนาโน	13
บทที่ 3 การสังเคราะห์และวัดสมบัติ.....	15
3.1) ระบบปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล	15
3.1.1) เครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล.....	16
3.1.2) การวัดความดันไอ.....	18
3.1.3) ระบบการสร้างภาพจากการสะท้อนการแทรกสอดของลำอิเล็กตรอนพลังงานสูง (Reflection high-energy electron diffraction, RHEED)	18
3.1.4) ระบบวิเคราะห์มวลแบบสี่ขั้ว (Quadrupole mass spectrometer, QMS).....	19
3.2) การเตรียมชิ้นงานและกำหนดเงื่อนไขการปลูก	20
3.2.1) การติดตั้งงานบน Mo block.....	20
3.2.2) กระบวนการ Pre-heat	21
3.2.3) กระบวนการ De-gas.....	21
3.2.4) กระบวนการ De-ox.....	22
3.2.5) การสอบเทียบอุณหภูมิผิวหน้า.....	23
3.2.6) การสอบเทียบอัตราการปลูกของสารประกอบ GaAs.....	24

3.2.7) การสอบเทียบอัตราการปลูกของสารประกอบ InAs	25
3.3) การปลูกชั้นผลึก	25
3.3.1) การปลูกชั้นก่อนผลึก	25
3.3.2) การปลูกชั้นพื้นผิวลายตาราง	26
3.3.3) การปลูกชั้นควอนตัมดอท	26
3.3.4) การปลูกชั้นกลบทับ GaAs.....	27
3.4) ลักษณะสมบัติของชิ้นงาน.....	28
3.4.1) สัณฐานวิทยาพื้นผิว.....	28
3.4.2) สมบัติเชิงแสง	29
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	32
4.1) สรุปผลการทดลองควอนตัมดอทบนพื้นผิวลายตารางในอดีต	32
4.1.1) การเปลี่ยนเศษส่วนโมลของ In (x) และผลต่อการจัดเรียงตัวของควอนตัมดอท	33
4.1.2) การเปลี่ยนความหนาของชั้นลายตาราง (y) และผลต่อการจัดเรียงตัวของควอนตัมดอท	34
4.1.3) การเปลี่ยนช่วงเวลาขัดจังหวะการปลูกและผลต่อการจัดเรียงตัวของควอนตัมดอท ...	34
4.1.4) การเปลี่ยนความหนาของควอนตัมดอท (z) บนพื้นผิวลายตาราง	35
4.1.5) ควอนตัมดอทบนพื้นผิวลายตาราง 1 ชั้นและซ้อนทับมากกว่า 1 ชั้น.....	36
4.1.6) สมบัติเชิงแสงของควอนตัมดอทบนพื้นผิวลายตาราง	37
4.2) สัณฐานวิทยาพื้นผิวของควอนตัมดอท $In_xGa_{1-x}As$ ที่ปลูกซ้อนทับกันบนพื้นผิวลายตาราง $In_{0.2}Ga_{0.8}As$	40
4.2.1) กรณี $x = 1$: ควอนตัมดอท InAs	41
4.2.2) กรณี $x = 0.5$: ควอนตัมดอท $In_{0.5}Ga_{0.5}As$	43
4.3) สมบัติเชิงแสงของควอนตัมดอท $In_xGa_{1-x}As$ ที่ปลูกซ้อนทับกันบนพื้นผิวลายตาราง $In_{0.2}Ga_{0.8}As$	46
4.3.1) กรณี $x = 1$: ควอนตัมดอท InAs	46
4.3.2) กรณี $x = 0.5$: ควอนตัมดอท $In_{0.5}Ga_{0.5}As$	51
บทที่ 5 สรุป.....	56
รายการอ้างอิง	59

ภาคผนวก.....	65
รายละเอียดของกระบวนการปลูกชิ้นงาน A', B', C', D', E' และ F'.....	66
ผลงานตีพิมพ์.....	69
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	70



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1

บทนำ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำถูกค้นคว้าและพัฒนาอย่างแพร่หลายทั่วโลก เพื่อตอบรับกับความต้องการในการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และสิ่งประดิษฐ์เชิงแสง ในช่วงแรกสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างจากโครงสร้างโฮโม (Homostructure) ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้สร้างสิ่งประดิษฐ์เชิงแสง ภายหลังจากสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างจากโครงสร้างเฮเทอโร (Heterostructure) ได้รับความสนใจในการพัฒนามากขึ้น เนื่องจากสมบัติเชิงแสงที่ดีในการกักพาหะบริเวณไวงาน สามารถปล่อยพลังงานในรูปของแสงที่มีกระแสขีดเริ่มต่ำ (Low threshold current) เช่น เลเซอร์ (Laser) ([1]-[2]) และแอลอีดี (LED) [3] หรือสิ่งประดิษฐ์ที่รับแสงมาเปลี่ยนเป็นพลังงาน เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) [4] และดีเทคเตอร์ (Detector) [5] ซึ่งการสังเคราะห์สิ่งประดิษฐ์แต่ละแบบข้างต้นในปัจจุบัน ประยุกต์ใช้การสังเคราะห์โครงสร้างนาโนในหลายหน่วยงานวิจัย

โครงสร้างนาโนที่สำคัญถูกสังเคราะห์เพื่อใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์ คือ โครงสร้างควอนตัมดอต (Quantum dots) เป็นโครงสร้างนาโนขนาดเล็กที่สามารถกักกักประจุ และมีมิติความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เป็นศูนย์ การสร้างควอนตัมดอตสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธี 1) วิธี Top-down ในวิธีนี้ควอนตัมดอตถูกสร้างขึ้นโดยการกำหนดลวดลายโครงสร้างด้วยหน้ากาก (Mask) ([6],[7],[8]) และการทำแบบลงบนผิวหน้าด้วยกระบวนการที่หลากหลาย เช่น การทำลิโธกราฟี (Lithography) [6] ด้วยเลเซอร์หรือลำอิเล็กตรอน [9] เป็นต้น วิธีนี้สามารถควบคุมการจัดเรียงและขนาดของควอนตัมดอต แต่จะเพิ่มความไม่สมบูรณ์ของผลึก (Defect) ส่งผลให้เกิด Non-radiative recombination center จึงเกิดการลดทอนคุณสมบัติเชิงแสงและเชิงไฟฟ้า และเป็นกระบวนการที่มีต้นทุนสูง 2) วิธี Bottom-up วิธีนี้จะใช้การสังเคราะห์ควอนตัมดอตจากการปลูกชั้นสารประกอบที่มีสมบัติความไม่เข้ากันของผลึก (Lattice mismatched) กับแผ่นฐานตั้งต้น เรียกชั้นปลูกนี้ว่า ชั้นเอพิหรือชั้นเอพิแทกซ์ (Epitaxial layer) ความเครียด (Strain) สะสมจะเพิ่มขึ้นเมื่อชั้นเอพิหนาขึ้น เมื่อชั้นเอพิหนาเกินค่าความหนาวิกฤติ (Critical thickness) จะเกิดการคลายความเครียด (Strain relaxation) เกิดเป็นโครงสร้างแบบก่อตัวเองเป็นเกาะสามมิติ เรียกว่า ควอนตัมดอต (Quantum dots, QDs) การปลูกควอนตัมดอตสามารถสังเคราะห์ได้จากสารประกอบหลายชนิด เช่น ควอนตัมดอตจากสารประกอบหมู่ III-V ([10]-[11]) จากการปลูกสาร InAs บนแผ่นฐาน GaAs, ควอนตัมดอตจากสารประกอบหมู่ IV-IV ([12],[13],[14]) จากการปลูกสาร Ge บนแผ่นฐาน Si และควอนตัมดอตจากสารประกอบหมู่ II-VI จากการปลูกสาร CdSe บนแผ่นฐาน ZnSe ([15],[16],[17]) เป็นต้น การก่อตัวของควอนตัมดอตจะเป็นแบบสุ่มทั่วผิวหน้าของชิ้นงาน การพัฒนาผ่านงานวิจัยที่ใช้ลดความสุ่มของการก่อตัวของควอนตัมดอตจึงเป็นที่สนใจเพื่อประยุกต์ในการสังเคราะห์โครงสร้างที่ใช้ใน

สิ่งประดิษฐ์ที่ต้องการขนาดและการจัดเรียงตัวที่แน่นอนของควอนตัมดอท เช่น QCA [18] เป็นต้น ซึ่งสามารถทำได้จากการปลูกชั้นพื้นผิวลายตาราง (Cross-hatch surface) บนแผ่นฐานตั้งต้น จากนั้นจึงปลูกชั้นควอนตัมดอท ความเครียดที่เกิดจากชั้นพื้นผิวลายตารางจะส่งผลให้ควอนตัมดอทก่อตัวส่วนใหญ่อยู่บนชั้นพื้นผิวลายตาราง การสังเคราะห์แบบ Bottom up โดยการปลูกผลึกบนแผ่นฐานเรียกว่า กระบวนการเอพิแทกซี (Epitaxy)

กระบวนการเอพิแทกซีเป็นเทคนิคการปลูกฟิล์มบางซึ่งเป็นผลึกเดี่ยว (Epitaxy Growth) ลงบนแผ่นฐานตั้งต้น จำแนกออกเป็น 3 ประเภทหลักตามสถานะของสารตั้งต้น ได้แก่ 1) การปลูกผลึกแบบสถานะไอ (Vapor phase epitaxy, VPE) 2) การปลูกผลึกแบบสถานะของเหลว (Liquid phase epitaxy, LPE) และ 3) การปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล (Molecular beam epitaxy, MBE) ในหลายหน่วยงานวิจัยนิยมใช้การปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล เพราะเป็นเทคนิคที่สามารถควบคุมอัตราการปลูกได้ในระดับชั้นโมโน/วินาที (Monolayer/second, ML/s) ซึ่งมีความละเอียดสูงที่สุด ทำให้การสังเคราะห์โครงสร้างนาโน (Nanostructure) สามารถควบคุมลักษณะโครงสร้าง, ขนาด, สมบัติเชิงไฟฟ้า และสมบัติเชิงแสงได้ตามที่ออกแบบไว้ การปลูกผลึกแบบลำโมเลกุลยังสามารถสังเคราะห์โครงสร้างที่มีความซับซ้อนและมีความแตกต่างกันในแต่ละชั้นปลูก โดยเฉพาะโครงสร้างควอนตัมดอทที่ซ้อนทับกันหลายชั้นบนพื้นผิวลายตารางซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

พื้นผิวลายตารางสังเคราะห์จากการปลูกชั้นสารประกอบที่มีค่าคงตัวผลึกต่างจากแผ่นฐานตั้งต้น ความไม่เข้ากันของผลึกจะทำให้เกิดความผิดปกติ (Dislocation) 2 ประเภท คือ 1) Misfit dislocation (MD) ที่เกิดบริเวณรอยต่อของชั้นปลูกกับแผ่นฐานตั้งต้น มีลักษณะเป็นแนวยาวตามแนวรอยต่อ และ 2) Threading dislocation (TD) ที่เกิดจากผลกระทบจาก MD ที่เคลื่อนจากบริเวณรอยต่อไปยังบริเวณผิวหน้า ซึ่งความเครียดที่ส่งขึ้นยังผิวหน้าจะทำให้มีลำดับการเกิดโครงสร้างที่ต่างกันบริเวณที่ต่างกัน เมื่อชั้นปลูกมีความหนาเกินค่าวิกฤติ ความเครียดที่เกิดบนผิวหน้าจะทำให้เกิดลอนใน 2 ทิศทางผลึก คือ ทิศ [1-10] และทิศ [110] ตามลำดับ ดูเป็นรูปลายตาราง จึงถูกเรียกว่า พื้นผิวลายตาราง สามารถนำไปใช้เป็นแม่แบบสำหรับการปลูกโครงสร้างระดับนาโนที่ต้องการลดการก่อตัวแบบสุ่ม เช่น การปลูกควอนตัมดอทบนพื้นผิวลายตาราง

การปลูกควอนตัมดอทบนพื้นผิวลายตารางที่สังเคราะห์จากระบบปลูกผลึกแบบลำโมเลกุลได้รับความสนใจในงานวิจัยจากหลายกลุ่ม [18] เนื่องจากเป็นแนวทางในการพัฒนาสู่การประยุกต์ใช้ในทั้งสิ่งประดิษฐ์เชิงไฟฟ้าและเชิงแสง เนื่องจากแนวโน้มที่สามารถเพิ่มความเป็นระเบียบก่อตัวของควอนตัมดอท เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กับสิ่งประดิษฐ์ประเภท QCA และความเป็นระเบียบนี้ยังช่วยเพิ่มสมบัติโพลาไรซ์ (Polarization) ซึ่งมีประโยชน์กับสิ่งประดิษฐ์เชิงแสงประเภทต่างๆ หลังจากทีปลูกโครงสร้างเสร็จ ต้องนำชิ้นงานออกจากระบบปลูกผลึกแบบลำโมเลกุลเพื่อนำไป

ตรวจสอบและวัดสมบัติทางกายภาพด้วยเครื่องมือจากภายนอก (Ex-situ) เช่น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) [19], กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM) ([20]-[21]), กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscope, AFM) [22], เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffractometer) [21] และการวัดผลตอบสนองทางแสงโดยระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence, PL) ([23],[24],[25],[26],[27])

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ในการปลูกควอนตัมดอท $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ โดย $x > y$ ([28],[29],[30],[31],[32],[33],[34],[35],[36]) ตั้งแต่การปลูกควอนตัมดอท 1 ชั้นและการปลูกซ้อนทับมากกว่า 1 ชั้น หลังจากนั้นนำไปตรวจสอบสมบัติทางกายภาพเพื่อปรับเศษส่วนโมลของชั้นพื้นผิวลายตารางเพื่อทำความเข้าใจลักษณะก่อตัวของลอนใน 2 ทิศ และเศษส่วนโมลของควอนตัมดอทเพื่อทำความเข้าใจกระบวนการก่อตัวทั้งบนชั้นพื้นผิวลายตารางและชั้นเรียบ ต่อจากนั้นนำไปตรวจสอบสมบัติเชิงแสงเพื่อทำความเข้าใจในการเปล่งแสงและสมบัติโพลาไรซ์ของควอนตัมดอทที่ซ้อนทับกันบนพื้นผิวลายตารางเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในสิ่งประดิษฐ์เชิงไฟฟ้าและเชิงแสงต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและความรู้พื้นฐาน

บทนี้กล่าวถึงรายละเอียดของกระบวนการปลูกแบบเอพิแทกซี เริ่มจากหัวข้อที่ 2.1 อธิบายความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์และสมบัติเชิงแสงของโครงสร้างนาโนประกอบด้วยโครงสร้างควอนตัมดอท $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, พื้นผิวลายตารางและพื้นผิวลายทาง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$, ควอนตัมดอท $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ การสังเคราะห์โครงสร้างทั้งหมดล้วนอาศัยหลักการเดียวกัน คือ ความเครียดจากความไม่เข้ากันของโครงผลึก และการคลายความเครียดในชั้นเอพิ ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 2.2 และในหัวข้อ 2.3 กล่าวถึงจุดบกพร่องที่เป็น Dislocations และ Surface step ส่วนท้ายของบทจะกล่าวถึงทฤษฎีการก่อตัวของควอนตัมดอทในหัวข้อ 2.4 และพื้นผิวลายตารางในหัวข้อ 2.5 ต่อมาในหัวข้อที่ 2.6 กล่าวถึงการจัดเรียงควอนตัมดอทด้วยกระบวนการสร้าง Strain engineering template สุดท้ายในหัวข้อที่ 2.7 กล่าวถึงการเปล่งแสงของโครงสร้างระดับนาโน

2.1) กระบวนการปลูกแบบเอพิแทกซี

เอพิแทกซี คือ กระบวนการปลูกผลึกเดี่ยวลงบนแผ่นฐานที่เป็นผลึกเดี่ยว เรียกชั้นที่ปลูกได้ว่าชั้นเอพิ ชั้นเอพิสามารถสังเคราะห์ได้หลายวิธี เช่น การปลูกผลึกแบบสถานะไอ, การปลูกผลึกแบบสถานะของเหลว และการปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล กระบวนการเอพิแทกซีเป็นที่นิยมสำหรับงานวิจัยหลายกลุ่มเนื่องจากได้ผลึกเดี่ยวคุณภาพสูง หากชั้นเอพิมีองค์ประกอบทางเคมีเหมือนกับแผ่นฐาน กล่าวคือสารที่ปลูกมีโครงผลึกที่เข้ากันได้ (Lattice match) กับแผ่นฐาน จะเรียกว่า โฮโมเอพิแทกซี (Homoepitaxy) โดยมากจะใช้เพื่อสังเคราะห์ฟิล์มบางที่มีความเข้มข้นของสารเจือที่ต่างจากแผ่นฐาน หากชั้นเอพิมีองค์ประกอบทางเคมีต่างจากแผ่นฐาน ไม่ว่าจะโครงผลึกจะเข้ากันได้หรือไม่ก็ตาม จะเรียกว่า เฮเทอโรเอพิแทกซี (Heteroepitaxy) กรณีที่ค่าคงตัวผลึก (Lattice constant) ของชั้นเอพิเท่ากับของแผ่นฐาน ชั้นเอพิจะก่อตัวแบบ 2 มิติ เช่นเดียวกับโฮโมเอพิแทกซี แต่หากต่างจากของแผ่นฐาน ชั้นเอพิจะมีความเครียดสะสมอยู่ หากชั้นเอพิหนาเกินค่าความหนาวิกฤติจะเกิดการคลายความเครียด ทำให้ชั้นเอพิไม่เป็นฟิล์มบางที่เรียบแต่จะกลายเป็นโครงสร้างนาโนแบบต่างๆ อธิบายโดยละเอียดในหัวข้อ 2.2

2.2) ความไม่เข้ากันของโครงผลึกและการคลายความเครียดในชั้นปลูก

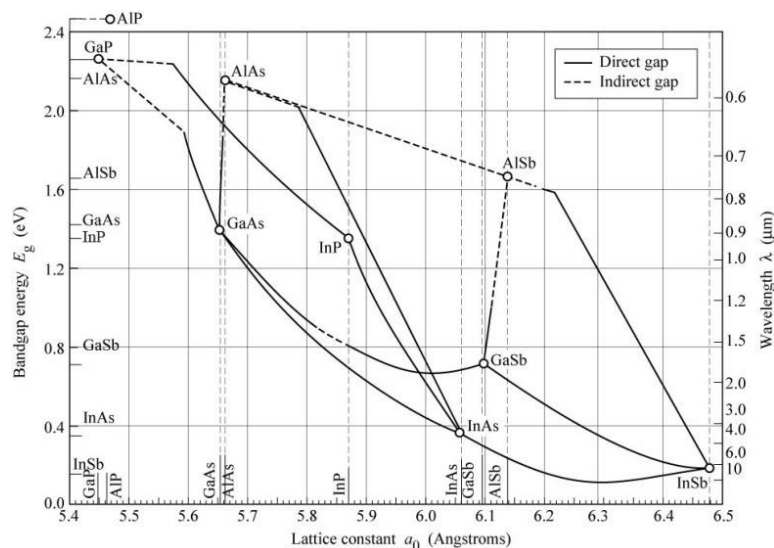
การปลูกฟิล์มบางของสารประกอบลงบนแผ่นฐาน จะให้ฟิล์มที่มีสัณฐานวิทยา (Morphology) แตกต่างกันไป เรียบบ้าง ขรุขระบ้าง ขึ้นอยู่กับความเข้ากันหรือไม่เข้ากันระหว่างโครงผลึกของฟิล์มกับของแผ่นฐาน ในการปลูกฟิล์มบางแบบโฮโมเอพิแทกซี แผ่นฐานและฟิล์มเป็นสารชนิดเดียวกัน โครงผลึกจึงเข้ากันได้โดยปริยาย ในขณะที่การปลูกฟิล์มบางแบบเฮเทอโรเอพิแทกซีจะมี

ทั้งแบบที่โครงผลึกเข้ากันได้ เช่น การปลูก $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ลงบน GaAs และแบบที่เข้ากันไม่ได้ เช่น การปลูก $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ลงบน GaAs เนื่องจากค่าคงตัวผลึกของ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ มีค่าใกล้เคียง GaAs ในกรณีแรก และของ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ต่างจาก GaAs ในกรณีหลัง สำหรับสารประกอบที่ใช้ในงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ คือ สารประกอบหมู่ III-V ประกอบด้วย GaAs, InAs และ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ การเลือกใช้สารประกอบ InAs และ GaAs เนื่องจากเป็นสารประกอบประเภท Direct band gap ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในสิ่งประดิษฐ์เชิงแสง และเป็นวัสดุราคาถูกเหมาะสมแก่การผลิตในภาคอุตสาหกรรม การสังเคราะห์โครงสร้างนาโนเกิดขึ้นจากความไม่เข้ากันของโครงผลึกเนื่องจากสารประกอบ GaAs มีค่าคงตัวผลึกต่ำกว่า $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ และมีช่องว่างแถบพลังงาน (Energy gap, E_G) ตามตารางที่ 1 ผลึกที่ปลูกจึงต้องลดค่าคงตัวผลึกลงเพื่อจัดเรียงตัวให้เข้ากับแผ่นฐาน เป็นสาเหตุให้เกิดความเครียดขึ้นในชั้นเอพิ จากนั้นจึงเกิดการคลายความเครียดในชั้นเอพิ ทำให้เกิดโครงสร้างระดับนาโนเมตรต่างๆ

การคลายความเครียดในชั้นเอพิเกิดขึ้นเมื่อปลูกสารประกอบที่มีค่าคงตัวผลึกต่างจากสารในแผ่นฐานและชั้นเอพิมีความหนาเกินค่าความหนาวิกฤติ ความเครียดในชั้นเอพิจำแนกออกได้เป็นแบบบีบอัด (Compressive strain) และความเครียดแบบขยายตัว (Tensile strain) ความเครียดที่เกิดขึ้นเมื่อปลูกสารประกอบ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ลงบนแผ่นฐาน GaAs เป็นความเครียดแบบบีบอัด ขนาดความเครียดจะเพิ่มขึ้นตามความหนาของชั้นเอพิ เมื่อชั้นเอพิมีความหนาเกินค่าความหนาวิกฤติ (Critical thickness) จะเกิดการคลายความเครียดสะสมที่เกิดในชั้นเอพิ กรณีที่ความเครียดสะสมมีค่ามาก จะเกิดโครงสร้างควอนตัมดอต กรณีที่ความเครียดสะสมมีค่าน้อย จะเกิดจุดบกพร่อง (Defect) ที่เป็น Dislocations และ Surface step ที่เป็นสาเหตุในการเกิดขึ้นพื้นผิวลายตารางอธิบายโดยละเอียดในหัวข้อ 2.3

ตารางที่ 2.1 สมบัติของ InAs, GaAs และ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ที่ 300 K [37]

Material	Energy gap (eV)	Lattice constant (Å)
InAs	1.424	5.6533
GaAs	0.354	6.0584
$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	$0.324 + 0.7(1 - x) + 0.41(1 - x)^2$	$5.6533 + 0.405(x)$



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานกับ

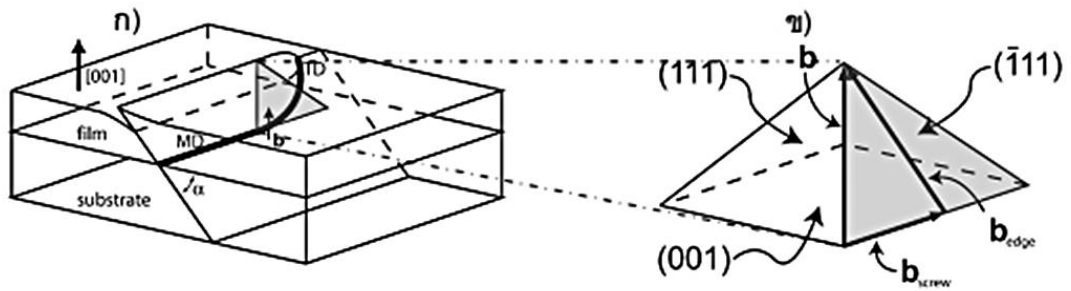
สารประกอบหมู่ III-V ที่อุณหภูมิห้อง [38]

2.3) จุดบกพร่องที่เป็น Dislocations และ Surface step

จุดบกพร่องในผลึกเดี่ยวจำแนกออกได้เป็น 4 รูปแบบ ได้แก่ 1) จุดบกพร่องแบบจุด (Point defect) 2) จุดบกพร่องแบบเส้น (Line defect) 3) จุดบกพร่องแบบระนาบ (Planar defect) และ 4) จุดบกพร่องแบบปริมาตร (Volume defect) จุดบกพร่องที่สามารถพัฒนาเป็น dislocation คือ จุดบกพร่องแบบเส้น ซึ่งเกิดจากการปลูกชั้นสารประกอบที่ต่างจากแผ่นฐาน ความเครียดบริเวณรอยต่อทำให้เกิดอะตอมที่มีพันธะไม่สมบูรณ์เป็นแนวเส้น เรียกจุดบกพร่องลักษณะนี้ว่า Misfit dislocation (MD)

ในโครงผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (Zinc blende) MD จะเกิดขึ้นในทิศทางผลึก [1-10] และ [110] ปริมาณของ MD จะมากขึ้นตามเศษส่วนโมลและความหนาของชั้น $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ MD ที่สะสมบริเวณรอยต่อจะส่งความเครียดแบบเส้นอีกชนิดหนึ่งที่เกิดจากพันธะที่ไม่สมบูรณ์เช่นกัน เรียกว่า Threading dislocation (TD) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.2 (ก) โดย TD ที่เกิดขึ้นจะมี 2 ทิศ คือ 1) ทิศ [001] เรียกว่า Pure edge dislocation และ 2) ทิศ (111) ที่ทำมุม 60° กับระนาบรอยต่อดังรูปที่ 2.2 (ข) เรียกว่า 60° dislocation [39] ส่วนใหญ่ TD ที่เกิดขึ้นเป็นผลต่อเนื่องมาจาก MD 2 ชนิด คือ 1) Edge dislocation และ 2) Screw dislocation ทำให้เวกเตอร์ลัพท์ของ TD เกิดจากการรวมเวกเตอร์ในทิศของเวกเตอร์ \mathbf{b}_{Edge} และ $\mathbf{b}_{\text{Screw}}$ ได้เป็นทิศของเวกเตอร์ \mathbf{b} ดังในรูปที่ 2.2 (ข) [40]

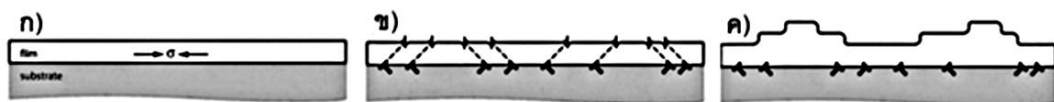
จากการวิจัยของ M. Tamura et al [41] แบ่งช่วงเศษส่วนโมลของสาร In (x) ที่ส่งผลต่อชนิดการเกิดของ TD เป็น 3 ช่วง คือ 1) ช่วง $x < 0.2$ ที่ TD ที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะเป็นชนิด 60° dislocation, 2) ช่วง $0.2 < x < 0.3$ จะมี TD ทั้งชนิด 60° dislocation และ Pure edge dislocation และ 3) ช่วง $x > 0.3$ ที่ TD ที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะเป็นชนิด Pure edge dislocation



รูปที่ 2.2 แผนภาพ ก) แสดง Misfit dislocation และ Threading dislocation ที่เกิดขึ้นในการปลูกผลึก ข) แสดง Dislocation vector ที่เกิดจาก Edge และ Screw dislocation [40]

TD ที่เกิดจากการเปลี่ยนทิศการเคลื่อนตัวของ MD ที่เกิดได้ง่ายที่สุด คือ ทิศ $[1-10]$ และ $[110]$ เพราะเป็นทิศทางที่ขนานกับ MD ที่เกิดบริเวณรอยต่อ [41] และ TD อาจจะเกิดขึ้นได้จาก TD เดิมของแผ่นฐานที่เคลื่อนตัวผ่านรอยต่อขึ้นสู่ผิวหน้าโดยไม่เปลี่ยนทิศ ทำให้เกิดเป็น TD ที่สามารถเคลื่อนตัวผ่านชั้นเอพิสุ่มบริเวณผิวหน้าในทิศ $[1-10]$ และ $[110]$ [42] เกิดเป็นโครงสร้างลอนทอดยาว ในทิศ $[1-10]$ และ $[110]$ และตัดกันเป็นรูปคล้ายลายตาราง จึงเรียกเส้นผิวที่มีลักษณะเช่นนี้ว่า พื้นผิวลายตาราง (Cross-hatch pattern) และเงื่อนไขการเกิดพื้นผิวลายตารางที่ดีที่สุด คือ การลด Pure edge dislocation ให้มากที่สุด ให้การเกิด TD มีแต่ชนิด 60° dislocation [43]

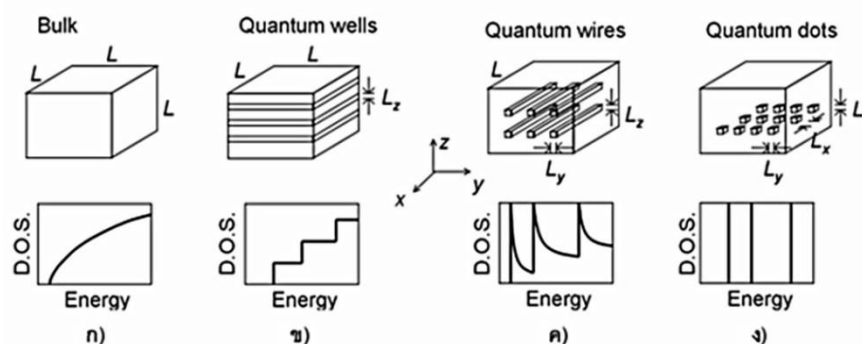
เมื่อปลูกสารที่มีค่าคงตัวผลึกมากกว่าแผ่นฐาน ในช่วงแรกชั้นเอพิจะก่อตัวแบบ 2 มิติ โดยที่มีความเครียดสะสม (σ) ในชั้นเอพิ ดังรูปที่ 2.3 (ก) เมื่อการปลูกดำเนินต่อไปจนกระทั่งชั้นเอพิหนากว่าความหนาวิกฤต จะเกิดการคลายความเครียด ก่อให้เกิด MD บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นเอพิกับแผ่นฐาน และส่งผลให้การเคลื่อนตัวของ TD ไปยังผิวหน้า ดังรูปที่ 2.3 (ข) TD ที่เคลื่อนตัวผ่านชั้นเอพิขึ้นสู่ผิวหน้าเกิดเป็น Surface step แล้วจึงเกิดกระบวนการกำจัด Surface step จนผิวหน้ามีลักษณะเป็นลอนดังรูปที่ 2.3 (ค)



รูปที่ 2.3 ภาพตัดขวางแสดงกระบวนการเกิดพื้นผิวลายตารางตามลำดับดังนี้ (ก) ชั้นเอพิที่มีคลายเครียดจากการปลูกบนแผ่นฐานตั้งต้น (ข) การเกิด surface step ที่ส่งผ่านจากบริเวณรอยต่อไปยังผิวหน้าเกิดเป็นตาราง MD และ (ค) สถานะสุดท้ายในการก่อตัวของชั้นฟิล์มที่เกิดจากการกำจัด surface step [43]

2.4) ควอนตัมดอต (Quantum dots, QDs)

โครงสร้างของสารกึ่งตัวนำเมื่อจำแนกโดยมิติความเป็นอิสระในการเคลื่อนที่ของพาหะแบ่งได้เป็น 4 แบบ คือ 1) โครงสร้างแบบก้อนผลึก (Bulk) ในรูป 2.4 (ก) คือ โครงสร้างขนาดใหญ่ที่พาหะสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระใน 3 มิติ และมีความหนาแน่นของสถานะ (Density of state) สามารถเคลื่อนที่ได้



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางกายภาพและความหนาแน่นสถานะของ (ก) ก้อนผลึก, (ข) ควอนตัมเวลล์, (ค) ควอนตัมไวร์ และ (ง) ควอนตัมดอต [44]

