

สมบัติเชิงแสงของชั้นควอนตัมคอตินเดียมอาร์เซไนด์ที่ปลูกซ้อนทับกันบนพื้นผิวลายตาราง

นายภาณุพงศ์ รัตนดอน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

Optical properties of stacked InAs quantum dots grown on cross-hatch patterns

Mr. Panupong Rattanadon

A Thesis Submitted in Partial Fullfillment 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

สมบัติเชิงแสงของชั้นควอนตัมดอทอินเดียมอาร์เซไนด์
ที่ปลูกซ้อนทับกันบนพื้นผิวลายตาราง

โดย

นายภาณุพงศ์ รัตนคอน

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. ทรงพล กาญจนชูชัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. นพดล นันทวงศ์)

ภาพพิมพ์ รัตนคอน : สมบัติเชิงแสงของชั้นควอนตัมดอทอินเดียมอาร์เซไนด์ที่ปลูกซ้อนทับกันบนพื้นผิวลายตาราง. (Optical properties of stacked InAs quantum dots grown on cross-hatch patterns) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร. ทรงพล กาญจนชูชัย, 80 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาพื้นผิวที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงแสงของควอนตัมดอท InAs และชั้นคั่น GaAs จำนวน 1, 3 และ 5 ชั้น บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของทุกชิ้นงาน สัณฐานวิทยาพื้นผิวถูกศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม เมื่อชั้นคั่น GaAs หนา 10 nm การเพิ่มจำนวนชั้นของ InAs จาก 1 ไป 3 ส่งผลให้ aspect ratio เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ความสูงของควอนตัมดอทเพิ่มขึ้น 2 nm และค่าโพลาไรซ์ (DOP) เพิ่มขึ้น 38% จากการวัดโดยเทคนิคโพลาไรเซชันโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (PPL) อย่างไรก็ตามเมื่อจำนวนชั้นของ InAs เพิ่มจาก 3 ไป 5 aspect ratio จะอ้อมตัวโดยความสูงของควอนตัมดอทลดลง 2 nm และ DOP ลดลงเหลือเพียง 3% ความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าสมบัติโพลาไรซ์ของแสงที่เปล่งออกมาจะถูกกระทบโดย aspect ratio และความสูงของควอนตัมดอทเป็นอย่างมาก

เมื่อปรับความหนาของชั้นคั่น GaAs เปลี่ยนเป็น 6 และ 3 nm aspect ratio ของควอนตัมดอทจากชิ้นงานที่มี InAs 1, 3 และ 5 ชั้น มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อความหนาชั้นคั่น 6 nm แต่จะแตกต่างกันอย่างชัดเจนที่ความหนาของชั้นคั่น 3 nm ความสูงเฉลี่ยควอนตัมดอทของชิ้นงานที่ความหนาชั้นคั่น 6 และ 3 nm มีการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายกันคือ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนชั้นเพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 3 ชั้น แต่จะลดลงเมื่อจำนวนชั้นเพิ่มขึ้นเป็น 5 ชั้น ความสูงเฉลี่ยควอนตัมดอทของชิ้นงานที่ความหนาชั้นคั่น 6 nm สูงกว่าชั้นที่ความหนาชั้นคั่น 3 nm จากความเครียดที่เพิ่มขึ้นของการลดความหนาชั้นคั่น ทำให้ควอนตัมดอทก่อตัวได้เร็วขึ้น การเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาพื้นผิวดังกล่าวจะทำให้เราสามารถปรับปรุงสมบัติโพลาไรซ์ของแสงที่เปล่งออกมาได้เพิ่มเติม

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าลายมือชื่อ.....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้าลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา 2556.....

5470325221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : QUANTUM DOT / InAs / InGaAs / CROSS-HATCH PATTERNS / GaAs
 SPACER/ PHOTOLUMINESCENCE / POLARIZATION / AFM

PANUPONG RATTANADON : OPTICAL PROPERTIES OF STACKED InAs
 QUANTUM DOTS GROWTH ON CROSS-HATCH PATTERN. ADVISOR :
 ASSOC. PROF. SONGPOL KANJANACHUCHAI, DR., 80 pp.

This thesis reports the effect that morphological changes of the 1-, 3- and 5-stack of InAs quantum dots (QD) with GaAs spacer grown on $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ cross-hatch pattern (CHPs), the main structure of this work, have on the optical properties. Surface morphology is characterized by atomic force microscopy. When the GaAs spacer thickness is 10 nm, increasing the number of stack from 1 to 3 results in a rapid increase of the aspect ratio, a 2-nm increase of QD height, and 38% increase of the degree of polarization (DOP) of the output emission as measured by polarization photoluminescence (PPL) measurements. As the number of stack increases from 3 to 5, however, the aspect ratio saturates, QD height decreases by 2 nm, and the DOP drops to 3%. The polarization of output emission is thus significantly affected by aspect ratio and QD height.

When the GaAs spacer thickness changes to 6 and 3 nm, the aspect ratio of the 1-, 3- and 5-stack samples are approximately the same in the case of the 6-nm spacer, but are distinctly different in the case of the 3-nm spacer. The changes of QD average heights for the 6- and 3-nm GaAs spacer samples are similar: increases as the number of stack increases from 1 to 3, but decreases as the number of stack increases to 5. The average QD height for the 6-nm spacer samples is greater than those for the 3-nm spacer samples as a result of increasing strain which in turn accelerates the QD self-assembly process. These surface morphological changes allow further engineering of the polarization property of the emission.

Department: Electrical Engineering..... Student's Signature

Field of Study: Electrical Engineering..... Advisor's Signature

Academic Year: 2013.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีอาจสำเร็จได้ตามเป้าหมายที่วางไว้ หากปราศจากอุปกรณ์ และเครื่องมือสำหรับทำวิจัย ความช่วยเหลือและสนับสนุนจากผู้มีพระคุณทั้งหลายจาก ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้เขียนขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร. ทรงพล กาญจนชูชัย ที่สละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำปรึกษา ช่วยเหลือ และแนะนำสิ่งที่มีประโยชน์ต่อข้าพเจ้าทั้งเรื่องการเรียนรู้และการใช้ชีวิตจนกระทั่งจบการศึกษาระดับปริญญาโท

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

ผู้เขียนขอขอบคุณพี่ๆ ห้องธุรการที่ให้ความช่วยเหลือด้านงานธุรการ อุปกรณ์ งานเทคนิค และแนะนำสิ่งที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ประกอบไปด้วย พี่ศุภโชค และพี่ขวัญเรือน ไทยน้อย พี่พัฒนา พันธวงษ์ และพี่พรชัย ช่างม่วง

ผู้เขียนขอขอบคุณสมาชิกห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ที่ให้ความช่วยเหลือและแนะนำสิ่งที่เป็นประโยชน์

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณครอบครัวประกอบไปด้วย บิดา มารดา พี่ชาย พี่สาว และบุคคลอันเป็นที่รัก ที่คอยให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ และสนับสนุนข้าพเจ้าอย่างดีตลอดมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้พื้นฐาน.....	4
2.1 ควอนตัมคอต.....	4
2.2 ความเครียดและการคลายความเครียด.....	9
2.3 พื้นผิวลายตาราง.....	11
2.4 Luminescence.....	16
2.4.1 Macro PL.....	16
2.4.2 PPL.....	21
บทที่ 3 การสังเคราะห์และวัดสมบัติของชิ้นงาน.....	23
3.1 ระบบปลูกผลึกด้วยเครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล.....	23
3.1.1 เครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล.....	24
3.1.2 RHEED.....	26
3.1.3 QMS.....	27
3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์ชิ้นงาน.....	27
3.2.1 Pre-Heat.....	28

3.2.2 De-gas.....	28
3.2.3 De-ox.....	29
3.2.4 การหาอุณหภูมิจริงของผิวหน้า.....	31
3.2.5 การกำหนดอัตราการปลูก.....	32
3.2.6 การปลูกโครงสร้าง.....	33
3.2.6.1 โครงสร้างก้อนผลึก.....	33
3.2.6.2 โครงสร้างลายตาราง.....	34
3.2.6.3 โครงสร้างควอนตัมดอต.....	34
3.2.6.4 โครงสร้างชั้นกลบ.....	35
3.3 การวัดลักษณะสมบัติของชิ้นงาน.....	35
3.3.1 ระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence : PL).....	35
3.3.2 การวัดลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope : AFM).....	38
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	40
4.1 ผลการวัดและวิเคราะห์สมบัติเชิงแสงของโครงสร้างเดิมจากในอดีต ด้วยเทคนิค PL และ PPL.....	40
4.1.1 สันฐานวิทยาของพื้นผิว.....	41
4.1.2 สมบัติเชิงแสงโดยเทคนิค PL แบบปกติ.....	43
4.1.2.1 Power Dependent.....	43
4.1.2.2 Temperature Dependent.....	44
4.1.3 สมบัติเชิงแสงโดยเทคนิค PPL.....	46
4.2 ผลการวัดและวิเคราะห์สันฐานวิทยาพื้นผิวของโครงสร้างใหม่ ด้วยเทคนิค AFM.....	49

บทที่ 5 สรุป.....	57
รายการอ้างอิง.....	60
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	66

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมบัติทางกายภาพของ InAs, GaAs และ $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$	5
4.1	ความหนาของชั้นกั้น GaAs (d) และจำนวนชั้นของ QDs (x) ของชั้นงาน 301A B C และ 303A B C.....	50

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างทางกายรูปและความหนาแน่นสถานะของ ก) ก้อนผลึก ข) ควอนตัม เวลล์ ค) ควอนตัมไวร์ และ ง) ควอนตัมดอต..... 4
2.2	แผนภาพเฟสสมดุล (Equilibrium Phase Diagram) ในรูปแบบของฟังก์ชันระหว่าง ความหนา (H) และความเครียด (E) ภาพด้านบนและด้านล่างแสดงถึงลักษณะ โครงสร้างของผิวหน้าในโหมดต่างๆ ทั้ง 6 โหมด สามเหลี่ยมเล็กแสดงเกาะที่มี เสถียรภาพ ขณะที่สามเหลี่ยมใหญ่แสดงเกาะที่โตเต็มที่ (Ripening island) โดย กราฟจะแสดงโหมดการปลูกในแต่ละเฟสของกราฟ ซึ่งถูกแบ่งด้วยเส้นขอบเขต $H_{C1}(E) : FM-R_1, FM-SK_1; H_{C2}(E) : SK_1-R_2; H_{C3}(E) : SK_2-SK_1; H_{C4}(E) : VW-SK_2,$ $VW-R_3$ 6
2.3	ลักษณะการเกิดควอนตัมดอต InAs บนแผ่นฐาน GaAs แบบ SK..... 8
2.4	แผนภาพ ก) แสดง misfit dislocation และ threading dislocation ที่เกิดขึ้นในการ ปลูกผลึก ข) แสดง dislocation vector ที่เกิดจาก edge และ screw dislocation..... 10
2.5	ภาพตัดขวางแสดง MD และ TD ก) เมื่อ $H < H_c$ เกิด TD แต่ไม่มี MD เกิดขึ้น เมื่อ $H > H_c$ ข) TD เริ่มเคลื่อนตัวและทำให้ MD ยาวขึ้นเป็นระยะ $\Delta\lambda$ ค) TD เคลื่อน ตัวมาพบ MD ขวางอยู่และหยุดเคลื่อนที่..... 10
2.6	ภาพตัดขวางแสดงกระบวนการเกิดพื้นผิวลายตาราง..... 11
2.7	ภาพ AFM แสดง ก) ผิวหน้าของควอนตัมดอต Ge บน SiGe/Si (100) และ ข) ผิว หน้าของควอนตัมดอต InAs บน $In_{0.2}Ga_{0.8}As/Ga$ 12
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาวิกฤตของชั้น $In_xGa_{1-x}As$ (Monolayer) ที่ปลูกบน ชั้นของ GaAs กับสัดส่วนของ In..... 13
2.9	ภาพ AFM แสดงควอนตัมดอต InAs บนพื้นผิวลายตาราง $In_xGa_{1-x}As$ เมื่อ x มีค่า (ก) 0.08, (ข) 0.10, (ค) 0.16 และ (ง) 0.20 ตามลำดับ..... 14

รูปที่	หน้า	
2.10	ภาพ AFM แสดงควอนตัมดอท InAs บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นลายตารางที่ (ก) 50 nm, (ข) 100 nm และ (ค) 150 nm.....	14
2.11	ภาพ AFM ของควอนตัมดอท InAs บน $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ เมื่อเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาขัดจังหวะการปลูกที่ (ก) 0, (ข) 30 และ 60 วินาที.....	15
2.12	ภาพ AFM แสดง (ก) ควอนตัมดอท InAs บน $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ หนา 50 nm และจากการทำ Image thresholding โดยค่า threshold ที่ (ข) 5.5-, (ค) 4.9-, (ง) 4.0- และ (จ) 3.0 nm สีขาวและสีดำหมายถึงบริเวณที่ความสูงมีค่าต่ำกว่าและสูงกว่าค่า threshold.....	16
2.13	ผลการเปล่งแสงของควอนตัมดอท InAs บน $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาที่ 50, 100 และ 150 nm กำหนดค่าอุณหภูมิคงตัวที่ 77 K และค่าพลังงานของแสงกระตุ้นคงตัวที่ 200 mW.....	17
2.14	ผลการเปล่งแสงของชั้นงาน G ที่ค่าอุณหภูมิคงตัวที่ 20 K และเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานของแสงกระตุ้นที่ 2, 5, 10, 15 และ 20 mW.....	18
2.15	ผลการเปล่งแสงของชั้นงาน G โดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการวัดที่ 20-200 K.....	18
2.16	แสดงผลการเปล่งแสงของชั้นงาน G เมื่อเปลี่ยนแปลงมุมในการวัด ด้วย Polarizer กำหนดค่าอุณหภูมิคงตัวที่ 20 K และค่าพลังงานของแสงกระตุ้นคงตัวที่ 40mW.....	19
2.17	ก) ผลการเปล่งแสงของชั้นงาน A (ควอนตัมดอท InAs ควบคุมขนาด 1.7 ML), ชั้นงาน B (ลายตารางควบคุม $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ หนา 50 nm), ชั้นงาน C และ D ที่มีโครงสร้างเหมือนกัน (ควอนตัมดอทบนลายตาราง $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ หนา 50 nm) ข) ผลการเปล่งแสงของชั้นงาน D จากการวัดด้วยระบบ Macro PL และจากการทำ multiple Gaussian function ของข้อมูลที่วัดได้.....	20
2.18	เปรียบเทียบผลการเปล่งแสงของควอนตัมดอทขนาด ก) 1 ML และ ข) 2 ML ที่ค่าอุณหภูมิคงตัว 10 K ด้วยวิธีวัดแบบ Micro Photoluminescence.....	22
3.1	แผนภาพโครงสร้างเครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล.....	23
3.2	แผนภาพโครงสร้างภายในห้องปลูกผลึก.....	24

รูปที่	หน้า
3.3	แผนผังแสดงระบบ RHEED..... 26
3.4	รูปแบบ RHEED ที่สถานะต่างๆ (ก) ผิวหน้า GaAs ที่ ขรุขระ (ข) ผิวหน้า GaAs ที่เรียบ (ค) ผิวหน้าที่มี InAs QD..... 26
3.5	การทำงานของ Quadrupole mass analyze..... 27
3.6	โปรไฟล์อุณหภูมิสำหรับกระบวนการ Pre-Heat..... 28
3.7	โปรไฟล์อุณหภูมิสำหรับกระบวนการ De-gas..... 29
3.8	โปรไฟล์อุณหภูมิสำหรับกระบวนการ De-ox..... 30
3.9	โปรไฟล์อุณหภูมิในการกำหนดอุณหภูมิจริงของผิวหน้า และ RHEED patterns ณ จุดสำคัญ..... 31
3.10	(ก) การก่อดั้วของ GaAs บน GaAs(001) จาก A ไป E (ข) ความสว่างของ specular beam จาก A ไป E (ค) การสั้นของความสว่างของ specular beam ขณะปลูก GaAs ลงบน GaAs(001)..... 33
3.11	กระบวนการแปลงแสงของระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์..... 35
3.12	แผนภาพเค้าร่างของระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์..... 36
3.13	(ก) กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope : AFM) Seiko รุ่น SPA-400 (ข) แผนภาพการทำงานอย่างง่ายของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม..... 38
4.1	ภาพตัดขวางแสดงลักษณะ โครงสร้างของชิ้นงาน ก) A (F05C) ข) B (F05B) และ ค) C (F05A)..... 41
4.2	ภาพ AFM ขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ (รูปแทรกขนาด $1 \times 1 \mu\text{m}^2$) ของชิ้นงาน ก) A ข) B และ ค) C..... 42
4.3	สเปกตรัม PL ของ ชิ้นงาน ก) A, ข) B และ ค) C ที่อุณหภูมิ 20 K และพลังงาน กระตุ้น 20, 50 และ 200 mW..... 43
4.4	สเปกตรัม PL ของชิ้นงาน ก) A, ข) B และ ค) C จากการวัดแบบ Temperature Dependent 44

รูปที่	หน้า
4.5	การเปลี่ยนแปลงระหว่างพลังงานและอุณหภูมิของชั้นงาน ก) 301A, ข) 301B และ ค) 301C จากค่ายอดพลังงานของควอนตัมดอตบนเส้นลายตารางและชั้นลายตาราง เทียบกับ Varshni..... 45
4.6	สเปกตรัม PL ของชั้นงาน A, B และ C เมื่อกำหนดอุณหภูมิกงตัวที่ 20 K และค่าพลังงานกระตุ้นคงตัวที่ 50 mW..... 46
4.7	ผลการเปล่งแสงโพลาไรซ์ของชั้นงาน ก) A ข) B และ ค) C เมื่อวัดด้วยระบบ PPL. 47
4.8	ผลการเปล่งแสงของโครงสร้างควอนตัมดอต InAs และชั้นชั้น GaAs ขนาด 10 nm จำนวน 3 ชั้น เมื่อวัดด้วยระบบ PPL ในรูปแบบ 3 มิติ..... 48
4.9	แสดงการเปลี่ยนแปลงของ ก) ค่าโพลาไรซ์ของควอนตัมดอตและพื้นผิวลายตาราง ข) aspect ratio และความสูงของควอนตัมดอต เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนชั้นการปลูก..... 49
4.10	ภาพ AFM ขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ และ $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ ของโครงสร้าง ก) ควอนตัมดอต InAs 1.7 ML อัตราการปลูก 0.1 ML/s และชั้นชั้น GaAs ขนาด 6 nm บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ขนาด 25 nm ข) ควอนตัมดอต InAs 1.7 ML อัตราการปลูก 0.01 ML/s และชั้นชั้น GaAs ขนาด 6 nm บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ขนาด 35 nm..... 51
4.11	ภาพตัดขวางแสดงลักษณะโครงสร้างของชั้นงาน 301A B C และ 303A B C..... 51
4.12	ภาพ AFM ขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ ของชั้นงาน ก) 301A ข) 301B และ ค) 301C..... 52
4.13	ภาพ AFM ขนาด $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ และภาพตัดขวางในทิศ [1-10] (บริเวณเส้นประ) ของ ชั้นงาน ก) 301A, ข) 301B และ ค) 301C..... 53
4.14	ภาพ AFM ขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ ของชั้นงาน ก) 303A ข) 303B และ ค) 303C 54
4.15	ภาพ AFM ขนาด $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ และภาพตัดขวางในทิศ [1-10] (บริเวณเส้นประ) ของ ชั้นงาน ก) 303A, ข) 303B และ ค) 303C..... 55
4.16	แสดงการเปลี่ยนแปลง ก) aspect ratio และ ข) ความสูงของควอนตัมดอตของชุดชั้นงาน 301 และ 303..... 56

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโดยเฉพาะอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ได้ถูกพัฒนาให้มีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ เช่น อุปกรณ์สื่อสาร คอมพิวเตอร์ เป็นต้น โดยสิ่งเหล่านี้เป็นปัจจัยที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ส่วนมาก และสิ่งที่เหมือนกันในการสร้างอุปกรณ์เหล่านี้คือ การทำให้มีขนาดเล็กลง มีสมรรถนะสูงขึ้น และสิ่งที่สำคัญที่สุดคือ ราคาที่คนส่วนมากสามารถซื้อได้ ในการสร้างอุปกรณ์เหล่านี้จากอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์กำลังถึงทางตัน จึงมีการคิดค้นโครงสร้างระดับนาโนเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงในอนาคต และโครงสร้างที่มีการศึกษาและพัฒนาเพื่อใช้งานในสิ่งประดิษฐ์เหล่านี้คือ โครงสร้างควอนตัมดอต (Quantum Dot : QD) เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่มีการกักเก็บพาหะได้ทุกทิศทาง และพลังงานของพาหะมีลักษณะไม่ต่อเนื่องจึงเป็นสมบัติที่ทำให้เกิดการเปล่งแสงเมื่อมีพลังงานมากระตุ้น ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่นำมาประยุกต์ใช้กับสิ่งประดิษฐ์ทางแสง เช่น กล้องในโทรศัพท์ จอภาพ เลเซอร์ เซลล์แสงอาทิตย์ และดีเทคเตอร์ [1-3] เป็นต้น

การสร้างควอนตัมดอตสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีคือ 1) วิธี top-down ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถควบคุมขนาดและการจัดเรียงตัวของควอนตัมดอต ด้วยกระบวนการต่างๆ เช่น ลิโธกราฟี (lithography) [4] แต่วิธีนี้เกิดความบกพร่องของผลึก (defect) ส่งผลให้เกิด non-radiative recombination center ซึ่งลดทอนสมบัติทางแสง 2) วิธี bottom-up ใช้กระบวนการปลูกผลึกเดี่ยวในรูปแบบของฟิล์มบางลงบนแผ่นฐานที่เรียกว่า เอพิแทกซี (epitaxy) โดยควอนตัมดอตมีการก่อตัวแบบประกอบตัวเอง (self-assembled) ด้วยกระบวนการทางธรรมชาติจากความไม่เข้ากันของแลตทิซ (lattice mismatch) สารที่ปลูกกับแผ่นฐานเรียกว่า เฮเทอโรเอพิแทกซี (heteroepitaxy)

กระบวนการเอพิแทกซีสามารถแบ่งตามสถานะของสารตั้งต้นที่ใช้ปลูก โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้เทคนิคการปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy : MBE) เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีความละเอียดในการปลูกสูงระดับมอโนเลเยอร์ต่อวินาที และยังให้ความบริสุทธิ์ของชั้นงานสูง เนื่องจากปลูกภายใต้ภาวะสุญญากาศสูงยิ่ง ควอนตัมดอตที่ก่อตัวขึ้นมี