แบบต่อเนื่อง 2) โครงสร้างควอนตัมเวลล์ (Quantum well) ในรูป 2.4 (ข) มีลักษณะเป็นแผ่นบางสามารถกักกันการเคลื่อนที่ของพาหะได้ใน 1 มิติ (เฉพาะการเคลื่อนที่ในแนวระนาบ) และมีความหนาแน่นของสถานะแบบขั้นบันได 3) โครงสร้างควอนตัมไวร์ (Quantum wire) ในรูป 2.4 (ค) มีลักษณะเป็นเส้นสามารถกักกันการเคลื่อนที่ของพาหะได้ใน 1 มิติ และมีความหนาแน่นสถานะแบบไม่ต่อเนื่องและ 4) โครงสร้างควอนตัมดอต ในรูป 2.4 (ง) เป็นโครงสร้างที่สามารถกักกันการเคลื่อนที่ของพาหะได้ใน 3 มิติหรือมีระดับขั้นความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เป็นศูนย์ มีความหนาแน่นของสถานะไม่ต่อเนื่องหรือ Delta function [45]

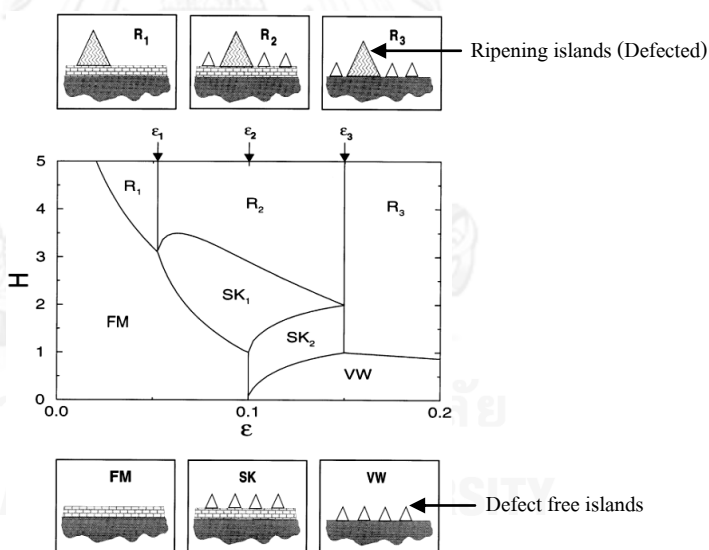
การปลูกผลึกบนแผ่นฐานจะเกิดกระบวนการก่อตัวในโหมด (Mode) ต่างๆ ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการ คือ 1) ระดับความไม่เข้ากันของโครงผลึก (ϵ) ระหว่างสารที่ปลูกกับแผ่นฐาน และความหนาของชั้นเอพิ (H)

โหมดการปลูกมีกระบวนการก่อตัวของชั้นปลูกต่างกันตามความสัมพันธ์ในแผนภาพรูปที่ 2.5 แบ่งเป็น 6 โหมดดังนี้

1. โหมด Frank-van de Merve (FM) เป็นโหมดการปลูกแบบ 2 มิติ ผลึกที่ได้เป็นชั้นฟิล์มบาง เนื่องจากมีระดับความไม่เข้ากันของโครงผลึกค่าน้อย ($\epsilon < 0.1$) และความหนาชั้นปลูกมีค่าน้อย

2. โหมด Volmer-Weber (VW) เป็นโหมดการปลูกแบบ 3 มิติ ผลึกที่ได้เป็นโครงสร้างเกาะ 3 มิติ เนื่องจากมีระดับความไม่เข้ากันของโครงผลึกค่ามาก ($\epsilon > 0.1$) เมื่อเริ่มปลูก ชั้นเอพิจะคลายความเครียด ก่อตัวเป็นเกาะ 3 มิติทันที

3. โหมด Stranski-Krastanov (SK) เป็นโหมดการปลูกแบบทั้ง 2 มิติและ 3 มิติ เนื่องจากมีระดับความไม่เข้ากันของโครงผลึกค่าระหว่างโหมด FM และ VW ($0.05 < \epsilon < 0.15$) โหมด SK จึงเป็นโหมดที่เกิดโครงสร้าง 2 มิติแบบโหมด FM และโครงสร้าง 3 มิติแบบโหมด VW ร่วมกัน แบ่งย่อยได้เป็น โหมด SK_1 และ SK_2 โดยโหมด SK_1 เป็นโหมดที่ความเครียดจากความไม่เข้ากันของโครงผลึกของผลึกใกล้เคียงกับโหมด FM การก่อตัวจึงเริ่มจากการก่อตัวแบบ 2 มิติโดยมีความเครียดสะสมในชั้นเอพิ เรียกชั้นเอพิส่วนนี้ว่า Wetting layer (WL) เมื่อชั้นเอพิหนาขึ้นจนเกินค่าความหนาวิกฤติ จะเกิดการคลายความเครียดเป็นเกาะ 3 มิติ ในขณะที่โหมด SK_2 เป็นโหมดที่ความเครียดจากความไม่เข้ากันของโครงผลึกของผลึกใกล้เคียงกับโหมด VM การก่อตัวจึงเริ่มจากการก่อตัวแบบเกาะ 3 มิติ เมื่อชั้นเอพิหนาขึ้น WL จะก่อตัวในตำแหน่งที่ยังไม่เกิดเกาะ 3 มิติ โครงสร้างสุดท้ายของทั้ง 2 โหมดจึงเหมือนกัน ต่างกันที่ลำดับการก่อตัวของโครงสร้าง



รูปที่ 2.5 แผนภาพเฟสสมดุลในรูปของฟังก์ชันระหว่าง H (ความหนา) และ ϵ (ความเครียด) แสดงลักษณะผิวหน้าทั้ง 6 โหมด สามเหลี่ยมเล็กสีขาวแสดงเกาะที่มีเสถียรภาพ สามเหลี่ยมใหญ่ระบายสี

แสดงเกาะที่โตเต็มที่ แต่ละโหมดถูกแบ่งด้วยเส้นขอบ ดังนี้ $H_{c1}(\epsilon) : FM-R_1, FM-SK_1; H_{c2}(\epsilon) :$

$$SK_1 - R_2; H_{c3}(\epsilon) : SK_2-SK_1; H_{c4}(\epsilon) : VW-SK_2, VW-R_3 [46]$$

4. โหมด R_1 เป็นโหมดที่ความเครียดในชั้นเอพิเนื่องจากความไม่เข้ากันของผลึกต่ำกว่า 0.05 ($\epsilon < \epsilon_1$, $\epsilon_1 = 0.05$) เป็นโหมดที่เกิดขึ้นต่อจากการปลูกผลึกในโหมด FM จนความหนาค่าหนึ่งมีค่ามากกว่าความหนาวิกฤติ ($H > H_c(\epsilon)$) จึงเกิดเป็นเกาะ 3 มิติที่ขนาดใหญ่กว่าโหมด VM และ SK บน WL เรียกว่า Ripening Island

5. โหมด R_2 เป็นโหมดที่ความเครียดในชั้นเอพิเนื่องจากความไม่เข้ากันของผลึกมีค่าระหว่าง ϵ_1 และ ϵ_2 ($\epsilon_1 < \epsilon < \epsilon_2$, $\epsilon_1 = 0.05$, $\epsilon_2 = 0.15$) เป็นโหมดที่เกิดขึ้นต่อจากการปลูกผลึกในโหมด SK ทำให้เกิด Ripening island และเกาะ 3 มิติขนาดใกล้เคียงเดิมอยู่รอบๆ บน WL

6. โหมด R_3 เป็นโหมดที่ความเครียดในชั้นเอพิเนื่องจากความไม่เข้ากันของผลึกสูงกว่า 0.15 ($\epsilon > \epsilon_2$, $\epsilon_2 = 0.15$) เป็นโหมดที่เกิดขึ้นต่อจากการปลูกผลึกในโหมด VW จึงเกิดเป็น Ripening islands และเกาะ 3 มิติขนาดใกล้เคียงเดิมอยู่รอบๆ โดยไม่มี WL

ควอนตัมดอตที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้เป็นควอนตัมดอต $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ แบบประกอบตัวเอง (Self-assembled) บนแผ่นฐาน GaAs ชั้นควอนตัมดอตเกิดจากความไม่เข้ากันของผลึก ชั้น $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ จะเกิดความเครียดแบบบีบอัด เนื่องจากค่าคงตัวผลึกของ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ มากกว่าของ GaAs การประกอบตัวเองของควอนตัมดอต $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ สอดคล้องกับแผนภาพสมดุลเฟสในรูปที่ 2.5 หากปลูก $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ลงบน GaAs เป็นการปลูกในโหมด SK_1 ซึ่งเป็นโหมดที่เริ่มจากโครงสร้าง 2 มิติก่อน ในช่วงที่ชั้นเอพิมีค่าน้อย จากนั้นปลูกต่อจนชั้นเอพิหนามากกว่าค่าความหนาวิกฤติ จึงเกิดการคลายความเครียด เกิดเป็นโครงสร้างควอนตัมดอตที่เป็นโครงสร้าง 3 มิติ หากชั้นเอพิใช้สารประกอบ InAs จะมีความต่างของค่าคงตัวผลึก $\epsilon = 7.2\%$ เทียบกับแผ่นฐาน GaAs จึงเป็นการปลูกในโหมด SK ค่า H_c ที่อ่านได้จากแผนภาพเฟสสมดุลในรูปที่ 2.5 คือ 1.8 ML ใกล้เคียงกับค่าที่วัดจากการปลูกจริงที่ 500°C ที่ค่า 1.7 ML และการก่อตัวจะเป็นแบบสุ่มทั่วทั้งผิวหน้าชิ้นงาน หากต้องการเพิ่มความเป็นระเบียบของการก่อตัว สามารถทำได้โดยกระบวนการจัดเรียงควอนตัมดอตในแนวระนาบ (Lateral alignment)

การจัดเรียงควอนตัมดอตในงานวิจัยทั้งหมดใช้การปลูกควอนตัมดอตบนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ซึ่งหากสามารถทราบถึงพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการก่อตัวของพื้นผิวลายตาราง จะทำให้สามารถออกแบบลักษณะการก่อตัวของลายตารางที่เกิดขึ้น ไม่ว่าจะเป็ความถี่ของการก่อตัว และทิศทางของการก่อตัว ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการจัดเรียงควอนตัมดอตและสมบัติเชิงแสงที่ตามมา

2.5) พื้นผิวลายตาราง (Cross-hatch surface) และพื้นผิวลายทาง (Stripe surface)

พื้นผิวลายตารางเกิดจากการปลูกวัสดุที่ค่าคงตัวผลึกแตกต่างจากแผ่นฐานไม่เกิน 1.5 % ความเครียด 2 ชนิดได้แก่ Tensile strain และ Compressive strain จากบริเวณรอยต่อของสาร 2

ชนิด จะเคลื่อนที่ไปยังผิวหน้าของชั้นเอพิ เกิดเป็นลายตารางทั่วทั้งผิวหน้า ลายตารางที่สร้างจากสารประกอบกลุ่ม III-V เช่น $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ บน GaAs จะให้ลอนสองแนวตั้งฉากกันและมีลักษณะต่างกัน เช่น ความสูงของลายตารางที่ในทิศ [1-10] สูงกว่าทิศ [110] บ่งชี้ถึงลำดับของการก่อตัว [47]

ความหนาแน่นและตำแหน่งของลายตารางบนผิวหน้าเกิดขึ้นแบบสุ่ม แต่สามารถควบคุมความหนาแน่นได้จากการควบคุมปัจจัยในกระบวนการปลูก เช่น เศษส่วนโมลของสารประกอบ และความหนาของชั้นปลูก ลายตารางจะเกิดขึ้นบนผิวหน้าเมื่อปลูกวัสดุจนความหนาแน่นมากกว่าความหนาวิกฤติ ความหนาวิกฤติจะขึ้นอยู่กับเศษส่วนโมลของสาร In และเป็นจุดบกพร่องชนิด 60° Dislocation โดยที่ความหนาวิกฤติของจุดบกพร่องชนิดนี้ (h_{c60}) กำหนดได้จาก [37]

$$h_{c60} = \frac{G_{\text{GaAs}}G_{\text{InGaAs}}b}{\pi(G_{\text{GaAs}}+G_{\text{InGaAs}})(1-\nu)} \frac{(1-\nu(\cos\theta)^2)(\ln(\frac{h_{c60}}{b})+1)}{Yf} \quad (2.1)$$

เมื่อ

$$G = C_{44} - \frac{1}{3}(2C_{44} + C_{12} + C_{11}) \quad (2.2)$$

$$b = \frac{\sqrt{2}}{2} a_{\text{InGaAs}} \quad (2.3)$$

$$\nu = \frac{C_{12}}{C_{12}+C_{11}} \quad (2.4)$$

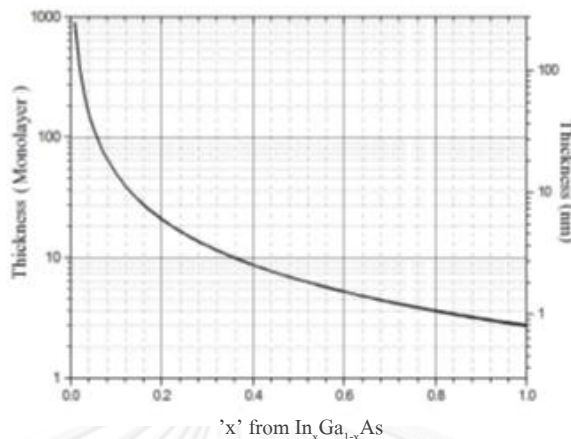
$$Y = C_{11} + C_{12} + 2\frac{C_{12}^2}{C_{11}} \quad (2.5)$$

$$f = \frac{a_{\text{InGaAs}} - a_{\text{GaAs}}}{a_{\text{InGaAs}}} \quad (2.6)$$

โดย ν คือ Poisson ratio, G คือ Anisotropic factor, C คือ Elastic constant และ Y คือ Young's modulus สำหรับการปลูก $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ บน GaAs หากใช้สัดส่วนของ In ที่ 0.2 จะได้ค่า $h_c = 6$ nm ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหากเศษส่วนโมลของสาร In ในสารประกอบ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ สูงขึ้น ความหนาวิกฤติจะลดลง

ในระบบ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ เส้นลายตารางในทิศ [1-10] จะสูงกว่าในทิศ [110] เนื่องจากสารประกอบในลายตารางจะต่างกัน 2 ทิศ โดยสารส่วนใหญ่ในทิศ [1-10] คือ สาร As แต่สารในทิศ [110] คือ Ga ดังนั้นหากควบคุมเศษส่วนโมลของสารประกอบ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ที่เหมาะสมค่าหนึ่ง และปลูกให้มีความหนาที่ค่าเหมาะสม ทำให้มีการคลายความเครียดในทิศ [1-10] มากกว่าในทิศ

[110] อย่างมีนัยสำคัญ ทำให้เกิดลอนบนผิวหน้าในทิศ [1-10] มากกว่าทิศ [110] จนเสมือนว่าเป็นลายทาง [48]

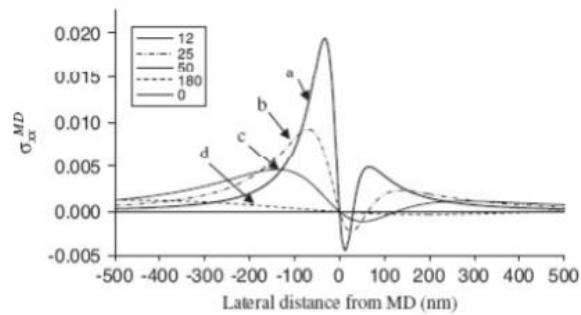


รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาวิกฤติของชั้น In_xGa_{1-x}As (Monolayer) ที่ปลูกบนชั้น GaAs กับเศษส่วนโมล (x) [47]

2.6) การจัดการความเค้นตึงด้วยกระบวนการสร้าง Strain engineering template

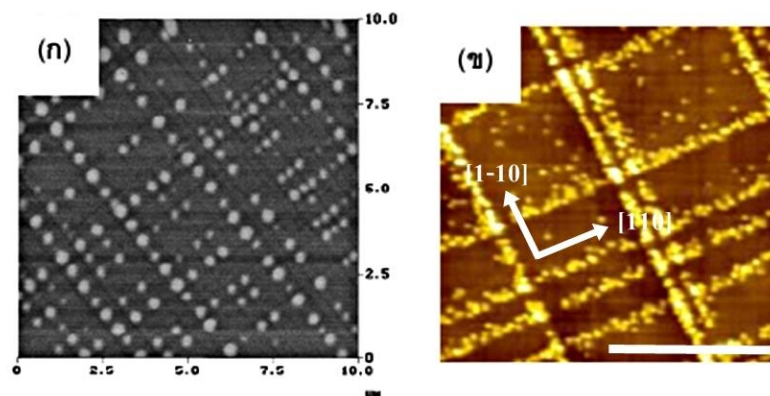
แผ่นฐานที่ปลูกชั้นพื้นผิวลายตาราง In_xGa_{1-x}As จะมีโพรไฟล์ (Profile) ของความเครียดในแต่ละบริเวณไม่เท่ากัน โดยความเครียดสะสมจะมากในบริเวณลายตาราง เมื่อมาใช้เป็นเทมเพลต (Template) สำหรับการปลูกชั้นทับด้วยควอนตัมดอต ควอนตัมดอตที่ได้จะมีการจัดเรียงตัวเหมือนการก่อตัวของพื้นผิวลายตาราง เช่น จากงานวิจัยของ C. Zhang et al [49] ที่ปลูกโครงสร้างพื้นผิวลายตาราง In_{0.15}Ga_{0.85}As ที่ความหนาต่าง ๆ คือ 12, 25, 50 และ 180 nm จะได้โพรไฟล์ของความเครียด (σ_{xx}^{MD}) ที่เปลี่ยนแปลงตามบริเวณบนพื้นผิวแสดงดังรูปที่ 2.7 จากรูปจะเห็นได้ว่าพื้นผิวด้านหนึ่งจะมีความเครียดแบบ Tensile ขณะที่ด้านตรงข้ามจะมีความเครียดแบบ Compressive โดยอะตอม In จะเคลื่อนตัวไปยังด้านที่มีความเครียดแบบ Tensile ขณะที่อะตอม Ga จะเคลื่อนตัวไปยังด้านที่มีความเครียดแบบ Compressive ขนาดของอะตอม In ใหญ่กว่าของอะตอม As บริเวณที่อะตอม In สะสมมากจึงมีลักษณะนูนสูงขึ้นมา ในขณะที่บริเวณที่อะตอม As สะสมมากจะมีลักษณะเป็นแอ่งต่ำลงไป เมื่อเพิ่มความหนาของชั้น In_{0.15}Ga_{0.85}As ขนาดของความเครียด (σ) โดยเฉลี่ยจะลดลงแต่จะขยายวงกว้างขึ้น ดังรูปที่ 2.7 ในชิ้นงานที่ความหนาชั้น In_{0.15}Ga_{0.85}As เท่ากับ 180 nm จะแทบไม่พบความแตกต่างของความเครียดจากด้านที่เป็น Tensile strain และ Compressive strain เนื่องจากเมื่อชั้น In_{0.15}Ga_{0.85}As หนาขึ้น อะตอมที่มากขึ้นของ In ในด้าน Tensile strain และ Ga ในด้าน Compressive strain จะมากขึ้น ทำให้เกิดการแพร่ออกเป็นบริเวณกว้างทำให้ Strain ในแต่ละด้านลดลง ซึ่งจะมีผลต่อการปลูกชั้นทับด้วยควอนตัมดอต InAs เนื่องจาก InAs ก่อตัวในบริเวณที่สารบนผิวหน้ามีค่าคงตัวผลึกใกล้เคียงกับ InAs ก่อนบริเวณอื่น ในชิ้นงานที่ชั้น

$\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ หนา 12 nm จะมีลักษณะการจัดเรียงควอนตัมดอตที่ชัดเจนที่สุด และจะไม่พบลักษณะการจัดเรียงที่ชัดเจนบนชั้นงานที่ชั้น $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ หนา 180 nm



รูปที่ 2.7 โพรไฟล์ความเครียดในบริเวณต่างๆในชั้นพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ หนา 12, 25, 50 และ 180 nm [49]

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดเรียงควอนตัมดอตบนพื้นผิวลายตารางเริ่มจาก Shiryaev et al [50] และ Xie et al [51] ซึ่งปลูกควอนตัมดอต Ge บนพื้นผิวลายตาราง SiGe/Si ควอนตัมดอตที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเฉลี่ยเท่ากันและสมมาตรทั้งในทิศ [1-10] และ [110] ดังที่แสดงในรูปที่ 2.8 (ก) ในขณะที่การปลูกโครงสร้างควอนตัมดอต InAs บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ควอนตัมดอตที่เกิดขึ้นมีขนาดเฉลี่ยที่ไม่เท่ากัน และไม่สมมาตรในทิศ [1-10] และ [110] ดังที่แสดงในรูปที่ 2.8 (ข) โดยควอนตัมดอตในทิศ [1-10] จะสูงกว่าและหนาแน่นกว่าในทิศ [110]

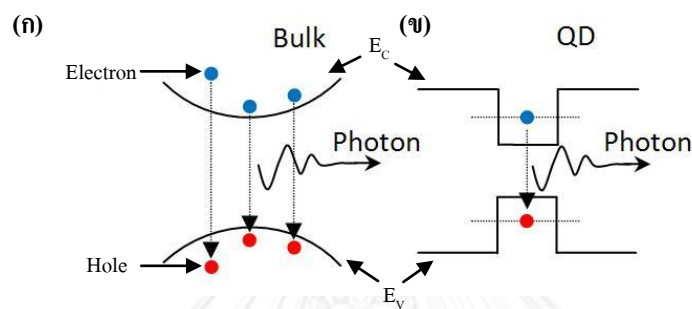


รูปที่ 2.8 ภาพโครงสร้างควอนตัมดอตบนพื้นผิวลายตารางของระบบ (ก) Ge/SiGe [51] และ (ข) InAs/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ [48]

2.7) กระบวนการเปล่งแสงของโครงสร้างนาโน

การเปล่งแสงของโครงสร้างแบบกักขังผลึกจะมีความเข้มต่ำและมีช่วงกว้าง เนื่องจากโครงสร้างกักขังผลึกจะมีอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานสูงกว่าแถบการนำ (Conduction band) และมี

โฮลที่ระดับพลังงานต่ำกว่าแถบเวเลนซ์ (Valence band) ดังรูปที่ 2.9 (ก) ซึ่งต่างจากการเปล่งแสงของโครงสร้างนาโน เช่น การเปล่งแสงของควอนตัมดอต เนื่องจากระดับพลังงานภายในของควอนตัมดอตถูก ควอนไตซ์ ทำให้มีลักษณะการเปล่งแสงแบบความเข้มสูงแต่มีช่วงสั้นดังรูปที่ 2.9 (ข) ทำให้ควอนตัมดอตถูกนำมาประยุกต์ใช้ในสิ่งประดิษฐ์เชิงแสง เนื่องจากสามารถควบคุมสมบัติของแสงที่เปล่งออกมาได้ เช่น ความยาวคลื่นและสมบัติโพลาไรซ์ จากการควบคุมสมบัติทางกายภาพของควอนตัมดอต เช่น ขนาดและการจัดเรียงควอนตัมดอต



รูปที่ 2.9 แผนภาพแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ แสดงแถบการนำ (E_C) แถบเวเลนซ์ (E_V) และกลไกการผสมกลับแบบเปล่งแสง (Photon) เมื่ออิเล็กตรอน (•) ตกจากแถบการนำลงมาผสมกลับกับโฮล (•) ในแถบเวเลนซ์ในวัสดุ (ก) ขนาดใหญ่ (ก้อนผลึก) (ข) ขนาดเล็ก (ควอนตัมดอต)

บทที่ 3

การสังเคราะห์และวัดสมบัติ

ชิ้นงานทั้งหมดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สังเคราะห์ขึ้นภายในห้องปลูก (Growth chamber) ของเครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุลภายใต้ภาวะสุญญากาศสูงยิ่ง (Ultra-high vacuum) ชิ้นงานต้องผ่านกระบวนการทำความสะอาดก่อนเพิ่มอุณหภูมิไปที่ค่าสูง จากนั้นจึงปล่อยลำโมเลกุลของสารหมู่ V (As_4) กระจายทั่วห้องปลูก ตามด้วยหมู่ III (In และ Ga) ทำให้เกิดการก่อตัวของสารประกอบ $In_xGa_{1-x}As$ บนผิวหน้าชิ้นงานตามเศษส่วนโมล (x) ที่ออกแบบการทดลองไว้ เทคนิคการปลูกผลึกแบบลำโมเลกุลได้รับความนิยมจากห้องปฏิบัติการหลายแห่งทั่วโลกในปัจจุบัน เพราะสามารถใช้สังเคราะห์ชิ้นงานที่ต้องการโครงสร้างความละเอียดสูง และต้องการควบคุมเศษส่วนโมลของสารประกอบภายในชิ้นงาน เนื่องจากสามารถควบคุมอัตราการปลูกได้ในระดับนาโนเมตร ซึ่งสำคัญต่อการสังเคราะห์ชิ้นงานที่เป็นโครงสร้างควอนตัมดอทบนพื้นผิวหลายตารางซึ่งเป็นแก่นของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

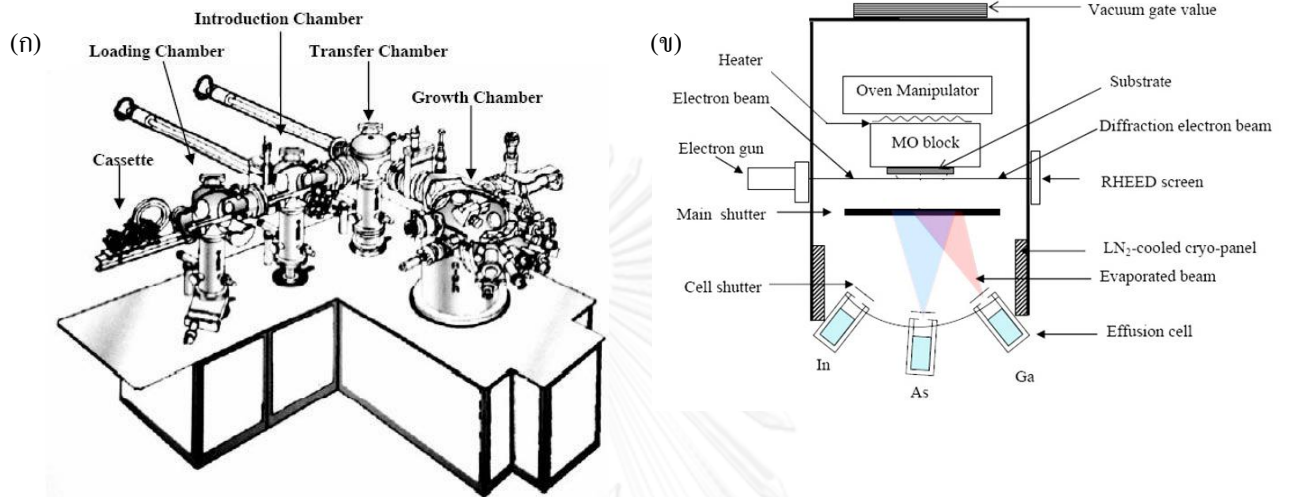
เนื้อหาในบทนี้แบ่งออกเป็น 4 หัวข้อ ได้แก่ 3.1) ระบบปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล กล่าวถึงส่วนประกอบและการใช้งานเครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุลและอุปกรณ์ตรวจสอบชิ้นงานจากภายใน (In-situ) 3.2) การเตรียมชิ้นงานและกำหนดเงื่อนไขการปลูก กล่าวถึงการเตรียมชิ้นงานก่อนการปลูกและการวางแผนงานเพื่อใช้ในการกำหนดลำดับการปลูกจริง 3.3) การปลูกชั้นผลึก อธิบายรายละเอียดวิธีการปลูกชั้นผลึกและโครงสร้างของชิ้นงาน และ 3.4) ลักษณะสมบัติของชิ้นงาน กล่าวถึงการวัดลักษณะสมบัติจากระบบตรวจสอบชิ้นงานจากภายนอก (Ex-situ) ได้แก่ การวัดสัณฐานวิทยาพื้นผิวโดยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscope, AFM) และการวัดสมบัติเชิงแสงโดยระบบโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence, PL)

3.1) ระบบปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล

แผ่นฐานตั้งต้นที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทั้งหมดเป็นผลึกเดี่ยว GaAs โดยใช้เทคนิคการปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล (MBE) ด้วยเครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุลรุ่น RIBER 32P มีอุปกรณ์ตรวจสอบชิ้นงานจากภายใน ได้แก่ เครื่องมือตรวจสอบสถานะผิวหน้า คือ เครื่องวัดแสงสะท้อนจากอิเล็กตรอนพลังงานสูง (Reflection high-energy diffraction, RHEED) และเครื่องมือตรวจสอบสถานะของสารในห้องปลูก คือ เกจวัดความดันไอ (Ionization gauge) และระบบวัดมวลแบบสี่ขั้ว (Quadrupole mass spectrometer, QMS)

3.1.1) เครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล

ระบบปลูกผลึกแบบลำโมเลกุลถูกแสดงดังแผนภาพในรูปที่ 3.1 (ก) ประกอบด้วยห้อง (Chamber) 4 ห้อง แต่ละห้องแยกออกจากกันโดยประตู (Gate) ได้แก่



รูปที่ 3.1 (ก) ระบบของเครื่องปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล RIBER 32P

(ข) แผนภาพอย่างง่ายภายในห้องปลูก

1) **ห้องโหลด (Loading chamber)** เป็นห้องที่ใช้ถ่ายโอนชิ้นงานที่ติดกับ Mo Block เข้าสู่หรือออกจากระบบ หากต้องการถ่ายโอนเข้าสู่ระบบ จะต้องลดความดันลงจากภาวะบรรยากาศ (1 atm หรือ 760 Torr) ให้เป็นภาวะสุญญากาศ (Vacuum) ก่อนจึงจะส่งชิ้นงานผ่านเข้าสู่ห้องอินโทรดักชัน (Introduction chamber) ได้ แต่หากต้องการถ่ายโอนออกจากระบบ ต้องเพิ่มความดันเป็นบรรยากาศก่อน โดยการเติมก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่ห้องโหลดเพื่อทำให้ความดันภายในเท่ากับความดันบรรยากาศ ก่อนเติมจะต้องตรวจสอบให้มั่นใจว่าประตูกันห้องโหลดและห้องอินโทรดักชัน และวาล์วที่เชื่อมต่อกับปั๊มเทอร์โบ (Turbo pump) ต้องปิดสนิท

การปรับลดความดันจากภาวะบรรยากาศ เป็นภาวะสุญญากาศ เริ่มจากเปิดปั๊มไดอะแฟรม (Diaphragm pump) เพื่อลดความดันจากบรรยากาศลงเหลือประมาณ 1 Torr ใช้เวลาประมาณ 10 นาที จากนั้นจึงเปิดปั๊มเทอร์โบเพื่อลดความดันลงสู่ระดับ 5×10^{-6} Torr จึงเริ่มเปิดประตูกันห้องโหลดและห้องอินโทรดักชันอย่างช้าๆ เพื่อให้ปั๊มไอออน (Ion pump) ที่ทำงานตลอดเวลาในห้องอินโทรดักชัน และปั๊มไทเทเนียม (Titanium pump) ที่เปิดเฉพาะเวลาที่ไม่ได้ทำการปลูก ช่วยลดความดันลงสู่ระดับ 1×10^{-7} Torr ก่อนที่จะส่งผ่านชิ้นงานที่อยู่บนรถคันที่ 1 เข้าสู่

ห้องอินโทรดักชันด้วยระบบสายพานที่ควบคุมโดยเฟืองขับสายพานที่หมุนได้จากลูกบิดที่ติดตั้งอยู่ภายนอก หลังจากชิ้นงานผ่านไปสู่อินโทรดักชัน จึงปิดประตูกันห้อง

2) **ห้องอินโทรดักชัน (Introduction chamber)** เป็นห้องที่ใช้สำหรับกระบวนการทำความสะอาดและกำจัดความชื้นเบื้องต้นจากชิ้นงานโดยการเพิ่มอุณหภูมิ เรียกว่า กระบวนการ Pre-heat โดยภายในห้องนี้มีปั๊มไอออนและปั๊มไทเทเนียมเพื่อขจัดสิ่งแปลกปลอมที่ชิ้นงานปล่อยออกมา (Outgas) ระหว่างการ Pre-heat เมื่อชิ้นงานมาถึงห้องนี้ ต้องใช้แขนจับแม่เหล็ก (Magnetic arm) จับ Mo block ออกจากรถคันที่ 1 เพื่อใส่ลงในตำแหน่งที่ติดตั้งขดลวดนำความร้อน แล้วส่งผ่านรถคันที่ 1 กลับไปยังห้องโหลด ก่อนที่จะเริ่มกระบวนการ Pre-heat หลังชิ้นงานผ่านกระบวนการนี้ จึงเปิดประตูกันห้องอินโทรดักชันและห้องทรานส์เฟอร์ (Transfer chamber) นำรถคันที่ 2 จากห้องทรานส์เฟอร์เข้ามาภายในห้องอินโทรดักชัน จึงใช้แขนจับแม่เหล็กจับ Mo block ออกจากตำแหน่งขดลวดความร้อนมาไว้บนรถคันที่ 2 แล้วส่งรถคันที่ 2 พร้อมกับชิ้นงานกลับไปยังห้องทรานส์เฟอร์ด้วยระบบสายพาน

3) **ห้องทรานส์เฟอร์ (Transfer chamber)** เป็นห้องพักชิ้นงานระหว่างการปลุกหรือการ Pre - Heat ชิ้นงานอื่น มีระบบดูดอากาศด้วยปั๊มไอออนและปั๊มไทเทเนียมเช่นเดียวกับห้องอินโทรดักชัน เนื่องจากห้องนี้เป็นห้องคั่นกลางระหว่างห้องอินโทรดักชันและห้องปลุก เพราะขณะทำการ Pre-heat ความดันภายในห้องอินโทรดักชันจะสูง จากสิ่งแปลกปลอมที่ถูกขับออกจากชิ้นงาน ห้องนี้จึงช่วยลดผลดังกล่าวจากห้องอินโทรดักชันที่จะมีต่อห้องปลุก ภายในห้องจะมีแขนจับแม่เหล็กที่ใช้สำหรับจับและส่งผ่านชิ้นงานจากรถคันที่ 2 เข้าสู่ห้องปลุก หรือจับชิ้นงานที่ปลุกเสร็จออกจากห้องปลุก

4) **ห้องปลุก (Growth chamber)** เป็นห้องที่ใช้ทำการปลุกผลึก ในห้องปลุกมีส่วนประกอบต่างๆดังแผนภาพในรูปที่ 3.1 (b) ห้องปลุกจะมีความดันอยู่ในระดับ 10^{-9} Torr หรือต่ำกว่าตลอดเวลา ระบบดูดอากาศในห้องปลุก ได้แก่ ปั๊มไอออนซึ่งเปิดตลอดเวลาและปั๊มไทเทเนียมซึ่งเปิดเฉพาะเวลาที่ไม่มีการปลุกเนื่องจากขณะปั๊มทำงานจะมีการระเหิดไทเทเนียมออกจากขดลวดเพื่อให้สารไทเทเนียมจับกับสารอื่นในห้องปลุก กลายเป็นของแข็งแล้วถูกดูดออกจากระบบหรือจับกับผนังอย่างถาวร หากเปิดขณะปลุกจะทำให้ไทเทเนียมเจือปนกับผิวหน้าของชิ้นงาน

ภายในห้องปลุกมีผนังซึ่งถูกหล่อเย็นโดยไนโตรเจนเหลว (Cryoshroud) มีอุปกรณ์ตรวจสอบสภาพภายในห้องปลุก ได้แก่ เกจวัดแรงดันไอ ทำหน้าที่วัดความดันไอของสารภายในห้องปลุก ระหว่างการปลุกจริง ระบบวิเคราะห์มวลแบบสี่ขั้ว (Quadrupole mass spectrometer, QMS) เพื่อตรวจสอบปริมาณสาร ระบบการสร้างภาพจากการสะท้อนการแทรกสอดของลำอิเล็กตรอนพลังงานสูง (Reflection high-energy electron diffraction, RHEED) ตรวจสอบลักษณะผิวหน้าชิ้นงานระหว่างปลุก เมื่อชิ้นงานอยู่ภายในห้องปลุก Mo Block จะถูกวางไว้ตรงแท่นควบคุมที่มีขีด

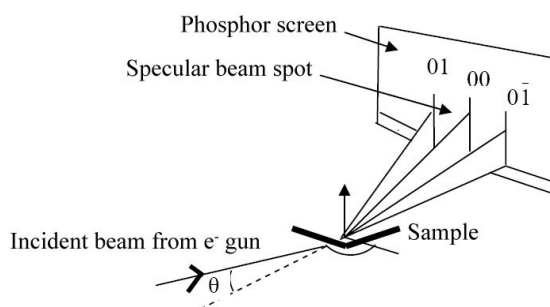
ลดความร้อนอยู่ด้านล่าง เรียกว่า Manipulator ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของชิ้นงาน ให้ลำโมเลกุลของสารที่ตกกระทบผิวหน้าชิ้นงาน Manipulator ควบคุมผ่านมอเตอร์กระแสตรงที่สามารถหยุดและหมุนตำแหน่งของ Manipulator โดยผู้ทดลองระหว่างกระบวนการต่างๆ เวลาปลูกจริง ทำให้การกระจายตัวของสารบนผิวหน้าเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ภายในห้องปลูกมีชัตเตอร์หลายตำแหน่ง ได้แก่ ชัตเตอร์หลัก (Main shutter) กั้นระหว่างชิ้นงานและเซลล์บรรจุสาร (Effusion cell) และเซลล์ชัตเตอร์ (Cell shutter) ควบคุมการปล่อยสารของแต่ละเซลล์ เมื่อเริ่มการปลูกต้องเปิดชัตเตอร์ของสารหมู่ V ในที่นี้ คือ As_4 โดยใช้อุณหภูมิเตา (Crucible temperature) ควบคุมอัตราการปล่อยสารที่บรรจุในเซลล์ จนสาร As_4 กระจายทั่วห้องปลูก หลังจากนั้นเปิดชัตเตอร์หลัก จึงเริ่มกระบวนการทำความสะอาดชิ้นงาน (กระบวนการ De-gas) โดยการเพิ่มอุณหภูมิมบนแทนควบคุม หลังจากกระบวนการ De-gas จึงจะเริ่มการปลูกตามทีออกแบบการทดลองจริง

3.1.2) การวัดความดันไอ

ความดันไอเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการกำหนดอัตราการปลูกฟิล์มบางและเศษส่วนโมลของสารประกอบ ความดันไอแปรผันตรงกับอุณหภูมิเตา วัดได้โดยการหมุนแทนควบคุมให้ลำโมเลกุลกระทบเกจวัดความดันไอโดยตรงที่มุมประมาณ 225° จากนั้นเปิดชัตเตอร์หลักและชัตเตอร์ของสารที่ต้องการวัดความดันไอ ได้แก่ In, Ga และ As_4 จากนั้นบันทึกค่าความดันไอและอุณหภูมิเตา ค่าความดันไอและอุณหภูมิเตาที่ได้จะใช้กำหนดอุณหภูมิปลูกและใช้สอบเทียบอัตราการปลูก (Growth rate calibration) ในทางปฏิบัติจะวัดความดันไอของสารหมู่ III คือ In และ Ga ก่อนเนื่องจากเกจสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ (Flux) ของหมู่ III ได้ดี การอ่านค่าความดันไอจึงทำได้ทันทีหลังจากเปิดชัตเตอร์ หลังจากทีวัดความดันไอของหมู่ III เสร็จ จึงจะวัดของหมู่ V คือ As_4 ซึ่งเกจจะใช้เวลานานในการตอบสนอง จึงต้องรอให้สารกระจายทั่วห้องปลูกสักประมาณ 10 นาทีก่อน จึงจะวัดความดันไอที่อุณหภูมิเตาหนึ่ง ๆ

3.1.3) ระบบการสร้างภาพจากการสะท้อนการแทรกสอดของลำอิเล็กตรอนพลังงานสูง (Reflection high-energy electron diffraction, RHEED)

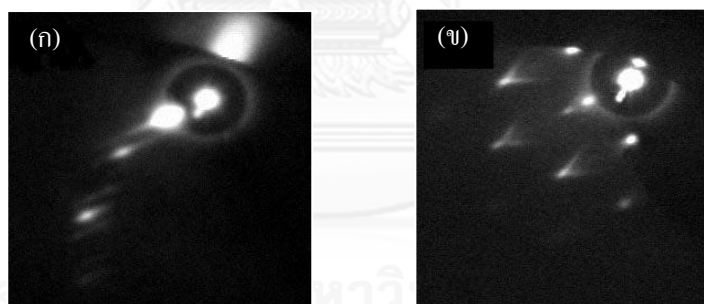
ในระหว่างการปลูก ผู้ทดลองสามารถทราบสถานะของผิวหน้าชิ้นงานได้จากระบบ RHEED ซึ่งมีหลักการทำงาน คือ ยิงอิเล็กตรอนพลังงานสูงตกกระทบผิวหน้าชิ้นงานด้วยมุมตกกระทบประมาณ 1-3 องศา อิเล็กตรอนจะสะท้อนและเลี้ยวเบนจากผิวหน้าชิ้นงานมากระทบฉากฟอสเฟอรัส (Phosphor screen) ด้านตรงข้ามของปืนอิเล็กตรอนดังรูปที่ 3.2 ทำให้เกิดลวดลายลักษณะเฉพาะ (Pattern) ขึ้นอยู่กับสภาพผิวของชิ้นงาน ภาพที่ปรากฏบนฉากฟอสเฟอรัสเป็นภาพในมิติกลับ (Reciprocal space) เมื่อโครงสร้างผิวหน้าเปลี่ยนไป ลวดลายนี้จะเปลี่ยนไป หลังจากนั้นจึงตีความ



รูปที่ 3.2 ระบบ RHEED

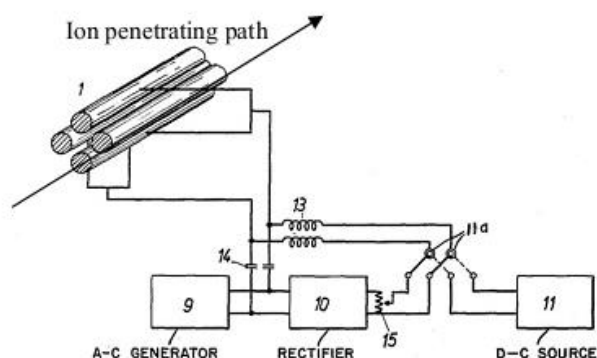
ลวดลายลักษณะเฉพาะดังกล่าวว่า ขึ้นงานในขณะนั้นมีลักษณะผิวหน้าเป็นอย่างไร จึงต้องทราบก่อนว่าลวดลายลักษณะเฉพาะจากระบบ RHEED สื่อถึงผิวหน้าลักษณะใด

ลวดลายที่สำคัญ ได้แก่ ลวดลายแบบเส้น (Streaky pattern) ดังรูปที่ 3.3 (ก) สื่อถึงผิวหน้าเรียบ และลวดลายแบบจุด (Spotty pattern) ดังรูปที่ 3.3 (ข) สื่อถึงผิวหน้าขรุขระ ซึ่งใช้ในการบ่งชี้ว่าเกิดโครงสร้างควอนตัมดอต ลวดลายลักษณะเฉพาะจากระบบ RHEED ยังสามารถใช้สอบเทียบอุณหภูมิจริงของชิ้นงาน และสอบเทียบอัตราการปลูกได้ด้วยดังรายละเอียดในหัวข้อ 3.2.4 และ 3.2.5 ตามลำดับ

รูปที่ 3.3 ลวดลายลักษณะเฉพาะจากระบบ RHEED (ก) Streaky pattern
(ข) Spotty pattern

3.1.4) ระบบวิเคราะห์มวลแบบสี่ขั้ว (Quadrupole mass spectrometer, QMS)

ภายในห้องปลูกหากต้องการทราบปริมาณของสารใด จะมีอุปกรณ์ตรวจสอบที่ทำงานตลอดเวลาเพื่อให้ผู้ทำการทดลองสามารถทราบสถานะของสารภายในห้องปลูก คือ ระบบวิเคราะห์มวลแบบสี่ขั้ว ทำงานโดยการผ่านไอออนของสารสู่เครื่องตรวจจับ (Detector) ที่มีลักษณะเป็นแท่งโลหะ 4 แท่งดังรูปที่ 3.4 วางขนานกัน 2 คู่ แท่งที่อยู่ตรงข้ามกันจะเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้า ทำงานที่แรงดันคลื่นความถี่วิทยุ (RF voltage) ที่มีการแปรค่าตลอดเวลา ขณะทำงานแรงดันกระแสตรงจะถูก



รูปที่ 3.4 ภาพการทำงานของ Quadrupole mass spectrometer [52]

จ่ายให้แท่งโลหะทั้ง 2 คู่ ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าใน 2 ทิศทางตามแท่งโลหะที่เป็นคู่กัน ไอออนของสารจะเคลื่อนที่ผ่านแท่งโลหะด้วยแรงคูลอมบ์ (Coulomb force) แล้วชนกับแท่งโลหะ จะมีเฉพาะไอออนที่มีค่ามวลต่อประจุ (m/z) สอดคล้องกับความถี่ RF ณ ขณะนั้นเท่านั้นที่ผ่านแท่งโลหะไปได้ จากนั้นจึงอ่านค่าศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าสูง-ต่ำขึ้นอยู่กับปริมาณสารในห้องปลุก และเนื่องจากการแปรค่า RF ตลอดเวลา จึงทำให้ไอออนที่วิ่งผ่านถูกอ่านค่าอย่างต่อเนื่องผ่านหน้าจอ การอ่านค่าได้ในช่วงกว้างนี้ทำให้ผู้ทดลองสามารถทราบสถานะของสารต่าง ๆ ที่อยู่ภายในห้องปลุก

3.2) การเตรียมชิ้นงานและกำหนดเงื่อนไขการปลุก

การเตรียมชิ้นงานและกำหนดเงื่อนไขการปลุกเป็นขั้นตอนที่จำเป็นแก่การสังเคราะห์ชิ้นงานทุกชิ้น เป็นการเตรียมชิ้นงานและเตรียมสารที่ใช้ในการปลุกทั้งหมดให้อยู่ในสภาวะพร้อมปลุก หากไม่ทำกระบวนการเหล่านี้อย่างเคร่งครัด อาจทำให้ชิ้นงานเสียหรือไม่เป็นโครงสร้างดังที่ออกแบบการทดลอง การเตรียมชิ้นงานและกำหนดเงื่อนไขการปลุกแยกเป็นกระบวนการย่อยได้ คือ การติดชิ้นงานบน Mo block, กระบวนการ Pre-heat, กระบวนการ De-gas, กระบวนการ De-ox, การสอบเทียบอุณหภูมิของชิ้นงาน และการสอบเทียบอัตราการปลุก

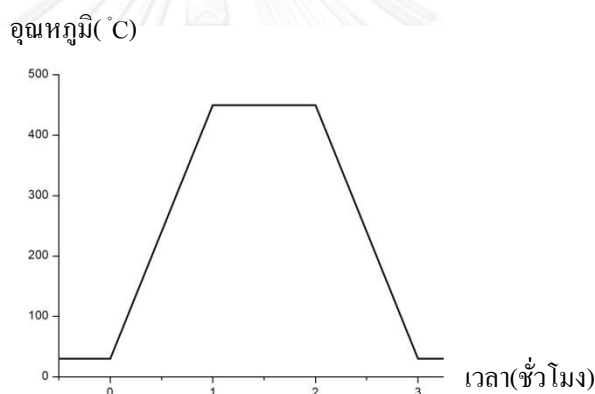
3.2.1) การติดชิ้นงานบน Mo block

ชิ้นงานตั้งต้นจะถูกตัดจากเวเฟอร์ (Wafer) ผลิตเดี่ยว GaAs ออกเป็นชิ้นย่อยขนาดประมาณ $1 \times 1 \text{ cm}^2$ หลังจากนั้นจึงนำก้อน In ใส่บน Mo block ที่ตั้งบนเตาความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ $250\text{-}270 \text{ }^{\circ}\text{C}$ จนกระทั่ง In ละลายบน Mo block จึงนำชิ้นงานติดบน Mo block จากนั้นจึงตั้งชิ้นงานให้ทั่วบริเวณที่มี In เหลว เพื่อให้ In กระจายตัวทั่วถึงได้ชิ้นงาน ขั้นตอนนี้หากไม่ทำอย่างเคร่งครัด จะทำให้ความร้อนกระจายไม่ทั่วถึงทั้งชิ้นงาน ส่งผลให้เกิดโครงสร้างที่ไม่เหมือนกันทั้งชิ้นงาน หรือบางครั้งอาจจะทำให้ชิ้นงานเสียได้ หลังจากติดชิ้นงานแล้วจึงใช้มีดขูดเอา In เหลวส่วนเกินทิ้ง จากนั้นทำ

ความสะอาดด้วยก๊าซไนโตรเจนก่อนวาง Mo block บนรถคันที่ 1 แล้วส่งผ่านรถคันที่ 1 พร้อมกับชิ้นงานเข้าสู่ห้องโหลด

3.2.2) กระบวนการ Pre-heat

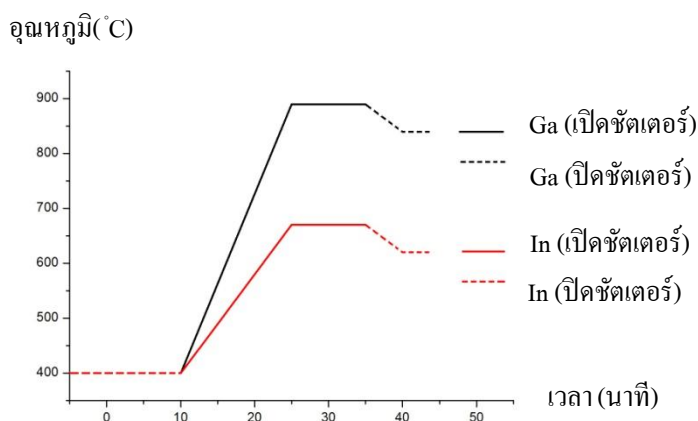
Pre-heat เป็นกระบวนการสำหรับกำจัดไอน้ำและสิ่งแปลกปลอมที่อยู่บนผิวหน้าออกจากชิ้นงานเบื้องต้น โดยการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานผ่านขดลวดความร้อนในห้องอินโทรดักชัน เริ่มจากเปิดโปรแกรม Pre-heat เพื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 30 °C เป็น 450 °C ในเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นหยุดที่ 450 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิลงที่ 30 °C ในเวลา 1 ชั่วโมง ตั้งโปรแกรมอุณหภูมิในรูปแบบที่ 3.5 ขณะทำการ Pre-heat ไอน้ำและสิ่งแปลกปลอมจะหลุดออกจากผิวหน้า และถูกดูดออกจากระบบด้วยปั๊มไอออน หลังจากนั้นจึงย้ายชิ้นงานสู่ห้องทรานส์เฟอร์และห้องปลุกต่อไป



รูปที่ 3.5 โปรแกรมอุณหภูมิของกระบวนการ Pre-heat

3.2.3) กระบวนการ De-gas

หลังจากที่ชิ้นงานถูกส่งเข้ามายังห้องปลุก ก่อนทำการเพิ่มอุณหภูมิชิ้นงานและการเปิดชุดเตอร์หลัก ต้องผ่านกระบวนการทำความสะอาดเซลล์บรรจุสาร เพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมที่อยู่ในสารและผนังของเซลล์ และเพื่อให้อัตราการปลุกสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้ในวันที่ปลุก จึงต้องวางแผนงานสำหรับการปลุก เพื่อกำหนดอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้สำหรับทุกเซลล์ เนื่องจากกระบวนการนี้ทำที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ 50 °C ดังรูปที่ 3.6 เริ่มจากการเปิดชุดเตอร์ จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิเก็บรักษา (Standby temperature) ของสารในหมู่ III คือ In และ Ga ด้วยอัตรา 30 °C/นาที่หรือต่ำกว่า ทั้งสารและสิ่งแปลกปลอมจะถูกปล่อยออกจากเซลล์ เมื่อถึงอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ 50 °C ให้หยุดไว้เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นจึงปิดชุดเตอร์ แล้วลดอุณหภูมิมาที่อุณหภูมิที่ต้องการใช้

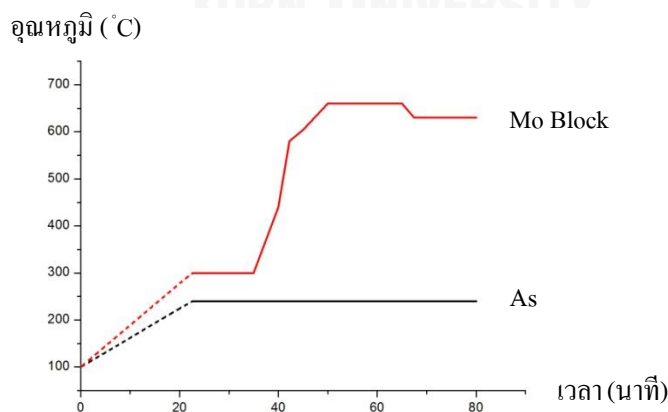


รูปที่ 3.6 โพลไฟล์อุณหภูมิของกระบวนการ De-gas

3.2.4) กระบวนการ De-ox

หลังจากที่เซลล์บรรจุสารได้ผ่านกระบวนการ De-gas เรียบร้อยแล้ว จะเริ่มเพิ่มอุณหภูมิของเซลล์ As จนถึงค่าเหมาะสม จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิของชิ้นงานขึ้นเป็น $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ดังรูปที่ 3.7 จึงเปิดชัตเตอร์หลักและชัตเตอร์ของเซลล์ As เพื่อปล่อยสาร As_4 ให้กระจายทั่วห้องปลูก (ตรวจสอบจากเกจวัดฟลักซ์ให้มีค่าประมาณ 8×10^{-8} Torr ควบคุมกับค่ายอดของ As_4 ที่ QMS เกิน 20 mV (หรือระดับ 2 ช่อง เมื่อใช้สเกล 10 mV/div) รอประมาณ 10 นาที เพื่อให้ค่าที่ตรวจสอบจากเกจวัดฟลักซ์และ QMS สอดคล้องกัน จึงเพิ่มอุณหภูมิขึ้นด้วยอัตรา $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$ เพื่อเริ่มกระบวนการ De-ox

กระบวนการ De-ox เป็นขั้นตอนการทำความสะอาดสุดท้ายก่อนการปลูกจริง เนื่องจากต้องการกำจัดสิ่งแปลกปลอมที่เป็นสารประกอบออกไซด์ที่ไม่สามารถกำจัดได้จากกระบวนการ Pre-heat โดยสารประกอบออกไซด์จะถูกขับออกจากชิ้นงานที่อุณหภูมิเทียบเท่าค่าประมาณ $580\text{ }^{\circ}\text{C}$ ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเข้าใกล้อุณหภูมินี้ จึงลดอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเป็น $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$ เพื่อสังเกตผลลวดลายจากระบบ RHEED เมื่อเกิดกระบวนการ De-ox จากนั้น เพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิดังกล่าว $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ หยุดไว้เป็นเวลาประมาณ 10 นาที เพื่อขับสารประกอบออกไซด์ออกจากผิวหน้าให้มากที่สุด

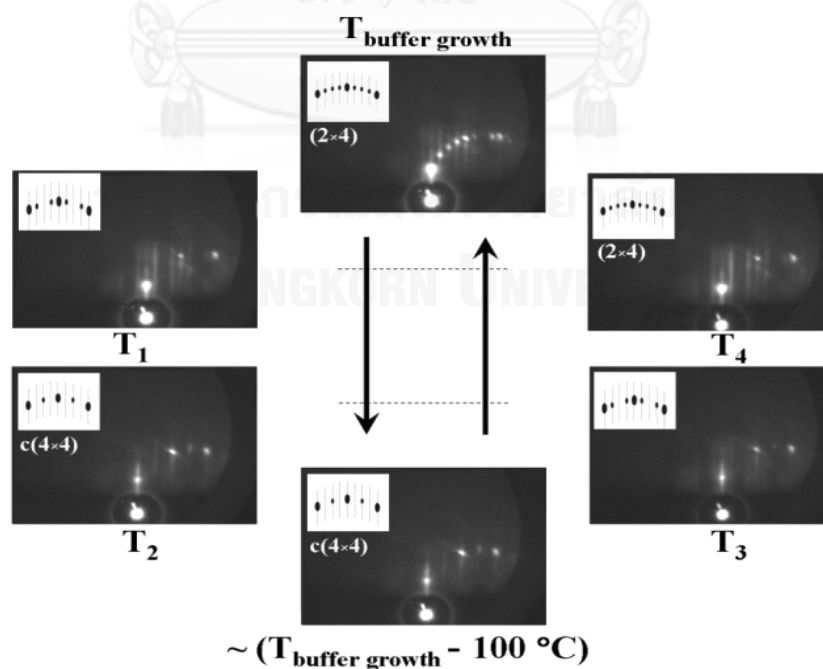


รูปที่ 3.7 โพลไฟร์อุณหภูมิของกระบวนการ De-ox

พร้อมสังเกตค่ายอดของออกไซด์จาก QMS (ค่ามวลโมเลกุล 28 หรือ ค่ามวลโมเลกุลของสารออกไซด์อื่นๆ) เมื่อค่ายอดลดลงจึงลดอุณหภูมิชิ้นงานมาที่อุณหภูมิที่เกิดกระบวนการ De-ox (T_{De-ox}) เพื่อปลูกชั้นบัฟเฟอร์ GaAs ตามรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.3.1 ด้วยความหนาประมาณ 100 นาโนเมตร หรือมากกว่าจนกว่าผิวหน้าจะเรียบจริง สังเกตจากลวดลายแบบเส้นจากระบบ RHEED จากนั้นจึงทำการสอบเทียบอุณหภูมิผิวหน้าตามรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

3.2.5) การสอบเทียบอุณหภูมิผิวหน้า

การตรวจสอบอุณหภูมิของ Mo block อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ซึ่งติดตั้งที่แท่นควบคุม จึงมีใช้อุณหภูมิจริงของผิวหน้าของชิ้นงาน การสอบเทียบอุณหภูมิเป็นการอ่านค่าอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิลแล้วเปรียบเทียบกับลวดลาย RHEED ที่เปลี่ยนไป จากนั้นอ่านค่าอุณหภูมิ 4 ค่า (T_1, T_2, T_3, T_4) จากระบบ RHEED ดังรูปที่ 3.8 มีขั้นตอนดังนี้ หลังจากปลูกชั้นบัฟเฟอร์ GaAs เสร็จ ปิดชัตเตอร์เซลล์ Ga หมุนแผ่นฐานไปจนกระทั่งลำอิเล็กตรอนตกกระทบกับทิศ [1-10] ลวดลายของ RHEED ปรากฏเป็นเส้น 5 เส้น เรียกว่า ลวดลายแบบ (2×4) จากนั้นลดอุณหภูมิด้วยอัตรา $10\text{ }^{\circ}\text{C/นาท}$ จนลำแสงเส้นกลางหายไปสนิท บันทึกค่าเป็นอุณหภูมิ T_1 จากนั้นลดอุณหภูมิต่อไปจนกระทั่งลำแสงเส้นกลางกลับมาเริ่มสว่างอีกครั้ง บันทึกค่าเป็นอุณหภูมิ T_2 จากนั้นลดอุณหภูมิต่อเนื่องจนลำแสงเส้นกลางสว่างเทียบเท่ากับตอนเริ่มกระบวนการ จึงหยุดแล้วเริ่มเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา $10\text{ }^{\circ}\text{C/นาท}$ จนพบว่าลำแสงเส้นกลางหายไปสนิทอีกครั้ง บันทึกค่าเป็นอุณหภูมิ T_3 จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิต่อไปจนกระทั่งลำแสงเส้นกลางกลับมาเริ่มสว่างอีกครั้ง บันทึกค่าเป็นอุณหภูมิ T_4

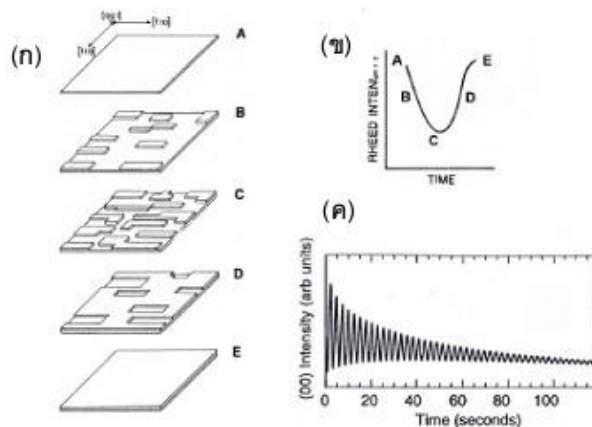


รูปที่ 3.8 การสอบเทียบอุณหภูมิผิวหน้า [53]

กระบวนการนี้ เรียกว่า Transition อุณหภูมิเฉลี่ยของ T_1 , T_2 , T_3 และ T_4 คือ ค่าอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลที่เทียบเท่าอุณหภูมิจริงบนผิวหน้าที่ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_{\text{Transition}} = (T_1+T_2+T_3+T_4)/4$) [53]

3.2.6) การสอบเทียบอัตราการปลูกของสารประกอบ GaAs

หลังสอบเทียบอุณหภูมิเสร็จสิ้น อุณหภูมิแผ่นฐานมักถูกลดลงมาที่ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ เพื่อสอบเทียบอัตราการปลูกของสารประกอบ GaAs ต่อ โดยการปรับเซลล์ Ga ไปยังอุณหภูมิที่ต้องการสอบเทียบ ปิดมอเตอร์กระแสตรงที่ป้อนให้แก่ Manipulator จากนั้นหมุนมอเตอร์ด้วยมือจนกระทั่งลำอิเล็กตรอนขนานกับทิศ [1-10] ของแผ่นฐานซึ่งสังเกตได้จาก Specular beam บนฉากฟอสเฟอร์ในระบบ RHEED มีความสว่างสูงสุด แล้วหยุดที่ตำแหน่งนี้ ใช้เป็นจุดสังเกตขณะทำการสอบเทียบ หลังจากนั้นเปิดชัตเตอร์ Ga เพื่อปลูกชั้นสารประกอบ GaAs ลงบนผิวหน้า (ภายในห้องปลูกขณะนี้ยังคงมีสาร As_4 ทั่วห้องปลูก) สังเกตลวดลายของ Specular beam จะพบความเปลี่ยนแปลงในลักษณะสว่าง-มืดสลับกัน เรียกว่า Oscillate ระยะเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนจากลักษณะสว่างถึงลักษณะสว่าง 1 ครั้ง หรือลักษณะมืดถึงลักษณะมืด 1 ครั้ง เทียบเท่ากับการปลูกสารประกอบ GaAs 1 ML ดังแสดงในรูปที่ 3.9 จากการจับเวลาจะสามารถวัดความถี่ในการ Oscillate หรืออัตราการปลูกในหน่วย ML/s หากอัตราการปลูกต่ำกว่าหรือสูงกว่าที่ต้องการ ให้เพิ่มหรือลดอุณหภูมิเซลล์ Ga ตามลำดับ แล้วทำการสอบเทียบอีกครั้ง หลังการสอบเทียบแต่ละครั้ง ให้ทำการหมุนมอเตอร์กระแสตรง แล้วเปิดชัตเตอร์ Ga เพื่อปลูกชั้นสารประกอบ GaAs ประมาณ 20 นาโนเมตร เพื่อให้ผิวหน้าเรียบขึ้นสังเกตจากลวดลายแบบเส้นที่คมชัดมากขึ้น



รูปที่ 3.9 (ก) การก่อตัวของ GaAs ความหนา 1 ML จาก A ถึง E (ข) RHEED oscillation ของ Specular beam ขณะทำการปลูก และ (ค) ความสว่างของ specular beam กับ การก่อตัวของผลึก