รูปแบบการเกิดแบบสุ่มทั่วผิวหน้าของชั้นงานสามารถไปใช้กับสิ่งประดิษฐ์ที่ไม่ต้องการความเป็นระเบียบของการจัดเรียงตัว และขนาดที่สม่ำเสมอของควอนตัมดอท [5] ควอนตัมดอทสามารถเกิดได้จากสารประกอบในหลายกลุ่ม เช่น ควอนตัมดอท CdSe บน ZnSe หรือ CdTe บน ZnTe [6-7] จากสารประกอบในหมู่ II-VI, ควอนตัมดอท InAs บน GaAs [8] จากสารประกอบในหมู่ III-V และควอนตัมดอท Ge บน Si จากสารประกอบในหมู่ IV-IV [9] เป็นต้น สำหรับโครงสร้างที่ต้องการความเป็นระเบียบของควอนตัมดอท สามารถปลูกควอนตัมดอทลงบนพื้นผิวลายตาราง (cross-hatch pattern : CHP) ซึ่งเกิดจากการปลูกสารที่มีค่าคงตัวผลึกแตกต่างจากแผ่นฐานเล็กน้อย ส่งผลให้เกิด Misfit dislocation (MD) บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นเอพิ (epilayer) กับแผ่นฐาน ซึ่งในผลึก III-V จะมีลักษณะเป็นเส้นยาวทำมุม 60° กับแผ่นฐาน และเหนี่ยวนำให้เกิด Threading dislocation (TD) บริเวณผิวหน้าของชั้นปลูก TD จะปรากฏที่ผิวหน้าก็ต่อเมื่อความหนาของชั้นปลูกมีค่ามากกว่าความหนาวิกฤต ผิวหน้าที่ได้มีลักษณะเป็นลอนและเป็นลายทาง (stripes) ยาวไปในทิศ $[110]$ และ $[\bar{1}10]$ ซึ่งตั้งฉากกัน ทิศทางที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการเคลื่อนตัวของ MD และ TD ธรรมชาติของการเกิดของ MD และ TD มีรูปแบบการเกิดแบบสุ่ม ส่งผลให้เส้นลายตารางที่ปรากฏบนผิวหน้าของชั้นงานมีการเกิดแบบสุ่มเช่นเดียวกัน แม้ว่าจะไม่สามารถกำหนดบริเวณการเกิดของเส้นลายตารางได้ แต่เราสามารถควบคุมความหนาแน่นของเส้นลายตารางได้จากการเปลี่ยนแปลงเศษส่วน โมล (molar fraction) ของสารประกอบ และความหนาของชั้นเอพิ [10-11]

ชั้นลายตารางสามารถสังเคราะห์ได้จากสารประกอบในหลายกลุ่มเช่นเดียวกับควอนตัมดอท เช่น ควอนตัมดอท InAs บนแผ่นฐานลายตาราง $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ จากสารประกอบในกลุ่ม III-V [11-13] และควอนตัมดอท Ge บนแผ่นฐานลายตาราง $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ จากสารประกอบในกลุ่ม IV-IV [14-15] เป็นต้น ผลการปลูกที่ได้มักถูกนำมาวัดสมบัติทางกายภาพโดยจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy : AFM) [16] และวัดสมบัติเชิงแสงโดยระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence : PL) [17-19] ควอนตัมดอทบางชนิดสามารถเปล่งแสงที่มีสมบัติโพลาไรเซชัน โดยขึ้นอยู่กับขนาดและโครงสร้างของควอนตัมดอท ซึ่งโดยส่วนมากพบได้ในโครงสร้างของควอนตัมดอทที่มีความเป็นระเบียบ และขนาดที่แตกต่างกันให้ผลการเปล่งแสงที่

แตกต่างกัน จากผลการศึกษาดังกล่าวเป็นการแสดงถึงความสำคัญของสมบัติทางกายภาพที่มีผลต่อสมบัติเชิงแสง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้รายงานผลการวิจัยการปลูกและวัดลักษณะสมบัติของโครงสร้างควอนตัมดอท InAs และชั้นกั้น GaAs ที่ซ้อนทับกันจำนวน 1, 3 และ 5 ชั้นบนแผ่นฐานลายตาราง $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ โครงสร้างถูกสังเคราะห์โดยเทคนิคการปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล และหลังจากนั้นจะถูกวัดและวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงแสง การวัดสมบัติเชิงแสงมี 2 รูปแบบคือ 1) การวัดโดยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence : PL) เพื่อศึกษาสมบัติเชิงแสงที่ขึ้นงานเปล่งออกมาในภาพรวม และ 2) การวัดโดยเทคนิคโพลาไรเซชันโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Polarization Photoluminescence : PPL) เพื่อวิเคราะห์เชิงลึกถึงความเข้มแสงที่ขึ้นงานเปล่งออกมาในแต่ละมุม

โครงสร้างของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ในส่วนต่อไปประกอบไปด้วย บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้พื้นฐาน บทที่ 3 การสังเคราะห์และวัดลักษณะสมบัติของชั้นงาน โดยอธิบายรายละเอียดของการสังเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค MBE และรายละเอียดของการวัดสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงแสง โดย AFM, PL และ PPL ตามลำดับ บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ ซึ่งได้สรุปรายละเอียดจากการวิเคราะห์ผลการทดลองไว้ในบทที่ 5

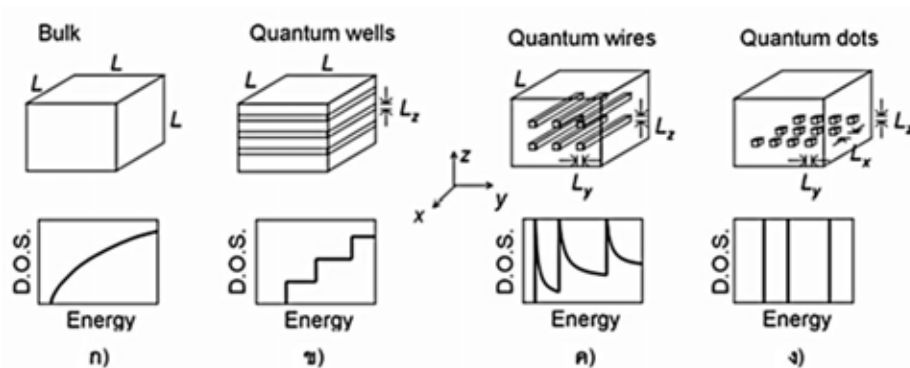
บทที่ 2

ทฤษฎีและความรู้พื้นฐาน

เนื้อหาในบทนี้จะอธิบายทฤษฎีและความรู้พื้นฐานที่จำเป็นต่อการอธิบายผลการทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบไปด้วย 2.1) ควอนตัมดอต 2.2) ความเครียดและการคลายความเครียด 2.3) พื้นผิวฉายดาว และ 2.4) Luminescence ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ควอนตัมดอต

ควอนตัมดอตเป็นโครงสร้างขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรที่จำแนกจากมิติของความเป็นอิสระ (Degree of freedom) โดยโครงสร้างขนาดใหญ่หรือแบบก้อนผลึก (bulk) เป็นโครงสร้างที่พาหะสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในทุกทิศทางหรือ 3 มิติ ดังรูปที่ 2.1(ก) และโครงสร้างขนาดเล็กคือ โครงสร้างควอนตัมเวลล์ (Quantum Well), โครงสร้างควอนตัมไวร์ (Quantum wire) และโครงสร้างควอนตัมดอต (Quantum dot) เป็นโครงสร้างที่พาหะสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระใน 2, 1 และ 0 มิติ ดังรูปที่ 2.1(ข), 2.1(ค) และ 2.1(ง) ตามลำดับ โครงสร้างควอนตัมดอตมีขนาดเล็กในทุกทิศทางและมีความหนาแน่นของสถานะ (density of state) แบบไม่ต่อเนื่อง (Quantized state) คือเป็น Delta function [20] ดังรูปที่ 2.1(ง) ควอนตัมดอตถูกนำไปประยุกต์ใช้ในสิ่งประดิษฐ์ทางแสงอย่างแพร่หลาย สมบัติเชิงแสงของควอนตัมดอตสามารถควบคุมได้โดยการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของควอนตัมดอต เช่น ขนาด ความสูง รูปแบบการก่อตัว



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางกายภาพและความหนาแน่นสถานะของ ก) ก้อนผลึก ข) ควอนตัมเวลล์

ค) ควอนตัมไวร์ และ ง) ควอนตัมดอต [21]

การสร้างานที่มีโครงสร้างควอนตัมดอตจะใช้กระบวนการปลูกผลึกเดี่ยวในลักษณะของฟิล์มบางลงบนแผ่นฐานที่เรียกว่า เอพิแทกซี ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด โดยจำแนกตามองค์ประกอบของสารที่ปลูกผลึกและแผ่นฐานคือ 1) โฮโมเอพิแทกซี (homoepitaxy) เป็นกระบวนการปลูกผลึกที่สารที่ปลูกและแผ่นฐานมีองค์ประกอบของสารเหมือนกันทำให้การปลูกเกิดความเข้ากันของผลึก (lattice match) และ 2) เฮเทอโรเอพิแทกซี (heteroepitaxy) เป็นกระบวนการปลูกผลึกที่สารที่ปลูกและแผ่นฐานมีองค์ประกอบของสารที่แตกต่างกัน ทำให้การปลูกอาจเกิดความเข้ากันหรือไม่เข้ากันของผลึก (lattice mismatch) เมื่อแบ่งตามสถานะของสารตั้งต้นที่ใช้ในการปลูก เอพิแทกซีจะแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ 1) เทคนิคการปลูกแบบสถานะไอ (Vapor Phase Epitaxy : VPE) 2) เทคนิคการปลูกแบบสถานะของเหลว (Liquid Phase Epitaxy : LPE) และ 3) เทคนิคการปลูกแบบลำโมเลกุล (Molecular Phase Epitaxy : MBE) เทคนิคที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์คือ MBE เพราะเป็นเทคนิคที่มีความละเอียดในการปลูกสูงระดับมอโนเลเยอร์ต่อวินาที และมีความบริสุทธิ์ของชั้นงานสูงเนื่องจากปลูกภายใต้ภาวะสุญญากาศสูงยิ่ง ซึ่งแสดงรายละเอียดในหัวข้อ 3.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของ InAs, GaAs และ $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ [22]

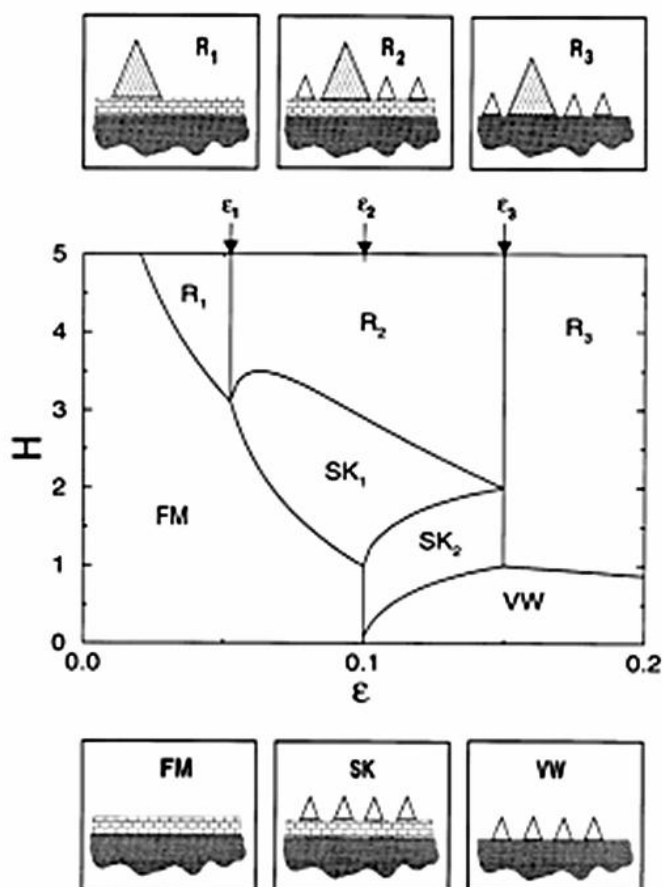
Material	Band Gap (eV) at 300 K	Lattice (Å)
GaAs	1.424	5.6533
InAs	0.354	6.0584
$\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$	1.140	5.7343

สารประกอบกึ่งตัวนำที่สำคัญต่องานในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ InAs, GaAs และ $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ซึ่งเมื่อปลูกลงบนแผ่นฐาน GaAs แล้วจะเกิดความไม่เข้ากันของผลึกในกรณีที่ทำกรปลูกชั้น InAs และ $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ เนื่องจากสารประกอบทั้ง 2 มีค่าคงตัวแลตทิซ (lattice constant : a) ที่แตกต่างจากแผ่นฐาน ดังตารางที่ 2.1 โดยค่าคงตัวแลตทิซคือ ระยะห่างระหว่าง Unit cell เมื่อวัดจากจุดศูนย์กลางของอะตอมริมสุดด้านหนึ่งไปถึงริมสุดอีกด้านของ unit cell ชั้นที่ปลูกขึ้นจะก่อตัวกันเป็นฟิล์มบาง (thin film) หรือควอนตัมดอตขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยหลักคือ ความหนาของชั้นผลึก

(Thickness : H) และความเครียดจากความไม่เข้ากันของผลึก (Misfit strain : ϵ) โดยค่าความเครียดหาได้จากสมการ

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

เมื่อ a_s และ a_f คือ ค่าคงตัวแลตทิซของแผ่นฐานและของสารที่ปลูก ตามลำดับ [23]



รูปที่ 2.2 แผนภาพเฟสสมดุล (Equilibrium Phase Diagram) ในรูปแบบของฟังก์ชันระหว่าง ความหนา (H) และความเครียด (ϵ) ภาพด้านบนและด้านล่างแสดงถึงลักษณะโครงสร้างของผิวหน้าใน โหมดต่างๆ ทั้ง 6 โหมด สามเหลี่ยมเล็กแสดงเกาะที่มีเสถียรภาพ ขณะที่สามเหลี่ยมใหญ่แสดงเกาะที่ โตเต็มที่ (Ripening island) โดยกราฟจะแสดงโหมดการปลูกในแต่ละเฟสของกราฟ ซึ่งถูกแบ่งด้วย เส้นขอบเขต $H_{C1}(\epsilon)$: FM-R₁, FM-SK₁; $H_{C2}(\epsilon)$: SK₁-R₂; $H_{C3}(\epsilon)$: SK₂-SK₁; $H_{C4}(\epsilon)$: VW-SK₂, VW-R₃ [23]

รูปที่ 2.2 แสดงโหมดการปลูกในรูปแบบต่างๆ ที่เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาของชั้นผลึก (H) และความเครียด (ϵ) โดยแบ่งออกเป็น 6 โหมด ดังนี้

1. Frank-van de Merwe (FM) เมื่อความเครียดจากค่าความไม่เข้ากันของค่าคงที่ผลึกมีค่า $\epsilon < 0.1$ ส่งผลให้ผลึกมีการก่อตัวแบบชั้นต่อชั้นในรูปแบบสองมิติที่สมบูรณ์

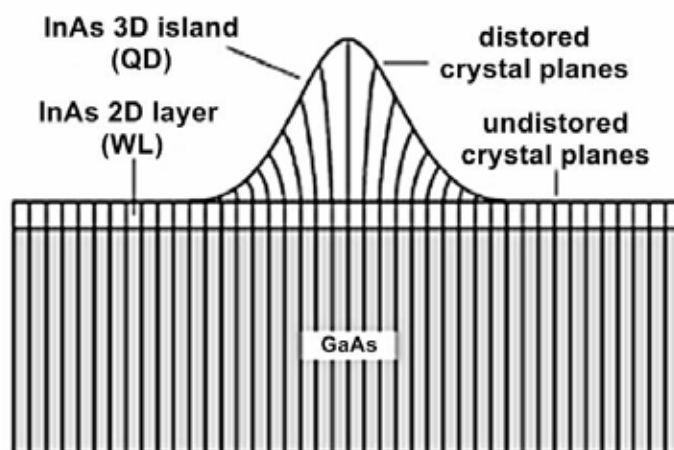
2. Stranski-Krastanov (SK) เมื่อความเครียดจากค่าความไม่เข้ากันของผลึกของสารอยู่ในช่วงประมาณ $0.05 < \epsilon < 0.15$ ทำให้ผลึกเกิดการก่อตัวเป็นโครงสร้างแบบสองมิติ ที่เรียกว่า wetting layer (WL) จนกระทั่งความเครียดสะสมจนถึงค่าๆ หนึ่งเรียกว่า ค่าความหนาวิกฤต (critical thickness : H_c) จะเกิดการคลายความเครียดเพื่อคลายพลังงานรวมของระบบ ส่งผลให้ผลึกมีการก่อตัวเป็นโครงสร้างแบบสามมิติหรือควอนตัมดอท (QD) ขึ้นมา การก่อตัวของผลึกทั้งรูปแบบสองและสามมิติ ของโหมด SK มีรูปแบบการก่อตัวของผลึกแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ เมื่อจำแนกจากลำดับรูปแบบการก่อตัวของผลึกดังนี้คือ โหมด SK_1 จะมีการก่อตัวของชั้นผลึกในรูปแบบสองมิตีก่อนแล้วจึงก่อตัวในรูปแบบสามมิติ ส่วนโหมด SK_2 มีการก่อตัวของชั้นผลึกในรูปแบบสามมิตีก่อนแล้วจึงก่อตัวในรูปแบบสองมิติ ผลลัพธ์ที่ได้จากการก่อตัวของทั้ง 2 รูปแบบมีสมบัติเหมือนกัน

3. Volmer-Weber (VW) เมื่อความเครียดจากค่าความไม่เข้ากันของผลึกมีค่า $\epsilon > 0.1$ ทำให้ชั้นผลึกเกิดการคลายความเครียดทันทีเกิดเป็นเกาะสามมิติ

4. R_1 เมื่อความเครียดจากค่าความไม่เข้ากันของผลึกมีค่าน้อยกว่า 0.05 หรือ $\epsilon < \epsilon_1$; $\epsilon_1=0.05$ และความหนาของผลึกมีค่ามากกว่า 3 ML โดยประมาณ รูปแบบของโครงสร้างพื้นผิวที่ได้จะมีลักษณะคล้ายกับแบบ SK แต่การก่อตัวของผลึกแบบสามมิติจะมีขนาดใหญ่กว่า เรียกว่า เกาะสามมิติโตเต็มที่ (Ripening island)

5. R_2 เมื่อความเครียดจากค่าความไม่เข้ากันของผลึกมีค่าระหว่าง $0.05 < \epsilon < 0.15$ หรือ $\epsilon_1 < \epsilon < \epsilon_3$ และค่าความหนาของผลึกมีค่ามากกว่า 2-3 ML รูปแบบที่ได้มีลักษณะคล้าย SK แต่การก่อตัวของเกาะจะมีทั้งแบบสามมิติ และสามมิติโตเต็มที่ ซึ่งเป็นการเพิ่มความหนาเกินโหมด SK_1

6. R_3 เมื่อความเครียดจากค่าความไม่เข้ากันของผลึกมีค่ามากกว่า 0.15 หรือ $\epsilon > \epsilon_3$ และค่าความหนาของชั้นผลึกมีค่ามากกว่า 1 ML ทำให้รูปแบบของผลึกมีลักษณะโครงสร้างเป็นทั้งเกาะสามมิติ และเกาะสามมิติโตเต็มที่ ซึ่งเป็นการเพิ่มความหนาเกินโหมด VW



รูปที่ 2.3 ลักษณะการเกิดควอนตัมดอท InAs บนแผ่นฐาน GaAs แบบ SK [24]

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาควอนตัมดอท InAs ที่เกิดจากการประกอบตนเอง (Self-assembled) บนแผ่นฐานตั้งต้น (001)-GaAs ในรูปแบบ SK ซึ่งประกอบไปด้วยโครงสร้างนาโนในรูปแบบสองและสามมิติ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น เนื่องจากค่าคงตัวผลึกของวัสดุที่ปลูก (InAs) ที่ 6.0584 Å และแผ่นฐาน (GaAs) ที่ 5.6533 Å เมื่อนำค่าคงตัวผลึกของสารทั้งสองแทนค่าลงในสมการ 2.1 ทำให้ได้ค่าความไม่เข้ากันของผลึกที่ 7.2% หรือ $\epsilon = 0.072$ ซึ่งจากรูปที่ 2.2 จะอ่านค่า H_c ได้คือ 1.6 ML หากความหนาของชั้นที่ปลูก H ต่ำกว่า H_c ชั้นที่ปลูกได้จะเป็นฟิล์มบาง 2 มิติ แต่หาก $H > H_c$ จะได้ชั้นควอนตัมดอท (QD) บนชั้น WL ดังรูปที่ 2.3

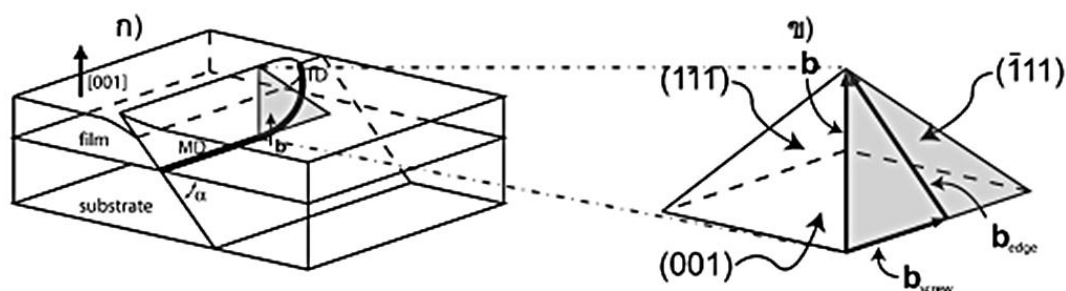
2.2 ความเครียดและการคลายความเครียด

ความเครียดในชั้นเอพิเกิดจากการปลูกสารที่มีองค์ประกอบแตกต่างกันเข้าด้วยกันคือ $a_s \neq a_f$ ในตอนเริ่มต้นของการปลูกสารที่ปลูกจะถูกบังคับให้ก่อตัวอย่างเป็นระเบียบให้เท่ากับค่าคงตัวผลึกของแผ่นฐาน หาก $a_s > a_f$ ชั้นที่ปลูกจะมีความเครียดแบบบีบอัด (compressive strain) แต่หาก $a_s < a_f$ ชั้นที่ปลูกจะมีความเครียดแบบขยาย (tensile strain) เมื่อปลูกชั้นที่หนากว่า H_c ชั้นเอพิ

จะผ่อนคลายความเครียด โดยการแตกหักของพันธะ เกิดจุดที่ก่อตัวกันอย่างผิดปกติเรียกว่า จุดบกพร่อง (defect)