3.2.7) การสอบเทียบอัตราการปลูกของสารประกอบ InAs

หลังสอบเทียบอัตราการปลูกของสารประกอบ GaAs เสร็จสิ้น สามารถสอบเทียบอัตราการปลูกของสารประกอบ InAs ต่อไปได้ สารประกอบ InAs มีค่าคงตัวผลึกสูงกว่า GaAs ซึ่งเป็นแผ่นฐานตั้งต้นถึง 7.2 % การปลูก InAs ลงบน GaAs จึงไม่เกิดเป็นโครงสร้าง 2 มิติ เนื่องจากเกิดความเครียดในชั้นปลูก จะทำให้การปลูกเป็นโครงสร้างเกาะ 3 มิติ กระจายแบบสุ่มทั่วทั้งแผ่นฐาน เรียกว่า ควอนตัมดอต การสอบเทียบอัตราการปลูกสารประกอบ InAs จึงเป็นการสอบเทียบอัตราการปลูกควอนตัมดอต InAs ความหนาของ InAs เมื่อเริ่มเกิดควอนตัมดอตบนพื้นผิว GaAs มีค่า 1.7 ML การสอบเทียบเริ่มจากการเปิดมอเตอร์กระแสตรงให้หมุนอย่างต่อเนื่อง จากนั้นปรับอุณหภูมิของเซลล์ In ไปที่อุณหภูมิที่ต้องการสอบเทียบ จากนั้นจึงเปิดชัตเตอร์ของเซลล์ In พร้อมจับเวลา สังเกตความเปลี่ยนแปลงของลวดลายบนฉากฟอสเฟอร์ในระบบ RHEED เริ่มต้นจะเห็นเป็นลวดลายแบบเส้น (Streaky pattern) จนกระทั่งเมื่อเริ่มเกิดควอนตัมดอต InAs บนผิวหน้าชิ้นงาน ลวดลายแบบเส้นจะเริ่มเปลี่ยนเป็นลวดลายแบบจุด (Spotty pattern) จึงหยุดจับเวลาพร้อมปิดชัตเตอร์เซลล์ In เวลาที่ได้จะเป็นเวลาที่ปลูก InAs ด้วยความหนาเทียบเท่า 1.7 ML ใน 2 มิติ (2D equivalent thickness) เมื่อหาร 1.7 ML ด้วยเวลานี้ จะได้อัตราการปลูกในหน่วย ML/s หากอัตราการปลูกที่ต่ำกว่าหรือสูงกว่าที่ต้องการ ให้เพิ่มหรือลดอุณหภูมิเซลล์ In เพื่อสอบเทียบอีกครั้ง หลังการสอบเทียบในแต่ละครั้ง ให้เพิ่มอุณหภูมิของแผ่นฐานหรือ Mo block ไปที่ T_{De-ox} เพื่อสลายควอนตัมดอต InAs บน GaAs ซึ่งจะส่งผลให้บริเวณผิวหน้าขรุขระ จึงต้องปลูกชั้นบัฟเฟอร์ GaAs หนาประมาณ 100 นาโนเมตรเพื่อให้ผิวหน้าเรียบอีกครั้ง ก่อนสอบเทียบครั้งต่อไปหรือก่อนการปลูกชั้นผลึก

3.3) การปลูกชั้นผลึก

การปลูกชั้นผลึกของสารประกอบ III-V สามารถจำแนกลักษณะโครงสร้างจากสัณฐานวิทยา ออกได้เป็น 4 โครงสร้าง ได้แก่ 1) ชั้นก้อนผลึก 2) ชั้นพื้นผิวลายตาราง 3) ชั้นควอนตัมดอต และ 4) ชั้นกลบทับ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.3.1) การปลูกชั้นก้อนผลึก

การปลูกชั้นก้อนผลึก (Bulk) เป็นการก่อตัวที่ละ 1 ML จนเกิดโครงสร้าง 2 มิติ เกิดจากสารที่ปลูกมีค่าคงตัวผลึกเท่ากับแผ่นฐานตั้งต้น เช่น การปลูกชั้น GaAs บนแผ่นฐาน GaAs เรียกว่า ชั้นบัฟเฟอร์ (Buffer layer) ปลูกหลังจากที่ชิ้นงานผ่านกระบวนการที่ทำให้ผิวหน้าขรุขระเพื่อปรับปรุงให้ผิวหน้าเรียบระดับอะตอม ก่อนปลูกโครงสร้างอื่นต่อไป

การปลูกชั้นบัฟเฟอร์ GaAs เริ่มจากการเปิดชัตเตอร์ Ga เพื่อให้ลำโมเลกุลของ Ga ตกกระทบบนผิวหน้าชิ้นงานซึ่งมีอุณหภูมิสูง ทำให้เกิดปฏิกิริยากับสาร As_4 ในห้องปลูก และ As_2 ที่

ผิวหน้า ก่อตัวเป็นชั้นของสารประกอบ GaAs โดยทั่วไปการปลูกชั้นบัฟเฟอร์จะกระทำที่อุณหภูมิ 580 °C ต่อเนื่องจากการกระบวนการ De-ox หรือการสลายควอนตัมดอต ซึ่งต่างทำให้ผิวหน้าซรุระ อัตราการปลูกที่ใช้ คือ 0.6 ML/s เนื่องจากเป็นอัตราที่สะดวกแก่การใช้งาน การปลูก GaAs ด้วยอัตรานี้จะให้บัฟเฟอร์ GaAs หนา 10 nm/min นอกจากนี้การปลูกที่อุณหภูมิสูงจะทำให้มีผลึกคุณภาพดี ส่งผลให้สมบัติเชิงแสงของชั้นงานมีคุณภาพดี

3.3.2) การปลูกชั้นพื้นผิวลายตาราง

ชั้นพื้นผิวลายตาราง (Cross-hatch) เกิดจากการปลูกสารประกอบต่างชนิดจากแผ่นฐานตั้งต้นและมีสมบัติเหมาะสม พื้นผิวลายตารางที่เป็นแก่นของวิธานิพนธ์เกิดจากการปลูกสารประกอบ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ บนชั้น GaAs ความแตกต่างของค่าคงตัวผลึกจะแปรผันกับเศษส่วนโมลของสารประกอบ (x) ก่อให้เกิดความเครียดในชั้นเอพิ สารประกอบจะต้องมีเศษส่วนโมลของ In ไม่สูงกว่า ~ 20 % เพื่อให้ชั้นผลึกยังคงก่อตัวเป็นแบบ 2 มิติ เมื่อปลูกผลึก $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ หนาขึ้น ความเครียดสะสมในชั้นเอพิก็มากขึ้น จนกระทั่งความหนาของชั้นปลูกเกินค่าความหนาวิกฤติ ความเครียดสะสมจะทำให้เกิดตำแหน่งบกพร่อง (Dislocation) บนผิวหน้าเพื่อลดความเครียดในชั้นปลูก โดยจะเกิดเป็นลอนในทิศ [1-10] และ [110]

ขั้นตอนการปลูกชั้นพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ เริ่มจากการปรับอุณหภูมิของเซลล์สาร Ga และ In ให้ได้อัตราการปลูกตามทีออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดเศษส่วนโมลตามที่ต้องการ เช่น $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ จากนั้นเปิดชัตเตอร์ของเซลล์ Ga และ In พร้อมกัน เพื่อให้ลำโมเลกุลของสาร Ga และ In จับตัวกับ As_4 ที่กระจายอยู่ทั่วภายในห้องปลูก เกิดเป็นสารประกอบ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ บนผิวหน้าชั้นงานที่มีอุณหภูมิสูง ข้อควรระวังโดยเฉพาะเมื่อ x มีค่าสูง คือ หากทำการสอบเทียบอุณหภูมิของสาร Ga และ/หรือ In ไม่แม่นยำ จะทำให้เกิดโครงสร้าง 3 มิติของควอนตัมดอต $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ไม่ได้ชั้นลายตารางตามทีออกแบบการทดลองไว้ ควอนตัมดอต $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ไม่สามารถกำจัดออกได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิไปที่ $T_{\text{De-ox}}$ เหมือนกับควอนตัมดอต InAs เพราะจะทำให้ผิวหน้าซรุระในระดับที่ไม่สามารถปรับปรุงความเรียบโดยการปลูกชั้น GaAs หนา ๆ ครอบคลุมได้

3.3.3) การปลูกชั้นควอนตัมดอต

ชั้นควอนตัมดอต (Quantum dots) เกิดจากการปลูกสารประกอบต่างชนิดจากแผ่นฐานตั้งต้นและมีสมบัติเหมาะสม ควอนตัมดอตที่เป็นแก่นวิธานิพนธ์เกิดจากการปลูกสารประกอบ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ด้วยเศษส่วนโมลของ In สูงกว่าหรือเท่ากับ 50 % ความเครียดจึงสูงกว่าชั้นพื้นผิวลายตารางมาก ในช่วงแรกของการปลูกสารประกอบจะก่อตัวเป็นผลึกโครงสร้าง 2 มิติ เป็นชั้นเรียบๆ เรียกว่า Wetting layer (WL) ลวดลายบนฉากฟอสเฟอร์ของระบบ RHEED จะเป็นลวดลายแบบเส้น

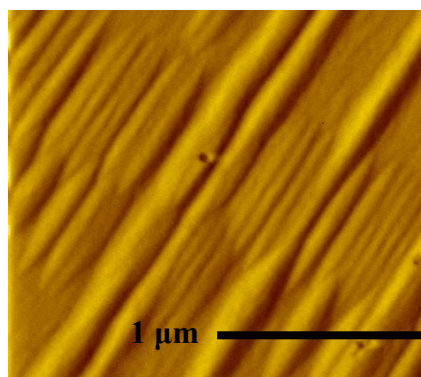
ที่คมชัดน้อยกว่าตอนที่ผิวหน้าเรียบ ในช่วงท้ายของการปลูกสวดลายแบบเส้นจะเปลี่ยนเป็นสวดลายแบบจุดที่ความหนาวิกฤติ θ_c ที่ขึ้นกับเศษส่วนโมลของสารประกอบ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ที่ $x = 1$, $\theta_c = 1.7$ ML และที่ $x = 0.5$, $\theta_c = 3.5$ ML แสดงถึงการเกิดควอนตัมดอต

การปลูกควอนตัมดอตบนชั้นพื้นผิวลายตาราง อาจมีการแทรกเวลาขัดจังหวะปลูก (Growth Interrupt, GI) หลังจากปลูกชั้นพื้นผิวลายตารางประมาณ 10-20 วินาที จึงเปิดชุดเตอร์ In แล้วเริ่มจับเวลาพร้อมสังเกตสวดลายจากระบบ RHEED สวดลายเริ่มต้นจะเป็นแบบเส้นที่ไม่ค่อยคมชัดเนื่องจากผิวหน้าเป็นลอน กระทั่งปลูก $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ได้ความหนาวิกฤติ สวดลายจะเปลี่ยนจากแบบเส้นเป็นแบบจุด จึงปิดชุดเตอร์ In และ Ga แล้วแทรก GI ≈ 10 -20 วินาที เพื่อให้ควอนตัมดอตจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบ [36]

3.3.4) การปลูกชั้นกบตบ GaAs

หลังการปลูกชั้นควอนตัมดอตหรือพื้นผิวลายตารางเสร็จ หากต้องการศึกษาสัญญาณวิทยาพื้นผิว (Surface morphology) ให้นำชิ้นงานออกจากระบบแล้วนำไปวัดโดยเครื่อง AFM แต่หากต้องการศึกษาสมบัติเชิงแสง ชั้นควอนตัมดอตหรือพื้นผิวลายตารางจะต้องถูกกบตบด้วย GaAs ก่อนเนื่องจากพื้นผิวชิ้นงานเป็นบริเวณที่ความเป็นผลึกสิ้นสุดลงอย่างฉับพลัน มีจุดบกพร่อง (Defect) และพันธะอิสระ (Dangling bond) มากมายที่สามารถดักจับ (Trap) ผสมกลับ (Recombine) พาหะอิสระทำให้เกิดการรวมตัวแบบไม่เปล่งแสง (Non-radiative recombination) จึงจำเป็นต้องปลูกชั้นกบตบ (Capping layer) GaAs หนาประมาณ 50-100 nm ที่พื้นผิวเพื่อป้องกันมิให้พันธะอิสระแผ่อิทธิพลเข้ามาถึงชั้นควอนตัมดอตหรือพื้นผิวลายตาราง จึงจะสามารถศึกษาสมบัติเชิงแสงของชั้นทั้งสองได้

การปลูกชั้นกบตบอาจจะถูกนำมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์อื่น ๆ ในส่วนต่าง ๆ ของโครงสร้าง เช่น การปลูกชั้นกบตบบาง (Thin capping) หลังการปลูกชั้นพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ เนื่องจากชั้นพื้นผิวลายตารางถือเป็นจุดบกพร่องอย่างหนึ่ง ทำให้บริเวณที่เป็นลอนในชั้นลายตารางมีความเครียดสูงกว่าบริเวณผิวเรียบ หากปลูกควอนตัมดอต InAs หลังการปลูกชั้นลายตาราง จะทำให้ควอนตัมดอตส่วนใหญ่เกิดบนลายตาราง และก่อตัวเป็นควอนตัมดอตที่ความหนาความหนาต่ำกว่า 1.7 ML ทำให้ควอนตัมดอตที่ได้มีขนาดเล็ก การปลูกชั้นกบตบบนชั้นลายตารางก่อนการปลูกควอนตัมดอตจะช่วยลดผลจากความเครียดในชั้นลายตารางให้มีค่าลดลงจนใกล้เคียงชั้นเรียบ ทำให้ควอนตัมดอตก่อตัวที่ $\theta_c \approx 1.7$ ML เรียกชั้นกบตบนี้ว่า ชั้นแทรก (Spacer layer) หรือการปลูกชั้นกบตบบางหลังการปลูกควอนตัมดอต InAs โดยให้ความหนาน้อยกว่าความสูงของควอนตัมดอตเล็กน้อย มีผลทำให้โครงสร้างของควอนตัมดอตยื่นออกในทิศทางผลึก [1-10] เนื่องจากเกิดการแพร่ของสาร In ที่มีปริมาณสูงที่สุดบริเวณส่วนบนสุดของควอนตัมดอตเข้าสู่ชั้นกบตบบาง GaAs ทำให้



รูปที่ 3.10 ภาพ AFM แสดงลักษณะโครงสร้างหลุมนาโน [55]

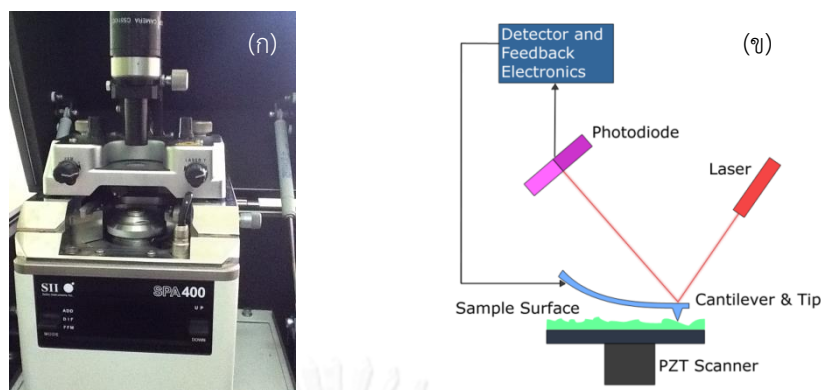
เกิดโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นหลุมขึ้นบริเวณส่วนบนสุดของควอนตัมดอต เรียกว่า หลุมนาโน (Nanohole) ดังรูปที่ 3.10 ซึ่งใช้เป็นโครงสร้างแม่แบบ (Template) สำหรับการปลูกโครงสร้างโมเลกุลควอนตัมดอต (Quantum dot Molecules) [55]

3.4) ลักษณะสมบัติของชิ้นงาน

เมื่อชิ้นงานถูกนำออกจากระบบปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล จะถูกตรวจสอบสมบัติทางกายภาพหรือสมบัติเชิงแสงจากภายนอก (Ex-situ) โดยการวัดข้อมูลจากการวัดสัณฐานวิทยาพื้นผิวเป็นข้อมูลป้อนกลับสำคัญสำหรับตรวจสอบชิ้นงานว่ามีโครงสร้างทางกายภาพตรงกับที่ออกแบบการทดลองหรือไม่ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscope, AFM) และการวัดสมบัติเชิงแสงด้วยชุดการทดลองโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence, PL) ขณะที่ข้อมูลจากการวัด PL จะบ่งบอกถึงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ ชิ้นงานทั้งหมดที่สังเคราะห์เป็นสารกึ่งตัวนำ Direct เปล่งแสงและดักจับแสงที่ความยาวคลื่น (λ) ที่สอดคล้องกับช่องว่างพลังงาน (E_G) จะของสารกึ่งตัวนำด้วยความสัมพันธ์ของพลังค์ $E_G = \frac{hc}{\lambda}$ ทั้งนี้ E_G จะแตกต่างกันตามเศษส่วนโมลของสารประกอบและโครงสร้างควอนตัมภายในชิ้นงาน

3.4.1) สัณฐานวิทยาพื้นผิว

กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมเป็นอุปกรณ์หลักที่ใช้ตรวจสอบโครงสร้างผิวหน้าของชิ้นงาน มีความละเอียดในการวัดในระดับนาโนเมตรหรือดีกว่า จึงสามารถให้ข้อมูลสำคัญด้านโครงสร้าง เช่น ลักษณะและลำดับการก่อตัว, ความหนาแน่น, ความสูงของโครงสร้างระดับนาโนเมตร เช่น พื้นผิวลายตาราง, ควอนตัมดอต, หลุมนาโน และโมเลกุลควอนตัมดอตของสารประกอบ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ข้อมูลสำคัญเหล่านี้มักถูกนำมาใช้ประกอบการอธิบายสมบัติเชิงแสงของวัสดุ กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมที่ใช้เป็นยี่ห้อ Seiko Instruments รุ่น SPA-400 ดังภาพถ่ายในรูปที่ 3.11 (ก)

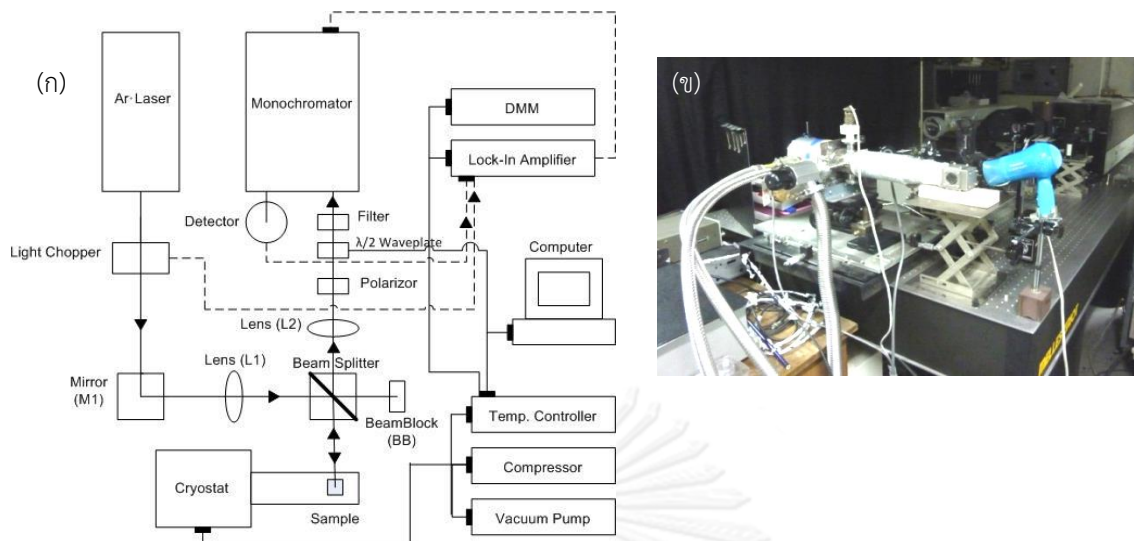


รูปที่ 3.11 (ก) ภาพจริงของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (ข) แผนภาพการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมสามารถอธิบายได้ดังแผนภาพในรูปที่ 3.11 (ข) เริ่มจากเล็อนเข็ม (AFM Tip) เข้าใกล้กับชิ้นงาน ผ่านแสงเลเซอร์ไปยังคานยื่น (Cantilever) ที่ปลายแหลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง ≈ 10 nm ส่วนปลายแหลมของคานจะไปสัมผัสแบบกระดกในทิศทางขึ้นและลงตามการเคลื่อนในระนาบ (x,y) ของพื้นผิววัตถุ เมื่อเครื่อง AFM ลากส่วนปลายแหลมผ่านผิวหน้า แรงปฏิกิริยาที่กระทำในแนวตั้งฉากที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของพื้นผิวกับปลายแหลมจะดึงคาน ทำให้คานโก่งงอตัว จากนั้นระบบจะวัดแสงสะท้อนด้วยตัวตรวจจับแสง (Photodetector) เพื่อวัดขนาดของแรงเชิงปฏิกิริสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของส่วนปลายแหลมและพื้นผิวของวัตถุ ซึ่งจะถูกลำมาแปรสัญญาณร่วมกันเพื่อนำมาสร้างเป็นภาพพื้นผิวที่มีกำลังการขยายสูง

3.4.2) สมบัติเชิงแสง

เนื่องจากชิ้นงานในวิทยานิพนธ์นี้สังเคราะห์จากสารกึ่งตัวนำ Direct การกระตุ้นชิ้นงานด้วยแสงที่มีพลังงานค่าสูงกว่า Energy gap ของชิ้นงาน จะทำให้เกิดพาหะอิสระหรือพาหะส่วนเกิน (Excess carrier) ซึ่งผสมกลับกันตลอดเวลา การผสมกลับหมายถึง การที่มีอิเล็กตรอนในแถบการนำตกลงมายังแถบเวเลนซ์ ส่วนต่างพลังงานซึ่งมีค่าเท่ากับ E_G ของชิ้นงานจะถูกปล่อยออกมาในรูปของโฟตอน (Photon) พลังงานของโฟตอนที่ปล่อยออกมาจะแปรตามลักษณะโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมี การวัดความเข้มแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ เรียกว่า การวัดสเปกตรัมจึงเป็นข้อมูลสำคัญในการบ่งชี้ถึงองค์ประกอบทางกายภาพของชิ้นงานว่าตรงกับที่ออกแบบการทดลอง ซึ่งสามารถวัดได้จากระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์



รูปที่ 3.12 แผนภาพ (ก) และภาพจริง (ข) ของระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์

หลังจากนำชิ้นงานออกจากระบบปลูกผลึกแบบลำโมเลกุลหรือกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม นำชิ้นงานมาตัดให้มีขนาดประมาณ $3 \times 3 \text{ mm}^2$ แล้วทากาวที่ด้านหลังชิ้นงาน แปะชิ้นงานกับแท่น (Sample holder) จากนั้นติดตั้งชิ้นงานในห้องวัดดังรูปที่ 3.12 (ก) ที่ถูกทำให้เป็นภาวะสุญญากาศ โดยการดูดอากาศ และไอน้ำออกจากระบบด้วย Vacuum pump เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเปิดระบบหมุนเวียนฮีเลียม (Helium compressor) ทำหน้าที่ลดอุณหภูมิโดยนำพาความร้อนออกจาก Sample holder การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ทำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 K การทดลองเริ่มจากยิงลำแสงเลเซอร์ผ่าน Light chopper ตัดลำแสงที่มีความถี่ประมาณ 330 Hz เพื่อลดสัญญาณรบกวนของระบบ ลำแสงจะสะท้อนกระจก (M1 ในรูป) ผ่านเลนส์รวมแสง (L1) ก่อนผ่านเข้าสู่ Beam Splitter แสงเลเซอร์ที่ผ่าน Beam Splitter จะมี 2 ส่วน ส่วนแรกจะออกจาก Beam Splitter เข้าสู่ Beamblock (BB) อีกส่วนหนึ่งจะออกจาก Beam Splitter ตกกระทบกับชิ้นงาน แสงเลเซอร์ที่ใช้มีพลังงาน 2.41 eV (514.5 nm) สูงกว่า E_G ของชิ้นงานทั้งหมด ในกรณีของ GaAs มี $E_G = 1.43 \text{ eV}$ ที่ 300 K และ 1.51 eV ที่ 20 K หลังจากที่ยิงแสงถูกกระตุ้นและคายพลังงาน โฟตอนที่ออกจากชิ้นงานจะผ่าน Beam splitter และเลนส์รวมแสง (L2) ผ่าน Polarizer และ Waveplate ก่อนเข้าสู่ โมโนโครมาเตอร์ (Monochromator) ที่ทำหน้าที่คัดกรองแสงที่มีหลายความยาวคลื่นให้เหลือเพียงความยาวคลื่นเดียวโดยการหมุนเกรตติงภายใน แสงความยาวคลื่นเดียวนี้จะตกกระทบตัวตรวจจับแสง (Detector) ทำหน้าที่แปลงความเข้มแสงเป็นค่าศักย์ไฟฟ้า จากนั้นส่งข้อมูลเข้าเครื่อง Lock-in amplifier (LIA) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่มีเฟสและความถี่ตรงกับ Light chopper จากนั้นประมวลผลเป็นกราฟระหว่างความเข้มแสงและความยาวคลื่นเก็บข้อมูลในคอมพิวเตอร์

การวัดด้วยระบบโพโตลูมิเนสเซนซ์ในวิทยานิพนธ์นี้ จะมี 2 แบบ คือ 1) การวัดโพโตลูมิเนสเซนซ์แบบปกติ เป็นการวัดที่เริ่มจากการปรับค่ามุมของ Polarizer ที่มีค่าความเข้มแสงสูงสุด จากนั้นปรับค่ามุมของ Waveplate ตามที่ออกแบบการทดลอง จึงเริ่มวัดโพโตลูมิเนสเซนซ์ โดยการสแกนความยาวคลื่นของโมโนโครมาเตอร์ แล้ววัดความเข้มแสงจากตัวตรวจจับแสง และ 2) การวัดโพลาไรซ์โพโตลูมิเนสเซนซ์ที่ความยาวคลื่นที่สนใจ เริ่มจากการปรับค่ามุมของ Polarizer ที่มีค่าความเข้มแสงสูงสุด จากนั้นจึงเริ่มวัดโพโตลูมิเนสเซนซ์ โดยการสแกนค่ามุมของ Waveplate ตั้งแต่ 0-360° แล้ววัดความเข้มแสงจากตัวตรวจจับแสง



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

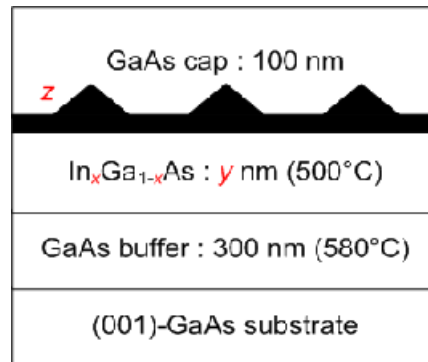
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้รายงานผลการวิจัยที่ได้จากการสังเคราะห์ วัดและวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงแสงของโครงสร้างควอนตัมดอทบนพื้นผิวลายตาราง การสังเคราะห์กระทำโดยเทคนิคการปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล สมบัติทางกายภาพได้จากการวัดสัญญาณวิทยาพื้นผิวเพื่อศึกษาการก่อตัวของควอนตัมดอทบนพื้นผิวลายตาราง สมบัติเชิงแสงได้จากการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ การทดลองทั้งหมดได้พัฒนามาอย่างต่อเนื่องโดยสมาชิกในห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (SDRL) ตอนต้นของบทจะเป็นการสรุปผลการทดลองในอดีตดังหัวข้อ 4.1) การทดลองในอดีตได้มุ่งเน้นศึกษาการก่อควอนตัมดอทในบริเวณพื้นผิวลายตารางและผิวเรียบ การขัดจังหวะการปลูก (GI) เพื่อศึกษาลำดับการเกิดควอนตัมดอทบนพื้นผิวลายตารางซึ่งเชื่อมโยงกับการทดลองในวิทยานิพนธ์นี้ โดยจำแนกผลการทดลองออกเป็น 6 หัวข้อ ได้แก่ 4.1.1) การเปลี่ยนแปลงเศษส่วนโมล (x ในรูปที่ 4.1) ของชั้นลายตาราง $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ และผลต่อการจัดเรียงควอนตัมดอท 4.1.2) การเปลี่ยนความหนา (y) ของชั้นลายตารางและผลต่อการจัดเรียงตัวของควอนตัมดอท 4.1.3) การเปลี่ยนเวลาขัดจังหวะการปลูก (GI) และผลต่อการจัดเรียงควอนตัมดอท 4.1.4) การเปลี่ยนความหนาของควอนตัมดอท (z) และวิวัฒนาการในการก่อตัวของควอนตัมดอทบนพื้นผิวลายตาราง 4.1.5) ควอนตัมดอทบนพื้นผิวลายตาราง 1 ชั้นและซ้อนทับมากกว่า 1 ชั้น และ 4.1.6) สมบัติเชิงแสงของควอนตัมดอทบนพื้นผิวลายตาราง หลังจากนั้นจึงอธิบายผลการทดลองและบทวิเคราะห์ที่ต่อยอดจากผลการทดลองในอดีต ได้แก่ 4.2) สัญญาณวิทยาพื้นผิวของควอนตัมดอท $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ และ 4.3) สมบัติเชิงแสงของควอนตัมดอท $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ที่ปลูกซ้อนทับกันบนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$

4.1) สรุปผลการทดลองควอนตัมดอทบนพื้นผิวลายตารางในอดีต

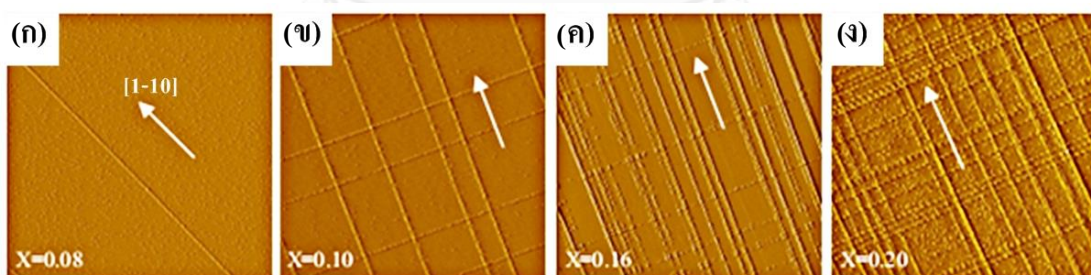
โครงสร้างควอนตัมดอทบนพื้นผิวลายตารางที่ได้ทำการทดลองมาทั้งหมดในอดีตสามารถสรุปได้ดังภาพตัดขวางในรูปที่ 4.1 เริ่มจากแผ่นฐานตั้งต้น GaAs (001) ตามด้วยชั้น buffer GaAs 300 nm ชั้นพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ หนา y nm ชั้นควอนตัมดอท InAs และชั้น GaAs ปิดโครงสร้าง (cap) 100 nm สำหรับการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ โดยการจัดเรียงตัวของควอนตัมดอทจะขึ้นอยู่กับพื้นผิวลายตาราง



รูปที่ 4.1 แผนภาพสำหรับชั้นงานที่มีโครงสร้างควอนตัมดอทบนพื้นผิวลายตาราง

4.1.1) การเปลี่ยนเศษส่วนโมลของ In (x) และผลต่อการจัดเรียงตัวของควอนตัมดอท [56]

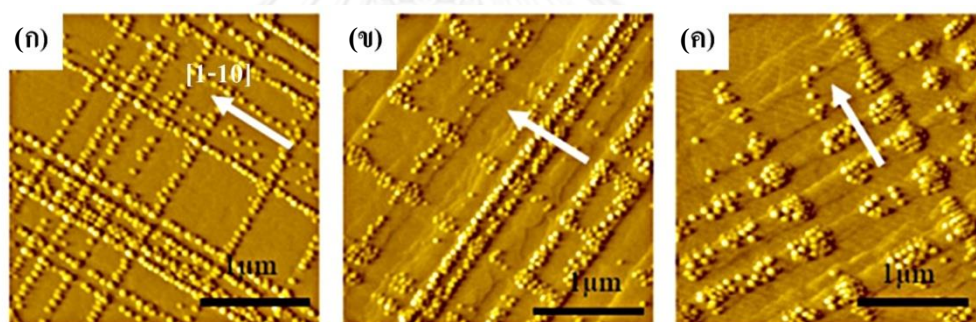
เศษส่วนโมลของ In (x) มีผลต่อการจัดเรียงตัวของควอนตัมดอท เมื่อ x เพิ่มขึ้น ลายตารางจะถี่ขึ้น เนื่องจากความเครียด $\epsilon = \frac{a_{\text{GaAs}} - a_{\text{InGaAs}}}{a_{\text{GaAs}}}$ จะเพิ่มขึ้นตาม ทำให้ θ_c ลดลง สำหรับชุดชั้นงานที่มีความหนา y ของชั้นลายตารางเท่ากัน ชั้นงานที่มี x สูงกว่า ย่อมมี θ_c ต่ำกว่าดังนั้นลายตารางจึงถี่กว่า รูปที่ 4.2 แสดงภาพ AFM เมื่อ x = 0.08, 0.10, 0.16 และ 0.20 ซึ่งจะเห็นแนวโน้มว่าลายตารางถี่ขึ้นตาม x ที่เพิ่มขึ้น ในบางบริเวณผิวหน้ามีลักษณะเป็นเส้นในทิศ [1-10] และ [110] ทำให้ควอนตัมดอทจัดเรียงตัวบนเส้นลายตารางนี้เป็นส่วนใหญ่ การจัดเรียงควอนตัมดอทจึงขึ้นกับลักษณะการก่อตัวของพื้นผิวลายตาราง จากการทดลองสรุปได้ว่า เศษส่วนโมลที่เหมาะสมแก่การปลูกชั้นลายตารางควรต่ำกว่า 0.2 และความถี่ของเส้นลายตารางแปรผันตรงกับ x



รูปที่ 4.2 ภาพ AFM ขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ ของควอนตัมดอท InAs บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ หนา 25 nm เมื่อ x = (ก) 0.08, (ข) 0.10, (ค) 0.16 และ (ง) 0.20, ลูกศรแสดงทิศ [1-10] [56]

4.1.2) การเปลี่ยนความหนาของชั้นลายตาราง (y) และผลต่อการจัดเรียงตัวของควอนตัมดอท [57]

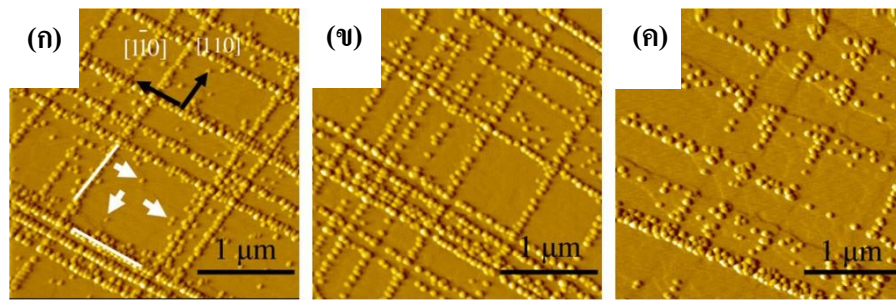
เมื่อชั้น $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ หนากว่าค่าวิกฤติ ($y > \theta_c$) พื้นผิวจะเกิดเป็นลายตารางเพื่อลดพลังงาน ความเครียดที่สะสมในชั้นเอพิทัง Cho Cho Thet ได้ทดลองเปลี่ยนความหนาของชั้นลายตาราง (y) ระหว่าง 50, 100 และ 150 nm และปลูกควอนตัมดอททับบนลายตาราง พบว่าผลการทดลองที่ $y = 50$ nm ควอนตัมดอทจะก่อตัวหนาแน่นอย่างชัดเจนบนลายตารางดังรูปที่ 4.3 (ก) ต่อมาเมื่อเพิ่มเป็น $y = 100$ nm ความหนาแน่นในการก่อตัวจะลดลงดังรูปที่ 4.3 (ข) และหนาแน่นน้อยที่สุดที่ $y = 150$ nm ดังรูปที่ 4.3 (ค) จึงสรุปว่าความหนาสำหรับการปลูกชั้นลายตารางที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นแม่แบบในการจัดเรียงควอนตัมดอทควรมีค่าระหว่าง θ_c ถึง 50 nm เนื่องจากการซ้อนทับกันของ Dislocation ทำให้การกระจายตัวของความเครียดบนผิวหน้าไม่เด่นชัดดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ก)



รูปที่ 4.3 ภาพ AFM ของควอนตัมดอท InAs บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ ที่ความหนา (y) มีค่า (ก) 50 nm, (ข) 100 nm และ (ค) 150 nm, ลูกศรแสดงทิศ [1-10] [57]

4.1.3) การเปลี่ยนช่วงเวลาขัดจังหวะการปลูกและผลต่อการจัดเรียงตัวของควอนตัมดอท [36]

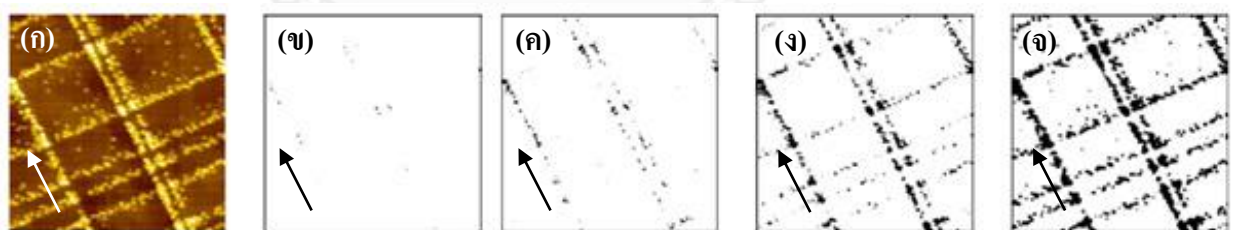
หลังจากที่ปลูกชั้นควอนตัมดอท InAs จะมีการขัดจังหวะการปลูก (GI) เพิ่มความเป็นระเบียบของควอนตัมดอท ช่วงเวลา GI นับตั้งแต่ปิดชัตเตอร์ของสาร (In) จนกระทั่งดำเนินการปลูกในขั้นตอนถัดไป สำหรับควอนตัมดอท InAs บนผิวเรียบ GaAs จากการทดลองพบว่าการขัดเวลาการปลูกที่ทำให้การจัดเรียงตัวของควอนตัมดอทมีความเป็นระเบียบสูงที่สุด ใช้เวลาประมาณ 30 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ก) [36] ในกรณีที่ไม่มี GI หรือใช้เวลาน้อยเกินไป จะมีควอนตัมดอทบางส่วนก่อตัวบนผิวเรียบ ควอนตัมดอทส่วนนี้สามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่มีความเครียดสูงกว่าผิวเรียบ (พื้นผิวลายตาราง) ได้ หากยังไม่ลดอุณหภูมิผิวหน้าลง แต่หาก GI นานเกินไปควอนตัมดอทจะหายไปบางส่วนเนื่องจากกระเหิดออกจากผิวหน้าดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ข) และแยกเป็นกลุ่มควอนตัมดอทอย่างชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ค)



รูปที่ 4.4 ภาพ AFM ของควอนตัมดอต InAs บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ ที่ GI มีค่า (ก) 0 วินาที, (ข) 30 วินาที และ (ค) 60 วินาที [36]

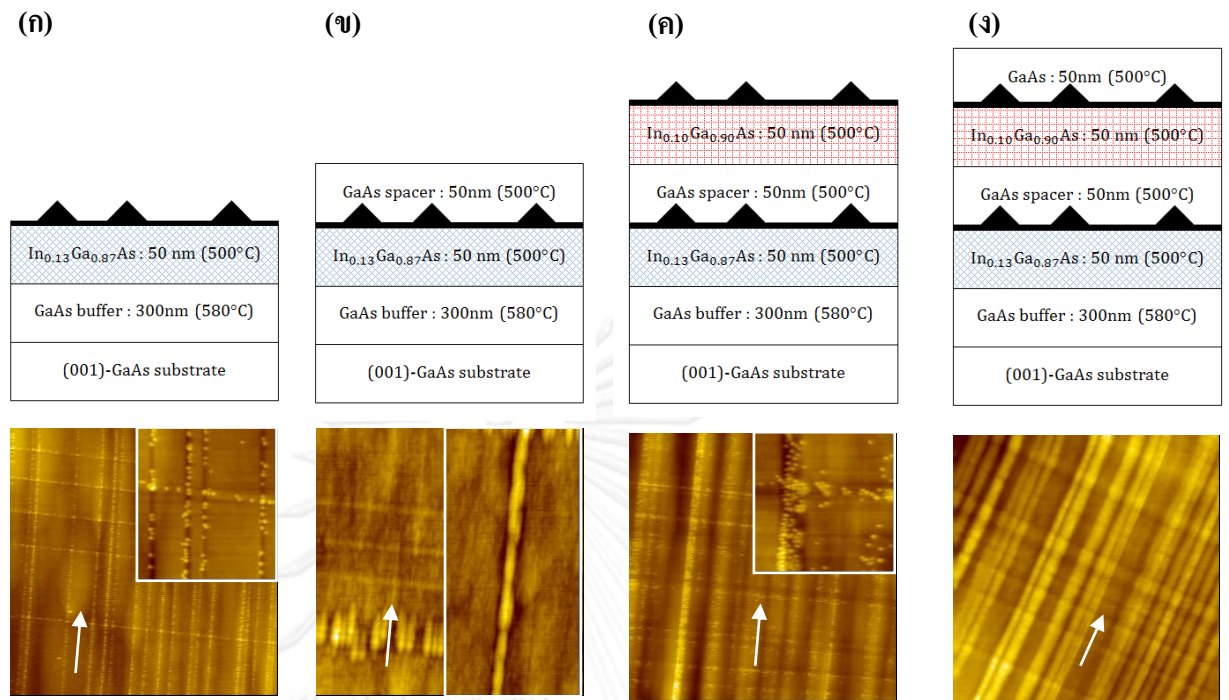
4.1.4) การเปลี่ยนความหนาของควอนตัมดอต (z) บนพื้นผิวลายตาราง ([48], [56])

ควอนตัมดอตที่ก่อตัวบนพื้นผิวลายตารางในแต่ละตำแหน่งมีความสูงต่างกัน บ่งชี้ถึงลำดับการก่อควอนตัมดอตในบริเวณต่าง ๆ T. Limwongse [48] ได้ทำ Image thresholding จากภาพ AFM ของชิ้นงานเป็นโครงสร้างควอนตัมดอตบนพื้นผิวลายตาราง (เศษส่วนโมลของ In ในชั้นพื้นผิวลายตารางคือ $x = 0.2$ ความหนาคือ $y = 50 \text{ nm}$) สรุปลำดับการก่อตัวของควอนตัมดอตบนพื้นผิวลายตารางดังรูปที่ 4.5 จากก่อนไปหลังตามลำดับดังนี้ คือ 1) ควอนตัมดอตบริเวณจุดตัดของเส้นลายตารางในทิศ $[1-10]$ และ $[110]$, 2) ควอนตัมดอตบนเส้นลายทางในทิศ $[1-10]$, 3) ควอนตัมดอตบนเส้นลายทางในทิศ $[110]$ และ 4) ควอนตัมดอตบนผิวเรียบ เหตุเกิดจากสนามความเครียดซึ่งสูงที่สุดบริเวณจุดตัดของเส้นลายตาราง รองลงมาคือที่เส้นลายทางในทิศ $[1-10]$, ทิศ $[110]$ และที่บริเวณผิวเรียบตามลำดับ



รูปที่ 4.5 (ก) ภาพ AFM ขนาด $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ ของควอนตัมดอต InAs บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ และภาพจากการทำ Image thresholding โดยบริเวณสีขาว คือ บริเวณที่ความสูงน้อยกว่าค่า Threshold และบริเวณสีดำ คือ บริเวณที่ความสูงมากกว่าค่า Threshold ค่า Threshold ของแต่ละภาพ คือ (ข) 5.5 nm, (ค) 4.9 nm, (ง) 4.0 nm และ (จ) 3.0 nm, ลูกศรแสดงทิศ $[1-10]$ [48]

4.1.5) ควอนตัมดอตบนพื้นผิวลายตาราง 1 ชั้นและซ้อนทับมากกว่า 1 ชั้น ([58]-[59])

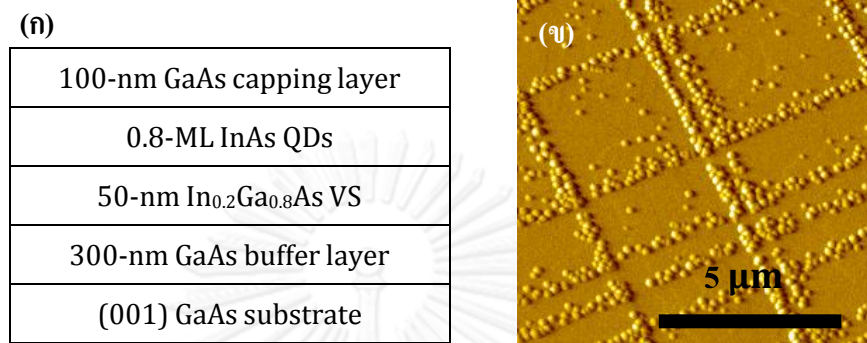


รูปที่ 4.6 แผนภาพและภาพ AFM ขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ ของควอนตัมดอต InAs บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ หนา 50 nm โดยที่ (ก) ไม่มีชั้นกลบ, (ข) มีชั้นกลบ GaAs หนา 50 nm, (ค) มีควอนตัมดอต InAs ชั้นที่ 2 บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{As}$ บนชั้นกลบ GaAs หนา 50 nm, (ง) มีควอนตัมดอต InAs ชั้นที่ 2 บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{As}$ ชั้นกลบ GaAs หนา 50 nm จากนั้นกลบชั้นควอนตัมดอตด้วยชั้น GaAs หนา 50 nm, ลูกศรแสดงทิศ [1-10] [59]

จากการศึกษาของ C. Himwas หลังจากปลูกควอนตัมดอต InAs บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ ดังรูปที่ 4.6 (ก) หากปลูกกลบด้วยชั้นแทรก (Spacer Layer) GaAs หนา 50 นาโนเมตร ควอนตัมดอตจะยึดตัวในทิศ [1-10] ลักษณะเป็นเส้นควอนตัม (Quantum Wires) และควอนตัมแดช (Quantum Dashes) ในทิศ [110] ดังรูปที่ 4.6 (ข) ซึ่งจะส่งผลกับการปลูกโครงสร้างในชั้นถัดไป หากต้องการให้ผลทางสัณฐานวิทยาเป็นอิสระต่อกันจะต้องปลูกชั้นแทรก GaAs หนากว่า 50 นาโนเมตร ซึ่งงานที่ปลูกควอนตัมดอตบนพื้นผิวลายตาราง 2 ชั้น ในชั้นแรกมีลักษณะเป็นกลุ่มควอนตัมดอตที่เรียงตัวชัดเจนในทิศ [1-10] และเป็นกลุ่มควอนตัมดอตแบบเส้นแบบไม่ชัดเจนเรียงตัวในทิศ [110] ในชั้นที่ 2 กลุ่มควอนตัมดอตจะไม่เรียงตัวแบบเดียวเหมือนชั้นที่ 1 ดังรูปที่ 4.6 (ค) เนื่องจากผลจากผิวหน้าของชั้นแทรก GaAs ซึ่งเสมือนเป็นแม่แบบของโครงสร้างในชั้นที่ 2 ที่มีลักษณะเป็นเส้นควอนตัมในทิศ [1-10] และควอนตัมแดชในทิศ [110] ในชั้นที่ 2 กลุ่มควอนตัมดอตในทิศ [1-10] มีความกว้างใกล้เคียงความกว้างของเส้นควอนตัมในชั้นแทรก และกลุ่มควอนตัมดอตที่เรียงตัวเป็นเส้นไม่ต่อเนื่องในทิศ [110] มีลักษณะใกล้เคียงกับควอนตัมแดช เกิดจากความไม่เป็น

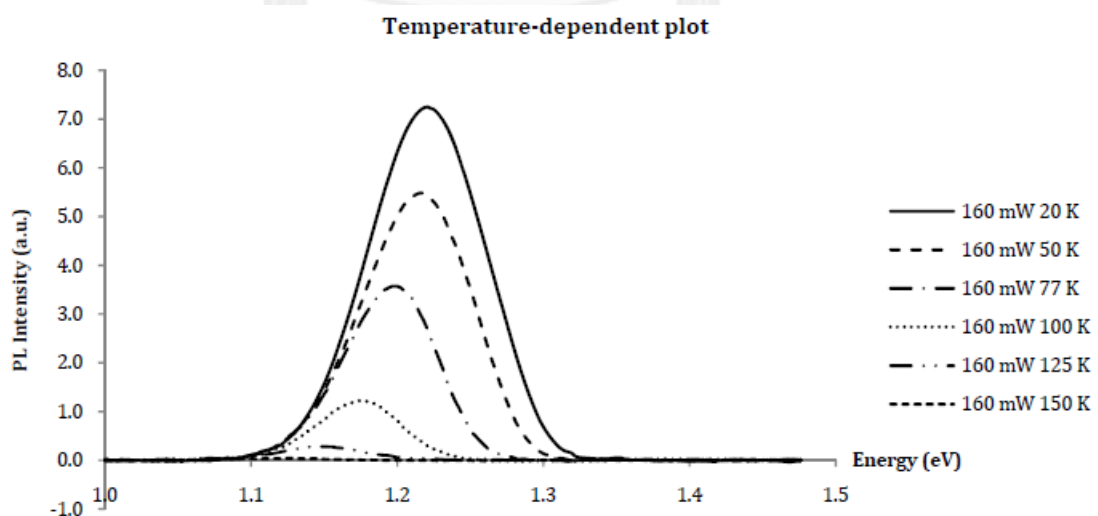
ระนาบ (Non-planar) ของ GaAs รอบๆควอนตัมดอต ทำให้ชั้นงานหลังจากกลบด้วย GaAs หนา 50 nm มีลักษณะเป็นควอนตัมแคช และควอนตัมไวร์ดังรูปที่ 4.6 (ง) [60]

4.1.6) สมบัติเชิงแสงของควอนตัมดอตบนพื้นผิวลายตาราง



รูปที่ 4.7 แผนภาพ (ก) และภาพ AFM (ข) ของควอนตัมดอต InAs บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ [56]

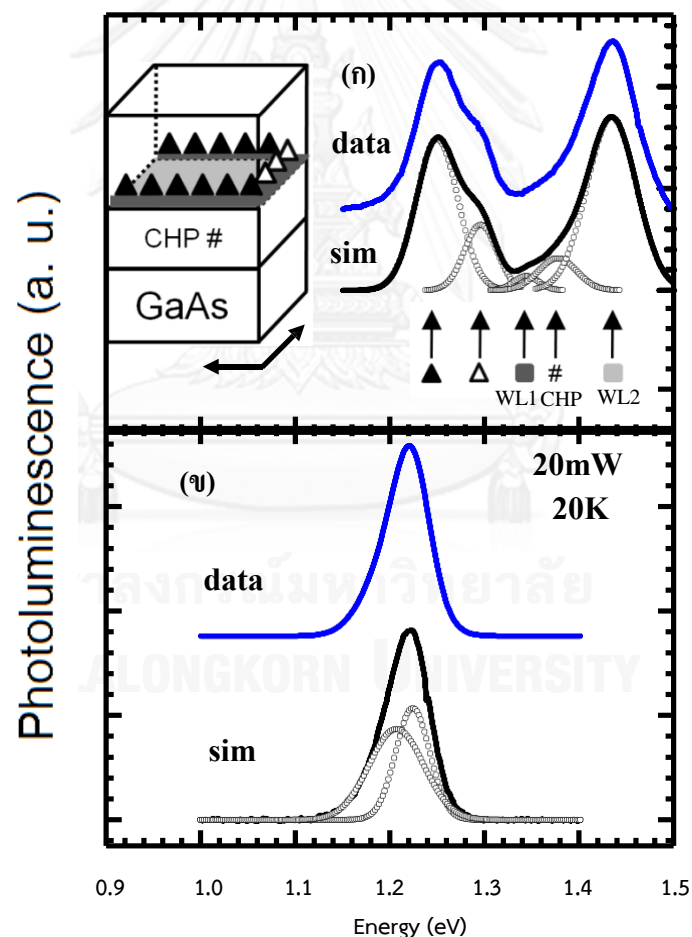
สมบัติเชิงแสงของควอนตัมดอตบนพื้นผิวลายตาราง 1 และ 2 ชั้น ถูกศึกษาโดย P. Pattanasattayavong [61] และ C. Himwas ([58]-[59]) ตามลำดับ โครงสร้างของชั้นงานที่ศึกษาโดย P. Pattanasattayavong ถูกแสดงดังรูปที่ 4.7 [56] ผล PL ที่อุณหภูมิต่างๆ ถูกแสดงดังรูปที่ 4.8 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการทดลองวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่ใช้แสงกระตุ้นที่ 160 mW โดยการแปรค่าอุณหภูมิ 6 ค่า ที่ 20, 77, 100, 125 และ 150 K พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ การเปล่งแสงจากควอนตัมดอตมีแนวโน้มที่แอมพลิจูด (Amplitude) ของค่ายอดพลังงานที่ลดลงตามลำดับ



รูปที่ 4.8 สเปกตรัมจากการเปล่งแสงของควอนตัมดอต InAs บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ จากการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์แบบ Temperature dependent [61]

เกิดจากอัตราการรวมตัว (Recombination) ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron-hole pair, EHP) ลดลง เนื่องจากพาหะที่อยู่ในควอนตัมดอทหลักจากการ Relaxation สามารถถูกกระตุ้นใหม่ (Re-excited) ด้วย Thermal energy และหลุดออกจากควอนตัมดอท [61]

ส่วนการศึกษาของ C. Himwas ใช้ชิ้นงานที่มีโครงสร้างควอนตัมดอท InAs บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ ชั้นทับกัน 2 ชั้นดังรูปที่ 4.6 (ง) การเปล่งแสงมีสเปกตรัมที่แคบกว่าการเปล่งแสงจากควอนตัมดอทบนพื้นผิวลายตาราง 1 ชั้น และพบค่ายอดพลังงานที่เกิดจากควอนตัมดอทบนพื้นผิวลายตารางในทิศ [1-10] และทิศ [110] เท่านั้น ไม่พบค่ายอดพลังงานจากชั้นพื้นผิวลายตาราง เนื่องจากควอนตัมดอทในชั้นที่ 2 มีความหนาประสิทธิผลมากกว่าชั้นแรก 0.2 ชั้นโมโน ทำให้มีขนาดเฉลี่ยใหญ่กว่า ส่งผลให้ค่ายอดพลังงานมีค่าน้อยกว่า และเนื่องจากผลตอบสนองเชิงแสงของควอนตัมดอทในชั้นที่ 1 ถูกดักจับโดยพื้นผิวลายตารางของชั้นที่ 2 [59]

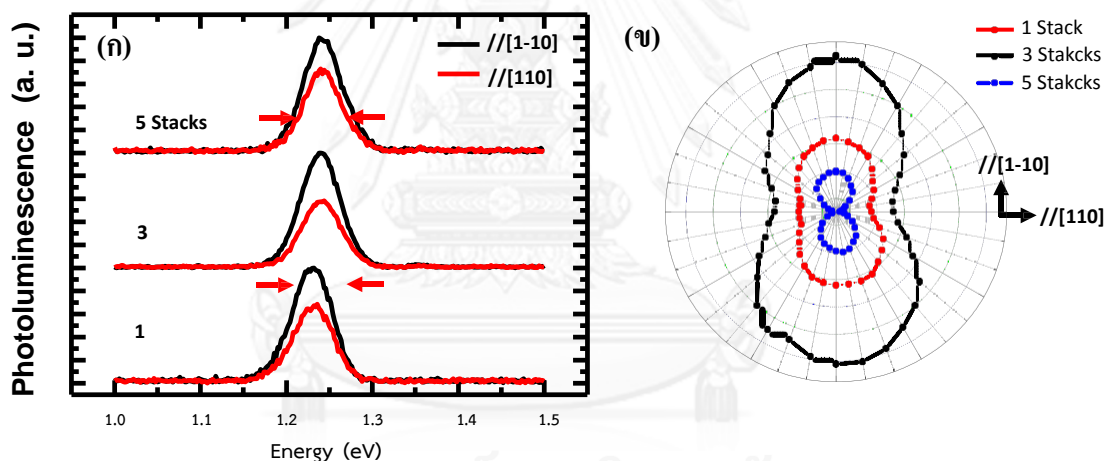


รูปที่ 4.9 ผลตอบสนองทางแสงของชิ้นงานที่มีโครงสร้าง (ก) ควอนตัมดอท InAs บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ หนา 50 nm และ (ข) ควอนตัมดอท InAs บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ หนา 50 nm (ชั้นที่ 1) และควอนตัมดอท InAs บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{As}$ หนา 50 nm (ชั้นที่ 2)

[59]

การศึกษาสมบัติโพลาไรซ์ของ C. Himwas ในชั้นงานที่มีโครงสร้างควอนตัมดอต InAs 1,2 และ 3 ชั้นบนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ โดยมีชั้นแทรก GaAs หนา 20 นาโนเมตร มีค่าระดับความเป็นโพลาไรซ์ (Degree of polarization, DOP) คือ 19.70 %, 26.92 % และ 15.56 % ตามลำดับดังรูปที่ 4.10 (ก) ค่า DOP ของชั้นงานควอนตัมดอต 2 ชั้น มีค่าสูงสุดเนื่องจากควอนตัมดอตบนชั้นที่ 2 เรียงตัวสอดคล้องกับชั้นแรก ทำให้การเปล่งแสงแสดงสมบัติโพลาไรซ์ที่เสริมกัน ในขณะที่การปลูกควอนตัมดอต 3 ชั้นบนพื้นผิวลายตารางกลับมีค่า DOP ลดลง แสดงว่าควอนตัมดอตบนชั้นที่ 3 จัดเรียงตัวเป็นระเบียบลดลง ทำให้ลดสมบัติโพลาไรซ์โดยรวมจากทั้ง 3 ชั้น [59]

ข้อมูลข้างต้นทำให้สามารถเข้าใจกระบวนการก่อตัวของควอนตัมดอตบนพื้นผิวลายตาราง จากการศึกษาสัณฐานวิทยาผิวหน้า จากวิวัฒนาการของการเกิดของเส้นลายตาราง ควอนตัมดอตบนผิวเรียบ และควอนตัมดอตบนพื้นผิวลายตาราง พบว่าค่า DOP ที่มีค่าต่ำ มีสาเหตุจากการปลูกชั้นแทรก GaAs 20 nm ซึ่งมากเกินไปกว่าที่จะทำให้การแทรกสอดระหว่างชั้นของ Wave function เกิดภาวะเสริมสร้างกัน หากเปลี่ยนความหนาของชั้นแทรกลง อาจได้ค่า DOP สูงขึ้น

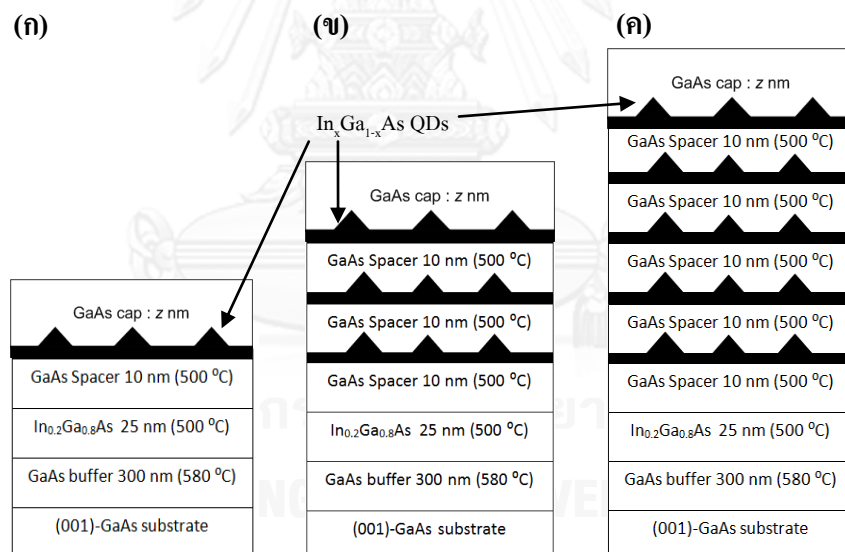


รูปที่ 4.10 ผลตอบสนองทางแสง (ก) และผลตอบสนองทางแสงที่จุดยอดเมื่อเปลี่ยนมุมโพลาไรเซอร์ (ข) ของชั้นงานที่มีโครงสร้างควอนตัมดอต InAs ปลูกซ้อนทับกัน 1 ชั้น, 3 ชั้น และ 5 ชั้นบนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ หนา 50 nm ที่มีชั้นแทรก GaAs 20 nm [59]

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทดลองเปลี่ยนความหนาของชั้นแทรก GaAs เป็น 10 nm โดยแบ่งเป็นหัวข้อ 4.2) สัณฐานวิทยาพื้นผิวของควอนตัมดอต $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ และหัวข้อ 4.3) สมบัติเชิงแสงของควอนตัมดอต $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ที่ปลูกซ้อนทับกันบนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$

4.2) สันฐานวิทยาพื้นผิวของควอนตัมดอต $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ที่ปลูกซ้อนทับกันบนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีแนวคิดที่จะเพิ่มขนาดของควอนตัมดอต $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ที่ปลูกซ้อนทับกันมากกว่า 1 ชั้นบนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ โดยการปลูกชั้น GaAs 10 nm แทรกหลังปลูกชั้นพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ก่อนปลูกชั้นควอนตัมดอต $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ เรียกชั้นนี้ว่า ชั้นแทรก (Spacer layer) โครงสร้างโดยรวมจึงเป็นดังแสดงในรูปที่ 4.11 ขณะที่รายละเอียดของพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ปลูกถูกสรุปดังตารางที่ 4.1 ชั้นแทรกสามารถลดผลของสนามความเครียดจากพื้นผิวลายตารางทำให้ควอนตัมดอต InAs เริ่มก่อตัวที่ $\theta_{c-\text{GaAs}}$ งานวิจัยของ C. Himwas พบว่าหากไม่มีชั้นแทรกควอนตัมดอต InAs จะเริ่มก่อตัวบนพื้นผิวลายตารางเมื่อความหนาของชั้นปลูก $\theta_{c-\text{InGaAs}} \approx 0.8$ ML ต่ำกว่าการก่อตัวบนพื้นผิว GaAs เรียกว่า $\theta_{c-\text{GaAs}} \approx 1.7$ ML [60] เนื้อหาในลำดับต่อไปสามารถจำแนกออกเป็น 2 กรณี ตามหัวข้อ 4.2.1) กรณี $x = 1$: ควอนตัมดอต InAs และ 4.2.2) กรณี $x = 0.5$: ควอนตัมดอต $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$



รูปที่ 4.11 แผนภาพแสดงโครงสร้างควอนตัมดอต $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ที่มีชั้นแทรก GaAs 10 nm ที่ปลูกซ้อนทับ (ก) 1 ชั้น, (ข) 3 ชั้น และ (ค) 5 ชั้น บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ หนา 25 nm, เศษส่วนโมล $x = 0.5$ หรือ 1, ความหนาของชั้น GaAs ปิดทับโครงสร้าง $Z = 0$ หรือ 100 nm สำหรับชิ้นงาน AFM หรือ PL ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของชั้นงานต่างๆ

ชื่อชั้นงาน	รหัสชั้นงาน	x	z (nm)	จำนวน Stack (ชั้น)	รูปที่ 4.11
A, A'	F04A, F05C	1	0, 100	1	ก
B, B'	F08D, F05B	1	0, 100	3	ข
C, C'	F08E, F05A	1	0, 100	5	ค
D, D'	F06B, F07C	0.5	0, 100	1	ก
E, E'	F06DR, F07D	0.5	0, 100	3	ข
F, F'	F06E, F07E	0.5	0, 100	5	ค

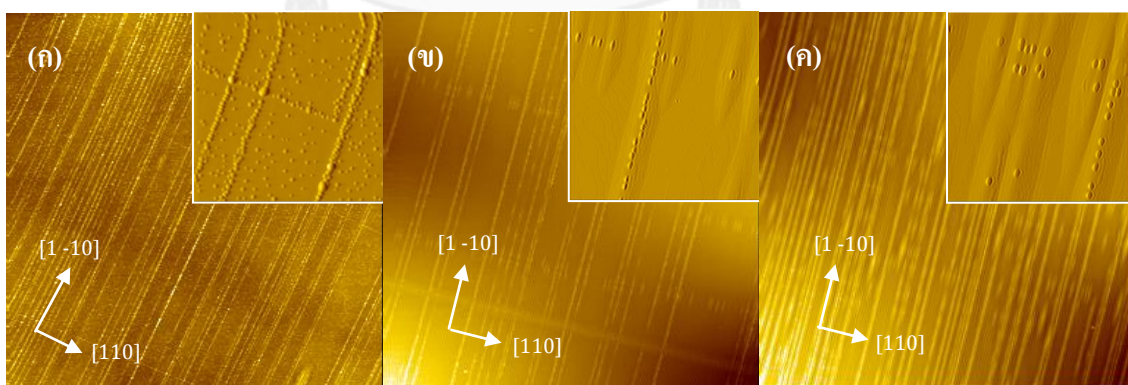
4.2.1) กรณี x = 1: ควอนตัมดอต InAs

ชั้นงาน A ในรูปที่ 4.11 (ก) เป็นโครงสร้างควอนตัมดอต InAs 1.7 ML บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ หนา 25 nm มีขั้นตอนการปลูกดังที่ได้อธิบายไปในบทที่ 3 โดยพารามิเตอร์สำคัญในการปลูกได้แก่อัตราการปลูกของ Ga = 0.263 ML/s และของ In = 0.066 ML/s ชั้น $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 25 nm จึงใช้เวลาปลูก 4:25 min ตามด้วย GI 10 s ส่วนชั้นแทรก GaAs 10 nm ที่ตามมาใช้เวลาปลูก 2:15 min ตามด้วย GI = 30 s ก่อนที่จะปลูกควอนตัมดอต InAs 1.7 ML โดยใช้เวลา 28.7 s ตามด้วย GI 30 s ก่อนที่จะลดอุณหภูมิผิวหน้าลงอย่างฉับพลันแล้วนำไปศึกษาสัณฐานวิทยาพื้นผิวโดยการวัดความสูงต่ำของพื้นผิวโดยระบบ AFM แสดงดังรูปที่ 4.12 (ก) ควอนตัมดอตมีรูปร่างเป็นทรงกลม ส่วนใหญ่จะเรียงตัวอยู่บนพื้นผิวลายตาราง ในทิศ [1-10] มีส่วนน้อยในทิศ [110] ความสูงเฉลี่ยในทิศ [1-10] ประมาณ 6 nm และความสูงเฉลี่ยในทิศ [110] ประมาณ 4.5 nm เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของควอนตัมดอตในทิศ [1-10] ประมาณ 30 nm และในทิศ [110] ประมาณ 30 nm อัตราส่วนของความกว้างที่ฐานในทิศ [1-10] ต่อ [110] (Aspect ratio) ≈ 1 ความหนาแน่นของควอนตัมดอตประมาณ $1.1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ คำนวณจากการนับจำนวนควอนตัมดอตในภาพเล็กที่เป็นภาพ AFM ขนาด $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ ของรูป 4.12 (ก) แล้วคำนวณออกมาเป็นความหนาแน่นในหน่วย cm^{-2}