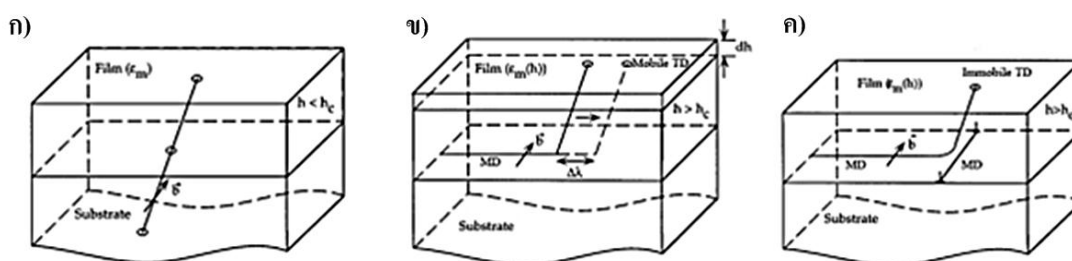
จุดบกพร่องแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบ ได้แก่ จุดบกพร่องแบบจุด (point defect), จุดบกพร่องแบบเส้น (line defect), จุดบกพร่องแบบระนาบ (planar defect) และจุดบกพร่องแบบปริมาตร (volume defect) ที่สำคัญต่อวิธานิพนธ์ฉบับนี้คือ จุดบกพร่องแบบเส้น ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดพื้นผิวลายตาราง และเป็นต้นกำเนิดของ dislocation จุดบกพร่องแบบเส้นเกิดจากการการปลูกผลึกที่มีความไม่เข้ากันของผลึกของสาร ทำให้บริเวณรอยต่อของชั้นปลูกและแผ่นฐานเกิดจุดบกพร่องในลักษณะเป็นแนวยาวของพันธะที่ไม่สมบูรณ์ เรียกว่า misfit dislocation (MD) แนวของพันธะที่ไม่สมบูรณ์ดังกล่าวทำให้ชั้นปลูกของชั้นงานเกิดการจับกันของพันธะในรูปแบบที่เหลื่อมกัน และเกิดเป็นแนวระนาบเลื่อนทำมุม 60° (60° dislocation) กับแผ่นฐาน เรียกว่า slip plane และความต่อเนื่องของแนวการเกิด MD ที่ปรากฏบริเวณผิวหน้าของชั้นปลูกเรียกว่า Surface Step จนกระทั่งทำให้เกิด Threading dislocation (TD) ดังรูปที่ 2.4(ก)

รูปที่ 2.5(ก) เป็น TD ในทิศ $\langle 211 \rangle$ ที่เกิดจากรอยต่อของระนาบทำมุม 60° dislocation ต่อเนื่องมาจากการเกิด MD โดยเกิดจากจุดบกพร่องแบบเส้นของ Screw และ Edge dislocation เกิดเป็นเวกเตอร์ลัพธ์ในแนวแกน b ขึ้น ดังรูปที่ 2.4(ข) TD ที่เกิดมาจาก MD ที่ทำมุมในแนว 60° dislocation แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ Mobile และ Immobile TD โดยข้อแตกต่างของรูปแบบทั้งสองคือ Mobile TD สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระตามแนว MD และสามารถเพิ่มความยาวของ MD ได้จากการเพิ่มความหนาของชั้นปลูก ดังรูปที่ 2.5(ข) แต่ Immobile TD จะเคลื่อนที่ไปจนกระทั่งมี MD ในทิศตั้งฉากมากขึ้น ดังรูปที่ 2.5(ค) โดย MD ที่เกิดขึ้นจากการปลูก $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ บนแผ่นฐาน GaAs จะเกิดในทิศ $[110]$ และ $[1-10]$ [25] และมีเงื่อนไขในการเกิด TD ทั้งสองคือ ชั้นปลูกต้องหนากว่าค่าความหนาวิกฤต ($H > H_c$)



รูปที่ 2.4 แผนภาพ ก) แสดง misfit dislocation และ threading dislocation ที่เกิดขึ้นในการปลูกผลึก

ข) แสดง dislocation vector ที่เกิดจาก edge และ screw dislocation [26]

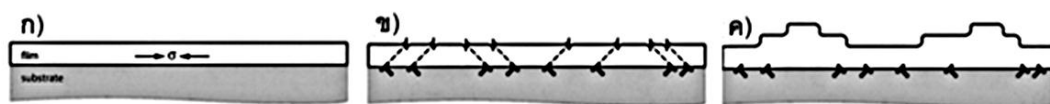


รูปที่ 2.5 ภาพตัดขวางแสดง MD และ TD ก) เมื่อ $h < h_c$ เกิด TD แต่ไม่มี MD เกิดขึ้น เมื่อ $h > h_c$

ข) TD เริ่มเคลื่อนตัวและทำให้ MD ยาวขึ้นเป็นระยะ $\Delta\lambda$ ค) TD เคลื่อนตัวมาพบ MD ขวางอยู่และหยุดเคลื่อนที่ [25]

การเกิด dislocation ข้างต้นเป็นการคลายความเครียดภายในชั้นผลึกและที่ผิวหน้า ซึ่งเป็นรูปแบบสำคัญที่ทำให้เกิดพื้นผิวลายตาราง (cross-hatch pattern) โดยเฉพาะ TD ซึ่งเป็นการคลายความเครียดที่ส่งผ่านมาที่ผิวหน้าของชั้นปลูก เกิดจาก 60° dislocation และเปลี่ยนทิศทางผลึกจากการเลื่อน MD โดย TD ที่เปลี่ยนไปในทิศ $[110]$ และ $[1-10]$ เป็นทิศทางที่เปลี่ยนไปง่ายที่สุด TD ที่เคลื่อนไปสู่ผิวหน้าทำให้ผิวหน้ามีลักษณะเป็นลอนและวิ่งยาวไปในทิศ $[110]$ และ $[1-10]$ แล้วทำให้เกิดพื้นผิวลายตารางตัดกันในทิศ $[110]$ และ $[1-10]$ แสดงให้เห็นว่า TD ที่เกิดจาก 60° dislocation เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดพื้นผิวลายตาราง ดังนั้นจึงต้องใช้เศษส่วนโมล In (x) ที่ค่า $x < 0.2$ ซึ่งเป็นช่วงที่ TD เกิดจาก 60° dislocation [27]

เมื่อปลูกผลึกที่ไม่เข้ากับแผ่นฐาน ในช่วงแรกของการปลูกชั้นปลูกจะก่อตัวในรูปแบบสองมิติและมีความเครียดในชั้นปลูก ดังรูปที่ 2.6(ก) เมื่อการปลูกดำเนินต่อไปจนกระทั่งความหนา มากกว่าความหนาวิกฤต ทำให้มีการคลายความเครียด โดยเกิด MD บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นปลูก กับแผ่นฐาน และ slip plane ที่ทำให้เกิด TD ดังรูปที่ 2.6(ข) ถูกส่งผ่านจนไปปรากฏที่ผิวหน้าเกิด เป็น surface step แล้วจึงเกิดกระบวนการกำจัด surface step จนผิวหน้ามีลักษณะเป็นลอนดัง รูปที่ 2.6(ค)

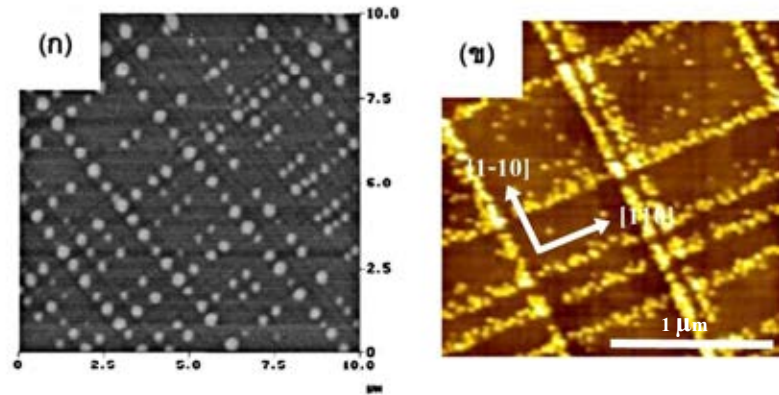


รูปที่ 2.6 ภาพตัดขวางแสดงกระบวนการเกิดพื้นผิวลายตาราง [26]

2.3 พื้นผิวลายตาราง

พื้นผิวลายตารางที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นพื้นผิวที่สร้างได้จากสารประกอบในหมู่ III-V คือ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ บน GaAs สารประกอบทั้งสองมีโครงสร้างผลึกแบบ Zinc Blend [28] ค่า x ที่ ใช้คือ 0.2 ทำให้ $\epsilon \approx 1.5\%$ (จากค่าจำกัดความไม่สมการที่ (2.1)) และ $H_c = 6 \text{ nm}$ (จากรูปที่ 2.8) การปลูก $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ บน GaAs ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดให้ชั้น $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ หนา 25 และ 35 nm ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีสูงกว่า H_c ของการเกิดลายตาราง ซึ่งจะอธิบายในลำดับต่อไป (รูปที่ 2.8)

พื้นผิวลายตารางยังสามารถเกิดได้ในสารประกอบหมู่ IV-IV เช่น การปลูก SiGe บน Si เป็นต้น [14-15] รูปแบบการเกิดเส้นลายตารางทั้ง 2 ทิศทางของระบบ SiGe/Si จะค่อนข้างสมมาตร (เนื่องจากเป็นสารในหมู่เดียวกัน ดังรูปที่ 2.7(ก)) ต่างจากระบบ InGaAs/GaAs เนื่องจากสารที่เป็น แกนของทั้ง 2 ทิศทาง เป็นสารที่ต่างชนิดกัน โดยในทิศ [1-10] มี As เป็นสารแกน และในทิศ [110] มี Ga เป็นสารแกน ดังรูปที่ 2.7(ข)



รูปที่ 2.7 ภาพ AFM แสดง ก) ผิวหน้าของควอนตัมดอต Ge บน SiGe/Si (100) [29] และ ข) ผิวหน้าของควอนตัมดอต InAs บน $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Ga}$ [10]

การปลูกพื้นผิวลายตารางจะมี dislocation เกิดขึ้นก็ต่อเมื่อความหนาของชั้นปลูก h มีค่ามากกว่าความหนาวิกฤตของการเกิด 60° dislocation (h_{c60}) หาก $h < h_{c60}$ dislocation จะยังไม่เกิดขึ้น แต่ชั้นปลูกจะมีความเครียดสะสมอยู่ ค่า h_{c60} สามารถหาได้จากสัดส่วนของ In เป็นหลัก โดยกำหนดได้จากความสัมพันธ์[22]

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

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

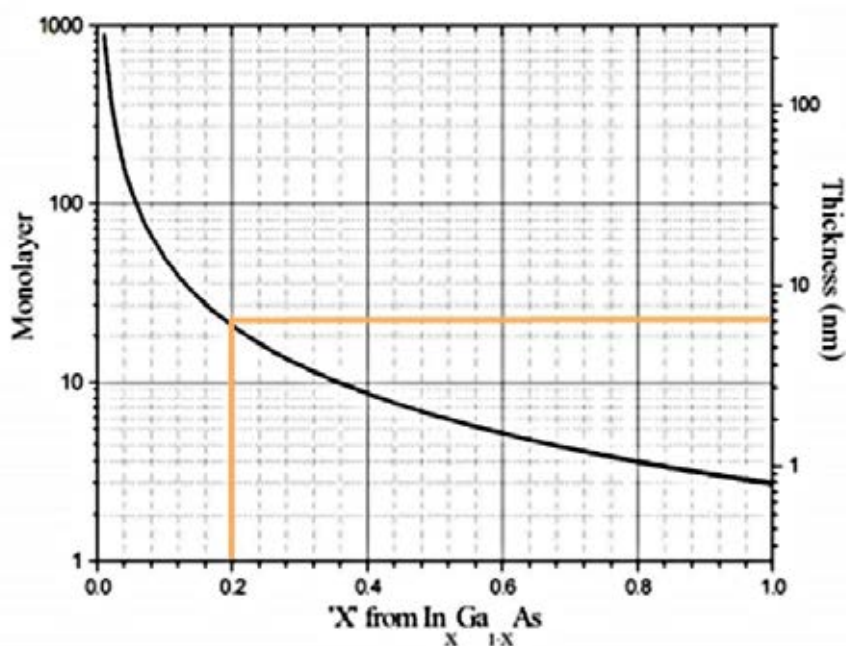
$$b = \frac{2}{2} a_{\text{InGaAs}} \quad (2.4)$$

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

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

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

โดย G คือ Anisotropic factor, ν คือ Poisson ratio, C คือ Elastic Constant และ Y คือ Young's modulus



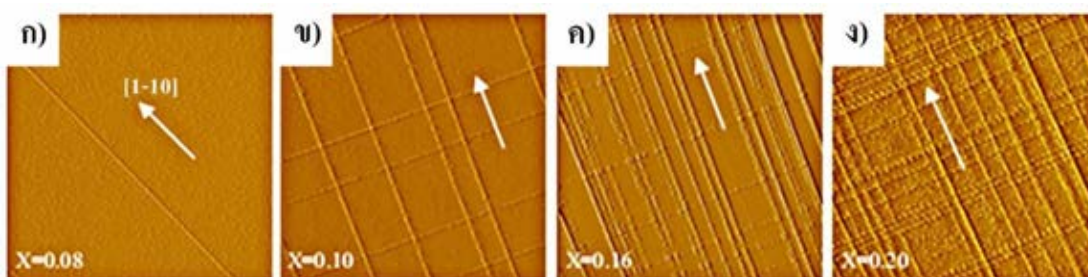
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาวิกฤตของชั้น $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (Monolayer) ที่ปลูกบนชั้นของ GaAs กับสัดส่วนของ In [30]

รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาวิกฤต (h_{c60}) ของชั้น $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (Monolayer) ที่ปลูกบนชั้นของ GaAs กับสัดส่วน โมลของ In (x) ซึ่งกำหนดได้จากสมการ 2.2-2.7 ข้างต้น และแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่า x เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาวิกฤตมีค่าลดลง ชั้น $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ที่ปลูกบน GaAs จึงมี $h_{c60} = 6 \text{ nm}$ โดยความหนาที่ใช้จริงคือ 25 และ 35 nm ซึ่งมีค่าสูงกว่า h_{c60} พื้นผิวที่ได้จึงเกิดเป็นลายตาราง

พื้นผิวลายตารางก่อตัวแบบสุ่ม ตำแหน่งและความถี่ของเส้นลายตารางมีความไม่แน่นอน อย่างไรก็ตามความหนาแน่นของเส้นลายตารางสามารถควบคุมได้จากความหนาของชั้นลายตาราง ในอดีตจนถึงปัจจุบันห้องปฏิบัติการวิจัยสารกึ่งตัวนำ (SDRL) ได้ศึกษาเกี่ยวกับพื้นผิวลายตาราง สรุปได้ดังนี้

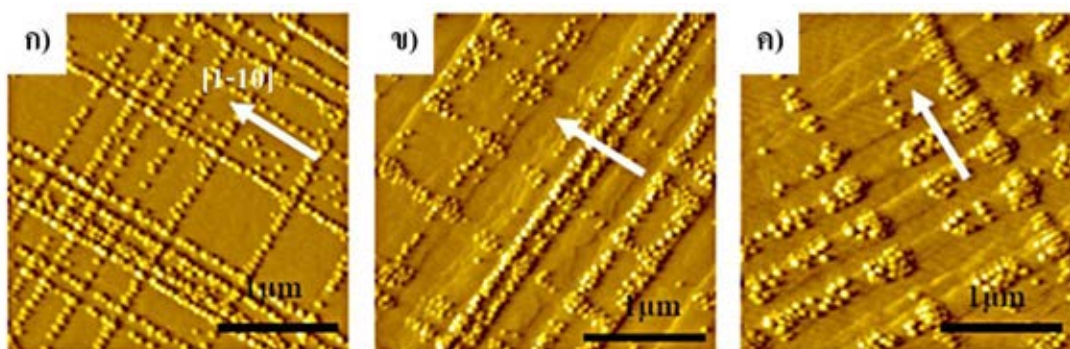
การปลูก $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ บน GaAs โดยเปลี่ยนแปลงสัดส่วน โมลของ In(x) ดังนี้ 0.08, 0.10, 0.16 และ 0.20 ตามลำดับ และกำหนดความหนาของชั้นปลูกเป็นค่าคงตัวที่ 50 nm ผลที่ได้คือ เมื่อ x มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นของเส้นลายตารางเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.9 เนื่องจากเมื่อ x มีค่าเพิ่มมาก

ขึ้นทำให้ความหนาวิกฤตของชั้นปลูกมีค่าลดลง ดังรูปที่ 2.8 ทำให้ dislocation สามารถคลายความเครียดที่พื้นผิวได้ง่ายขึ้น และในบางบริเวณ dislocation ที่เกิดขึ้นมาความต่อเนื่องกันเป็นแนวยาว เมื่อปลูกควอนตัมดอตลงบนเส้นลายตารางทำให้เกิดควอนตัมดอตที่ต่อเนื่องกันเป็นแนวยาว เรียกว่า สายโซ่ของควอนตัมดอต (Quantum dots chains)



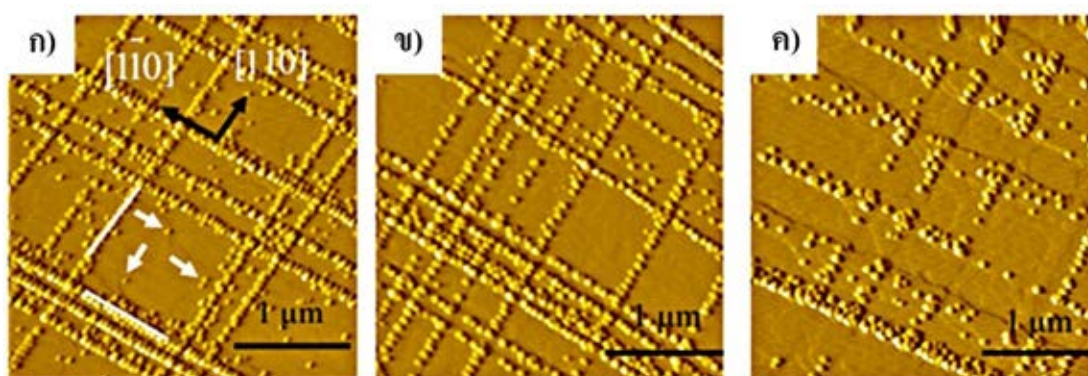
รูปที่ 2.9 ภาพ AFM แสดงควอนตัมดอต InAs บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ เมื่อ x มีค่า (ก) 0.08, (ข) 0.10, (ค) 0.16 และ (ง) 0.20 ตามลำดับ [10]

นอกจากสัดส่วน โมลของ In (x) แล้ว ความหนาของชั้นปลูกยังส่งผลต่อผิวหน้าลายตาราง ซึ่งแสดงได้จากการทดลองต่อไปนี้ ปลูกควอนตัมดอต InAs บน $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ โดยเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นลายตารางที่ 50, 100 และ 150 nm ซึ่งเป็นค่าความหนาที่มากกว่าค่าความหนาวิกฤตมาก ส่งผลให้ความเครียดของชั้นลายตารางลดลงและความหนาของชั้นลายตารางที่เพิ่มขึ้นทำให้การคลายความเครียดที่ผิวหน้าของชั้นงานลดลงผิวหน้าของชั้นงานจึงมีลักษณะขรุขระและเส้นลายตารางไม่ต่อเนื่อง ดังรูปที่ 2.10(ข) และ (ค) จึงสรุปได้ว่าความหนาของชั้นลายตารางที่เหมาะสมควรมีค่าอยู่ในช่วงความหนาวิกฤตถึง 50 nm



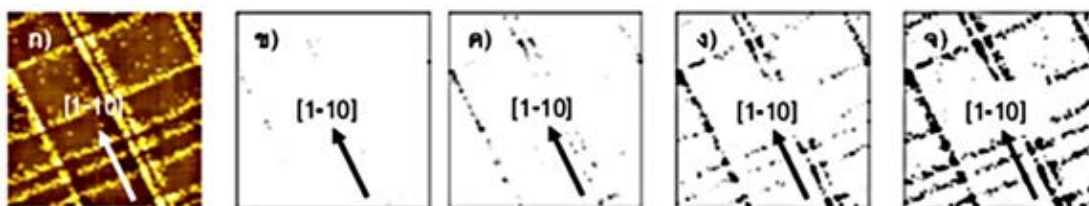
รูปที่ 2.10 ภาพ AFM แสดงควอนตัมดอต InAs บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นลายตารางที่ (ก) 50 nm, (ข) 100 nm และ (ค) 150 nm [31]

ปัจจัยอีกข้อหนึ่งที่สำคัญต่อการจัดเรียงตัวของควอนตัมดอทคือ ช่วงเวลาขัดจังหวะการปลูก (Growth Interruption : GI) เป็นช่วงเวลาหลังจากปิดชัตเตอร์ ก่อนที่จะดำเนินการปลูกในขั้นตอนถัดไป ในรูปที่ 2.11 แสดงภาพ AFM จากการปลูกควอนตัมดอท InAs บน $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ ที่ความหนาของชั้นลายตาราง 50 nm เมื่อ GI ที่ 0 วินาที ซึ่งเป็นเวลาที่น้อยเกินไปทำให้ควอนตัมดอทบางส่วนก่อตัวอยู่บนพื้นผิวเรียบ ดังรูปที่ 2.11(ก) แต่ถ้า GI ที่เวลามากเกินไปคือ 60 วินาที ทำให้ควอนตัมดอทที่อยู่บนเส้นลายตารางมีรูปร่างผิดปกติ ดังรูปที่ 2.11 (ค) โดย GI ที่เหมาะสมที่สุดคือเวลา 30 วินาที ควอนตัมดอทที่อยู่บนเส้นลายตารางมีการก่อตัวกันอย่างเป็นระเบียบดังรูปที่ 2.11(ข)



รูปที่ 2.11 ภาพ AFM ของควอนตัมดอท InAs บน $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ เมื่อเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาขัดจังหวะการปลูกที่ (ก) 0, (ข) 30 และ 60 วินาที [13]

ในการทดลองที่ผ่านมา ลักษณะผิวหน้าของควอนตัมดอทที่ปลูกบนพื้นผิวลายตารางมีความสูงที่แตกต่างกันในแต่ละตำแหน่ง T. Limwongse จึงได้ศึกษาวิวัฒนาการของการเกิดควอนตัมดอทบนลายตาราง ซึ่งเป็นสิ่งที่บ่งชี้ถึงลำดับการก่อตัวของผิวหน้าในแต่ละตำแหน่ง โดยปลูกชั้นงานควอนตัมดอท InAs บน $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ หนา 50 nm ได้ภาพ AFM ออกมาดังรูปที่ 2.12 จากนั้นใช้เทคนิคที่เรียกว่า Image thresholding วิเคราะห์ความสูงจากภาพ โดยสรุปลำดับการก่อตัวของ QD จากก่อนไปหลังตามลำดับ ได้ดังนี้ 1) บริเวณจุดตัดของทิศ [1-10] และ [110] ดังรูปที่ 2.12(ข) 2) บนเส้นลายตารางในทิศ [1-10] ดังรูปที่ 2.12(ค) 3) บนเส้นลายตารางในทิศ [110] ดังรูปที่ 2.12(ง) และ 4) บริเวณพื้นผิวเรียบดังรูปที่ 2.12(จ) [32]