ชั้นงาน B ในรูปที่ 4.11 (ข) เป็นโครงสร้างควอนตัมดอต InAs 1.7 ML ซ้อนทับ 3 ชั้นบนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ หนา 25 nm อัตราการปลูกของ Ga = 0.2 ML/s และของ In = 0.05 ML/s ชั้น $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 25 nm จึงใช้เวลาปลูก 5:49 นาที ตามด้วย GI 10 s ส่วนชั้นแทรก GaAs 10 nm ที่ตามมาใช้เวลาปลูก 2:15 min ตามด้วย GI = 30 s ก่อนที่จะปลูกควอนตัมดอต InAs 1.7 ML เปลี่ยนอัตราการปลูกของ In เป็น 0.01 ML/s โดยใช้เวลา 2:53 min จากนั้นปลูกชั้นแทรก GaAs 10 nm และชั้นควอนตัมดอต InAs ซ้อนทับชั้นนี้อีก 2 ชั้น เวลาในการก่อตัวของควอนตัมดอตเป็น 2:03 min และ 2:03 min ตามลำดับ (แสดงให้เห็นถึงความหนาวิกฤติที่น้อยลงเมื่อปลูกควอนตัมดอตบน

ชั้นซ้อนทับ) ก่อนที่จะลดอุณหภูมิผิวหน้าลงอย่างฉับพลัน ภาพ AFM แสดงดังรูปที่ 4.12 (ข) ควอนตัมดอตมีรูปร่างเป็นทรงรีที่ยืดออกในทิศ [1-10] ส่วนใหญ่จะเรียงตัวอยู่บนพื้นผิวลายตาราง ในทิศ [1-10] มีส่วนน้อยในทิศ [110] ความสูงเฉลี่ยในทิศ [1-10] ประมาณ 8 nm และความสูงเฉลี่ยในทิศ [110] ประมาณ 6 nm เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของควอนตัมดอตในทิศ [1-10] ประมาณ 76 nm และในทิศ [110] ประมาณ 35 nm Aspect ratio ≈ 2.19 ความหนาแน่นของควอนตัมดอตประมาณ $6.8 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$

ชิ้นงาน C ในรูปที่ 4.11 (ค) เป็นโครงสร้างควอนตัมดอต InAs 1.7 ML ซ้อนทับ 5 ชั้นบนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ หนา 25 nm อัตราการปลูกของ Ga = 0.2 ML/s และของ In = 0.05 ML/s ชั้น $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 25 nm จึงใช้เวลาปลูก 5:49 นาที ตามด้วย GI 10 s ส่วนชั้นแทรก GaAs 10 nm ที่ตามมาใช้เวลาปลูก 2:15 min ตามด้วย GI = 30 s ก่อนที่จะปลูกควอนตัมดอต InAs 1.7 ML เปลี่ยนอัตราการปลูกของ In เป็น 0.01 ML/s โดยใช้เวลา 2:37 min จากนั้นปลูกชั้นแทรก GaAs 10 nm และชั้นควอนตัมดอต InAs ซ้อนทับชั้นนี้อีก 4 ชั้น เวลาในการก่อตัวของควอนตัมดอตเป็น 2:04 min, 2:00 min, 1:57 min, และ 1:59 min ตามลำดับ ก่อนที่จะลดอุณหภูมิผิวหน้าลงอย่างฉับพลัน แล้วนำไปศึกษาสัณฐานวิทยาพื้นผิวโดยการวัดความสูงต่ำของพื้นผิวโดยระบบ AFM ได้ผลดังรูปที่ 4.12 (ค) ควอนตัมดอตมีรูปร่างเป็นทรงรีที่ยืดออกในทิศ [1-10] ส่วนใหญ่จะเรียงตัวอยู่บนพื้นผิวลายตาราง ในทิศ [1-10] มีส่วนน้อยในทิศ [110] ความสูงเฉลี่ยในทิศ [1-10] ประมาณ 6 nm และความสูงเฉลี่ยในทิศ [110] ประมาณ 5 nm เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของควอนตัมดอตในทิศ [1-10] ประมาณ 72 nm และในทิศ [110] ประมาณ 35 nm Aspect ratio ≈ 2.06 ความหนาแน่นของควอนตัมดอตประมาณ $6.3 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$



รูปที่ 4.12 ภาพ AFM ขนาด $25 \times 25 \mu\text{m}^2$ (ภาพใหญ่) และ $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ (ภาพเล็ก) ของชิ้นงาน (ก) A, (ข) B, (ค) C ซึ่งมีควอนตัมดอต InAs ซ้อนทับกัน (ก) 1 ชั้น, (ข) 3 ชั้นและ (ค) 5 ชั้น บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ หนา 25 nm ตามลำดับ

ใหญ่จะเรียงตัวอยู่บนพื้นผิวลายตารางในทิศ [1-10] มีส่วนน้อยในทิศ [110] ความสูงเฉลี่ยในทิศ [1-10] ประมาณ 6 nm และความสูงเฉลี่ยในทิศ [110] ประมาณ 5 nm เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของควอนตัมดอทในทิศ [1-10] ประมาณ 72 nm และในทิศ [110] ประมาณ 35 nm Aspect ratio \approx 2.06 ความหนาแน่นของควอนตัมดอทประมาณ $6.3 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$

เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างชั้นงาน A (ควอนตัมดอท InAs ชั้นที่ 1 ชั้น) , B (3 ชั้น) และ C (5 ชั้น) ความสูงเฉลี่ยของควอนตัมดอทเพิ่มขึ้นจาก 6 nm เป็น 8 nm เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นชั้นชั้นจาก 1 ชั้น เป็น 3 ชั้น จากนั้นลดลงเป็น 6 nm เมื่อเพิ่มเป็น 5 ชั้น เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของควอนตัมดอทในชั้นงาน B และ C มีค่าใกล้เคียงกันที่ประมาณ 75 nm มากกว่าชั้นงาน A ที่ 30 nm Aspect ratio เพิ่มขึ้นจาก 1 ในชั้นงาน A เป็น 2.19 ในชั้นงาน B จากนั้นลดลงเป็น 2.06 ในชั้นงาน C ความหนาแน่นของควอนตัมดอทแนวโน้มลดลงจากชั้นงาน A = $1.1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ ลดลงเป็น B = $6.8 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ และ C = $6.3 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อปลูกจำนวนชั้นชั้นชั้นมากขึ้น ความเครียดที่ส่งผ่านจากชั้นพื้นผิวลายตารางขึ้นสู่ผิวหน้าจะมีค่าน้อยลงทำให้การก่อตัวอย่างหนาแน่นและมีระเบียบบนแนวของลายตารางน้อยลง และเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นชั้นชั้นชั้นความหนาของชั้นแทรกโดยรวมก็จะเพิ่มขึ้นด้วย จึงมีผลต่อการก่อตัวมีความหนาแน่นลดลงของควอนตัมดอทในบริเวณที่เรียบ ความหนาแน่นโดยรวมจึงลดลง ระยะห่างระหว่างควอนตัมดอทในทุกชั้นงานมีค่าประมาณ 8 nm ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของควอนตัมดอทในบริเวณที่พิจารณา ทำให้ระดับความเชื่อมโยงของพาหะ (Degree of carrier coupling) มีแนวโน้มที่จะมีค่าสูงในชั้นงาน A แล้วจึงลดหลั่นลงในชั้นงาน B และ C ตามลำดับ [62] สุดท้ายความหนาแน่นของเส้นลายตารางในชั้นงาน A และ C มีความใกล้เคียงกัน และน้อยลงในชั้นงาน B

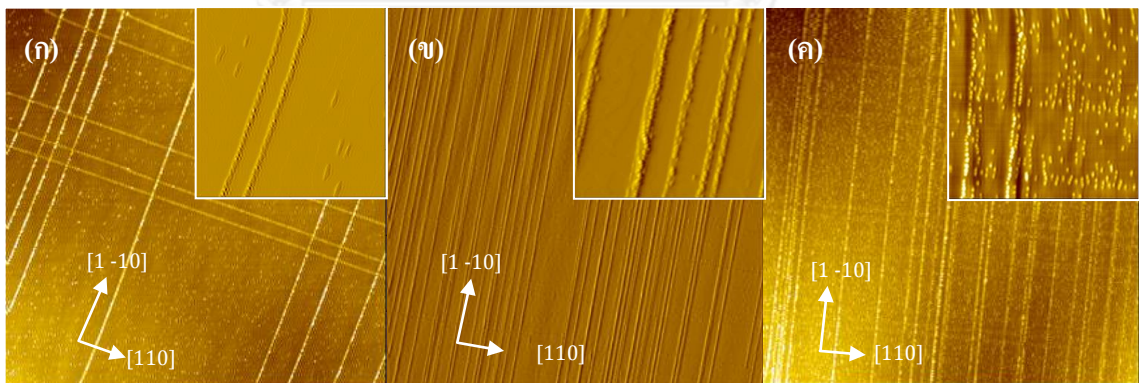
4.2.2) กรณี $x = 0.5$: ควอนตัมดอท $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$

กรณีนี้แตกต่างจากหัวข้อย่อยที่แล้วในประเด็นหลักเพียงประเด็นเดียว คือ $x = 0.5$ กล่าวคือชั้นควอนตัมดอทเปลี่ยนจาก InAs เป็น $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ ส่งผลให้ความหนาแน่นวิกฤติของการเกิดควอนตัมดอท θ_c เพิ่มขึ้น เพิ่มความแม่นยำในการจับเวลาการปลูกของผู้ทดลอง เนื่องจากต้องการลดการก่อตัวของควอนตัมดอทบนผิวเรียบ เพราะควอนตัมดอทจะก่อตัวบนตำแหน่งตามลำดับ จาก 1) ลอนในทิศทางผลึก [1-10], 2) ลอนในทิศทางผลึก [110] และ 3) ผิวเรียบ

ชั้นงาน D ในรูปที่ 4.11 (ก) อัตราการปลูกของ Ga = 0.2 ML/s และของ In = 0.05 ML/s ชั้น $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 25 nm จึงใช้เวลาปลูก 5:49 นาที ตามด้วย GI 10 s ส่วนชั้นแทรก GaAs 10 nm ที่ตามมาใช้เวลาปลูก 2:15 min ตามด้วย GI = 30 s ก่อนที่จะปลูกควอนตัมดอท $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ เปลี่ยนอัตราการปลูกของ Ga เป็น 0.05 ML/s โดยใช้เวลา 39:27 s ก่อนที่จะลดอุณหภูมิผิวหน้าลงอย่างฉับพลันแล้วนำไปศึกษาสัญญาณวิทยาพื้นผิวโดยการวัดความสูงต่ำของพื้นผิวโดยระบบ AFM ได้ผลดัง

รูปที่ 4.13 (ก) ควอนตัมดอตมีรูปร่างเป็นทรงกลม ส่วนใหญ่จะเรียงตัวอยู่บนพื้นผิวลายตารางในทิศ [1-10] มีส่วนน้อยในทิศ [110] ความสูงเฉลี่ยในทิศ [1-10] ประมาณ 5.33 nm และความสูงเฉลี่ยในทิศ [110] ประมาณ 3.5 nm เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของควอนตัมดอตในทิศ [1-10] ประมาณ 32.2 nm และในทิศ [110] ประมาณ 30 nm อัตราส่วนของความกว้างที่ฐานในทิศ [1-10] ต่อ [110] (Aspect ratio) ≈ 1.07 ความหนาแน่นของควอนตัมดอตประมาณ $1.2 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$

ชิ้นงาน E ในรูปที่ 4.11 (ข) อัตราการปลูกของ Ga = 0.2 ML/s และของ In = 0.05 ML/s ชั้น $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 25 nm จึงใช้เวลาปลูก 5:49 นาที ตามด้วย GI 10 s ส่วนชั้นแทรก GaAs 10 nm ที่ตามมาใช้เวลาปลูก 2:15 min ตามด้วย GI = 30 s ก่อนที่จะปลูกควอนตัมดอต InAs 1.7 ML เปลี่ยนอัตราการปลูกของ Ga เป็น 0.05 ML/s โดยใช้เวลา 38:02 s จากนั้นปลูกชั้นแทรก GaAs 10 nm และชั้นควอนตัมดอต InAs ซ้อนทับชั้นนี้อีก 2 ชั้น เวลาในการก่อตัวของควอนตัมดอตเป็น 34.41 s และ 34.45 s ตามลำดับ (แสดงให้เห็นถึงความหนาวิกฤติที่น้อยลงเมื่อปลูกควอนตัมดอตบนชั้นซ้อนทับ) ก่อนที่จะลดอุณหภูมิผิวหน้าลงอย่างฉับพลันแล้วนำไปศึกษาสัณฐานวิทยาพื้นผิวโดยการวัดความสูงต่ำของพื้นผิวโดยระบบ AFM ได้ผลดังรูปที่ 4.13 (ข) ควอนตัมดอตมีรูปร่างเป็นทรงกลม ส่วนใหญ่จะเรียงตัวอยู่บนพื้นผิวลายตาราง ในทิศ [1-10] มีส่วนน้อยในทิศ [110] ความสูงเฉลี่ยในทิศ [1-10] ประมาณ 1.99 nm และความสูงเฉลี่ยในทิศ [110] ประมาณ 1.5 nm เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของควอนตัมดอตในทิศ [1-10] ประมาณ 44.8 nm และในทิศ [110] ประมาณ 41.3 nm Aspect ratio ≈ 1.08 ความหนาแน่นของควอนตัมดอตประมาณ $4.1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$



รูปที่ 4.13 ภาพ AFM ขนาด $25 \times 25 \mu\text{m}^2$ (ภาพใหญ่) และ $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ (ภาพเล็ก) ของชิ้นงาน (ก) D, (ข) E, (ค) F รูปที่ 4.13 ภาพ AFM ขนาด $25 \times 25 \mu\text{m}^2$ (ภาพใหญ่) และ $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ (ภาพเล็ก) ของชิ้นงาน (ก) D, (ข) E, (ค) F ซึ่งมีควอนตัมดอต $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ ซ้อนทับกัน (ก) 1 ชั้น, (ข) 3 ชั้นและ (ค) 5 ชั้น บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ หนา 25 nm ตามลำดับ

ชั้นงาน F ในรูปที่ 4.11 (ค) อัตราการปลูกของ Ga = 0.2 ML/s และของ In = 0.05 ML/s ชั้น $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 25 nm จึงใช้เวลาปลูก 5:49 นาที ตามด้วย GI 10 s ส่วนชั้นแทรก GaAs 10 nm ที่ตามมาใช้เวลาปลูก 2:15 min ตามด้วย GI = 30 s ก่อนที่จะปลูกควอนตัมดอต InAs 1.7 ML เปลี่ยนอัตราการปลูกของ Ga เป็น 0.05 ML/s โดยใช้เวลา 33.70 s จากนั้นปลูกชั้นแทรก GaAs 10 nm และชั้นควอนตัมดอต InAs ซ้อนทับชั้นนี้อีก 4 ชั้น เวลาในการก่อตัวของควอนตัมดอตเป็น 32.88 s, 33.02 s, 33.14 s, และ 32.02 s ตามลำดับ ก่อนที่จะลดอุณหภูมิผิวหน้าลงอย่างฉับพลันแล้วนำไปศึกษาสัณฐานวิทยาพื้นผิวโดยการวัดความสูงต่ำของพื้นผิวโดยระบบ AFM ได้ผลดังรูปที่ 4.13 (ค) ควอนตัมดอตมีรูปร่างเป็นทรงรีเล็กน้อย ส่วนใหญ่จะเรียงตัวอยู่บนพื้นผิวลายตารางในทิศ [1-10] มีส่วนน้อยในทิศ [110] ความสูงเฉลี่ยในทิศ [1-10] ประมาณ 5.50 nm และความสูงเฉลี่ยในทิศ [110] ประมาณ 3 nm เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของควอนตัมดอตในทิศ [1-10] ประมาณ 51.2 nm และในทิศ [110] ประมาณ 37 nm Aspect ratio ≈ 1.38 ความหนาแน่นของควอนตัมดอตประมาณ $7.1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$

เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างชั้นงาน D (ควอนตัมดอต $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ ซ้อนทับ 1 ชั้น) , E (3 ชั้น) และ F (5 ชั้น) ความสูงของควอนตัมดอตเฉลี่ยลดลงจาก 5.33 nm เป็น 1.99 nm เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นซ้อนทับจาก 1 ชั้น เป็น 3 ชั้น จากนั้นเพิ่มขึ้นเป็น 5.50 nm เมื่อเพิ่มเป็น 5 ชั้น เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของควอนตัมดอตในทิศ [1-10] ในชั้นงาน D มีค่าประมาณ 32.2 nm จากนั้นเพิ่มขึ้นเป็น 44.8 ในชั้นงาน E และเพิ่มขึ้นเป็น 51.2 nm ในชั้นงาน F ตามลำดับ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของควอนตัมดอตในทิศ [110] ในชั้นงาน D มีค่าประมาณ 30 nm จากนั้นเพิ่มขึ้นเป็น 41.3 ในชั้นงาน E แต่ลดลงเป็น 37 nm ในชั้นงาน F Aspect ratio เพิ่มขึ้นจาก 1.07 ในชั้นงาน D เป็น 1.08 ในทั้งชั้นงาน E และ 1.38 ในทั้งชั้นงาน F ความหนาแน่นของควอนตัมดอตแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากชั้นงาน D = $1.2 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ เพิ่มขึ้นเป็น E = $4.1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ และ F = $7.1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ ตามลำดับ ความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นนี้อาจจะมีผลมาจากควอนตัมดอตที่ก่อตัวข้างล่างที่ค่าประมาณ 3.2-3.9 ML ทำให้ความเครียดสะสมส่งผลจากชั้นซ้อนทับไปยังผิวหน้าชั้นต่อไปยังมีความชัดเจนของแนวเส้นลายตาราง ทำให้ความหนาแน่นโดยรวมทั้งแนวลายตารางและผิวเรียบมีค่ามากขึ้น ระยะห่างระหว่างควอนตัมดอตในทุกชั้นงานมีค่าในช่วง 10-35 nm ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของควอนตัมดอตในบริเวณที่พิจารณา สุดท้ายความหนาแน่นของเส้นลายตารางในชั้นงาน E และ F ใกล้เคียงกัน และหนาแน่นกว่าในชั้นงาน D

เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างชุดชั้นงานที่ 1 ที่ค่าเศษส่วนโมลของ In (x) = 1 (ชั้นงาน A,B และ C) และชุดชั้นงานที่ 2 ที่ค่า x = 0.5 (ชั้นงาน D,E และ F) โดยในชุดที่ 1 ควอนตัมดอตมีความสูง

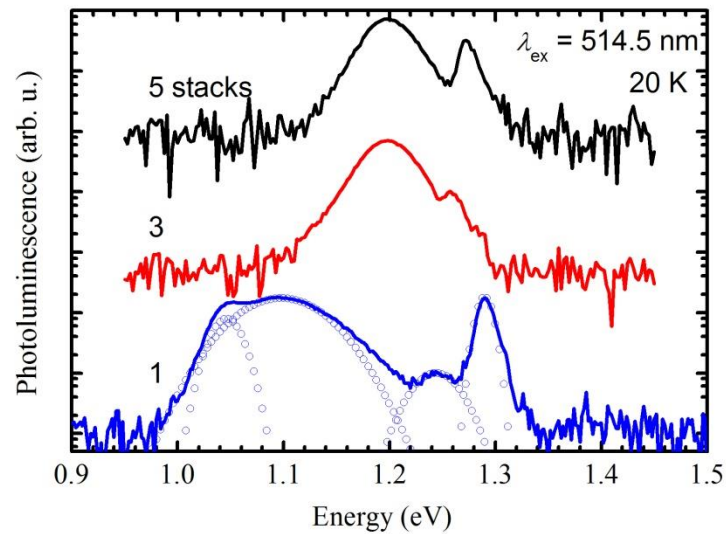
เฉลี่ย 6-8 nm สูงกว่าในชุดที่ 2 ที่มีความสูงเฉลี่ย 2-5.5 nm และชุดที่ 1 มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่ 30-75 nm ซึ่งมีช่วงกว้างชุดที่ 2 ที่ 30-50 nm

4.3) สมบัติเชิงแสงของควอนตัมดอท $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ที่ปลูกซ้อนทับกันบนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$

หลังจากการศึกษาเกี่ยวกับสัณฐานวิทยาพื้นผิวของควอนตัมดอท $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ที่ปลูกซ้อนทับ 1, 3 และ 5 ชั้นบนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ในหัวข้อ 4.2) จึงต้องทำการปลูกชั้นงานที่มีโครงสร้างเหมือนกับหัวข้อ 4.2) เพิ่มเป็นการทดลองอีก 2 ชุด โดยเพิ่มการปลูกชั้นกบดทับ GaAs 100 nm บนทุกชั้นงานดังรูปที่ 4.11 กรณี $z = 100$ nm เพื่อใช้ในการทดลองโฟโตลูมิเนสเซนซ์ดังรูปที่ 3.12 โดยกำหนดค่าพลังงานของแสงเลเซอร์กระตุ้นที่ 200 mW และอุณหภูมิชั้นงานที่ 20K เนื้อหาในลำดับต่อไปสามารถจำแนกออกเป็น 2 กรณี ตามหัวข้อ 4.3.1) กรณี $x = 1$: ควอนตัมดอท InAs สำหรับชั้นงานที่มีควอนตัมดอท 1 ชั้น (ชั้นงาน A'), 3 ชั้น (B') และ 5 ชั้น (C') ดังโครงสร้างในรูปที่ 4.11 (ก), (ข) และ (ค) ตามลำดับ และ 4.3.2) กรณี $x = 0.5$: ควอนตัมดอท $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ สำหรับชั้นงานที่มีควอนตัมดอท 1 ชั้น (ชั้นงาน D'), 3 ชั้น (E') และ 5 ชั้น (F') ดังโครงสร้างในรูปที่ 4.11 (ก), (ข) และ (ค) ตามลำดับเช่นกัน

4.3.1) กรณี $x = 1$: ควอนตัมดอท InAs

สเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์จากชั้นงาน A' ถูกแสดงในรูปที่ 4.14 (เส้นสีน้ำเงิน) ค่ายอดพลังงานที่ต่ำที่สุดคือ 1.05 eV เกิดจากการเปล่งแสงของควอนตัมดอท InAs ที่เรียงตัวในทิศ [1-10] เพราะเป็นควอนตัมดอทกลุ่มแรกที่ก่อตัวจึงเป็นกลุ่มควอนตัมดอทที่มีขนาดใหญ่ที่สุด ควอนตัมดอทที่มีขนาดใหญ่จะมีกำแพงศักย์ต่ำ พาหะจะมีระดับพลังงานจะต่ำจึงมีแนวโน้มที่จะเปล่งแสงพลังงานต่ำในย่านที่ใกล้แสงสีแดง ค่ายอดที่มีพลังงานสูงขึ้นในลำดับถัดไปคือ 1.10 eV เกิดจากการเปล่งแสงของควอนตัมดอทที่เรียงตัวในทิศ [110] เนื่องจากเป็นกลุ่มควอนตัมดอทลำดับถัดมาที่ก่อตัวสอดคล้องกับสัณฐานวิทยาพื้นผิวที่ศึกษาจากชั้นงาน A ที่พบว่าควอนตัมดอท InAs ที่เรียงตัวในทิศ [1-10] มีความสูงประมาณ 6 nm สูงกว่าในทิศ [110] ที่ความสูง 4.5 nm ต่อมาค่ายอดพลังงานค่าต่ำที่ 1.24 eV เป็นการเปล่งแสงจากควอนตัมดอทที่ก่อตัวบนผิวเรียบ ลำดับถัดมาเป็นค่ายอดพลังงานค่าสูงและมีช่วงแคบที่ 1.29 eV เป็นการเปล่งจากชั้นพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ รายละเอียดเกี่ยวกับลำดับการก่อตัวของโครงสร้างควอนตัมดอท $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ อ้างอิงได้จากงานวิจัยของ T. Limwongse [56] และ C. Himwas [59]

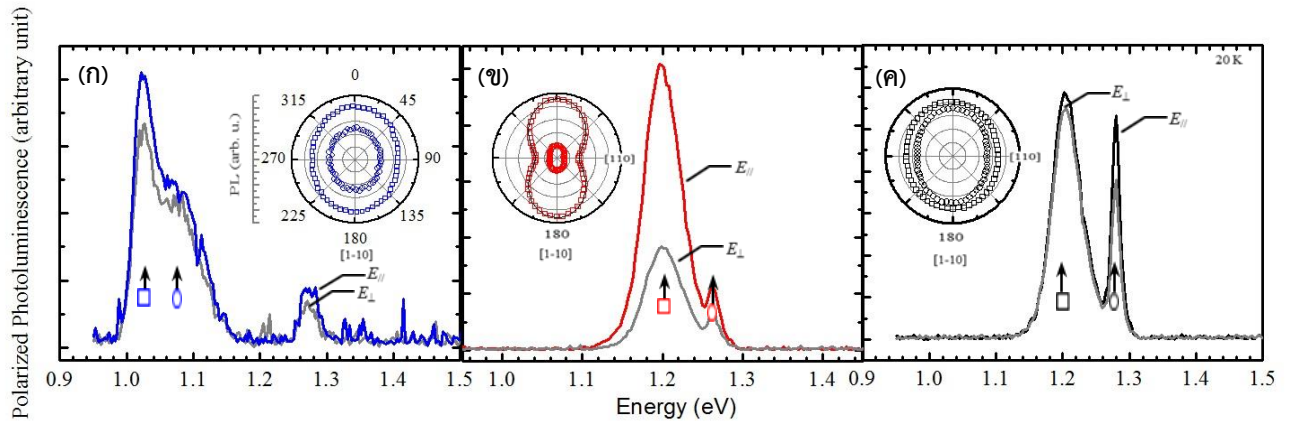


รูปที่ 4.14 กราฟโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของชิ้นงานที่มีโครงสร้างควอนตัมดอท InAs บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 1 ชั้น, 3 ชั้น และ 5 ชั้น, เส้นกราฟถูกเลื่อนขึ้นให้แยกจากกันเพื่อความชัดเจน

สเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์จากชิ้นงาน B' ถูกแสดงในรูปที่ 4.14 (เส้นสีแดง) ค่ายอดพลังงานที่ต่ำที่สุดเป็นช่วงกว้างที่ 1.20 eV มาจากผลรวมของค่ายอดพลังงาน 2 ค่า ที่มาจากการเปล่งแสงของควอนตัมดอท InAs ที่เรียงตัวในทิศ [1-10] และ [110] เนื่องจากขนาดของควอนตัมดอทใน 2 ทิศ มีรูปร่างและขนาดใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับสัณฐานวิทยาพื้นผิวจากชิ้นงาน B ควอนตัมดอทในทิศ [1-10] มีความสูงประมาณ 6 nm และ 4.5 nm ในทิศ [110] ค่ายอดที่มีพลังงานสูงขึ้นไปลำดับถัดไปเป็นค่าช่วงแคบที่ 1.26 eV เป็นการเปล่งแสงจากชั้นพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$

สเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์จากชิ้นงาน C' รูปที่ 4.14 (เส้นสีดำ) ค่ายอดพลังงานที่ต่ำที่สุดเป็นช่วงกว้างที่ 1.20 eV มาจากผลรวมของค่ายอดพลังงาน 2 ค่า มาจากการเปล่งแสงของควอนตัมดอท InAs ที่เรียงตัวในทิศ [1-10] และ [110] สอดคล้องกับสัณฐานวิทยาพื้นผิวจากชิ้นงาน B ควอนตัมดอทในทิศ [1-10] มีความสูงประมาณ 6 nm และ 5 nm ในทิศ [110] ค่ายอดที่มีพลังงานสูงขึ้นไปลำดับถัดไปเป็นค่าช่วงแคบที่ 1.27 eV เป็นการเปล่งแสงจากชั้นพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$

สังเกตว่าหากค่ายอดพลังงานที่มีระดับพลังงานต่ำที่สุดของโครงสร้างทั้ง 3 แบบมาจากการเปล่งแสงที่สถานะพื้น (Ground state) ของควอนตัมดอท InAs ที่เรียงตัวในทิศทางผลึก [1-10] และ [110] บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ เหมือนกัน จะเห็นว่าค่ายอดพลังงานกลุ่มนี้เกิดการเลื่อนเข้าใกล้ระดับพลังงานของแสงสีน้ำเงิน (Blue-shifted) ประมาณ 154 meV [55] เป็นผลจากขนาดที่เปลี่ยนไปของควอนตัมดอท InAs บนชั้นซ้อนทับของพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ตั้งแต่ชั้นที่ 2 ขึ้นไป ควอนตัมดอทจะก่อตัวที่ความหนาประมาณ 1.3 ML ซึ่งก่อตัวเร็วกว่าชั้นที่ 1 ที่ความหนา 1.7 ML เนื่องจากผลของสนามความเครียดจากชั้นควอนตัมดอทบนพื้นผิวลายตารางในชั้นที่ต่ำกว่า



รูปที่ 4.15 กราฟโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (ภาพหลัก) และกราฟโพลาไรซ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (ภาพแทรก) ของชั้นงานที่มีโครงสร้างควอนตัมดอท InAs บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ (ก) 1 ชั้น (ข) 3 ชั้น และ (ค) 5 ชั้น ภายใต้เงื่อนไขที่มุมโพลาไรซ์ขนานกับทิศ $[1-10]$ (E_{\parallel}) และตั้งฉากกับทิศ $[1-10]$ (E_{\perp}) ความเครียดสะสมในชั้นปลูกที่มากขึ้นจึงทำให้ควอนตัมดอทก่อตัวเร็วขึ้น เพราะความหนาวิกฤติที่มีค่าน้อยลง และอาจมีผลจากความเชื่อมโยงในแนวนอน (Lateral coupling) [63] และค่ายอดพลังงานที่เกิดจากการเปล่งแสงของพื้นผิวลายตารางที่ค่าประมาณ 1.27-1.29 eV เนื่องจากการเศษส่วนโมลของ In ในชั้นพื้นลายตารางมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากควบคุมอัตราการปลูกไม่เท่ากันตลอด

การวัดสมบัติโพลาไรซ์ของแสงใช้ระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ในรูปที่ 3.12 โดยคงค่าพลังงานของแสงเลเซอร์กระตุ้นที่ 80 mW และอุณหภูมิที่ 20 K จากนั้นจึงใช้โปรแกรมบังคับการหมุนของ Waveplate เพิ่มค่ามุมครึ่งละ 2 องศา พร้อมสังเกตผลตอบสนองเชิงแสงว่ามีการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกับมุมที่ใช้วัดอย่างไร แสงที่มีสมบัติโพลาไรซ์จะเข้มข้นหรือมัวลงตามการหมุนของ Waveplate สมบัติโพลาไรซ์ของแสงวัดจากระดับชั้นโพลาไรเซชัน (Degree of Polarization, DOP) ดังความสัมพันธ์