รูปที่ 2.12 ภาพ AFM แสดง (ก) ควอนตัมดอต InAs บน $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ หน้า 50 nm และจากการทำ Image thresholding โดยค่า threshold ที่ (ข) 5.5-, (ค) 4.9-, (ง) 4.0- และ (จ) 3.0 nm สีขาวและสีดำ หมายถึงบริเวณที่ความสูงมีค่าต่ำกว่าและสูงกว่าค่า threshold [32]

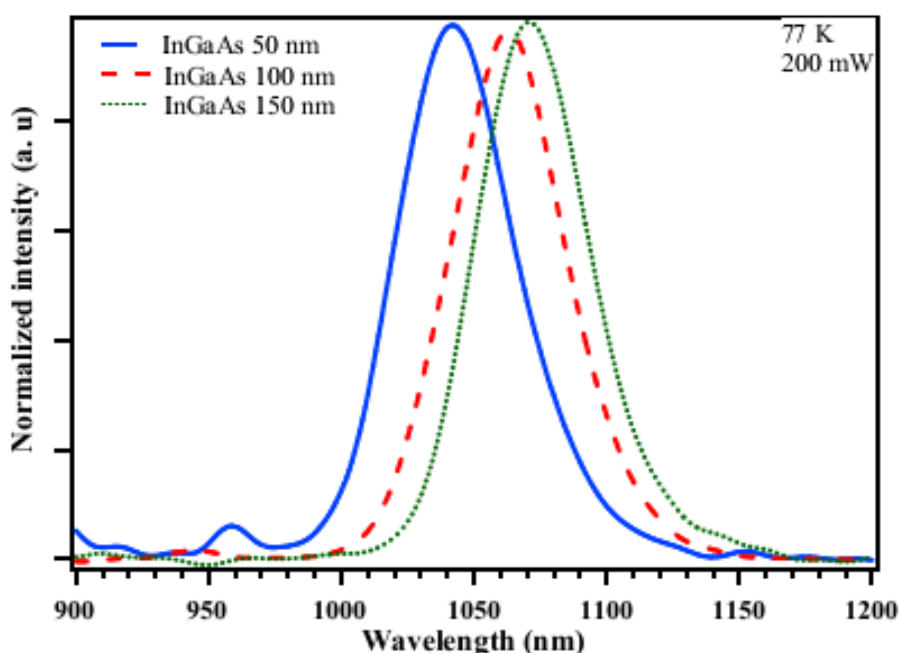
พาหะในควอนตัมดอตมีพลังงานได้เพียงบางค่า ควอนตัมดอตที่เป็นสารกึ่งตัวนำตรงจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเชิงแสงได้ สมบัติเชิงแสงของควอนตัมดอตสามารถควบคุมได้โดยการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ เช่น ขนาดหรือการจัดเรียงตัว เป็นต้น หัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงสมบัติเชิงแสงของควอนตัมดอต โดยเฉพาะควอนตัมดอตบนพื้นผิวลายตารางที่เป็นผลจากงานวิจัยในห้องปฏิบัติการ SDRL

2.4 Luminescence

ควอนตัมดอตจะเปล่งแสง (luminescence) ได้ก็ต่อเมื่อมีถูกกระตุ้นด้วยพลังงานที่มีค่าสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงาน โดยจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน เทคนิคในการวัดสเปกตรัมของแสงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบดังต่อไปนี้ 1) Macro Photoluminescence (Macro PL) และ 2) Polarization Photoluminescence (PPL)

2.4.1 Macro PL

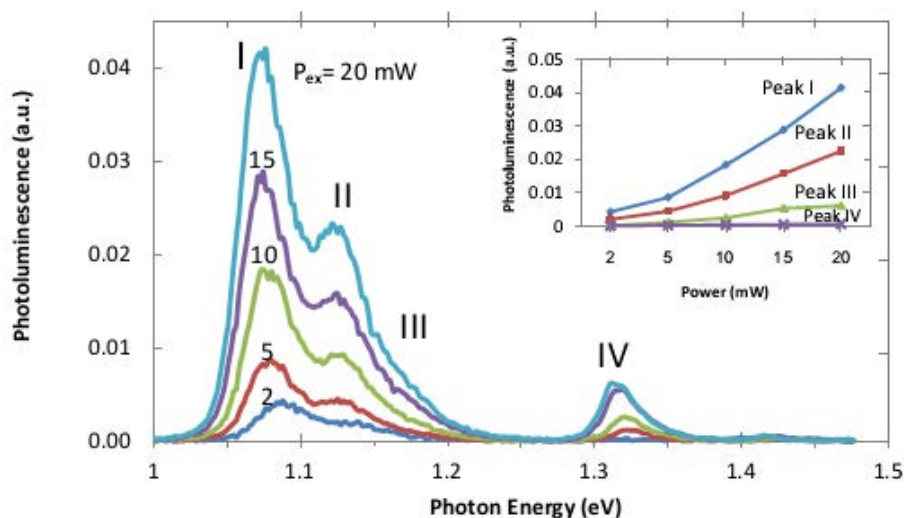
ระบบวัด PL เป็นเทคนิคที่ใช้วัดการเปล่งแสงของควอนตัมดอต การทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้ระบบวัด PL ในการวัดการเปล่งแสงของควอนตัมดอต InAs บนพื้นผิวลายตาราง InGaAs ห้องปฏิบัติการ SDRL ได้ศึกษาสมบัติเชิงแสงของควอนตัมดอตบนพื้นผิวลายตารางในเบื้องต้นมาแล้ว ดังนี้



รูปที่ 2.13 ผลการเปล่งแสงของควอนตัมดอท InAs บน $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาที่ 50, 100 และ 150 nm กำหนดค่าอุณหภูมิคงตัวที่ 77 K และค่าพลังงานของแสงกระตุ้นคงตัวที่ 200 mW [33]

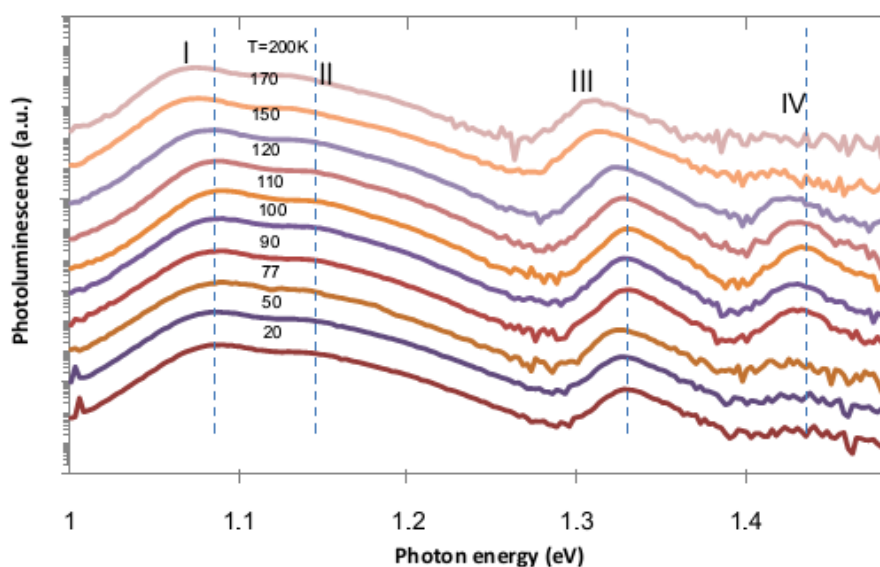
จากการทดลองของ Cho Cho Thet ดังรูป 2.13 แสดงผลการเปล่งแสงของควอนตัมดอท InAs บน $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาที่ 50, 100 และ 150 nm โดยผลการเปล่งแสงที่ได้มีค่าออกพลังงานที่ 1.190, 1.166 และ 1.157 eV ตามลำดับ ผลการทดลองที่ได้แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นลายตารางที่มากขึ้นส่งผลต่อผลการเปล่งแสงของควอนตัมดอทบนเส้นลายตารางให้ค่าออกพลังงานที่ได้มีลักษณะ red-shifted [33]

จากการทดลองของ M. Maitreeboriraks โดยวัดผลการเปล่งแสงของควอนตัมดอท InAs และชั้นกั้น GaAs หนา 250 nm บน $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ (ชั้นงาน G) ซึ่งแบ่งรูปแบบการวัดออกเป็น 3 แบบ คือ 1) การวัดโดยกำหนดค่าอุณหภูมิคงที่ แต่เปลี่ยนแปลงค่าพลังงานของแสงกระตุ้น (power dependence) 2) การวัดโดยกำหนดค่าพลังงานของแสงกระตุ้นคงตัว แต่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการวัด (temperature dependence) และ 3) การวัดผ่าน Polarizer ที่มุมต่างๆ โดยกำหนดค่าให้อุณหภูมิและค่าพลังงานแสงกระตุ้นคงตัว



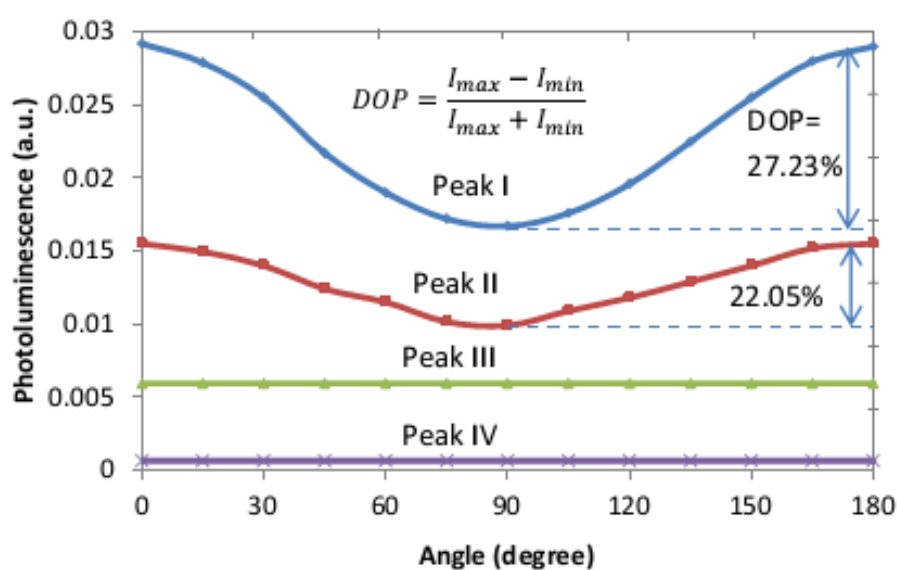
รูปที่ 2.14 ผลการเปล่งแสงของชั้นงาน G ที่ค่าอุณหภูมิคงตัวที่ 20 K และเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานของแสงกระตุ้นที่ 2, 5, 10, 15 และ 20 mW [34]

การวัดแบบ power dependence ดังรูปที่ 2.14 ให้ผลการเปล่งแสงที่ค่าออกพลังงาน 4 ค่า คือ ค่าออกพลังงานที่ 1.076 eV (I) เป็นของควอนตัมดอทในทิศ [1-10], ค่าออกพลังงานที่ 1.12 eV (II) เป็นของควอนตัมดอทในทิศ [110], ค่าออกพลังงานที่ 1.31 eV (III) เป็นของชั้น $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ และค่าออกพลังงานที่ 1.41 eV (IV) เป็นของชั้น WL ของ InGaAs และการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานของแสงกระตุ้นมีผลโดยตรงต่อความเข้มในการเปล่งแสงของทั้ง 4 ค่าออกพลังงาน [34]



รูปที่ 2.15 ผลการเปล่งแสงของชั้นงาน G โดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการวัดที่ 20-200 K [34]

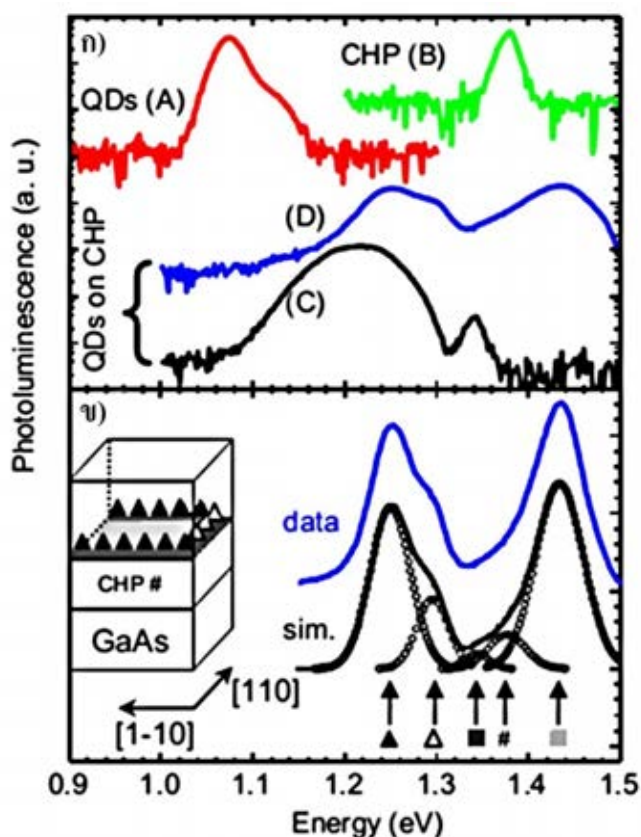
การวัดแบบ Temperature Dependence ดังรูปที่ 2.15 แสดงความเข้มแสงของแต่ละค่ายอดพลังงานที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในช่วงอุณหภูมิ 20-90 K เป็นผลจากการเพิ่มของจำนวนอิเล็กตรอนจากการกระตุ้นด้วยความร้อน Thermal excitation ที่เกิดจากการเพิ่มอุณหภูมิการวัด และความเข้มแสงของแต่ละค่ายอดพลังงานลดลงอย่างรวดเร็ว ในช่วงอุณหภูมิ 100-200 K เป็นผลจากการหลุดออกไปของพาหะหรืออิเล็กตรอนเมื่อถูกกระตุ้นด้วยความร้อนที่สูง ตำแหน่งของค่ายอดพลังงานในช่วงอุณหภูมิ 20-90 K มีลักษณะ blue-shifted ซึ่งเป็นผลจาก band filling effect และในช่วงอุณหภูมิ 100-200 K ตำแหน่งค่ายอดพลังงานมีลักษณะ red-shifted ซึ่งเป็นผลจากการขยายตัวด้วยความร้อนและผลการกระเจิงระหว่างอิเล็กตรอนกับโฟนอน ส่งผลให้ช่องว่างแถบพลังงานมีค่าลดลง [34]



รูปที่ 2.16 แสดงผลการแปลงแสงของชั้นงาน G เมื่อเปลี่ยนแปลงมุมในการวัด ด้วย Polarizer กำหนดค่าอุณหภูมิคงตัวที่ 20 K และค่าพลังงานของแสงกระตุ้นคงตัวที่ 40mW [34]

ผลการแปลงแสงของชั้นงาน G เมื่อเปลี่ยนแปลงมุมในการวัด ด้วย Polarizer เพื่อศึกษาสมบัติโพลาไรเซชันของแสง กำหนดค่าอุณหภูมิคงตัวที่ 20 K และค่าพลังงานของแสงกระตุ้นคงตัวที่ 40mW ดังรูปที่ 2.16 โดยค่ายอดพลังงานที่ I และ II เป็นค่ายอดพลังงานที่แสงที่แปลงออกมาให้สมบัติโพลาไรเซชัน เนื่องจากเป็นบริเวณที่ควอนตัมดอตเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ และมีค่า

Degree of Polarization (DOP) เท่ากับ 27.33 และ 22.05 % ตามลำดับ โดยค่า DOP จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความแตกต่างของปริมาณการจัดเรียงตัวของควอนตัมในแต่ละทิศทาง ส่วนค่ายอดพลังงานที่ III และ IV แสงที่เปล่งออกมาไม่มีสมบัติโพลาไรเซชัน [34]



รูปที่ 2.17 ก) ผลการเปล่งแสงของชั้นงาน A (ควอนตัมดอต InAs ควบคุมขนาด 1.7 ML), ชั้นงาน B (ลายตารางควบคุม $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ หน้า 50 nm), ชั้นงาน C และ D ที่มีโครงสร้างเหมือนกัน (ควอนตัมดอตบนลายตาราง $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ หน้า 50 nm) ข) ผลการเปล่งแสงของชั้นงาน D จากการวัดด้วยระบบ Macro PL และจากการทำ multiple Gaussian function ของข้อมูลที่วัดได้ [35]

จากการทดลองของ C. Himwas ดังรูปที่ 2.17(ก) เส้นกราฟสีแดงเป็นผลการเปล่งแสงของชั้นงาน A (ควอนตัมดอต InAs ควบคุมขนาด 1.7 ML) ให้ผลการเปล่งแสงที่ค่ายอดพลังงาน 2 ค่า คือ 1.075 และ 1.117 eV เป็นการเปล่งแสงของควอนตัมดอต 2 กลุ่ม จากความชันของค่ายอดพลังงานขาขึ้นและขาลงมีค่าที่แตกต่างกัน เนื่องจากเป็นวัดในระบบ Macro PL จึงไม่สามารถวัด

แยกการเปล่งแสงในแต่ละทิศทางของควอนตัมดอทได้ เส้นกราฟสีเขียวเป็นผลการเปล่งแสงของชั้นงาน B (ลายตารางควบคุม $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ หนา 50 nm) ให้ผลการเปล่งแสงที่ค่ายอดพลังงาน 1.377 eV เนื่องจากมีลักษณะโครงสร้างเสมือนเป็น WL จึงให้ผลการเปล่งแสงในระดับพลังงานที่ต่ำ เส้นกราฟสีน้ำเงินและดำเป็นของชั้นงาน D และ C เป็นชั้นงานที่มีโครงสร้างเหมือนกัน (ควอนตัมดอทบนลายตาราง $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ หนา 50 nm) ผลการเปล่งแสงของชั้นงาน C ให้ค่ายอดพลังงาน 2 ค่า คือ 1.222 eV และมีค่า FWHM กว้าง ซึ่งเป็นผลมาจากการเปล่งแสงของควอนตัมดอทในทิศ [110] และ [1-10] ส่วนค่ายอดพลังงานที่ 2 ที่ 1.344 eV เป็นผลการเปล่งแสงของ WL ระหว่างควอนตัมดอทและชั้นลายตาราง [35]

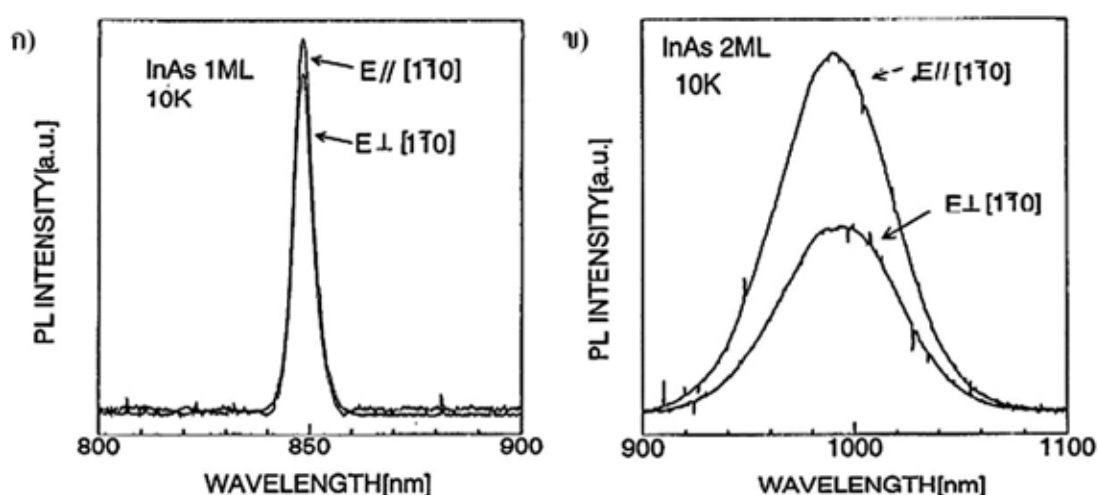
รูปที่ 2.17 ข) เป็นผลการเปล่งแสงของชั้นงาน D แต่ค่ายอดพลังงานอยู่ในระดับสูงกว่าชั้นงาน C เนื่องจากควอนตัมดอทมีขนาดเล็กกว่า จากการทำ multiple Gaussian function fit แสดงให้เห็นผลการเปล่งแสงที่มีต้นกำเนิดของแต่ละตำแหน่งดังนี้ รูป ▲ หรือค่ายอดพลังงานที่ 1.250 eV เป็นของควอนตัมดอทในทิศ [1-10], รูป Δ หรือค่ายอดพลังงานที่ 1.296 eV เป็นของควอนตัมดอทในทิศ [110], รูป ■ หรือค่ายอดพลังงานที่ 1.344 eV เป็นของ WL ที่อยู่ระหว่างควอนตัมดอทกับลายตาราง, รูป # หรือค่ายอดพลังงานที่ 1.377 eV เป็นของลายตาราง $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ และรูป ■ ค่ายอดพลังงานสุดท้ายที่ 1.42 eV เป็นของ GaAs จากการเปล่งแสงของควอนตัมดอทในทิศ [1-10] ที่ค่าพลังงานต่ำกว่าในทิศ [110] เนื่องจากควอนตัมดอทในทิศ [1-10] ก่อตัวก่อนจึงขนาดใหญ่กว่า ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในวิวัฒนาการของควอนตัมดอทบนพื้นผิวลายตาราง [35]

2.4.2 PPL

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการปลูกชั้นงานที่มีการจัดเรียงตัวของควอนตัมดอทในทิศ [110] และ [1-10] เพื่อที่จะทราบถึงลักษณะการเปล่งแสงของควอนตัมดอทในแต่ละทิศทาง จะใช้เทคนิคการวัดแบบ PPL และผลที่ได้จากการวัดสามารถนำไปวิเคราะห์สมบัติโพลาไรเซชันของชั้นงานได้

การทดลองของ Y. Nabetani โดยปลูกควอนตัมดอท InAs ขนาด 1 และ 2 ML และวัดสมบัติโพลาไรเซชันของควอนตัมดอท โดยให้พลังงานของแสงกระตุ้นเป็นหลอดฮาโลเจน ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ไม่มีสมบัติโพลาไรเซชัน และกำหนดค่าอุณหภูมิคงตัวในการวัดที่ 10 K สมบัติ

โพลาริเซชันของควอนตัมดอท InAs ขนาด 1 ML ดังรูปที่ 2.18(ก) แสดงให้เห็นว่าความเข้มแสงที่ขึ้นงานเปล่งออกมาในทิศขนาน ($E_{//}$) และตั้งฉาก (E_{\perp}) กับทิศ [1-10] ใกล้เคียงกันมาก แสดงว่าควอนตัมดอท InAs ขนาด 1 ML ให้ค่าโพลาริเซชันจากการเปล่งแสงได้ในปริมาณน้อย แต่เมื่อวัดการเปล่งแสงของควอนตัมดอท InAs ขนาด 2 ML ดังรูปที่ 2.18(ข) แสดงความแตกต่างของความเข้มแสงที่เปล่งออกมาระหว่างทิศขนานและตั้งฉากกับ [1-10] อย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าแสงที่เปล่งออกมามีสมบัติโพลาริเซชัน และยังกล่าวได้ว่าแสงที่เปล่งออกมาในทิศที่ขนานกับ [1-10] มีความเข้มแสงมากกว่าทิศตั้งฉาก [36] จากการทดลองดังกล่าวแสดงถึงสมบัติทางกายภาพของควอนตัมดอท ที่มีผลต่อสมบัติโพลาริเซชันของแสงที่เปล่งออกมา



รูปที่ 2.18 เปรียบเทียบผลการเปล่งแสงของควอนตัมดอทขนาด ก) 1 ML และ ข) 2 ML ที่ค่า

อุณหภูมิคงตัว 10 K ด้วยวิธีวัดแบบ Micro Photoluminescence [36]

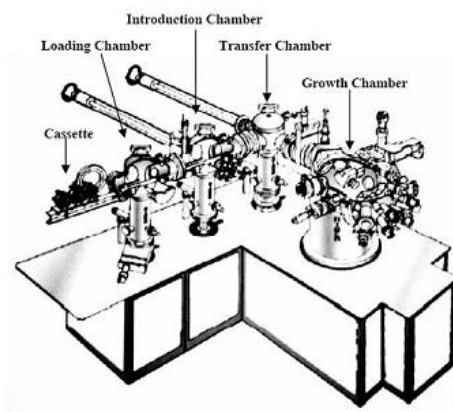
บทที่ 3

การสังเคราะห์และวัดสมบัติของชั้นงาน

ชั้นงานทั้งหมดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกสังเคราะห์โดยระบบปลูกผลึกด้วยเครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy : MBE) ซึ่งเป็นการสังเคราะห์โดยการปล่อยโมเลกุลต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของฟิล์มบางที่ต้องการให้ก่อตัวลงบนผิวหน้าของชั้นงานที่อุณหภูมิสูง วิธีการสังเคราะห์แบบ MBE ให้ชั้นงานที่มีคุณภาพดีเนื่องจากการสังเคราะห์ภายใต้ภาวะสุญญากาศสูงยิ่ง (Ultra-high vacuum) โดยเฉพาะ โครงสร้างพื้นผิวลายตารางเป็นเทคนิคที่อาศัยอัตราการปลูกที่แม่นยำ เนื้อหาในบทถูกจำแนกออกเป็น 3 หัวข้อย่อย เริ่มจาก 3.1 ระบบปลูกผลึกด้วยเครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล ตามด้วย 3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์ชั้นงาน และจบด้วย 3.3 การวัดลักษณะสมบัติของชั้นงาน

3.1 ระบบปลูกผลึกด้วยเครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล

การปลูกผลึกแบบลำโมเลกุลเป็นการปลูกผลึกเดี่ยวที่มีความละเอียดสูง สามารถควบคุมอัตราการปลูกได้ในระดับโมโนเลเยอร์ต่อวินาที (ML/s) มีความแม่นยำและมีความบริสุทธิ์สูง เนื่องจากทำการปลูกภายใต้ภาวะสุญญากาศสูงยิ่ง ซึ่งมีสารเจือปนอื่นอยู่ในระดับที่ต่ำมาก ทั้งยังตรวจสอบสถานะผิวหน้าของชั้นงานขณะทำการปลูกได้ตลอดเวลาด้วยเครื่องวัดแบบติดตั้งภายในระบบ (in-situ)



รูปที่ 3.1 แผนภาพโครงสร้างเครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล

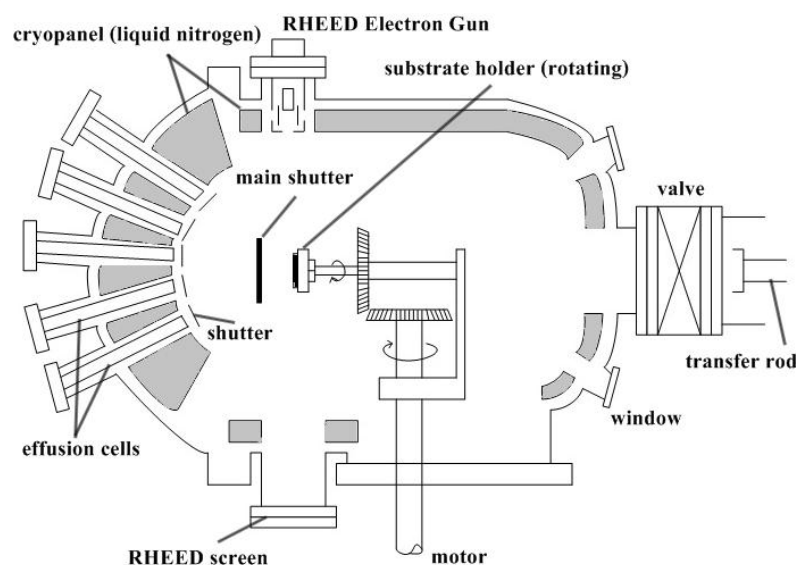
3.1.1 เครื่องปลูกผลึกแบบลำโม่เลกุล

เครื่องปลูกผลึกที่ใช้เป็นเครื่องปลูกผลึกแบบลำโม่เลกุลยี่ห้อ RIBER รุ่น 32P ติดตั้งอยู่ ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ทุกห้องจะมีประตู (Gate) เพื่อให้ห้องแต่ละห้องแยกออกจากกัน เพื่อให้ระบบสุญญากาศเป็นอิสระต่อกัน โดยประกอบไปด้วยห้อง (Chamber) ทั้งหมด 4 ห้องดังต่อไปนี้

1. ห้องโหลด (Loading Chamber) เป็นห้องที่ทำหน้าที่ในการนำชิ้นงานที่ติดกับโมล็ดินัมบล็อก (MO Block) เข้าหรือออกจากระบบห้องโหลดจะมีภาวะบรรยากาศ หากต้องการจะถ่ายชิ้นงานจากห้องโหลดไปยังห้องอินโทรดักชันห้องโหลดจะมีภาวะเป็นสุญญากาศ โดยทำการลดความดันลงโดยใช้ ปั๊มเทอร์โบ (turbo pump) ให้อยู่ในระดับ 10^{-6} Torr ก่อนที่จะถ่ายชิ้นงานไปยังห้องถัดไป

2. ห้องอินโทรดักชัน (Introduction Chamber) เป็นห้องที่ใช้สำหรับในกระบวนการทำ Pre-Heat เพื่อทำความสะอาด ขจัดความชื้นและสิ่งสกปรกบนผิวหน้าของชิ้นงานเบื้องต้น ห้องอินโทรดักชันเป็นห้องสุญญากาศที่มีระบบดูดอากาศโดย ไอออนปั๊ม (Ion pump) ทำงานตลอดเวลา และไททาเนียมปั๊ม (Titanium pump) ทำงานในช่วงที่มีได้ทำการ pre-heat

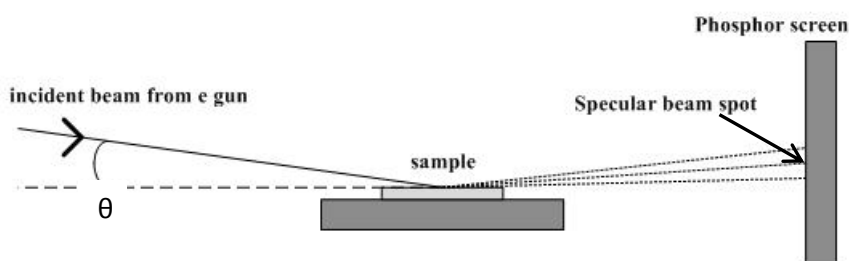
3. ห้องทรานสเฟอร์ (Transfer Chamber) เป็นห้องที่ใช้พักชิ้นงานระหว่างทำการปลูกหรือทำงาน Pre-Heat โดยระบบดูดอากาศในห้องนี้เป็นระบบเดียวกับห้องอินโทรดักชัน



รูปที่ 3.2 แผนภาพโครงสร้างภายในห้องปลูกผลึก [37]

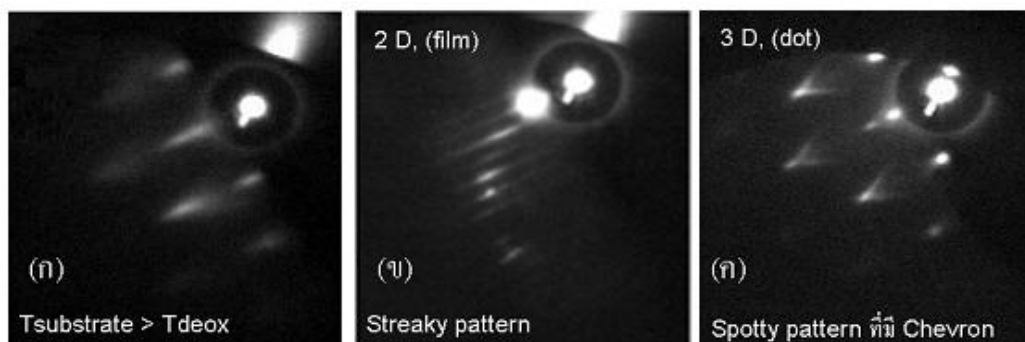
4. ห้องปลูก (Growth Chamber) เป็นห้องที่ใช้สำหรับการปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งห้องนี้จะประกอบไปด้วย Manipulator ที่ใช้สำหรับใส่ MO block ของชิ้นงาน มีเซลล์บรรจุสาร (Effusion cell) โดยแยกบรรจุสารแต่ละสารต่อ 1 เซลล์ วัสดุที่ใช้สำหรับเป็นสารตั้งต้นในการปลูกผลึกจะอยู่ในสภาพเป็นของแข็ง (solid source) แต่ละเซลล์จะมีเบ้าหลอม (crucible) เพื่อให้ความร้อนแก่วัสดุตั้งต้นให้เกิดการระเหิดจนกลายเป็นลำโมเลกุล มีชัตเตอร์ (shutter) ควบคุมการแพร่ของลำโมเลกุลออกจากแต่ละเซลล์ และมีชัตเตอร์หลัก (main shutter) ทำหน้าที่กั้นสารทั้งหมด บริเวณผนังห้องจะมีไนโตรเจนเหลวไหลวนอยู่เพื่อระบายความร้อนภายในจากเซลล์แต่ละเซลล์ภายในห้องปลูก ห้องปลูกจะถูกควบคุมความดันอากาศให้อยู่ที่ 10^{-9} Torr หรือต่ำกว่าโดยระบบดูดอากาศเช่นเดียวกับห้องอินโทรดักชันและห้องทรานสเฟอร์ ในขณะที่ปลูกระบบวัดภายในที่สำคัญประกอบไปด้วย Quadrupole mass spectrometer (QMS) เพื่อวิเคราะห์มวลของสารภายในห้องปลูก และ Reflective High-Energy Electron Diffraction (RHEED) เพื่อใช้ตรวจสอบผิวหน้าขณะปลูก

3.1.2 RHEED



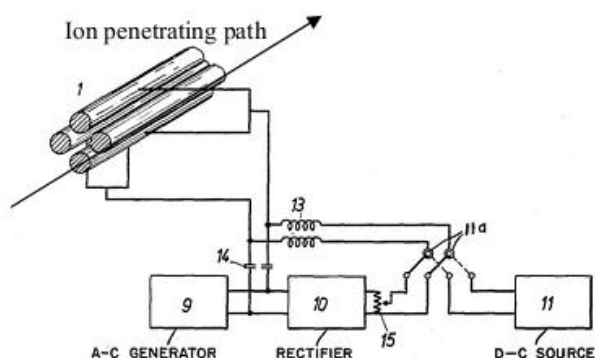
รูปที่ 3.3 แผนผังแสดงระบบ RHEED

ระบบ RHEED ดังแสดงในรูปที่ 3.3 เป็นการยิงลำอิเล็กตรอนพลังงานสูง (High Energy Electron) ไปตกกระทบบริเวณผิวหน้าของชิ้นงานด้วยมุมเล็กๆ ที่มีค่าประมาณ 1-3 องศา อิเล็กตรอนจะสะท้อนและเลี้ยวเบนไปตามผิวหน้าของชิ้นงานแล้วไปตกกระทบที่ฉากฟอสเฟออร์ (phosphor screen) ซึ่งจะเรืองแสงให้เห็นเป็นภาพ ภาพที่ได้แสดงถึงสภาพผิวหน้าของชิ้นงานในขณะนั้น รูปที่ 3.4 สรุปลภาพ RHEED ที่บอกถึงผิวหน้าของชิ้นงานในสถานะต่างๆ โดยรูปที่ 3.4(ก) แสดงถึงผิวหน้าของชิ้นงานขรุขระ สังกัดได้จากตำแหน่งของ specular beam ที่ไม่สว่าง รูปที่ 3.4(ข) แสดงถึงผิวหน้าชิ้นงานที่เรียบ สังกัดได้จากตำแหน่งของ specular beam ที่ความเข้มแสงสูงสุด และรูปร่างของแสงที่เปล่งออกมาจะมีลักษณะเป็นเส้น เรียกว่า Streaky pattern และรูปที่ 3.4(ค) แสดงถึงการเกิด QD ที่ผิวหน้าของชิ้นงานและมีลักษณะของแสงที่เรียกว่า Chevron [38] เรียกรูปแบบการปรากฏแบบนี้ว่า Spotty Pattern นอกจากนี้จะใช้บ่งบอกความเรียบ-ความขรุขระของผิวหน้าแล้ว ระบบ RHEED ยังเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการวัดเทียบอัตราปลูก (Growth rate calibration) อีกด้วย



รูปที่ 3.4 รูปแบบ RHEED ที่สถานะต่างๆ (ก) ผิวหน้า GaAs ที่ ขรุขระ (ข) ผิวหน้า GaAs ที่ เรียบ (ค) ผิวหน้าที่มี InAs QD [39]

3.1.3 QMS



รูปที่ 3.5 การทำงานของ Quadrupole mass analyze [40]

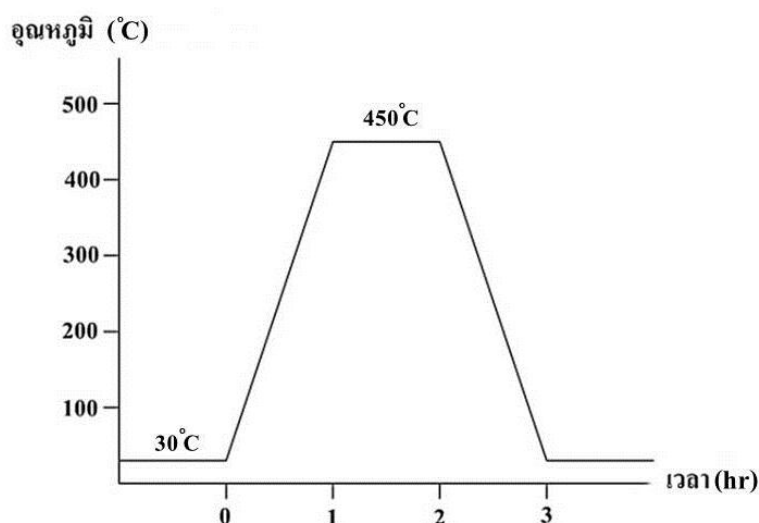
QMS เป็นเครื่องวิเคราะห์มวลสารเพื่อใช้ตรวจสอบถึงปริมาณไอออนของสารแต่ละชนิดที่อยู่ภายในห้องปลูกและยังสามารถบอกได้ว่าสารแต่ละชนิดมีปริมาณมากน้อยเพียงใด ทำให้สามารถกำหนดปริมาณสารที่ต้องการหรือไม่ต้องการใช้งานได้ในขณะที่ทำการปลูก โดยการสังเกตจอแสดงผล แกนนอนแสดงเลขมวลของสาร แกนตั้งสื่อถึงปริมาณของสารที่ปล่อยออกมา รูปที่ 3.5 แสดงหลักการทำงานของ QMS โดยทำการคัดกรองไอออนของสารผ่านแท่งโลหะทรงกระบอกที่วางห่างกันและขนานกัน ซึ่งมีการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับคลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency Voltage : RF Voltage) และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์ชิ้นงาน

การสังเคราะห์ชิ้นงานเริ่มจากการเตรียมชิ้นงาน ให้ผิวหน้าอยู่ในสภาพที่พร้อมสำหรับการปลูก หากไม่มีการเตรียมชิ้นงานในกระบวนการที่ถูกต้อง อาจส่งผลให้โครงสร้างที่ได้จากการปลูก ไม่เป็นไปตามลักษณะโครงสร้างที่ต้องการ ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานและปลูกโครงสร้างแบ่งออกเป็นขั้นตอนย่อยดังต่อไปนี้

3.2.1 Pre-Heat

Pre-Heat เป็นกระบวนการเบื้องต้นในการทำความสะอาดผิวหน้าของชิ้นงานที่จะทำการปลูกด้วยความร้อน เพื่อทำความสะอาดและขจัดความชื้นออกจากผิวหน้าของชิ้นงาน กระบวนการนี้จะกระทำที่ห้องอินโทรดักชัน โดยการนำชิ้นงานเข้าไปไว้ที่ห้องในบริเวณ Pre-Heat แล้วจึงทำการเพิ่มอุณหภูมิ โดยอุณหภูมิเริ่มต้นอยู่ที่ 30 C ซึ่งจะเพิ่มอุณหภูมิจาก 30 C ไปที่ 450 C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และให้อุณหภูมิกงที่ที่ 450 C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงลดอุณหภูมิลงไปที่ 30 C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังโปรไฟล์อุณหภูมิในรูปที่ 3.6 เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการ Pre-Heat นำชิ้นงานเคลื่อนไปไว้ที่ห้อง transfer ก่อนที่จะส่งเข้าไปในห้องปลูก เพื่อปลูกโครงสร้างจริง



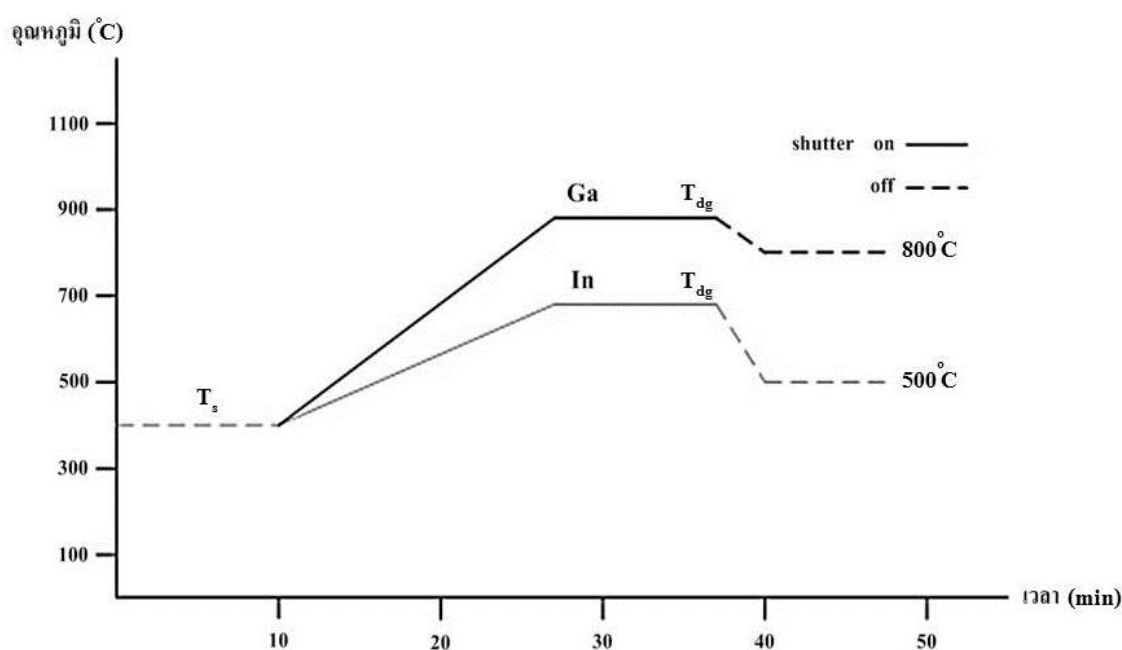
รูปที่ 3.6 โปรไฟล์อุณหภูมิสำหรับกระบวนการ Pre-Heat

3.2.2 De-gas

ในระหว่างที่ไม่มีการปลูกผลึก เซลล์บรรจุสารจะอยู่ในสถานะเตรียมพร้อมสำหรับการใช้งาน ซึ่งอยู่ในสถานะของอุณหภูมิเก็บรักษาสาร (standby temperature : T_s) แต่ละเซลล์จะมี T_s ที่แตกต่างกันดังนี้ As มี $T_s = 100$ C, Si มี $T_s = 600$ C, OM มี $T_s = 100$ C, Al มี $T_s = 500$ C, In มี $T_s = 400$ C, Ga มี $T_s = 400$ C และ GaP มี $T_s = 400$ C

การ De-gas เป็นการทำความสะอาดสารที่ใช้ในการปลูก และขจัดสิ่งสกปรกที่เกาะอยู่กับเซลล์และผนังเซลล์ ทำให้สารตั้งต้นมีความบริสุทธิ์อย่างแท้จริง การ De-gas ต้องทำทุกครั้งก่อน