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

เมื่อ I_{\max} และ I_{\min} คือ ความเข้มแสงที่สูงและต่ำที่สุด ตามลำดับ

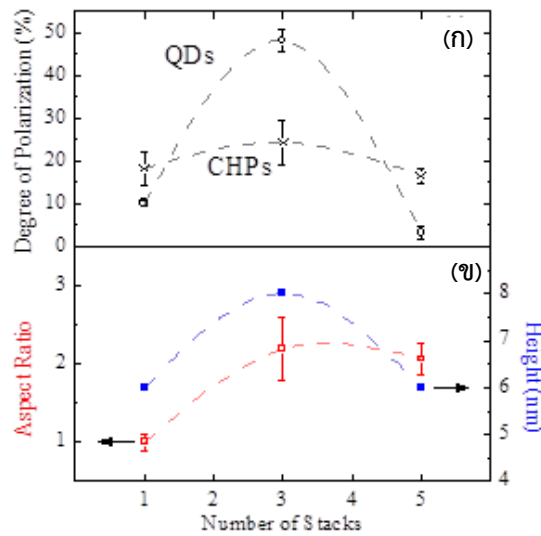
สเปกตรัมโพลาไรซ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์จากชั้นงาน A' ถูกแสดงในรูปที่ 4.15 (ก) ภายใต้เงื่อนไขที่มุม Wavelength ผ่านแสงออกมาได้มากที่สุด (E_{\parallel}) และน้อยที่สุด (E_{\perp}) ค่ายอดพลังงานที่ 1.02 และ 1.05 eV เป็นการเปล่งแสงของควอนตัมดอท InAs ที่จัดเรียงตัวในสองทิศทางบนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ค่ายอดพลังงานที่ 1.02 eV (ทิศ $[1-10]$) มีค่า $DOP \approx 10\%$ โดยใช้สูตรการหา DOP ดังสมการที่ 4.1 และค่ายอดพลังงานที่ 1.05 eV (ทิศ $[110]$) มีค่า $DOP \approx 10\%$ ซึ่งมีค่าสูงกว่า \approx

6 % ของสายโซ่ 1 มิติของควอนตัมดอท $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ จากงานวิจัยของ L. Villegas-Lelovsky et al [64] ที่อธิบายถึงระดับของความเชื่อมโยง (Degree of coupling) ของควอนตัมดอทที่มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากระยะห่างระหว่างควอนตัมดอทในสายโซ่ 2 มิติมีค่าน้อยกว่าแบบ 1 มิติ ค่า DOP ≈ 10 % สอดคล้องกับภาพแทรกในรูป 4.15 (ก) ที่เป็นการแสดงสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์แบบเชิงขั้ว (Polar plot) ซึ่งมีรูปร่างเป็นวงรีที่มีความต่างของแกนเอกและแกนโทเล็กน้อย และแอมพลิจูดของสเปกตรัมที่เปล่งจากควอนตัมดอทและพื้นผิวลายตารางค่อนข้างต่างกันมาก

จากนั้นพิจารณาสเปกตรัมโพลารไรซ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์จากชิ้นงาน B' ถูกแสดงในรูปที่ 4.15 (ข) ค่ายอดพลังงานที่ 1.20 eV เป็นค่ายอดพลังงานค่ากว้างที่เกิดจากค่ายอดพลังงาน 2 ค่าที่ใกล้เคียงกัน จากการเปล่งแสงของควอนตัมดอท InAs ที่ปลูกซ้อนทับ 3 ชั้นบนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ เนื่องจากควอนตัมดอทในทิศ [1-10] และ [110] มีขนาดใกล้เคียงกัน มีค่า DOP ≈ 48 % และค่ายอดพลังงานที่ 1.27 eV เป็นการเปล่งแสงของชั้นพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ มีค่า DOP ≈ 20 % สอดคล้องกับภาพแทรกเชิงขั้วในรูป 4.15 (ข) สเปกตรัมที่เปล่งจากควอนตัมดอทมีรูปร่างคล้ายเลขแปดแสดงถึงค่า DOP ที่ต่างกันในทิศที่ขนานมุม [1-10] ($E_{//}$) และตั้งฉากกับมุม [1-10] (E_{\perp}) ต่างจากสเปกตรัมที่เปล่งจากพื้นผิวลายตารางที่มีลักษณะเป็นวงรี และมีความต่างของแอมพลิจูดจากการเปล่งแสงของ 2 โครงสร้างเป็นอย่างมาก

ต่อมาพิจารณาสเปกตรัมโพลารไรซ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์จากชิ้นงาน C' ถูกแสดงดังในรูปที่ 4.14 (ค) ค่ายอดพลังงานที่ 1.20 eV เป็นค่ายอดพลังงานค่ากว้างที่เกิดจากค่ายอดพลังงาน 2 ค่าที่ใกล้เคียงกัน จากการเปล่งแสงของควอนตัมดอทในทิศ [1-10] และ [110] เช่นเดียวกับชิ้นงาน B' มีค่า DOP ≈ 3 % และค่ายอดพลังงานที่ 1.28 eV เป็นการเปล่งแสงของชั้นพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ มีค่า DOP ≈ 16 % สอดคล้องกับภาพแทรกเชิงขั้วในรูป 4.15 (ค) สเปกตรัมที่เปล่งจากควอนตัมดอทและพื้นผิวลายตารางมีรูปร่างเป็นวงรีที่มีความต่างของแกนเอกและแกนโทเล็กน้อย และแอมพลิจูดของสเปกตรัมที่เปล่งจากควอนตัมดอทและพื้นผิวลายตารางต่างกันน้อยมาก

เมื่อเปรียบเทียบผลโพลารไรซ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ของชิ้นงาน A', B' และ C' พบว่าค่ายอดพลังงานที่เป็นการเปล่งแสงจากชั้นพื้นผิวลายตารางมีการเปลี่ยนแปลงของค่า DOP ค่อนข้างน้อยจากการเพิ่มขึ้นของชั้นควอนตัมดอทซ้อนทับ ในทางกลับกันค่ายอดพลังงานที่เป็นการเปล่งแสงจากควอนตัมดอท InAs ที่สถานะพื้น มีค่า DOP เพิ่มขึ้นจาก 10 % สำหรับชั้นควอนตัมดอทซ้อนทับ 1 ชั้น เป็น 48 % สำหรับชั้นควอนตัมดอทซ้อนทับ 3 ชั้น แต่กลับลดลงเป็น 3 % สำหรับชั้นควอนตัมดอทซ้อนทับ 5 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (ก)

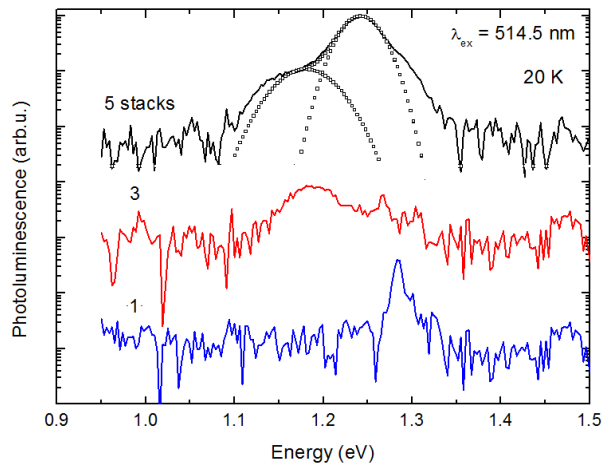


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงผลของการเปลี่ยนแปลงจำนวนชั้นซ้อนทับควอนตัมดอท InAs ที่มีต่อ (ก) ค่า DOP ของชั้นควอนตัมดอท InAs และชั้นพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ และเทียบกับ (ข) Aspect Ratio และความสูงของควอนตัมดอท InAs

รูปที่ 4.16 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความกว้างที่ฐานในทิศ [1-10] ต่อ [110] (Aspect ratio) ในแนวราบและความสูงของควอนตัมดอทจากการเพิ่มจำนวนชั้นซ้อนทับจาก 1 ชั้นเป็น 3 และ 5 ชั้น ตามลำดับ ค่า Aspect ratio จะเพิ่มขึ้นอย่างมากจาก 1 เป็น 2.19 แล้วลดลงเล็กน้อยเป็น 2.06 ตามลำดับ ในขณะที่ความสูงเฉลี่ยของควอนตัมดอทเพิ่มขึ้นจาก 6 nm เป็น 8 nm แล้วจึงลดลงเป็น 6 nm ตามลำดับ

ผลการเปลี่ยนแปลง DOP จากการทดลองข้างต้นสอดคล้องกับการคำนวณทางทฤษฎีของ Sheng ที่ทำนายเกี่ยวกับ Aspect ratio และความสูงของควอนตัมดอทที่มีผลต่อค่า DOP ([65]-[66]) ค่า DOP ที่เพิ่มขึ้นประมาณ 38 % นี้สอดคล้องกับการคำนวณทางทฤษฎีของ Sheng ที่ทำนายว่าค่า DOP จะเพิ่มขึ้นประมาณ 30 % เมื่อค่า Aspect ratio เพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 2 และการเพิ่มความสูงเฉลี่ยของควอนตัมดอท 2 nm จะเพิ่มค่า DOP อีกประมาณ 10 % [66] ผลรวมของการเพิ่มค่า DOP (40 %) จึงใกล้เคียงกับผลการทดลองมาก (38 %) อย่างไรก็ตามการลดลงของค่า DOP จากการเพิ่มชั้นซ้อนทับจาก 3 เป็น 5 ชั้น ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยปัจจัยเหล่านี้ เพราะค่า Aspect ratio มีค่าค่อนข้างคงที่ และความสูงเฉลี่ยลดลงประมาณ 2 nm แสดงว่าควอนตัมดอทที่มีค่า Aspect ratio สูงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า DOP มากกว่าควอนตัมดอทที่มีค่า Aspect ratio ต่ำ

4.3.2) กรณี $x = 0.5$: ควอนตัมดอต $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$



รูปที่ 4.17 กราฟโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของชิ้นงานที่มีโครงสร้างควอนตัมดอต $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 1 ชั้น, 3 ชั้น และ 5 ชั้น, เส้นกราฟถูกเลื่อนขึ้นให้แยกจากกันเพื่อความชัดเจน

สเปกตรัมโพลาริซไฟโฟโตลูมิเนสเซนซ์จากชิ้นงาน D' ถูกแสดงในรูปที่ 4.17 (เส้นสีน้ำเงิน) ค่ายอดพลังงานที่ต่ำที่สุด คือ 1.24 และ 1.28 eV เกิดจากการเปล่งแสงของควอนตัมดอต InAs ที่เรียงตัวในทิศ [1-10] และ [110] บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ตามลำดับ สอดคล้องกับสัญญาณวิทยาพื้นผิวที่ศึกษาจากชิ้นงาน D ที่พบว่าควอนตัมดอต InAs ที่เรียงตัวในทิศ [1-10] มีความสูงประมาณ 5.5 nm สูงกว่าในทิศ [110] ที่ความสูง 3.5 nm ค่ายอดพลังงานลำดับถัดไปมีค่า 1.33 eV เกิดจากการเปล่งแสงของชั้นพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ลำดับถัดมาเป็นค่ายอดพลังงานค่าต่ำที่ 1.47 eV เป็นการเปล่งแสงจากชั้น GaAs รายละเอียดเกี่ยวกับลำดับการก่อตัวของโครงสร้างควอนตัมดอต $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ อธิบายได้เช่นเดียวกับในชิ้นงาน A ([56],[59])

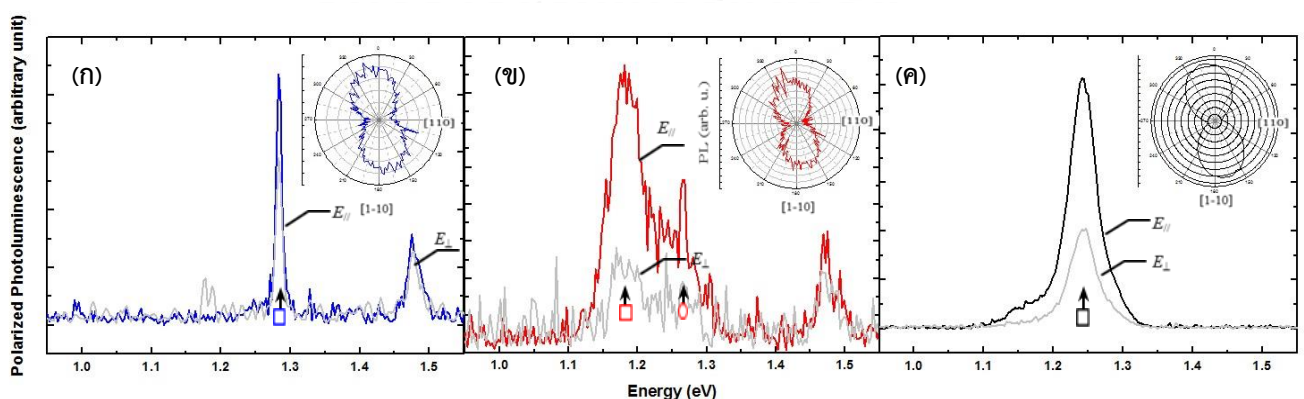
สเปกตรัมโพลาริซไฟโฟโตลูมิเนสเซนซ์จากชิ้นงาน E' ถูกแสดงในรูปที่ 4.17 (เส้นสีแดง) ค่ายอดพลังงานที่ต่ำที่สุด คือ 1.18 eV เกิดจากการเปล่งแสงของควอนตัมดอต InAs ที่เรียงตัวในทิศ [1-10] และ [110] สอดคล้องกับสัญญาณวิทยาพื้นผิวจากชิ้นงาน E ควอนตัมดอตในทิศ [1-10] มีความสูงประมาณ 2 nm และ 1.5 nm ในทิศ [110] ค่ายอดพลังงานลำดับถัดไปเท่ากับ 1.26 eV เกิดจากการเปล่งแสงของควอนตัมดอตที่ก่อตัวบนผิวเรียบ ลำดับถัดมาเป็นค่ายอดพลังงานค่าต่ำที่ 1.30 eV เกิดจากการเปล่งแสงของชั้นพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ลำดับถัดมาเป็นค่ายอดพลังงานที่ 1.47 eV เป็นการเปล่งแสงจากชั้น GaAs

สเปกตรัมโพลาริซไฟโฟโตลูมิเนสเซนซ์จากชิ้นงาน F' ถูกแสดงในรูปที่ 4.17 (เส้นสีดำ) ค่ายอดพลังงานที่ต่ำที่สุด คือ 1.16 eV เกิดจากการเปล่งแสงของควอนตัมดอตที่เรียงตัวในทิศ [1-10] และ 1.24 eV เกิดจากการเปล่งแสงของควอนตัมดอตที่เรียงตัวในทิศ [110] สอดคล้องกับสัญญาณวิทยา

พื้นผิวจากชั้นงาน F ควอนตัมดอตในทิศ [1-10] มีความสูงประมาณ 3.5 nm และ 3 nm ในทิศ [110] ลำดับถัดมาเป็นค่ายอดพลังงานที่ 1.47 eV เป็นการเปล่งแสงจากชั้น GaAs

สังเกตว่าหากค่ายอดพลังงานที่มีระดับพลังงานต่ำที่สุดของโครงสร้างทั้ง 3 แบบมาจากการเปล่งแสงที่สถานะพื้นของควอนตัมดอต $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ ที่เรียงตัวในทิศ [1-10] และ [110] บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ เหมือนกัน จะเห็นว่าค่ายอดพลังงานกลุ่มนี้เกิดการเลื่อนเข้าใกล้ระดับพลังงานของแสงสีแดง (Red-shifted) จากค่า 1.24 eV (1 ชั้น) เป็น 1.18 eV (3 ชั้น) และ 1.16 eV ตามลำดับ เป็นผลจากขนาดที่เปลี่ยนไปของควอนตัมดอต InAs บนชั้นซ้อนทับของพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ตั้งแต่ชั้นที่ 2 ขึ้นไป ซึ่งสอดคล้องกับชั้นงาน D, E และ F ที่ความสูงของควอนตัมดอตเฉลี่ยลดลงจาก 5.5 nm เป็น 2 nm เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นซ้อนทับจาก 1 ชั้น เป็น 3 ชั้น จากนั้นเพิ่มขึ้นเป็น 3.5 nm เมื่อเพิ่มเป็น 5 ชั้น และความเข้มแสงเฉลี่ยมีแนวโน้มที่มากขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นควอนตัมดอตซ้อนทับ เนื่องจากการเชื่อมโยงกันในแนวตั้งระหว่างควอนตัมดอตที่อยู่ต่างชั้นกัน ซึ่งอาจก่อให้เกิดการเปล่งแสงแบบเสริมกันหรือหักล้างกันก็ได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ C. Himwas ที่ทดลองกับชั้นงานที่ปลูกควอนตัมดอตซ้อนทับ 1 ชั้น, 2 ชั้น และ 3 ชั้น ที่มีชั้นแทรก GaAs 20 nm บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ [59]

สเปกตรัมโพลาไรซ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์จากชั้นงาน D' ถูกแสดงดังในรูปที่ 4.18 (ก) ภายใต้เงื่อนไขที่มุม Wavelength ผ่านแสงออกมาได้มากที่สุด ($E_{//}$) และน้อยที่สุด (E_{\perp}) ค่ายอดพลังงานที่ 1.28 eV เป็นการเปล่งแสงของควอนตัมดอต $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ ในทิศ [1-10] และ [110] มีค่า DOP $\approx 20.55\%$ และค่ายอดพลังงานที่ 1.47 eV เป็นการเปล่งแสงของชั้น WL มีค่า DOP $\approx 14.29\%$ สอดคล้องกับภาพแทรกในรูป 4.18 (ก) ที่เป็นการแสดงสเปกตรัมโพโตลูมิเนสเซนซ์แบบเชิงขั้ว ซึ่งมี



รูปที่ 4.18 กราฟโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (ภาพหลัก) และกราฟโพลาไรซ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (ภาพแทรก) ของชั้นงานที่มีโครงสร้างควอนตัมดอต $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ (ก) 1 ชั้น (ข) 3 ชั้น และ (ค) 5 ชั้น

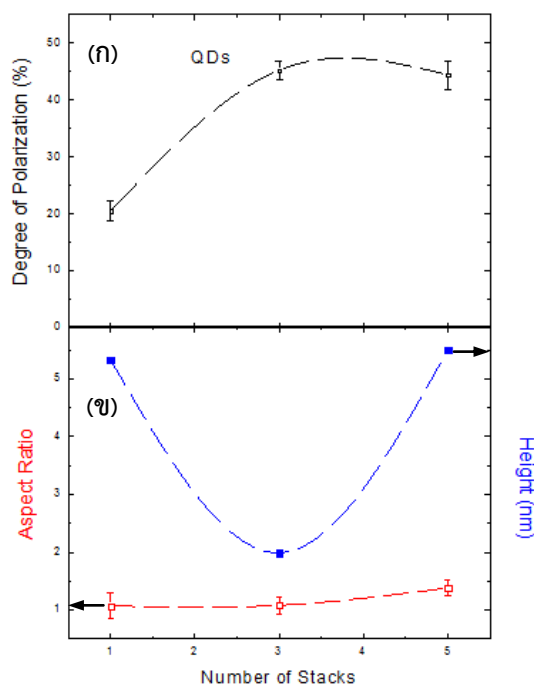
รูปร่างคล้ายเลขแปดที่มีแอมพลิจูดของสเปกตรัมที่เปล่งจากควอนตัมดอตในทิศ [1-10] ต่างจากทิศ [110] เล็กน้อย

สเปกตรัมโพลารไรซ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์จากชั้นงาน E' ถูกแสดงดังในรูปที่ 4.18 (ข) ค่ายอดพลังงานที่ 1.18 eV เป็นค่ายอดพลังงานค่ากว้างที่เกิดจากค่ายอดพลังงาน 2 ค่าที่ใกล้เคียงกัน จากการเปล่งแสงของควอนตัมดอต $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ ที่ปลูกซ้อนทับ 3 ชั้นบนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ เนื่องจากควอนตัมดอตในทิศ [1-10] และ [110] มีขนาดใกล้เคียง มีค่า DOP $\approx 45.28\%$ และค่ายอดพลังงานที่ 1.27 eV เป็นการเปล่งแสงของชั้นพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ มีค่า DOP $\approx 42.42\%$ และค่ายอดพลังงานที่ 1.47 eV เป็นการเปล่งแสงของชั้น WL มีค่า DOP $\approx 23.34\%$ สอดคล้องกับภาพแทรกสเปกตรัมเชิงขั้วในรูป 4.18 (ข) ซึ่งมีรูปร่างคล้ายเลขแปดที่มีแอมพลิจูดของสเปกตรัมที่เปล่งจากควอนตัมดอตในทิศ [1-10] ต่างจากทิศ [110] มากอย่างมีนัยสำคัญ

สเปกตรัมโพลารไรซ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์จากชั้นงาน F' ถูกแสดงดังในรูปที่ 4.18 (ค) ค่ายอดพลังงานที่ 1.13 eV และ 1.25 eV เป็นการเปล่งแสงของควอนตัมดอตในทิศ [1-10] และ [110] $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ ที่ปลูกซ้อนทับ 5 ชั้นบนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ตามลำดับ มีค่า DOP $\approx 44.44\%$ สอดคล้องกับภาพแทรกสเปกตรัมเชิงขั้วในรูป 4.18 (ค) ซึ่งมีรูปร่างคล้ายเลขแปดที่มีแอมพลิจูดของสเปกตรัมที่เปล่งจากควอนตัมดอตในทิศ [1-10] ต่างจากทิศ [110] มากอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างชั้นงานทั้ง 3 ชั้น (ชั้นควอนตัมดอต InAs ซ้อนทับ 1 ชั้น, 3 ชั้น, 5 ชั้น) พบว่าค่ายอดพลังงานที่เป็นการเปล่งแสงจากชั้นลายตารางจะไม่ปรากฏให้เห็นในทุกชั้นงาน มีเพียงชั้นงานที่เป็นชั้นควอนตัมดอตซ้อนทับ 1 ชั้น และ 3 ชั้นเท่านั้น ส่วนค่ายอดพลังงานที่มาจากการเปล่งแสงของชั้นเรียบ พบในชั้นงานที่เป็นชั้นควอนตัมดอตซ้อนทับ 1 ชั้น และ 3 ชั้น และมีการเปลี่ยนแปลงของค่า DOP น้อย ในทางกลับกันค่ายอดพลังงานที่เป็นการเปล่งแสงจากควอนตัมดอต InAs ที่สถานะพื้น มีค่า DOP เพิ่มขึ้นจาก 20.55% สำหรับชั้นควอนตัมดอตซ้อนทับ 1 ชั้น เป็น 45.28% สำหรับชั้นควอนตัมดอตซ้อนทับ 3 ชั้น แล้วลดลงเล็กน้อยเป็น 44.44% สำหรับชั้นควอนตัมดอตซ้อนทับ 5 ชั้น ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 (ก)

รูปที่ 4.19 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Aspect ratio ในแนวราบและความสูงของควอนตัมดอตจากการเพิ่มจำนวนชั้นซ้อนทับจาก 1 ชั้นเป็น 3 และ 5 ชั้น ตามลำดับ ค่า Aspect ratio จะเพิ่มขึ้นจาก 1.07 เป็น 1.08 และ 1.38 ตามลำดับ ในขณะที่ความสูงเฉลี่ยของควอนตัมดอตลดลงจาก 5.33 nm เป็น 1.99 nm แล้วจึงเพิ่มขึ้นเป็น 5.50 nm ตามลำดับ



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงผลของการเปลี่ยนแปลงจำนวนชั้นซ้อนทับควอนตัมดอต $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ ที่มีต่อ (ก) ค่า DOP ของชั้นควอนตัมดอต $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ และชั้นพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ และเทียบกับ (ข) Aspect Ratio และความสูงของควอนตัมดอต $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$

ตารางที่ 4.2 สรุปผลงานวิจัย

ชื่อชิ้นงาน	จำนวน Stack (ชั้น)	ความสูงเฉลี่ย (nm)	Aspect ratio	ค่า DOP (%)
A, A'	1 (InAs)	6	1	10
B, B'	3 (InAs)	8	2.19	48
C, C'	5 (InAs)	6	2.06	3
D, D'	1 ($\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$)	5.3	1.07	21
E, E'	3 ($\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$)	2	1.08	45
F, F'	5 ($\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$)	5.5	1.38	44

ผลการเปลี่ยนแปลง DOP จากการทดลองข้างต้นสอดคล้องกับการคำนวณทางทฤษฎีของ Sheng ที่ทำนายเกี่ยวกับ Aspect ratio และความสูงของควอนตัมดอตที่มีผลต่อค่า DOP ([65]-[66]) ค่า DOP ที่เพิ่มขึ้นประมาณ 24 % เมื่อเทียบระหว่างการเพิ่มจำนวนชั้นซ้อนทับจาก 1 เป็น 5 ชั้น ที่มีการเพิ่มของค่า Aspect ratio จากประมาณ 1 เป็น 1.4 สอดคล้องกับการคำนวณทางทฤษฎีของ Sheng ที่ทำนายว่าค่า DOP จะเพิ่มขึ้นประมาณ 30 % เมื่อค่า Aspect ratio เพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 2 [66] อย่างไรก็ตามหากเทียบค่า DOP จากการเพิ่มขึ้นซ้อนทับจาก 1 เป็น 3 ชั้น ไม่สามารถอธิบายได้

ด้วยปัจจัยเหล่านี้ เพราะค่า Aspect ratio มีค่าค่อนข้างคงที่ และความสูงเฉลี่ยลดลงประมาณ 3.5 nm แสดงว่าค่า DOP ที่สูงขึ้นประมาณ 25 % อาจเป็นผลจากการเพิ่มระดับของความเชื่อมโยง (Degree of coupling) เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของควอนตัมดอตซ้อนทับ



บทที่ 5

สรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาสัญญาณวิทยาพื้นผิวและสมบัติเชิงแสงของชั้นควอนตัมดอตซ้อนทับ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ที่ซ้อนทับกันหลายชั้นบนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ โดยมีชั้นแทรกระหว่างชั้นคือ GaAs หนา 10 nm วัสดุทั้งหมดถูกสังเคราะห์จากกระบวนการเอพิแทกซีโดยเทคนิคการปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล หัวข้อหลักที่ศึกษาประกอบด้วย 1) สัญญาณวิทยาพื้นผิวของควอนตัมดอต $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ โดยแยกเป็นกรณี $x = 1$ และ $x = 0.5$ ทำให้เข้าใจถึงลำดับ ลักษณะ และความหนาแน่นในการก่อตัวของพื้นผิวลายตารางและควอนตัมดอต และผลกระทบเมื่อจำนวนชั้นควอนตัมดอตเปลี่ยนแปลง 2) สมบัติเชิงแสงของควอนตัมดอต $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ที่ปลูกซ้อนทับกันบนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ในกรณี $x = 1$ และ $x = 0.5$

ผลทางสัญญาณวิทยาจากการเพิ่มชั้นซ้อนทับของควอนตัมดอต InAs จาก 1 ชั้น (ชิ้นงาน A) เป็น 3 ชั้น (ชิ้นงาน B) และ 5 ชั้น (ชิ้นงาน C) ความสูงเฉลี่ยของควอนตัมดอตเพิ่มขึ้นจาก 6 nm เป็น 8 nm แต่ลดลงเป็น 6 nm เมื่อจำนวนชั้นซ้อนทับเพิ่มจาก 1 เป็น 3 และ 5 ชั้น ตามลำดับ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของควอนตัมดอตในชิ้นงาน B และ C มีค่าใกล้เคียงกันที่ประมาณ 75 nm มากกว่าชิ้นงาน A ที่ 30 nm Aspect ratio เพิ่มขึ้นจาก 1 ในชิ้นงาน A เป็น 2.19 ในชิ้นงาน B จากนั้นลดลงเป็น 2.06 ในชิ้นงาน C ความหนาแน่นของควอนตัมดอตมีแนวโน้มลดลงจากชิ้นงาน A = $1.1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ ลดลงเป็น B = $6.8 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ และ C = $6.3 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อปลูกจำนวนชั้นซ้อนทับมากขึ้น ความเครียดที่ส่งผ่านจากชั้นพื้นผิวลายตารางขึ้นสู่ผิวหน้าจะมีค่าน้อยลงทำให้การก่อตัวอย่างหนาแน่นและมีระเบียบบนแนวของลายตารางน้อยลง และเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นซ้อนทับขึ้นความหนาของชั้นแทรกโดยรวมก็จะเพิ่มขึ้นด้วย จึงมีผลต่อการก่อตัวมีความหนาแน่นลดลงของควอนตัมดอตในบริเวณที่เรียบ ความหนาแน่นโดยรวมจึงลดลง ระยะห่างระหว่างควอนตัมดอตในทุกชิ้นงานมีค่าประมาณ 8 nm ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของควอนตัมดอตในบริเวณที่พิจารณา ทำให้ระดับความเชื่อมโยงของพาหะมีแนวโน้มที่จะมีค่าสูงในชิ้นงาน A แล้วจึงลดหลั่นลงในชิ้น B และ C ตามลำดับ สุดท้ายความหนาแน่นของเส้นลายตารางในชิ้นงาน A และ C มีความใกล้เคียงกัน และน้อยลงในชิ้นงาน B

ผลการวัดสมบัติเชิงแสงของชิ้นงาน A', B' และ C' ที่มีโครงสร้างเดียวกับชิ้นงาน A, B และ C ตามลำดับ ค่ายอดพลังงานที่มีระดับพลังงานต่ำที่สุดของโครงสร้างทั้ง 3 แบบมาจากการเปล่งแสงที่สถานะพื้น (Ground state) ของควอนตัมดอต InAs ที่เรียงตัวในทิศทางผลึก [1-10] และ [110] บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ เหมือนกัน จะเห็นว่าค่ายอดพลังงานกลุ่มนี้เกิดการเลื่อนเข้าใกล้ระดับพลังงานของแสงสีน้ำเงิน (Blue-shifted) ประมาณ 154 meV เป็นผลจากขนาดที่เปลี่ยนไปของ

ควอนตัมดอท InAs บนชั้นซ้อนทับของพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ตั้งแต่ชั้นที่ 2 ขึ้นไป ควอนตัมดอทจะก่อตัวที่ความหนาประมาณ 1.3 ML ซึ่งก่อตัวเร็วกว่าชั้นที่ 1 ที่ความหนา 1.7 ML เนื่องจากผลของสนามความเครียดจากชั้นควอนตัมดอทบนพื้นผิวลายตารางในชั้นที่ต่ำกว่าความเครียดสะสมในชั้นปลูกที่มากขึ้นจึงทำให้ควอนตัมดอทก่อตัวเร็วขึ้น เพราะความหนาวิกฤติมีค่าน้อยลง และอาจมีผลจากความเชื่อมโยงในแนวนอน (Lateral coupling)

ผลการวัดสมบัติเชิงแสงด้วยเทคนิค PPL เปรียบเทียบกันระหว่างชั้นงานทั้ง 3 (A', B' และ C') พบว่าค่ายอดพลังงานที่เป็นการเปล่งแสงจากชั้นพื้นผิวลายตารางมีการเปลี่ยนแปลงของค่า DOP ค่อนข้างน้อย จากการเพิ่มขึ้นของชั้นควอนตัมดอทซ้อนทับ ในทางกลับกันค่ายอดพลังงานที่เป็นการเปล่งแสงจากควอนตัมดอท InAs ที่สถานะพื้น มีค่า DOP เพิ่มขึ้นจาก 10 % สำหรับชั้นควอนตัมดอทซ้อนทับ 1 ชั้น เป็น 48 % สำหรับชั้นควอนตัมดอทซ้อนทับ 3 ชั้น แต่กลับลดลงเป็น 3 % สำหรับชั้นควอนตัมดอทซ้อนทับ 5 ชั้น สามารถเทียบได้จากการคำนวณทางทฤษฎีที่ทำนายเกี่ยวกับ Aspect ratio และความสูงของควอนตัมดอทที่มีผลต่อค่า DOP