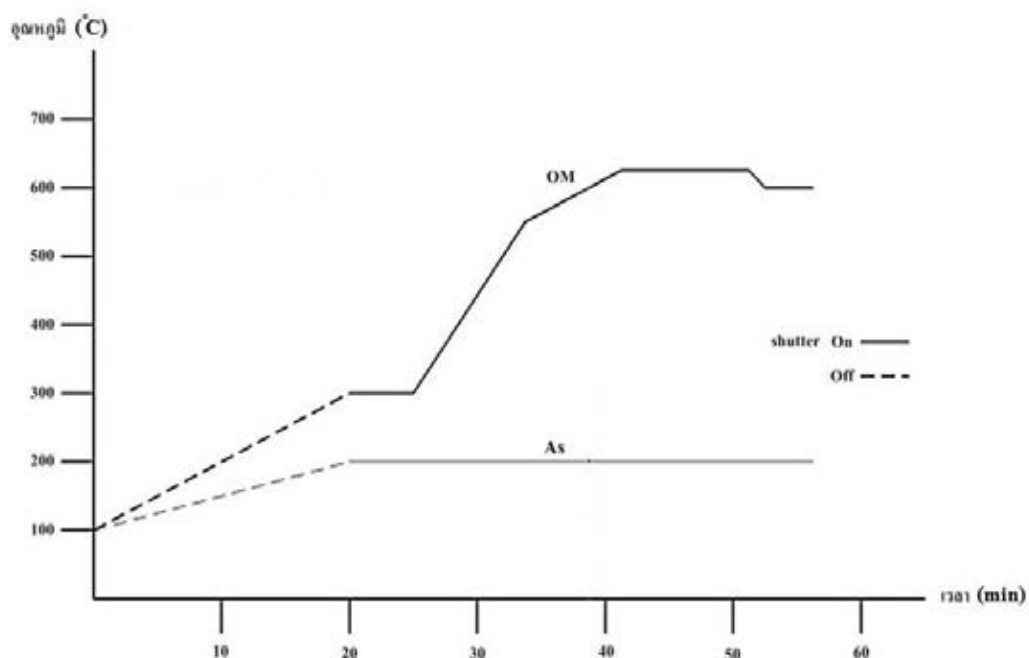
ปลูกชิ้นงานจริง ตัวอย่างการ De-gas เซลล์ In และ Ga แสดงดังรูปที่ 3.7 ซึ่งเป็นการ De-gas เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการปลูกที่อุณหภูมิปลูก (growth temperature : T_g) 500 และ 800 C ตามลำดับ อุณหภูมิของ De-gas จะสูงกว่าอุณหภูมิปลูก 50°C กล่าวคือ $T_{dg} = T_g + 50^{\circ}\text{C}$ และทำการ De-gas คือหยุดไว้ที่อุณหภูมินั้นเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้สิ่งสกปรกที่เกาะอยู่ถูกกำจัดออกมา อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซลล์จะถูกจำกัดไว้ที่ $30^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ชัตเตอร์จะถูกเปิดตั้งแต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของเซลล์ไปจนกระทั่ง De-gas เสร็จจึงปิดพร้อมๆ กับลดอุณหภูมิของเซลล์ไปยังอุณหภูมิปลูก



รูปที่ 3.7 โปรไฟล์อุณหภูมิสำหรับกระบวนการ De-gas

3.2.3 De-ox

การ De-oxidation หรือเรียกสั้นๆ คือ De-ox เป็นการทำความสะอาดผิวหน้าขั้นตอนสุดท้ายก่อนการปลูกชิ้นงานจริง De-ox เป็นการกำจัดออกไซด์ธรรมชาติที่ผิวหน้าของชิ้นงาน ซึ่งเป็นสิ่งที่กระบวนการ Pre-heat ไม่สามารถกำจัดออกไปได้ การ De-ox อาศัยการเพิ่ม-ลดอุณหภูมิของ OM ดังโปรไฟล์อุณหภูมิ (temperature profile) ดังรูปที่ 3.8(ก)

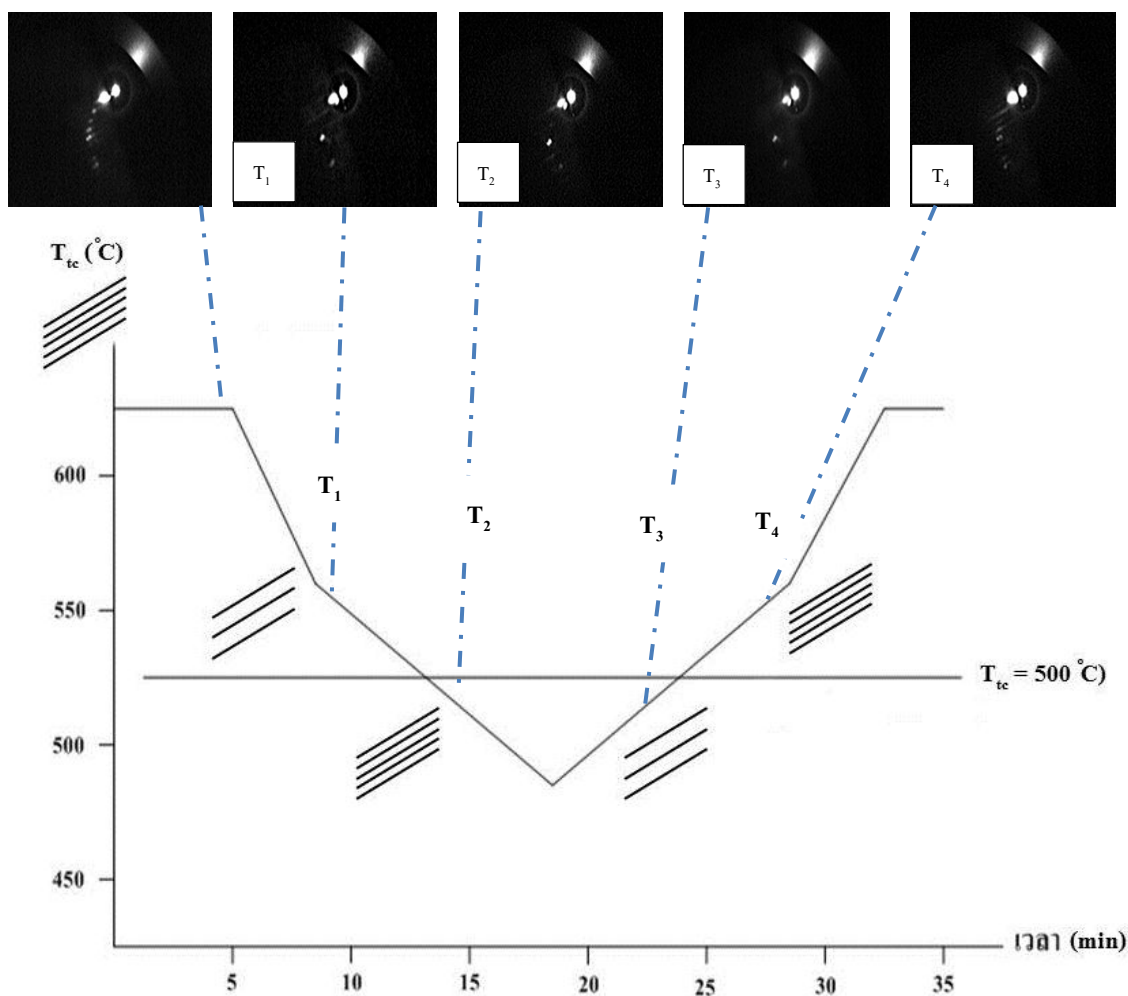


รูปที่ 3.8 โพรไฟล์อุณหภูมิสำหรับกระบวนการ De-ox

ก่อนที่จะทำการ De-ox ต้องเพิ่มอุณหภูมิของ MO Block และ As จากอุณหภูมิเก็บรักษามาที่ 300 C และอุณหภูมิที่ต้องการใช้ตามลำดับ ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมในการใช้งานของ As_4 จะสัมพันธ์กับปริมาณของ As_4 ที่เหลืออยู่ในเซลล์สังเกตได้จากเกจวัดฟลักซ์ โดยทำการเปิดชุดเตอร์หลักและชุดเตอร์ของ As_4 พร้อมๆกัน จากนั้นหยุดรอเพื่อปล่อยให้ As_4 กระจายตัวในห้องปลูกสังเกตการณ์การเปลี่ยนแปลง ฟลักซ์ของ As_4 ให้มีค่าประมาณ 8×10^{-8} torr เมื่อฟลักซ์คงที่แล้วเพิ่มอุณหภูมิของ MO Block ที่อัตรา $30^\circ C/min$ เพื่อทำการ De-ox ต่อไป โดยอุณหภูมิของการขับออกไอซ์ต์ออกจากผิวหน้าของชิ้นงานอยู่ที่ประมาณ $580^\circ C$ ดังนั้นจึงต้องเปลี่ยนแปลงอัตราการเพิ่มอุณหภูมิลงที่ $10^\circ C/min$ เพื่อสังเกตรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของ RHEED ดังแสดงในรูปที่ 3.8(ข) ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น เมื่อทราบค่า T_{de-ox} (Oxide Desorption Temperature) ต้องเพิ่มอุณหภูมิจาก T_{de-ox} อีก $30^\circ C$ แล้วหยุดรอเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้ไอซ์ต์หลุดออกจากผิวหน้าของชิ้นงานสามารถสังเกตออกไอซ์ต์ที่ออกมาได้จาก QMS จึงลดอุณหภูมิ MO Block ลงมาที่ T_{de-ox} เมื่อออกไอซ์ต์หลุดออกจากผิวหน้าของชิ้นงานทำให้ผิวหน้ามีลักษณะขรุขระจึงต้องปลูกโครงสร้างบัพเฟอร์หนาประมาณ 100 nm เพื่อให้ผิวหน้าเรียบจากนั้นจึงทำการหาอุณหภูมิจริงของผิวหน้าในหัวข้อถัดไป

3.2.4 การหาอุณหภูมิจริงของผิวหน้า

การหาอุณหภูมิจริงของผิวหน้าเป็นขั้นตอนที่จำเป็นเนื่องจากอุณหภูมิจริงที่ผิวหน้าของชิ้นงาน จะต่างจากอุณหภูมิของ MO Block ที่อ่านได้จากเทอร์มอคัปเปิลที่เชื่อมต่อบริเวณด้านหลัง MO Block (T_{tc}) การหาอุณหภูมิจริงผิวหน้ากระทำโดยการเปลี่ยนแปลง T_{tc} ดังโปรไฟล์อุณหภูมิในรูปที่ 3.9 แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงของ RHEED pattern และบันทึกค่าของอุณหภูมิที่สำคัญ 4 ค่าคือ T_1, T_2, T_3 และ T_4



รูปที่ 3.9 โปรไฟล์อุณหภูมิในการกำหนดอุณหภูมิจริงของผิวหน้า และ RHEED patterns

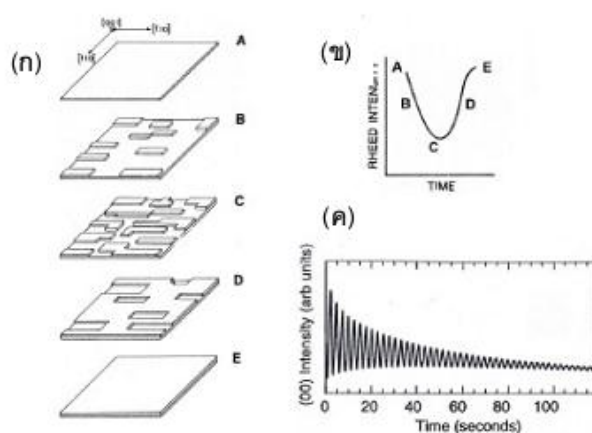
ณ จุดสำคัญ

หลังจากการปลูกบัพเฟอร์เพื่อทำให้ผิวหน้าเรียบหลังจากการทำ De-ox ลักษณะลวดลายของ RHEED จะมีรูปแบบเป็น streaky pattern ที่มีลักษณะเป็นเส้นดังรูปที่ 3.4(ข) ซึ่งเป็นภาพถ่ายขณะที่มอเตอร์หยุดหมุน เมื่อลดอุณหภูมิลงเส้นกลางของ streaky pattern จะหายไปที่อุณหภูมิ T_1 เมื่อลดอุณหภูมิลงไปอีกเส้นกลางจะกลับคืนมาที่ T_2 หลังจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเส้นกลางจะหายไปอีกที่ T_3 และกลับคืนมาที่ T_4 ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ได้ทั้ง 4 หรือ T_{av} คืออุณหภูมิทฤษฎีหรืออุณหภูมิจริงของผิวหน้าที่ 500°C โดยปกติ T_{av} จะขึ้นอยู่กับ MO Block และไม่คอยเปลี่ยนแปลงนัก MO Block ที่ใช้อยู่ ณ ปัจจุบันมี T_{av} โดยประมาณดังนี้ Block 4 ~ 608°C และ Block 5 ~ 605°C (สถานะเมื่อ พ.ศ. 2556)

3.2.5 การกำหนดอัตราการปลูก

การกำหนดอัตราการปลูกของฟิล์มที่ก่อตัวเป็นชั้น เช่น GaAs บน GaAs ทำได้จากการวัดความถี่การสั่นของ specular beam ของ RHEED โดยการจับเวลาดังสรุปในรูปที่ 3.10 เมื่อดูจากชั้นงานในสถานะ A ผิวหน้าของชั้นงานจะเรียบ ความสว่างของ RHEED บริเวณ specular beam มีความเข้มสูงสุด จากนั้นปลูกสารจนผิวหน้าของชั้นงานเริ่มขรุขระ RHEED จะมีความเข้มลดลงเมื่อผิวหน้าขรุขระที่สุด ความเข้มจะต่ำที่สุดเมื่อปลูกต่อไป ผิวหน้าจะลดพลังงานของระบบลงโดยก่อตัวเป็นชั้นที่เป็นระเบียบ ผิวหน้าจะเรียบคืน ความเข้มจะสว่างขึ้นกลับคืนมา ลักษณะมีด-สว่างสลับกันเป็นคาบ (oscillate) แต่ละคาบสื่อถึงการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มเท่ากับ 1 ML อัตราการปลูกจึงถูกกำหนดได้โดยง่ายจากการจับเวลาและการนับจำนวนคาบหรือจำนวนรอบของลักษณะมีด-สว่าง

การกำหนดอัตราการปลูกของฟิล์มที่ก่อตัวเป็นโครงสร้าง 3 มิติ (เช่น InAs บน GaAs) ทำได้จากการจับเวลาเมื่อ RHEED มีลักษณะเป็น Streaky pattern และหยุดจับเวลาเมื่อ RHEED มีลักษณะเป็น Spotty pattern แสดงว่าบนผิวหน้าของชั้นงานมีการเกิด QD ที่มีความหนาประมาณ 1.7 ML



รูปที่ 3.10 (ก) การก่อตัวของ GaAs บน GaAs(001) จาก A ไป E (ข) ความสว่างของ specular beam จาก A ไป E (ค) การสั่นของความสว่างของ specular beam ขณะปลูก GaAs ลงบน GaAs(001) [41]

3.2.6 การปลูกโครงสร้าง

โครงสร้างทั้งหมดปลูกในวิธานิพนธ์ฉบับนี้เป็นโครงสร้างสารประกอบกึ่งตัวนำหมู่ III-V จำแนกตามลักษณะทางกายภาพออกได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่ 1) โครงสร้างก้อนผลึก 2) โครงสร้างลายตาราง 3) โครงสร้างควอนตัมดอต และ 4) โครงสร้างชั้นกลบ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.2.6.1 โครงสร้างก้อนผลึก

โครงสร้างแบบก้อนผลึก (bulk) เป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ในรูปแบบ 3 มิติ ที่เกิดจากการปลูกสารชนิดเดียวกับแผ่นฐาน เช่น ชั้นบัฟเฟอร์ GaAs หนา 300 nm ที่ปลูกบนแผ่นฐาน GaAs จัดอยู่ในโครงสร้างแบบก้อนผลึกได้ โครงสร้างชนิดนี้เหมาะแก่การปรับผิวหน้าของชิ้นงานให้เรียบและพร้อมที่จะปลูกโครงสร้างอื่นๆ

การปลูกชั้นบัฟเฟอร์สามารถทำได้โดยการเปิดเซลล์เตอร์ของ Ga เพื่อให้ไอของ Ga จับกับ As_4 ที่บริเวณผิวหน้าของชิ้นงานภายใต้บรรยากาศของ As_4 โดยปกติชั้นบัฟเฟอร์จะถูกปลูกที่อุณหภูมิสูงๆ เช่น ที่ $580^{\circ}C$ เพื่อความเป็นสมบูรณ์ของผลึก

3.2.6.2 โครงสร้างลายตาราง

ชั้นลายตาราง (cross-hatch pattern : CHP) เป็นหนึ่งในโครงสร้างหลักในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โครงสร้าง CHP ของสารประกอบกึ่งตัวนำหมู่ III-V ที่สนใจคือ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ บน GaAs สารประกอบทั้งสองมีโครงสร้างแลตทิซแบบ Zinc Blend ชั้นลายตารางเกิดจากการปลูกฟิล์มที่มี lattice mismatch กับแผ่นฐานต่ำกว่า 1.5% จนกระทั่งชั้นเอพิทอกซ์เกินความหนาวิกฤติ (critical thickness : θ_c) ผลึกจะคลายความเครียด เกิด dislocation ซึ่งจะปรากฏที่ผิวหน้าของชั้นปลูกเป็นลายตารางที่ตั้งฉากกัน (orthogonal) ในทิศ [1-10] และ [110]

การปลูกชั้นลายตาราง InGaAs บน GaAs สามารถทำได้โดยการเปิดซัดเตอร์ In และ Ga พร้อมกันภายใต้บรรยากาศของ As_4 จนกระทั่งได้ความหนาที่ต้องการจากการคำนวณแล้วจึงปิดซัดเตอร์ทั้ง 2 พร้อมกัน จะทำให้ได้ชั้นลายตารางตามที่ต้องการ ในชั้นลายตารางความหนาแน่นและตำแหน่งของลายตารางจะเกิดแบบสุ่ม ซึ่งสามารถควบคุมได้จากความหนาของชั้นปลูกและสัดส่วนโมลของ In ใน $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ แต่มีข้อควรระวังคืออย่าให้อัตราส่วนที่ใช้ในการปลูกของ In เกิน 20% โดยประมาณเนื่องจากจะทำให้มีค่าคงตัวผลึกมากเกินไปจนทำให้ชั้นปลูกเกิดการก่อตัวเป็นรูปแบบ 3 มิติหรือควอนตัมดอต

3.2.6.3 โครงสร้างควอนตัมดอต

โครงสร้างควอนตัมดอตเป็นโครงสร้างในลักษณะ 3 มิติ ที่เกิดจากการปลูกชั้นเอพิที่มีค่าคงตัวแลตทิซไม่ต่างจากแผ่นฐานมากนัก ส่งผลให้ช่วงแรกของการปลูกฟิล์มที่ได้จะก่อตัวเป็นโครงสร้าง 2 มิติ คล้ายควอนตัมเวลล์เรียกว่า wetting layer (WL) หากชั้นเอพิหนากว่า θ_c ฟิล์มจะคลายความเครียดโดยการก่อตัวเป็นควอนตัมดอต

การปลูกชั้นควอนตัมดอต InAs บน GaAs ทำได้โดยการเปิดซัดเตอร์ In ในบรรยากาศของ As_4 ให้อะตอมเกิดการสร้างพันธะเกิดเป็นควอนตัมดอตบนผิวหน้าของชิ้นงาน ซึ่งเราสามารถสังเกตการณ์ควอนตัมดอตได้จาก RHEED pattern โดยก่อนที่จะทำการปลูกควอนตัมดอต ผิวหน้าของชิ้นงานจะเรียบ RHEED จะแสดง streaky pattern คือเป็นเส้นอย่างชัดเจน เมื่อทำการปลูก InAs

เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ความเป็นเส้นจะคมชัดน้อยลงจนกระทั่ง RHEED เปลี่ยนรูปแบบกลายเป็น spotty pattern ซึ่งแสดงถึงการเกิดควอนตัมคอตบนผิวหน้า

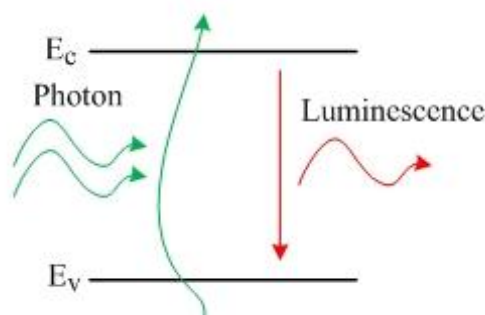
3.2.6.4 โครงสร้างชั้นกลบ

ชั้นกลบ (capping layer) เป็นโครงสร้างที่ปลูกเพื่อป้องกันชั้นไวงานมิให้ถูกระทบโดยสถานะผิว (surface states) ซึ่งอยู่ชั้นบนสุดของพื้นผิวที่มีพันธะอิสระ (dangling bonds) คอยดักจับพาหะ ทำให้เกิดการรวมตัวกันของพาหะแบบไม่เปล่งแสง (Non-radiative recombination) ชั้นงานที่จะถูกนำไปใช้งานหรือทดสอบเชิงแสงจึงต้องมีการปลูกชั้นกลบทับ เพื่อให้มีสมบัติเชิงแสงที่ดี ปกติชั้นกลบทับ GaAs จะหนาประมาณ 50-100 nm

3.3 การวัดลักษณะสมบัติของชั้นงาน

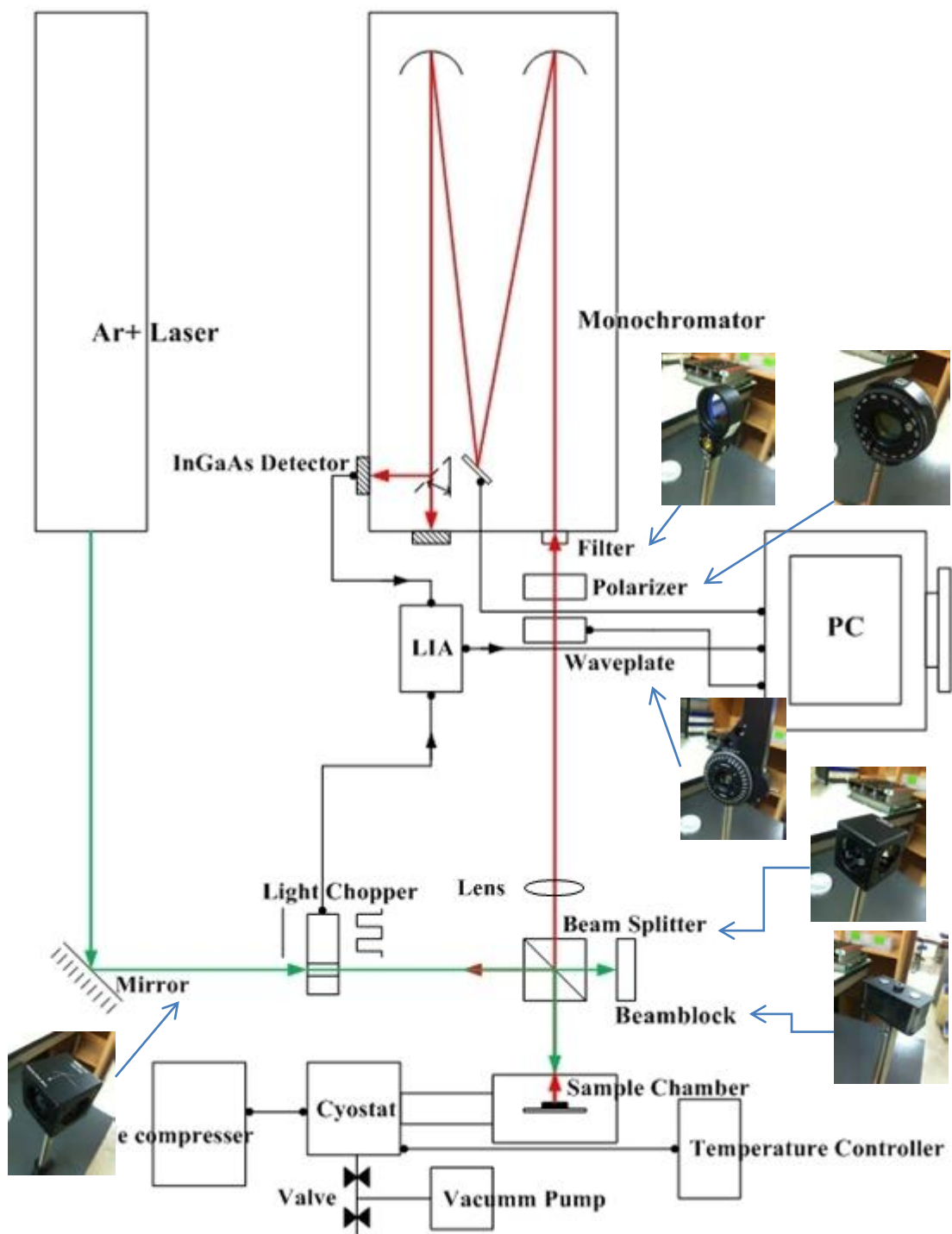
ชั้นงานในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกนำไปวัดลักษณะสมบัติโดยระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ เพื่อศึกษาสมบัติเชิงแสง และ โดยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมเพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ

3.3.1 ระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence : PL)



รูปที่ 3.11 กระบวนการเปล่งแสงของระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์

ชั้นงานจะเปล่งแสงเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีพลังงานสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงาน ทำให้คู่พาหะเกิดการรวมตัวกันและปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน (radiative recombination) ดังรูปที่ 3.11 ฟลักซ์และความยาวคลื่นหรือพลังงานของโฟตอนที่ปล่อยออกมาสามารถวัดได้ด้วยระบบโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.12



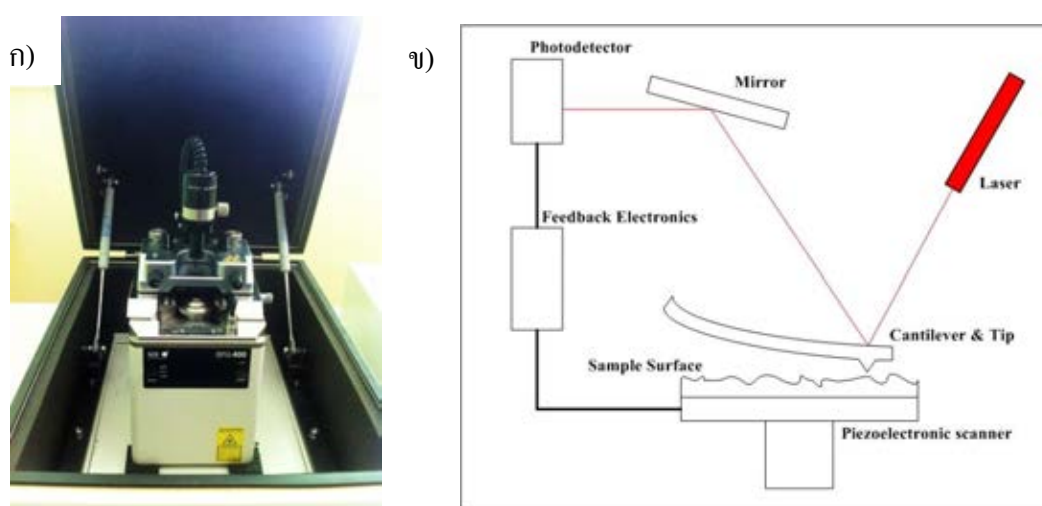
รูปที่ 3.12 แผนภาพเค้าร่างของระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์

การทำงานของระบบโฟโตลูมิเนสเซนซ์ เริ่มจากการยิงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 514.5 nm หรือพลังงาน 2.410 eV ซึ่งมีค่าสูงกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ In(Ga)As ที่ใช้ในการทดลองที่มีระดับพลังงานสูงสุดอยู่ 1.424 eV หรือ 870.8 nm โดยเลเซอร์ที่ยิงออกมาจะมีการเปลี่ยนทิศทางโดยใช้กระจกในการหักเหแสงผ่าน Light Chopper เพื่อทำหน้าที่กรองสัญญาณรบกวน และเปลี่ยนสัญญาณ DC ให้เป็นสัญญาณ AC ที่ความถี่ 330 Hz จากนั้นเลเซอร์จะวิ่งผ่าน Beam Splitter เพื่อใช้ในการหักเหแสงในทิศตั้งฉากเพื่อไปกระทบชิ้นงานที่อยู่ภายในห้องชิ้นงาน (sample chamber) โดยจะมีสถานะเป็นสุญญากาศเพื่อลดสิ่งเจือปนภายใน เมื่อชิ้นงานดูดกลืนพลังงานเกิดการสร้างอิเล็กตรอนและโฮล เมื่อพาหะเกิดการรวมตัวกันจะปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน (radiative recombination) ซึ่งแสงที่ปล่อยออกมาจะอยู่ในย่านอินฟราเรดผ่าน polarizer ที่ผ่านการปรับมุมเพื่อให้ได้ความเข้มแสงสูงสุดและจะวิ่งเข้าสู่โมโนโครเมเตอร์ (monochromator) โดยอุปกรณ์นี้จะทำหน้าที่เลือกเฉพาะความยาวคลื่นที่ต้องการวัดโดยใช้เกรตติงทำการคัดกรองให้แสงเหลือเพียงความยาวคลื่นเดียว แสงที่ผ่านการคัดเลือกจะตกกระทบบริเวณไวงานของอุปกรณ์ตรวจจับแสง (detector) สัญญาณที่ได้จาก detector จะถูกส่งไปยังเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน (Lock in Amplifier : LIA) ซึ่งจะขยายสัญญาณเฉพาะที่ความถี่ตรงกับ chopper เท่านั้น ข้อมูลที่ออกจาก LIA จะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์ เมื่อผนวกกับข้อมูลการควบคุมเกรตติงของ monochromator จะสามารถพลอตสเปกตรัมการเปล่งแสงของชิ้นงานที่แสดงกราฟความเข้มแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆได้

เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง สมบัติเชิงแสงของชิ้นงานก็จะเปลี่ยนไปด้วย ดังนั้นจึงมีระบบควบคุมอุณหภูมิของชิ้นงานในภาชนะเย็นยิ่งยวด (cryostat) ที่สามารถปรับลดอุณหภูมิที่ต้องการได้ในช่วง 20-300K ด้วยระบบฮีเลียมคอมเพรสเซอร์ (He^+ compressor) และตัวทำความร้อนโดยอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) และในการตรวจสอบสมบัติโพลาไรเซชันของชิ้นงานด้วยวิธีการโพลาไรเซชันโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Polarization Photoluminescence : PPL) จะใช้ Waveplate เพิ่มเติมบริเวณด้านหน้าของ Polarizer ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนมุมโพลาไรซ์ของแสงอินฟราเรดที่ปล่อยจากชิ้นงาน โดยสามารถเลื่อนมุมโพลาไรซ์ได้ครั้งละ 2 องศา และหมุนด้วยมอเตอร์จำนวน 180 ครั้ง จนครบหนึ่งรอบวง

3.3.2 การวัดลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope : AFM)

ในการตรวจสอบผิวหน้าของชิ้นงานที่ได้จากการสังเคราะห์ เราใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมที่เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผิวหน้าของชิ้นงานได้ในระดับนาโนเมตร ข้อมูลที่ได้จากกล้องทำให้ทราบถึงรูปแบบของผิวหน้าในลักษณะต่างๆ เช่น ขนาด ความสูง ความหนาแน่น และระยะห่างของควอนตัมดอต เป็นต้น ข้อมูลเหล่านี้เป็นสิ่งสำคัญที่บ่งบอกถึงสิ่งที่ได้จากการสังเคราะห์ เมื่อเราเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆ โดยชิ้นงานที่จะนำมาศึกษาสมบัติทางกายภาพจะเป็นชิ้นงานที่ไม่ผ่านการปลูกชั้นกลบ โดยเครื่อง AFM ที่ใช้ในห้องวิจัยคือ Seiko รุ่น SPA-400 ดังรูปที่ 3.13(ก)



รูปที่ 3.13 (ก) กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope : AFM) Seiko รุ่น SPA-400

(ข) แผนภาพการทำงานอย่างง่ายของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

หลักการทำงานของเครื่อง AFM ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.13(ข) เป็นการอาศัยแรงอะตอมระหว่างเข็ม (Tip) ที่อยู่บริเวณปลายคาน (Cantilever) กับผิวหน้าของชิ้นงาน โดยคานจะมีลักษณะการโค้งงอขึ้นอยู่กับผิวหน้าของชิ้นงาน และมีการวัดความโค้งงอของคานจากการยิงแสงเลเซอร์ไปตรงกระทบบด้านหลังของคาน ซึ่งเคลือบวัสดุที่มีคุณสมบัติการสะท้อนแสงได้ดี ให้แสงที่สะท้อนออกมาไปตกกระทบบกับตัวตรวจจับแสง (Photodetector) โดยสัญญาณจากตัวตรวจจับแสงเมื่อคาน

มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงจะเป็นข้อมูลของชั้นงานในแนวตั้ง (z) จากนั้นจึงเลื่อนตำแหน่งของชั้นงานแนวระนาบ (x,y) ในจุดถัดไป ข้อมูลในแนวตั้งของชั้นงานในแต่ละจุดบนแนวระนาบที่ได้จะมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะผิวหน้าของชั้นงาน ซึ่งข้อมูลจากการสแกนทั้งหมดจะถูกประมวลเป็นภาพที่มีลักษณะของโทนสีที่แตกต่างกัน เพื่อบ่งบอกถึงความสูงหรือต่ำของผิวหน้าแต่ละช่วงของชั้นงาน

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

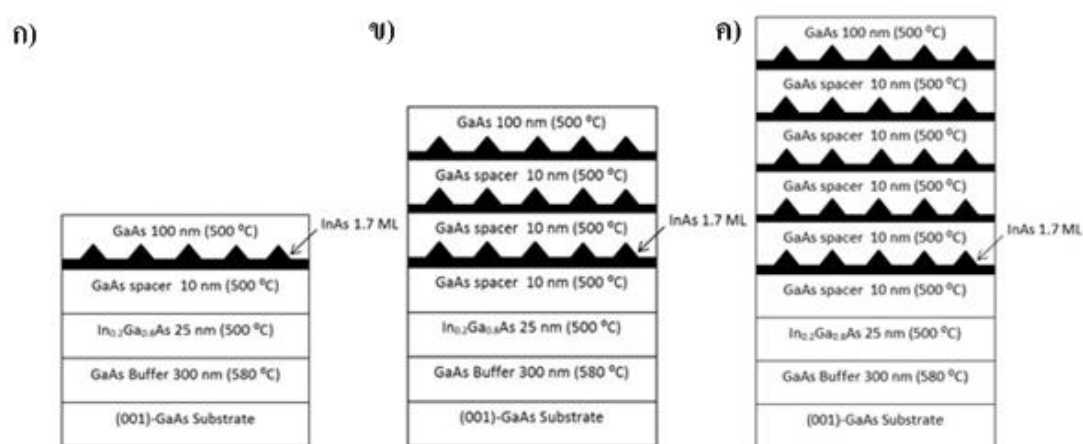
การทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาสมบัติเชิงแสงและสัณฐานวิทยาพื้นผิวของควอนตัมดอตบนพื้นผิวลายตารางเป็นหลัก เป็นการทดลองที่ต่อเนื่องและต่อยอดจากในอดีตของห้องปฏิบัติการวิจัยสารกึ่งตัวนำ (SDRL) ส่วนแรกเป็นการทดลองที่นำชิ้นงานซึ่งปลูกโดย T. Chokamnuai [42] ประกอบด้วยชิ้นงาน F05C, B และ A เป็นโครงสร้างควอนตัมดอต InAs และชั้นกั้น GaAs หนา 10 nm จำนวน 1, 3 และ 5 ชั้นตามลำดับ บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ มาวัดและวิเคราะห์สมบัติเชิงแสงด้วยระบบ PL และ PPL ส่วนที่สองเป็นการปลูกชิ้นงานโดยปรับความหนาของชั้นกั้น GaAs เป็น 6 และ 3 nm แล้วนำไปวัดและวิเคราะห์สัณฐานวิทยาพื้นผิวของควอนตัมดอต ผลการทดลองจึงจำแนกออกได้เป็นสองหัวข้อ 4.1) ผลการวัดและวิเคราะห์สมบัติเชิงแสงของโครงสร้างเดิมจากในอดีต ด้วยเทคนิค PL และ PPL และ 4.2) ผลการวัดและวิเคราะห์สัณฐานวิทยาพื้นผิวของโครงสร้างใหม่ด้วยเทคนิค AFM

4.1 ผลการวัดและวิเคราะห์สมบัติเชิงแสงของโครงสร้างเดิมจากในอดีต ด้วยเทคนิค PL และ PPL

ชิ้นงาน F05A B และ C เป็นชิ้นงานที่ปลูกบนแผ่นฐานตั้งต้น (001)-GaAs ซึ่งผ่านการทำความสะอาด ขัดสิ่งสกปรก และความชื้นบริเวณผิวหน้าก่อนนำเข้า Growth Chamber โดยการ preheat จากนั้นทำการขับออกไฮโดรเจนจากผิวหน้าของชิ้นงาน โดยเพิ่มอุณหภูมิที่ $580\text{ }^{\circ}\text{C}$ แต่การกำจัดออกไฮโดรเจนส่งผลให้ผิวหน้าของชิ้นงานขรุขระ จึงจำเป็นต้องปลูก GaAs Buffer ที่อุณหภูมิ $580\text{ }^{\circ}\text{C}$ หนา 300 nm เพื่อให้ผิวหน้าของชิ้นงานเรียบ จากนั้นจึงปลูกโครงสร้างที่ต้องการ

โครงสร้างของชิ้นงาน A (F05C) (ดังแสดงในรูปที่ 4.1(ก)) เริ่มจากพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ หนา 25 nm ตามด้วยชั้นกั้น GaAs หนา 10 nm และควอนตัมดอต InAs ขนาด 1.7 Monolayer (ML) โดยสังเกตการเกิดควอนตัมดอตจาก RHEED pattern โดยลวดลายที่แสดงบนฉากฟอสเฟอร์เปลี่ยนจาก Streaky เป็น Spotty pattern ใช้อัตราการปลูก 0.01 ML/s ทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนสารประกอบมีการแทรกเวลาขัดจังหวะการปลูก (Growth Interrupt : GI) เป็นเวลา 30 s การปลูกจากนั้นกลับทับด้วย GaAs หนา 100 nm เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์สมบัติเชิงแสง และปลูกชิ้นงาน

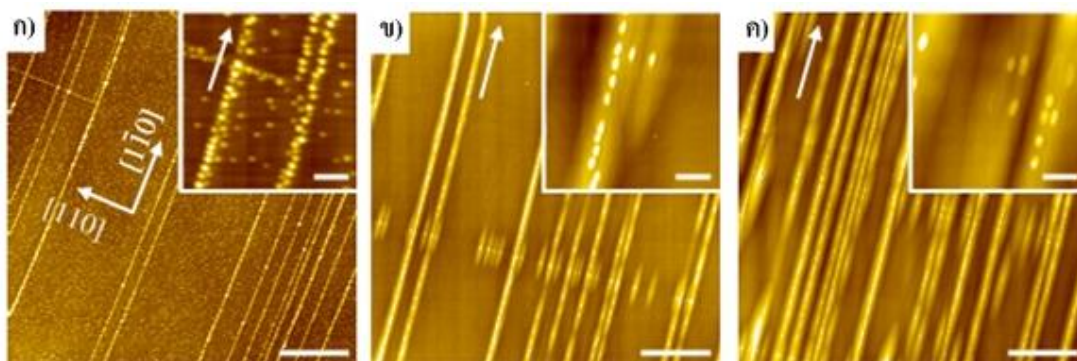
ด้วยโครงสร้างเดียวกันแต่ไม่มีการกบตบด้วย GaAs หนา 100 nm เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์สัณฐานวิทยา ส่วนชิ้นงาน B (F05B) และชิ้นงาน C (F05A) มีลักษณะโครงสร้างหลักที่เหมือนกับชิ้นงาน A แต่แตกต่างกันที่จำนวนชั้นของควอนตัมดอท InAs และชั้นกั้น GaAs ที่ซ้อนทับกัน 3 และ 5 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.1(ข) และ 4.1(ค) ตามลำดับ จุดสำคัญอยู่ที่ในการปลูกควอนตัมดอท InAs แต่ละชั้นของทั้ง 3 ชิ้นงาน ใช้การเกิด Spotty pattern ควบคุมขนาดของควอนตัมดอท



รูปที่ 4.1 ภาพตัดขวางแสดงลักษณะโครงสร้างของชิ้นงาน ก) A (F05C) ข) B (F05B) และ ค) C (F05A)

4.1.1 สัณฐานวิทยาพื้นผิว

สัณฐานวิทยาพื้นผิวของชิ้นงาน A B และ C จากการวัดโดยเครื่อง AFM แสดงให้เห็นว่า ผิวหน้าของชิ้นงานประกอบไปด้วยควอนตัมดอทบนลายตาราง รูปที่ 4.2(ก), (ข) และ (ค) แสดงจาก ภาพเป็นภาพ AFM ขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ (รูปหลัก) และ $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ (รูปแทรก) ของชิ้นงาน A, B และ C ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 ภาพ AFM ขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ (รูปแทรกขนาด $1 \times 1 \mu\text{m}^2$) ของชิ้นงาน ก) A ข) B และ ค) C [43]

เมื่อพิจารณาดำแหน่งก่อดัวของควอนตัมดอตจะพบว่า ชิ้นงาน A นอกจากจะมีควอนตัมดอตก่อดัวบนเส้น dislocation ในทิศทาง $[1-10]$ และ $[110]$ เหมือนกับชิ้นงาน B และ C แล้ว ยังมีควอนตัมดอตก่อดัวบนบริเวณพื้นที่เรียบอีกด้วย สาเหตุอาจเกิดจากการที่บริเวณพื้นที่เรียบของชิ้นงาน B และ C มีชั้นกั้น GaAs หลายชั้น จึงมีความเครียดน้อยกว่าในบริเวณเทียบเท่ากันในชิ้นงาน A ในการก่อดัวของควอนตัมดอตที่มีรูปแบบการปลูกเดียวกัน ควอนตัมดอตมีการก่อดัวในบริเวณที่มีความเครียดมากกว่าซึ่งก็คือบริเวณของเส้นลายตารางในทิศ $[110]$ และ $[1-10]$ ควอนตัมดอตที่ก่อดัวในบริเวณดังกล่าวมีความหนาแน่นของควอนตัมดอตสูง โดยชิ้นงาน A มีความหนาแน่นสูงที่สุด และมีค่าลดลงในชิ้นงาน B และ C ตามลำดับ ดังแสดงในรูปแทรกขนาด $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ ในทางตรงกันข้ามเส้นลายตารางในชิ้นงาน C มีความหนาแน่นสูงที่สุด และลดหลั่นลงไปชิ้นงาน B และ A ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบเส้นผ่านศูนย์กลางของควอนตัมดอตในแต่ละทิศทางคือ ทิศ $[110]$ เส้นผ่านศูนย์กลางของควอนตัมดอตในชิ้นงาน B และ C ใกล้เคียงกันที่ 35 nm ซึ่งยาวกว่าของชิ้นงาน A ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 nm ในทิศ $[1-10]$ เส้นผ่านศูนย์กลางของควอนตัมดอตในชิ้นงาน B และ C อยู่ที่ 60 nm และมีค่าเป็นสองเท่าของชิ้นงาน A ความสูงเฉลี่ยควอนตัมดอตของชิ้นงาน A อยู่ที่ 6 nm และเพิ่มขึ้นในชิ้นงาน B ที่ 8 nm แต่ลดลงในชิ้นงาน C ที่ 6 nm [43]

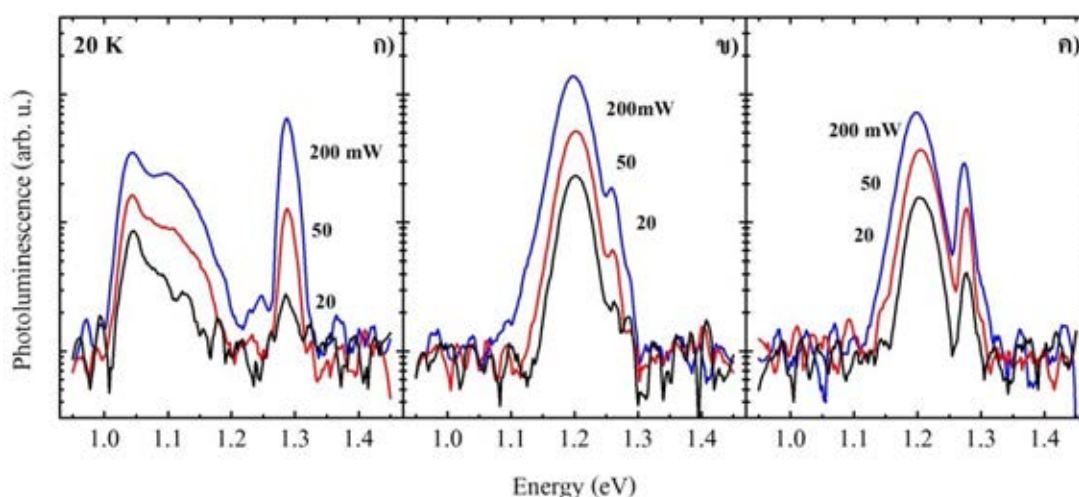
วัสดุข้างต้นถูกนำมาวัดสมบัติเชิงแสงโดยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (PL) ดังแสดงในรูปที่ 3.12 รูปแบบในการวัด PL spectra แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบย่อยคือ PL แบบปกติและ PL ที่สามารถจำแนกความเข้มของแสงที่แต่ละมุมโพลาไรซ์ของแสงหรือ PPL ได้ผลจากการทดลอง PL แบบปกติและ PPL เป็นดังนี้

4.1.2 สมบัติเชิงแสงโดยเทคนิค PL แบบปกติ

การวัดสมบัติเชิงแสงของชิ้นงานโดยเทคนิคแบบ PL แบบปกติจำแนกออกเป็น 2 รูปแบบ คือ 1) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมที่ชิ้นงานเปล่งออกมาเป็นฟังก์ชันกับพลังงานของแสงกระตุ้น (Power Dependent) และ 2) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมที่ชิ้นงานเปล่งออกมาเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ (Temperature Dependent) ดังต่อไปนี้

4.1.2.1 Power Dependent

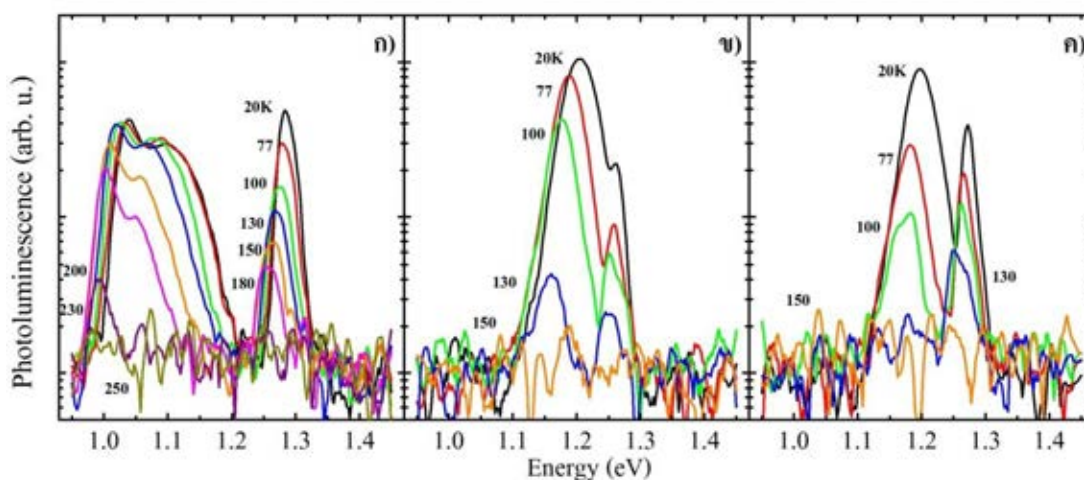
การวัด PL ของชิ้นงานแบบ Power Dependent กระทำโดยกำหนดให้อุณหภูมิของชิ้นงานคงตัวที่ 20 K แล้วเปลี่ยนแปลงพลังงานของแสงกระตุ้นที่ 20, 50 และ 200 mW สเปกตรัม PL ของทั้ง 3 ชิ้นงานถูกแสดงดังรูปที่ 4.3 ลักษณะกราฟของทั้ง 3 ชิ้นงาน สรุปได้ดังนี้ เมื่อค่าพลังงานของแสงกระตุ้นมีค่า 200 mW แสงที่วัตถุเปล่งออกมาจะมีความเข้มสูงที่สุด และเมื่อพลังงานของแสงกระตุ้นลดลงเป็น 50 และ 20 mW แสงที่วัตถุเปล่งออกมาก็จะมีความเข้มลดหลั่นลงตามลำดับ แสดงว่าค่าความเข้มโฟโตลูมิเนสเซนซ์แปรผันตามค่าพลังงานของแสงกระตุ้น ยืนยันว่าสเปกตรัมทั้งหมดเกิดจากพาหะในสถานะพื้น (ground state) เนื่องจากความเข้มไม่อิ่มตัว



รูปที่ 4.3 สเปกตรัม PL ของ ชิ้นงาน ก) A, ข) B และ ค) C ที่อุณหภูมิ 20 K และพลังงานกระตุ้น 20, 50 และ 200 mW

4.1.2.2 Temperature Dependent

การวัด PL ของชั้นงานแบบ Temperature Dependent กระทำโดยกำหนดให้พลังงานของแสงกระตุ้นชั้นงานมีค่าคงตัว สำหรับชั้นงาน A ให้คงตัวที่ 210 mW ชั้นงาน B ที่ 72 mW และชั้นงาน C ที่ 200 mW สาเหตุที่กำหนดค่าพลังงานของแต่ละชั้นงานแตกต่างกันก็เพื่อให้ค่าความเข้มของแสงที่ชั้นงานเปล่งออกมาอยู่ในระดับเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 4.4 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมกับอุณหภูมิของชั้นงานทั้ง 3 จะคล้ายกัน สำหรับชั้นงาน A เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสำหรับความเข้มโฟโตลูมิเนสเซนซ์จะลดลงกระทั่งอยู่ในระดับเดียวกับสัญญาณรบกวนที่อุณหภูมิ 250 K และยอดพลังงานจะมีพลังงานลดลง (red-shift) [34] ดังรูปที่ 4.4(ก) สำหรับชั้นงาน B และ C ความเข้มโฟโตลูมิเนสเซนซ์จะลดลงจนกระทั่งอยู่ในระดับเดียวกับสัญญาณรบกวนที่อุณหภูมิ 150 K โดยยอดพลังงานจะ red-shift คล้ายกันดังรูปที่ 4.4(ข) และ (ค) ตามลำดับ

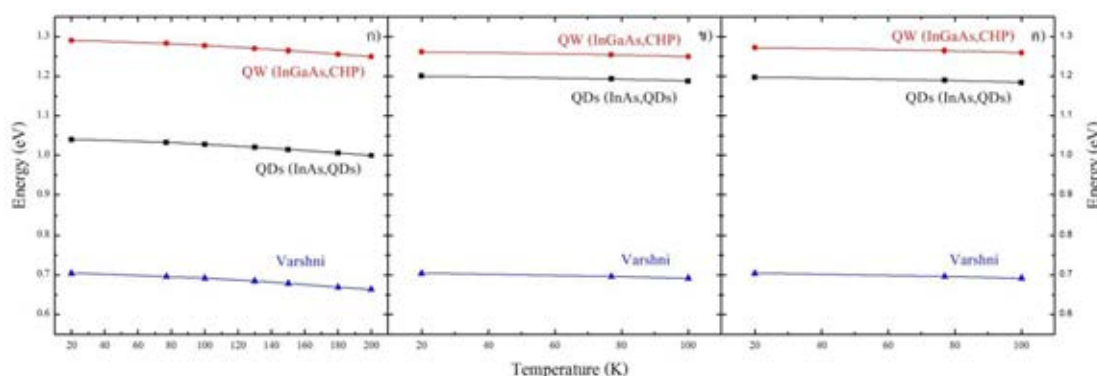


รูปที่ 4.4 สเปกตรัม PL ของชั้นงาน ก) A, ข) B และ ค) C จากการวัดแบบ Temperature Dependent

การที่ขดพลังงานมีค่าลดลงกับอุณหภูมิที่สูงขึ้นเกิดจากช่องว่างแถบพลังงานของควอนตัมดอตที่ลดลงกับอุณหภูมิตามกฎของ Varshni [44] ดังสมการ

$$E_g(T) = E(0) - \frac{T^2}{(T + \theta)} \quad (4.1)$$

เมื่อ $E_g(T)$ คือ ความกว้างของช่องว่างแถบพลังงาน, $E(0)$ คือ พลังงานที่ 0 K ของควอนตัมดอต InAs ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.705 eV, และ θ เป็นค่าคงตัวของวัสดุ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.91×10^{-4} eV/K และ 271 K [22] ตามลำดับ โดยนำค่าขดพลังงานของควอนตัมดอตบนเส้นลายตารางและชั้นลายตารางของชั้นงานทั้ง 3 มาแสดงเป็นกราฟระหว่างพลังงาน (แกน x) และอุณหภูมิของชั้นงาน (แกน y) เทียบกับกราฟของ Varshni แสดงถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงพลังงานและอุณหภูมิของชั้นงานที่สอดคล้องกับ Varshni ดังรูปที่ 4.5

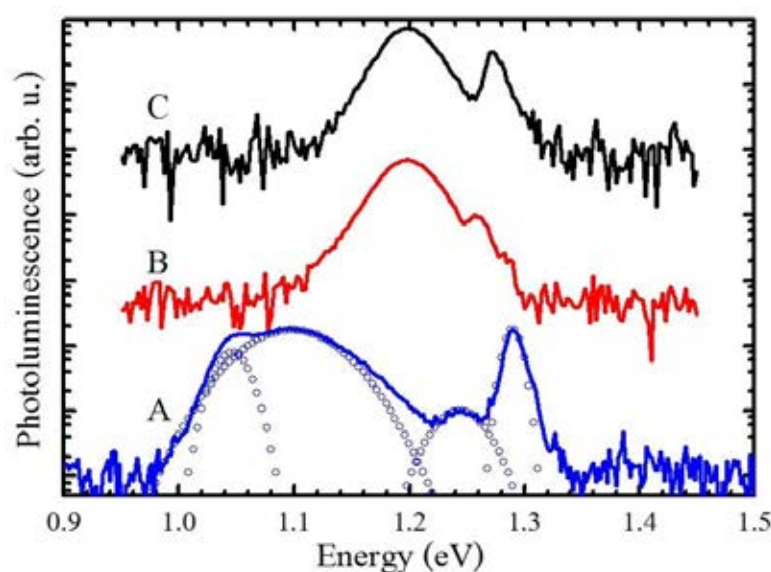


รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงระหว่างพลังงานและอุณหภูมิของชั้นงาน ก) 301A, ข) 301B และ ค) 301C จากค่าขดพลังงานของควอนตัมดอตบนเส้นลายตารางและชั้นลายตาราง เทียบกับ Varshni

หลังจากการวัด PL แบบ Power และ Temperature Dependent ข้างต้นแล้ว ยังได้มีการวัด PL เพิ่มเติมเพื่อวิเคราะห์ผลการเปล่งแสงของแต่ละชั้นงานในเชิงเปรียบเทียบ โดยกำหนดให้อุณหภูมิคงตัวที่ 20 K และพลังงานของแสงกระตุ้นคงตัวที่ 50 mW ผลที่ได้ถูกแสดงดังรูปที่ 4.6 ชั้นงาน A (เป็นการทำ multiple Gaussian function) มีค่าขดพลังงาน 4 ค่า ค่าที่ต่ำที่สุดคือ 1.05 eV เป็นผลจากการเปล่งแสงของควอนตัมดอต InAs ที่ก่อตัวบนเส้นลายตารางในทิศ [1-10] ค่าที่มีพลังงานสูงขึ้นลำดับถัดมาคือ 1.10 eV เป็นผลจากการเปล่งแสงของควอนตัมดอต InAs ก่อตัวบนเส้นลายตารางในทิศ [110] ที่ค่าขดพลังงานที่ให้ค่าความเข้มโฟโตลูมิเนสเซนซ์ต่ำที่สุดคือ 1.24 eV

เป็นผลจากการเปล่งแสงของควอนตัมดอทบนผิวราบเรียบ สุดท้ายที่ค่ายอดพลังงาน 1.29 eV เป็นผลจากการเปล่งแสงของชั้นลายตาราง InGaAs [43]

ค่ายอดพลังงานของชั้นงาน B และ C แตกต่างกันอย่างชัดเจน ชั้นงาน B มีค่ายอดพลังงานคล้ายกับยอดเดี่ยว ชั้นงาน C มีค่ายอดพลังงานแยกกันอย่างชัดเจน 2 ยอดคือที่ 1.2 และ 1.26-1.27 eV เมื่อเปรียบเทียบสเปกตรัมจากชั้นงานทั้ง 3 จะพบว่าควอนตัมดอทในชั้นงาน B และ C เปล่งแสงที่ระดับพลังงานสูงกว่าในชั้นงาน A ถึง 154 meV และมี FWHM ที่สูงกว่าชั้นงาน A มากบ่งชี้ว่ายอดพลังงานที่ 1.2 eV ของชั้นงาน B และ C เป็นผลรวมเชิงเส้นของความเข้มแสงที่เปล่งออกมาของควอนตัมดอทที่ก่อตัวบนลายตารางในทิศ [110] และ [1-10] ซึ่งมีขนาดเฉลี่ยและการกระจายตัว (distribution) แตกต่างกันได้เล็กน้อย และยังมี aspect ratio ที่แตกต่างกันด้วย จะเห็นได้จากการทดลอง PPL ในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4.6 สเปกตรัม PL ของชั้นงาน A, B และ C เมื่อกำหนดอุณหภูมิคงตัวที่ 20 K และค่าพลังงานกระตุ้นคงตัวที่ 50 mW [43]

4.1.3 สมบัติเชิงแสงโดยเทคนิค PPL

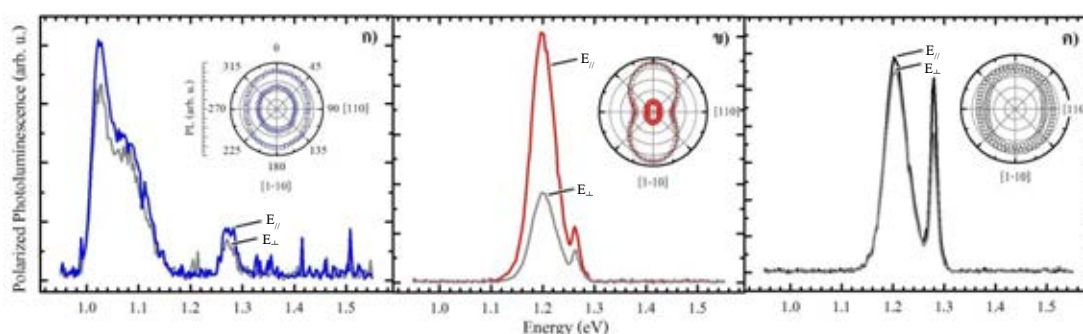
เทคนิค PPL เป็นเทคนิคที่สามารถวัดการเปล่งแสงของควอนตัมดอทแยกในแต่ละทิศทาง ทำให้สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ว่า การเปล่งแสงของชั้นงานมีสมบัติโพลาไรเซชันหรือไม่ ควอนตัมดอทในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีลักษณะที่แตกต่างจากรูปทรงกลมมาก ทำให้แสงที่เปล่ง

ออกมามีแนวโน้มว่ามีสมบัติโพลาไรซ์ ซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างหรือการจัดเรียงตัวของควอนตัมดอต ควอนตัมดอตบนพื้นผิวฉายตารางมีสมบัติโพลาไรเซชันในทิศ [110] และ [1-10] ค่าดีกรีของการโพลาไรซ์ (Degree of Polarization : DOP) กำหนดได้จาก

$$DOP = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (4.2)$$

เมื่อ I_{max} และ I_{min} คือ ความเข้มแสงเมื่อผ่าน Polarizer ที่มีค่ามากและน้อยที่สุด ตามลำดับ

ในการวัดโพลาไรเซชันของชิ้นงานกำหนดค่าพลังงานของแสงกระตุ้นของทั้ง 3 ชิ้นงานที่ 80 mW และค่าอุณหภูมิคงตัวที่ 20 K จากนั้นใช้ Polarizer ที่ผ่านการปรับให้ค่าความเข้มโฟโตลูมิเนสเซนซ์มีค่ามากที่สุด มาวางไว้หน้า Waveplate เพื่อปรับเปลี่ยนมุมโพลาไรซ์ของชิ้นงาน โดยการวัดเลื่อนมุมโพลาไรซ์ครั้งละ 2 องศา และหมุนด้วยมอเตอร์จำนวน 180 ครั้งจนครบหนึ่งรอบวง แล้วให้ข้อมูลออกมาดังรูปที่ 4.7 จากกราฟเชิงเส้นของทั้ง 3 ชิ้นงาน เส้นกราฟสีน้ำเงิน, สีแดง และสีดำ ซึ่งเป็นของชิ้นงาน A, B และ C ตามลำดับ เป็นเส้นกราฟจากการวัดค่าโพลาไรซ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ในทิศขนานกับ [1-10] หรือทิศ E_{\parallel} และเส้นกราฟสีเทาเป็นการวัดค่าโพลาไรซ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ในทิศตั้งฉากกับ [1-10] หรือทิศ E_{\perp} และนำค่าความเข้มที่ได้ในแต่ละทิศทางแทนลงในสมการ 4.2 เพื่อหาค่า DOP ของแต่ละชิ้นงาน

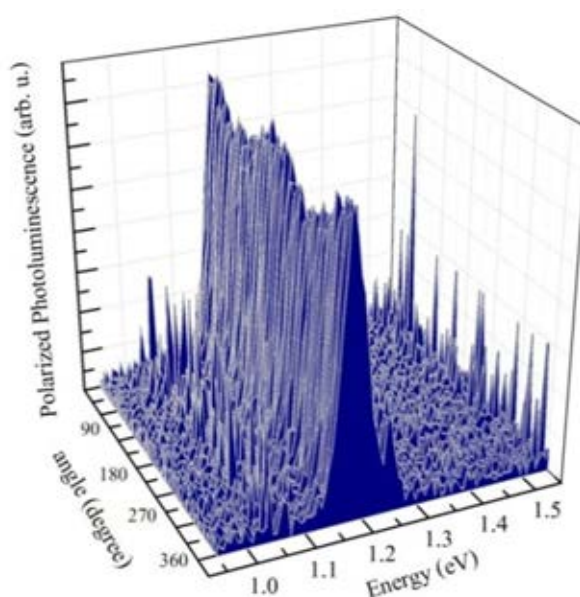


รูปที่ 4.7 ผลการแปลงแสงโพลาไรซ์ของชิ้นงาน ก) A ข) B และ ค) C เมื่อวัดด้วยระบบ PPL [43]

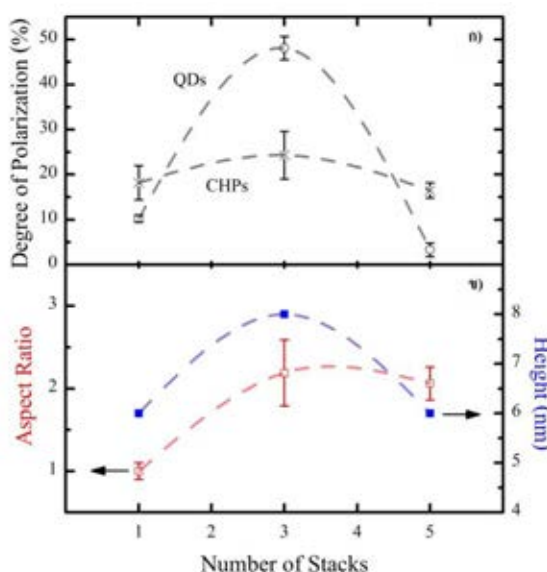
ผลจากการหาค่าโพลาไรซ์ที่ชิ้นงาน A มีผลรวมของการตอบสนองเชิงแสงของควอนตัมดอตแยกกันในแต่ละทิศทางดังนี้ ในทิศ [1-10] คือค่ายอดพลังงานที่ 1.02 eV และในทิศ [110] คือค่ายอดพลังงานที่ 1.05 eV ซึ่งมีลักษณะค่ายอดพลังงานที่คล้ายกันและให้ค่าโพลาไรซ์ 10% ดังรูปที่

4.7(ก) ที่ชั้นงาน B ผลการเปล่งแสงของควอนตัมดอททั้ง 2 ทิศทางคือ ค่ายอดพลังงานที่ 1.20 eV ให้ค่าโพลาไรซ์ 48% ดังรูปที่ 4.7(ข) ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจากชั้นงาน A มากถึง 38% และค่ายอดพลังงานของพื้นผิวลายตาราง InGaAs ที่ 1.27 eV ให้ค่าโพลาไรซ์ 20% แต่ในชั้นงาน C กลับให้ค่าโพลาไรซ์เพียง 3% เท่านั้น ดังรูปที่ 4.7(ค)

การวัดชั้นงาน B ด้วยเทคนิค PPL ในรูปแบบ 3 มิติ ดังรูปที่ 4.8 โดยกำหนดค่าคงตัวในการวัดเหมือนกับการวัดในรูปแบบ 2 มิติ ซึ่งแสดงผลการเปล่งแสงของควอนตัมดอทบนเส้นลายตารางในทิศ [110] และ [1-10] ณ ค่ายอดพลังงานที่ 1.20 eV เมื่อวิเคราะห์ในแต่ละแกนของกราฟ แกนของพลังงานของกราฟทั้ง 2 และ 3 มิติ กราฟเชิงเส้นมีลักษณะเหมือนกัน ส่วนในแกนของมุมโพลาไรซ์ลักษณะของกราฟเมื่อมุมโพลาไรซ์เปลี่ยนไปทุกๆ 90° ค่าความเข้มโพลาไรซ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์มีค่าลดลงและเพิ่มขึ้นสลับกันจนครบหนึ่งรอบวง การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงเป็นกราฟรูป sine โดยค่าความเข้มที่ลดลงเป็นผลการเปล่งแสงในทิศ [110] และที่เพิ่มขึ้นเป็นผลการเปล่งแสงในทิศ [1-10] ซึ่งรูปแบบการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสอดคล้องกับกราฟเชิงมุมของชั้นงาน B ที่แสดงการลดลงและเพิ่มขึ้นของความเข้มโพลาไรซ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์เมื่อมุมการวัดเปลี่ยนแปลง มีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงเป็นรูปเลข 8 ดังรูปที่ 4.7(ข)



รูปที่ 4.8 ผลการเปล่งแสงของโครงสร้างควอนตัมดอท InAs และชั้นชั้น GaAs ขนาด 10 nm จำนวน 3 ชั้น เมื่อวัดด้วยระบบ PPL ในรูปแบบ 3 มิติ



รูปที่ 4.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ ก) ค่าโพลาไรซ์ของควอนตัมดอตและพื้นผิวลายตาราง ข) aspect ratio และความสูงของควอนตัมดอต เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนชั้นการปลูก [43]

รูปที่ 4.9(ข) แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของความกว้างที่ฐานในทิศ [1-10] ต่อ [110] (aspect ratio) ของควอนตัมดอตมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วระหว่างชั้นงาน A และ B จนอิมิตัวในท้ายที่สุดระหว่างชั้นงาน B และ C แต่ความสูงของควอนตัมดอตมีการเพิ่มขึ้นจากชั้นงาน A ไป B และลดลงจากชั้นงาน B ไป C ที่ 2 nm เมื่อเปรียบเทียบค่าโพลาไรซ์ที่ได้ระหว่างชั้นงาน A และ B ค่าโพลาไรซ์เพิ่มขึ้นถึง 38% และมีค่าลดลงถึง 45% เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชั้นงาน B และ C แสดงให้เห็นว่า aspect ratio ของโครงสร้างส่งผลกระทบต่อสมบัติโพลาไรซ์ของแสงที่เปล่งออกมา

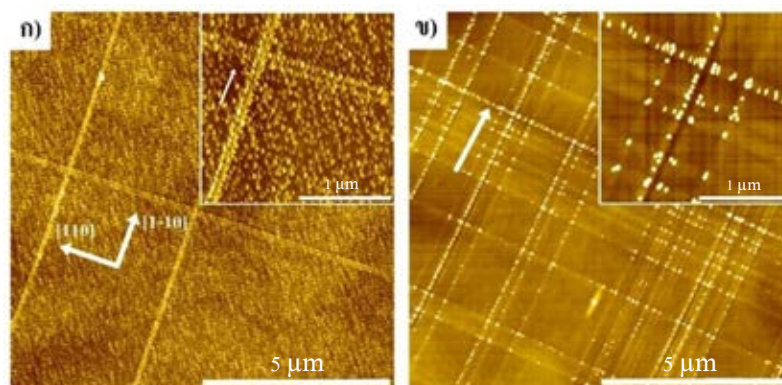
4.2 ผลการวัดและวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาพื้นผิวของโครงสร้างใหม่ด้วยเทคนิค AFM