ผลทางสัณฐานวิทยาจากการเพิ่มขึ้นซ้อนทับของควอนตัมดอท $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ จาก 1 ชั้น (ชั้นงาน D) เป็น 3 ชั้น (ชั้นงาน E) และ 5 ชั้น (ชั้นงาน F) สรุปได้ดังนี้ ความสูงของควอนตัมดอทเฉลี่ยลดลงจาก 5.33 nm เป็น 1.99 nm เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นซ้อนทับจาก 1 ชั้น เป็น 3 ชั้น จากนั้นเพิ่มขึ้นเป็น 5.50 nm เมื่อเพิ่มเป็น 5 ชั้น เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของควอนตัมดอทในทิศ [1-10] ในชั้นงาน D มีค่าประมาณ 32.2 nm จากนั้นเพิ่มขึ้นเป็น 44.8 ในชั้นงาน E และเพิ่มขึ้นเป็น 51.2 nm ในชั้นงาน F ตามลำดับ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของควอนตัมดอทในทิศ [110] ในชั้นงาน D มีค่าประมาณ 30 nm จากนั้นเพิ่มขึ้นเป็น 41.3 ในชั้นงาน E แต่ลดลงเป็น 37 nm ในชั้นงาน F Aspect ratio เพิ่มขึ้นจาก 1.07 ในชั้นงาน D เป็น 1.08 ในทั้งชั้นงาน E และ 1.38 ในทั้งชั้นงาน F ความหนาแน่นของควอนตัมดอทแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากชั้นงาน D = $1.2 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ เพิ่มขึ้นเป็น E = $4.1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ และ F = $7.1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ ตามลำดับ ความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นนี้อาจจะมีผลมาจากควอนตัมดอทที่ก่อตัวช้าลงที่ค่าประมาณ 3.2-3.9 ML ทำให้ความเครียดสะสมส่งผลจากชั้นซ้อนทับไปยังผิวหน้าชั้นต่อไปยังมีความชัดเจนของแนวเส้นลายตาราง ทำให้ความหนาแน่นโดยรวมทั้งแนวลายตารางและผิวเรียบมีค่ามากขึ้น ระยะห่างระหว่างควอนตัมดอทในทุกชั้นงานมีค่าในช่วง 10-35 nm ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของควอนตัมดอทในบริเวณที่พิจารณา สุดท้ายความหนาแน่นของเส้นลายตารางในชั้นงาน E และ F มีความใกล้เคียงกัน ซึ่งหนาแน่นกว่าในชั้นงาน D

ผลการวัดสมบัติเชิงแสงของชั้นงาน D', E' และ F' ที่มีโครงสร้างเดียวกับชั้นงาน D, E และ F ตามลำดับ ค่ายอดพลังงานที่มีระดับพลังงานต่ำที่สุดของโครงสร้างทั้ง 3 แบบมาจากการเปล่งแสงที่สถานะพื้นของควอนตัมดอท $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ ที่เรียงตัวในทิศ [1-10] และ [110] บนพื้นผิวลายตาราง

$\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ เหมือนกัน จะเห็นว่าค่ายอดพลังงานกลุ่มนี้เกิดการเลื่อนเข้าใกล้ระดับพลังงานของแสงสีแดง (Red-shifted) จากค่า 1.24 eV (1 ชั้น) เป็น 1.18 eV (3 ชั้น) และ 1.16 eV ตามลำดับ เป็นผลจากขนาดที่เปลี่ยนไปของควอนตัมดอท InAs บนชั้นซ้อนทับของพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ตั้งแต่ชั้นที่ 2 ขึ้นไป ซึ่งสอดคล้องกับชั้นงาน D, E และ F ที่ความสูงของควอนตัมดอทเฉลี่ยลดลงจาก 5.33 nm เป็น 1.99 nm เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นซ้อนทับจาก 1 ชั้น เป็น 3 ชั้น จากนั้นเพิ่มขึ้นเป็น 5.50 nm เมื่อเพิ่มเป็น 5 ชั้น และความเข้มแสงเฉลี่ยมีแนวโน้มที่มากขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นควอนตัมดอทซ้อนทับ เนื่องจากมีการเชื่อมโยงกันในแนวตั้งระหว่างควอนตัมดอทที่อยู่ต่างชั้นกัน ซึ่งอาจก่อให้เกิดการเปล่งแสงแบบเสริมกันหรือหักล้างกันก็ได้

ผลการสมบัติเชิงแสงด้วยเทคนิค PPL เปรียบเทียบกันระหว่างชั้นงานทั้ง 3 ชั้นงาน (D', E' และ F') เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างชั้นงานทั้ง 3 ชั้น (ชั้นควอนตัมดอท InAs ซ้อนทับ 1 ชั้น, 3 ชั้น, 5 ชั้น) พบว่าค่ายอดพลังงานที่เป็นการเปล่งแสงจากชั้นลายตารางจะไม่ปรากฏให้เห็นในทุกชั้นงาน มีเพียงชั้นงานที่เป็นชั้นควอนตัมดอทซ้อนทับ 3 ชั้นเท่านั้น ส่วนค่ายอดพลังงานที่มาจากการเปล่งแสงของชั้นเรียบ พบในชั้นงานที่เป็นชั้นควอนตัมดอทซ้อนทับ 1 ชั้น และ 3 ชั้น และมีการเปลี่ยนแปลงของค่า DOP น้อย ในทางกลับกันค่ายอดพลังงานที่เป็นการเปล่งแสงจากควอนตัมดอท InAs ที่สถานะพื้น มีค่า DOP เพิ่มขึ้นจาก 20.55 % สำหรับชั้นควอนตัมดอทซ้อนทับ 1 ชั้น เป็น 45.28 % สำหรับชั้นควอนตัมดอทซ้อนทับ 3 ชั้น แล้วลดลงเล็กน้อยเป็น 44.44 % สำหรับชั้นควอนตัมดอทซ้อนทับ 5 ชั้น ตามลำดับ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำให้เข้าใจถึงผลของการเปลี่ยนแปลงของสัณฐานวิทยาพื้นผิวจากการเพิ่มชั้นควอนตัมดอท $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ซ้อนทับที่มีชั้นแทรกบาง GaAs บนพื้นผิวลายตาราง ที่มีผลต่อลักษณะและความหนาแน่นในการก่อตัวของลายตารางและควอนตัมดอท และผลที่มีต่อสมบัติเชิงแสง โดยเฉพาะสมบัติโพลาไรซ์ งานที่น่าสนใจในการศึกษาลำดับถัดไป คือ การทดลองเปลี่ยนพารามิเตอร์ในโครงสร้างที่อาจช่วยเสริมสมบัติโพลาไรซ์

รายการอ้างอิง

1. Sundgren, P., Berggren, J. , Goldman, P. , Hammar, M., *Highly strained InGaAs/GaAs multiple quantum-wells for laser applications in the 1200-1300 nm wavelength regime*. Applied Physics Letters., 2005. 87(7): p. 071104-071104-3.
2. Adolfsson, G., Wang, S. M. , Sadeghi, M. , Larsson, A., *High-performance longwavelength InGaAs/GaAs multiple quantum-well lasers grown by molecular beam epitaxy*. Electronics Letters, 2007. 43(8): p. 454-456.
3. Ngo, C.Y., Yoon, S. F. , Fan, W. J. , Chua, S. J., *Tuning InAs quantum dots for high areal density and wideband emission*. Applied Physics Letters. , 2007. 90(11): p. 113103-113103-3.
4. Suraprapapich, S., Thainoi, S. , Kanjanachuchai, S. , Panyakeow, S., *n-GaAlAs on p-GaAs heterostructure solar cells grown by molecular beam epitaxy*. Solar Energy Materials and Solar Cells., 2006. 90(18-19): p. 2989-2994.
5. Passmore, B.S., Wu, J. , Manasreh, M. O. , Salamo, G. J., *Dual broadband photodetector based on interband and intersubband transitions in InAs quantum dots embedded in graded InGaAs quantum wells*. Applied Physics Letters., 2007. 91(23): p. 233508 - 233508-3.
6. Hahn, C.K., Park, Y. J. , Kim, E. K. , Min, S. K. , Jung, S. K. , Park, J. H., *Selective formation of one- and two-dimensional arrayed InGaAs quantum dots using Ga₂O₃ thin film as a mask material*. Applied Physics Letters, 1998. 73(17): p. 2479-2481.
7. Yoon, T.S., Kim, H. M. , Kim, K. B. , Ryu, D. Y. , Russell, T. P. , Zhao, Z. , Liu, J. , Xie, Y. H., *Study of growth behaviour and microstructure of epitaxially grown self-assembled Ge quantum dots on nanometer-scale patterned SiO₂/Si(001) substrates*. Physica status solidi (B), 2009. 246(4): p. 721-724.
8. Nakamura, Y., Murayama, A. , Watanabe, R. , Iyoda, T. , Ichikawa, M., *Self-organized formation and self-repair of a two-dimensional nanoarray of Ge quantum dots epitaxially grown on ultrathin SiO₂-covered Si substrates*. Nanotechnology., 2010. 21(9).
9. Borgström, M., Zela, V. , Seifert, W., *Arrays of Ge islands on Si(001) grown by means of electron-beam pre-patterning*. Nanotechnology, 2003. 14(2).
10. Leonard, D., Krishnamurthy, M. , Reaves, C. M. , Denbaars, S. P. , Petroff, P. M., *Direct formation of quantum-sized dots from uniform coherent islands of InGaAs on GaAs surfaces*. Applied Physics Letters., 1993. 63(23): p. 3203-3205.
11. Shchukin, V.A., Ledentsov, N. N. , Kop'ev, P. S. , Bimberg, D., *Spontaneous ordering of arrays of coherent strained islands*. Physics Review Letters., 1995. 75: p. 2968-2971.

12. Jin, G., Liu, J. L. , Wang, K. L., *Regimented placement of self-assembled Ge dots on selectively grown Si mesas*. Applied Physics Letters, 2000. 76(24): p. 3591-3593.
13. Tromp, R.M., Ross, F. M. , Reuter, M. C., *Instability-Driven SiGe Island Growth*. Physics Review Letters., 2000. 84: p. 4641-4644.
14. Kim, H.J., Xie, Y. H., *Influence of the wetting-layer growth kinetics on the size and shape of Ge self-assembled quantum dots on Si(001)*. Applied Physics Letters., 2001. 79(2): p. 263-265.
15. Xin, S.H., Wang, P. D. , Yin, A. , Kim, C. , Dobrowolska, M. , Merz, J. L. , Furdana, J. K., *Formation of self-assembling CdSe quantum dots on ZnSe by molecular beam epitaxy*. Applied Physics Letters., 1996. 69(25): p. 3884-3886.
16. Rinaldi, R., Turco, C. , Lovergeni, N. , Cingolani, R. , Vasanelli, L. , Difabricio, E. , Grilla, L. , Gentili, M. , Decaro, L. , Temfer, L., *Free-standing ZnSe/ZnS quantum wires with high luminescence efficiency*. Applied Physics Letters., 1997. 71(26): p. 3770-3772.
17. Tawara, T., Tanaka, S. , Kumano, H. , Suemune, I., *Growth and luminescence properties of self-organized ZnSe quantum dots*. Applied Physics Letters., 1999. 75(2): p. 235-237.
18. Graunke, C.R., Wheeler, D. I. , Tougaw, D. , Will, J. D., *Implementation of a crossbar network using quantum-dot cellular automata*. Nanotechnology., 2005. 4(4): p. 435-440.
19. Danilatos, G.D., *Foundations of environmental scanning electron microscopy*. Advances in Electronics and Electron Physics., 1988. 71(109–250.).
20. Rajan, K., Devine, R. , Moore, W. T. , Maigne, P., *Dislocation structure in $In_xGa_{1-x}As/GaAs$ strained layer superlattices*. Journal of Applied Physics., 1987. 62(5): p. 1713-1716.
21. Samonji, K., Yonezu, H. , Takagi, Y. , Ohshima, N., *Evolution process of crosshatch patterns and reduction of surface roughness in $(InAs)_m(GaAs)_n$ strained short-period superlattices and InGaAs alloy layers grown on GaAs*. Journal of Applied Physics, 1999. 86(3): p. 1331-1339.
22. Yeoh, T.S., Swint, R. B. , Elarde, V. C. , Coleman, J. J., *The role of the InGaAs surface in selective area epitaxy of quantum dots by indium segregation*. Applied Physics Letters, 2004. 84(16): p. 3031-3033.
23. Leon, R., Chaparro, S. , Johnson, S. R. , Navarro, C. , Jin, X. , Zhang, Y. H. , Siegert, J. , Marcinkevicius, S. , Liao, X. Z. , Zou, J., *Dislocation-induced spatial ordering of InAs quantum dots: Effects on optical properties*. Journal of Applied Physics, 2002. 91(9): p. 5826-5830.

24. An, H., Motohisa, J., *Optical properties of InAs quantum dots formed on GaAs pyramids*. Applied Physics Letters, 2000. 77(3): p. 385-387.
25. Pan, D., Xu, J., Elias, T., Xu, Q., Hsu, J. W., *Self-organization of (In,Ga)As/GaAs quantum dots on relaxed (In,Ga)As films*. Applied Physics Letters., 1998. 73(15): p. 2164-2166.
26. Kiravittaya, S., Nakamura, Y., Schmidt, O. G., *Photoluminescence linewidth narrowing of InAs/GaAs self-assembled quantum dots*. Physica E., 2002. 13(2-4): p. 224-228.
27. Welsch, H., Kipp, T., Köppen, T., Heyn, Ch., Hansen, W., *Spatially and energetically resolved optical mapping of self-aligned InAs quantum dots*. Semiconductor Science and Technology., 2008. 23(4).
28. Hiwatashi, F., Yamaguchi, K., *Selective growth of self-organizing InAs quantum dots on strained InGaAs surfaces*. Applied Surface Science, 1998. 130-132(2): p. 737-741.
29. Andrews, A.M., Romanov, A. E., Speck, J. S., Bobeth, M., Pompe, W., *Development of cross-hatch morphology during growth of lattice mismatched layers*. Applied Physics Letters, 2000. 77(23): p. 3740-3742.
30. Andrews, A.M., Romanov, A. E., Speck, J. S., Bobeth, M., Pompe, W., *Modeling cross-hatch surface morphology in growing mismatched layers*. Journal of Applied Physics, 2002. 91(4): p. 1933-1943.
31. Kim, K.M., Park, Y. J., Park, Y. M., Hyon, C. K., Kim, E. K., Park, J. H., *Alignment of InAs quantum dots on a controllable strain relaxed substrate using an InAs/GaAs superlattice*. Journal of Applied Physics, 2002. 92(9): p. 5453-5456.
32. Yastrubchak, O., Wosinski, T., Figielski, T., Lusakowska, E., Pecz, B., Tolt, A. L., *Misfit dislocations and surface morphology of lattice-mismatched InAs/InGaAs heterostructures*. Physica E., 2003: p. 561-563.
33. Kim, K.M., Park, Y. J., Hyon, S. H., Lee, S. H., Lee, J. I., Park, J. H., Park, S. K. *Artificial array of InAs quantum dots on a strain-engineered superlattice*. Physica E. 2004 [cited 24 1-2]; 148-152].
34. Wang, Z.M., Holmes, K., Mazur, Yu. I., Salamo, G. J., *Fabrication of (In,Ga)As quantum-dot chains on GaAs(100)*. Applied Physics Letters, 2004. 84(11): p. 1931-1933.
35. Zhang, C.L., Xu, B., Wang, Z. G., P. Jin and F. A. Zhao., *Development of cross hatch grid morphology and its effect on ordering growth of quantum dots*. Physica E., 2005. 25(4): p. 592-596.
36. Thet, C.C., Panyakeow, S., Kanjanachuchai, S., *Growth of InAs quantum-dot hatches on InGaAs/GaAs cross-hatch virtual substrates*. Microelectronic Engineering., 2007. 84(5-8): p. 1562-1565.

37. Bhattacharya, P., *Properties of Lattice matched and Strained Indium Gallium Arsenide*. London: INSPEC, 1993., 1993.
38. Alferov, Z.I., Ledentsov, N. O. N., Available from: http://www.fhberlin.mpg.de/th/lectures/materialscience2004/vorlesung_2004/introduction_to_Semiconductor_Nanostructures. . Semiconductor heterostructures., 2011.
39. Kavanagh, K.L., Capano, M. A. , Hobbs, L. W. , Barbour, J. C. , Marée, P. M. J. , Schaff, W. , Mayer, J. W. , Pettit, D. , Woodall, J. M. , Stroscio, J. A. , Feenstra, R. M., *Asymmetries in dislocation densities, surface morphology, and strain of GaInAs/GaAs single heterolayers*. Journal of applied physics, 1988. 64(10): p. 4843-4852.
40. Andrews, A.M., LeSar, R. , Kerner, M. A. , Speck, J. S. , Romanov, A. E. , Kolesnikova, A. L. , Bobeth, M. , Pompe, W., *Modeling crosshatch surface morphology in growing mismatched layers. Part II: Periodic boundary conditions and dislocation groups*. Journal of applied physics, 2004. 95(11): p. 6032-6047.
41. Tamura, M., Hashimoto, A. , Nakatsugawa, Y., *Threading dislocations in $In_xGa_{1-x}As/GaAs$ heterostructures*. Journal of Applied Physics, 1992. 72(8): p. 3398-3405.
42. Ramanov, A.E., Pompe, W. , Mathis, S. , Beltz, G. E. , Speck, J. S., *Threading dislocation reduction in strained layers*. Journal of applied physics, 1999. 85(1): p. 182-192.
43. Andrews, A.M., Speck, J. S. , Romanov, A. E. , Bobeth, M. , Pompe, W., *Modeling cross-hatch surface morphology in growing mismatched layers*. Journal of Applied Physics, 2002. 91(4): p. 1933-1943.
44. Sugawara, M., *Theoretical bases of the optical properties of semiconductor quantum nano-structures*. Semiconductors and Semimetals: Self-assembled InGaAs/GaAs quantum dots., 1999. 60: p. 1-116.
45. Tang, C.L., *Fundamentals of Quantum Mechanics for solid state electronics and optical.*, 2005.
46. Dakura, I., Barabasi, A. L., *Dislocation-Free Island Formation in Heteroepitaxial Growth: A Study at Equilibrium*. Physical Review Letters, 1997. 79: p. 3708-3711.
47. Matthews, J.W., Blanksee, A. E., *Defects in epitaxial multilayers *: I. Misfit dislocations*. Journal of Crystal Growth., 1974. 27: p. 118-125.
48. Limwongse, T., Panyakeow, S. , Kanjanachuchai, S., *Evolution of InAs quantum dots grown on cross-hatch substrates*. Physica Status Solidi C, 2009. 6(4): p. 806-809.
49. Zhang, C., Teng, L. , Wang, Y. , Wang, Z. , Xu, B. , *Influence of dislocation stress field on distribution of quantum dots*. Physica E., 2006. 33(1): p. 130-133.

50. Shiryayev, S.Y., Jensen, F., Hansen, J. L., Petersen, J. W., Larsen, A. N., *Nanoscale structuring by misfit dislocations in $Si_{1-x}Ge_x/Si$ Epitaxial Systems*. Physical review letters, 1997. 78(3): p. 503-506.
51. Xie, Y.H., Samavedam, S. B., Bulsara, M., Langdo, T.A., Fitzgerald, E. A., *Relaxed template for fabricating regularly distributed quantum dot arrays*. Applied Physics Letters, 1997. 71(24): p. 3567-3568.
52. Wolfgang, P., Helmut, S., *Apparatus for separating charged particles of different specific charges*. United States Patent 2939952, 1960.
53. Franke, T., Kreutzer, P., Zacher, Th., Naumann, W., Anton, R., *In situ RHEED, AFM, and REM investigations of the surface recovery of MBE-grown GaAs(001)-layers during growth interruptions*. Journal of Crystal Growth., 1998. 193(4): p. 451-459.
54. Panish, M.B., Temkin, H., *Gas Source Molecular Beam Epitaxy*. Mechanisms of Reactions of Organometallic Compounds with Surfaces, 1989. 198: p. 267-277.
55. Chokamnuai, T., Panyakeow, S., Kanjanachuchai, S., *Nanoholes formation by thin capping of InAs quantum dots grown on cross-hatch patterns*. Proceeding of EECN-34, 2011. 34: p. 857-860.
56. Limwongse, T., *Evolution of InAs Quantum Dots Grown on Cross-hatch Substrates*. Master's thesis, Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2008.
57. Thet, C.C., Sanorpim, S., Panyakeow, S., Kanjanachuchai, S., *The Effects of relaxed InGaAs virtual substrates on the formation of self-assembled InAs Quantum Dots*. Semiconductor Science Technology, 2008. 23(5).
58. Himwas, C., Panyakeow, S., Kanjanachuchai, S., *Optical properties of as-grown and annealed InAs quantum dots on InGaAs cross-hatch patterns*. Nanoscale Research Letters., 2011. 6(496).
59. Himwas, C., *Growth and characterization of stacked InAs quantum dots on cross-hatch substrates*. Master's thesis, Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2011.
60. Lee, S.J., Kim, J. O., Noh, S. K., Choe, J. W., Lee, K. S., *Evolution of structural and optical characteristics in InAs quantum dots capped by GaAs layers comparable to dot height*. Journal of Crystal Growth, 2005. 284(1-2): p. 39-46.
61. Pattanasattayavong, P., *Optical characterisation of InAs quantum dots*. Bachelor's thesis, Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2009.
62. Peng, J., Hermannstädter, C., Witzany, M., Heldmaier, M., Wang, L., Kiravittaya, S., Rastelli, A., Schmidt, O. G., Michler, P., Bester, G., *Heterogeneous confinement in*

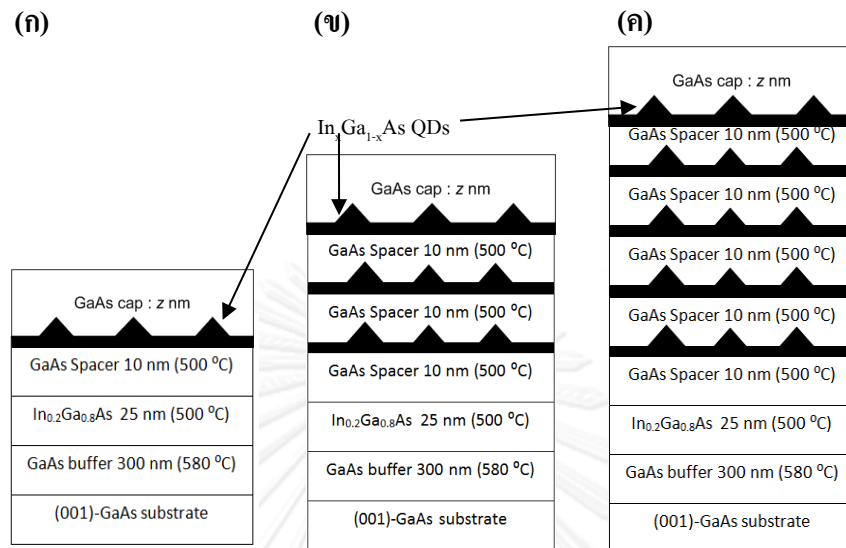
- laterally coupled InGaAs/GaAs quantum dot molecules under lateral electric fields.* Physical Review B, 2010. 81(205315).
63. Yu, P., Langbein, W. , Leosson, K. , Hvam, J. M. , Ledentsov, N. N. , Bimberg, D. , Ustinov, V. M. , Egorov, A.Y. , Zhukov, A. E. , Tsatsul'nikov, A. F. , Musikhin, Y. G., *Optical anisotropy in vertically coupled quantum dots.* Physical Review B, 1999. 60(16680).
64. Lelovsky, L.V., Teodoro, M. D. , Richard, V. L. , Calseverino, C. , Malachias, A. , Marega, E. , Liang, B. , Mazur, Y. I. , Marques, G. E. , Giner, C. T. , Salamo, G. J., *Anisotropic Confinement, Electronic Coupling and Strain Induced Effects Detected by Valence-Band Anisotropy in Self-Assembled Quantum Dots.* Nanoscale Research Letter, 2010. 6(56).
65. Sheng, W., Xu, S.J., *Optical characterization of structure for semiconductor quantum dots.* Physical Review B, 2008. 77(11).
66. Sheng, W., *Polarization of emission from self-assembled quantum dots and its application to the optical characterization of structure.* Physica Status Solidi B, 2009. 246(4): p. 876-879.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รายละเอียดของกระบวนการปลูกชั้นงาน A', B', C', D', E' และ F'



แผนภาพแสดงโครงสร้างควอนตัมดอต $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ที่มีชั้นแทรก GaAs 10 nm ที่ปลูกซ้อนทับ (ก) 1 ชั้น, (ข) 3 ชั้น และ (ค) 5 ชั้น บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ หนา 25 nm, เศษส่วนโมล $x = 0.5$ หรือ 1, ความหนาของชั้น GaAs ปิดทับโครงสร้าง $Z = 100$ nm

ชั้นงาน A' ((ก) $x = 1$) เป็นโครงสร้างควอนตัมดอต InAs 1.7 ML บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ หนา 25 nm มีขั้นตอนการปลูกดังที่ได้อธิบายไปในบทที่ 3 โดยพารามิเตอร์สำคัญในการปลูกได้แก่อัตราการปลูกของ Ga = 0.24096 ML/s และของ In = 0.06093 ML/s ชั้น $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 25 nm จึงใช้เวลาปลูก 4:49 min ตามด้วย GI 10 s ส่วนชั้นแทรก GaAs 10 nm ที่ตามมาใช้เวลาปลูก 2:15 min ตามด้วย GI = 30 s ก่อนที่จะปลูกควอนตัมดอต InAs 1.7 ML โดยใช้เวลา 2:41 min ตามด้วย GI 30 s สุดท้ายจึงปลูกชั้น GaAs 100 nm ก่อนที่จะลดอุณหภูมิผิวหน้าลงอย่างฉับพลัน

ชั้นงาน B' ((ข) $x = 1$) เป็นโครงสร้างควอนตัมดอต InAs 1.7 ML บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ หนา 25 nm มีขั้นตอนการปลูกดังที่ได้อธิบายไปในบทที่ 3 อัตราการปลูกของ Ga = 0.25000 ML/s และของ In = 0.05960 ML/s ชั้น $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 25 nm จึงใช้เวลาปลูก 4:41 นาที ตามด้วย GI 10 s ส่วนชั้นแทรก GaAs 10 nm ที่ตามมาใช้เวลาปลูก 2:15 min ตามด้วย GI = 30 s ก่อนที่จะปลูกควอนตัมดอต InAs 1.7 ML เปลี่ยนอัตราการปลูกของ In เป็น 0.01 ML/s โดยใช้เวลา 2:37 min จากนั้นปลูกชั้นแทรก GaAs 10 nm และชั้นควอนตัมดอต InAs ซ้อนทับชั้นนี้อีก 2 ชั้น

เวลาในการก่อตัวของควอนตัมดอทเป็น 1:58 min และ 2:00 min ตามลำดับ สุดท้ายจึงปลูกชั้น GaAs 100 nm ก่อนที่จะลดอุณหภูมิผิวหน้าลงอย่างฉับพลัน

ชั้นงาน C' ((ค) x = 1) เป็นโครงสร้างควอนตัมดอท InAs 1.7 ML บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ หนา 25 nm มีขั้นตอนการปลูกดังที่ได้อธิบายไปในบทที่ 3 อัตราการปลูกของ Ga = 0.24700 ML/s และของ In = 0.05800 ML/s ชั้น $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 25 nm จึงใช้เวลาปลูก 4:46 นาที ตามด้วย GI 10 s ส่วนชั้นแทรก GaAs 10 nm ที่ตามมาใช้เวลาปลูก 2:15 min ตามด้วย GI = 30 s ก่อนที่จะปลูกควอนตัมดอท InAs 1.7 ML เปลี่ยนอัตราการปลูกของ In เป็น 0.01 ML/s โดยใช้เวลา 2:39 min จากนั้นปลูกชั้นแทรก GaAs 10 nm และชั้นควอนตัมดอท InAs ซ้อนทับชั้นนี้อีก 4 ชั้น เวลาในการก่อตัวของควอนตัมดอทเป็น 2:00 min, 2:03 min, 2:07 min และ 1:59 min ตามลำดับ สุดท้ายจึงปลูกชั้น GaAs 100 nm ก่อนที่จะลดอุณหภูมิผิวหน้าลงอย่างฉับพลัน

ชั้นงาน D' ((ก) x = 0.5) เป็นโครงสร้างควอนตัมดอท $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ หนา 25 nm มีขั้นตอนการปลูกดังที่ได้อธิบายไปในบทที่ 3 อัตราการปลูกของ Ga = 0.2 ML/s และของ In = 0.05 ML/s ชั้น $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 25 nm จึงใช้เวลาปลูก 5:49 นาที ตามด้วย GI 10 s ส่วนชั้นแทรก GaAs 10 nm ที่ตามมาใช้เวลาปลูก 2:15 min ตามด้วย GI = 30 s ก่อนที่จะปลูกควอนตัมดอท $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ เปลี่ยนอัตราการปลูกของ Ga เป็น 0.05 ML/s โดยใช้เวลา 38:40 s สุดท้ายจึงปลูกชั้น GaAs 100 nm ก่อนที่จะลดอุณหภูมิผิวหน้าลงอย่างฉับพลัน

ชั้นงาน E' ((ข) x = 0.5) เป็นโครงสร้างควอนตัมดอท $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ หนา 25 nm มีขั้นตอนการปลูกดังที่ได้อธิบายไปในบทที่ 3 อัตราการปลูกของ Ga = 0.2 ML/s และของ In = 0.05 ML/s ชั้น $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 25 nm จึงใช้เวลาปลูก 5:49 นาที ตามด้วย GI 10 s ส่วนชั้นแทรก GaAs 10 nm ที่ตามมาใช้เวลาปลูก 2:15 min ตามด้วย GI = 30 s ก่อนที่จะปลูกควอนตัมดอท InAs 1.7 ML เปลี่ยนอัตราการปลูกของ Ga เป็น 0.05 ML/s โดยใช้เวลา 37:02 s จากนั้นปลูกชั้นแทรก GaAs 10 nm และชั้นควอนตัมดอท InAs ซ้อนทับชั้นนี้อีก 2 ชั้น เวลาในการก่อตัวของควอนตัมดอทเป็น 34:88 s และ 34:62 s ตามลำดับ สุดท้ายจึงปลูกชั้น GaAs 100 nm ก่อนที่จะลดอุณหภูมิผิวหน้าลงอย่างฉับพลัน

ชั้นงาน F' ((ค) x = 0.5) เป็นโครงสร้างควอนตัมดอท $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ หนา 25 nm มีขั้นตอนการปลูกดังที่ได้อธิบายไปในบทที่ 3 อัตราการปลูกของ Ga = 0.2 ML/s และของ In = 0.05 ML/s ชั้น $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 25 nm จึงใช้เวลาปลูก 5:49 นาที ตามด้วย GI 10 s ส่วนชั้นแทรก GaAs 10 nm ที่ตามมาใช้เวลาปลูก 2:15 min ตามด้วย GI = 30 s ก่อนที่จะปลูกควอนตัมดอท InAs 1.7 ML เปลี่ยนอัตราการปลูกของ In เป็น 0.01 ML/s โดยใช้เวลา 38:11 s จากนั้นปลูกชั้นแทรก GaAs 10 nm และชั้นควอนตัมดอท InAs ซ้อนทับชั้นนี้อีก 4 ชั้น เวลาในการ

ก่อดัวของควอนตัมดอทเป็น 34:59 s, 36:02 s, 36:80 s, และ 37:28 s ตามลำดับ สุดท้ายจึงปลูกชั้น GaAs 100 nm ก่อนที่จะลดอุณหภูมิผิวหน้าลงอย่างฉับพลัน



ผลงานตีพิมพ์

ผลงานตีพิมพ์ทางวิชาการระดับนานาชาติ

Polarization Anisotropy of Stacked InAs Quantum Dots on InGaAs/GaAs Cross-Hatch Patterns. T. Chokamnuai, P. Rattanadon, S. Thainoi, S. Panyakeow and S. Kanjanachuchai. *Journal of Crystal Growth.* 378 (2013) : 524–528

ผลงานตีพิมพ์ทางวิชาการระดับชาติ

Nanoholes formation by thin capping of InAs quantum dots grown on cross-hatch patterns. T. Chokamnuai, S. Kanjanachuchai and S. Panyakeow. *Proceeding of the 34th Electrical Engineering Conference (2011), Nakhon Nayok, Thailand.*

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายฐิติพงษ์ โชคอำนวย อาศัยอยู่บ้านเลขที่ 59/111 ซอยประเสริฐมนูกิจ 27 ถนนประเสริฐมนูกิจ แขวงจรเข้บัว เขตลาดพร้าว จังหวัดกรุงเทพมหานคร จบการศึกษาระดับมัธยมจากโรงเรียนสตรีวิทยา 2 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีบัณฑิต จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2552 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY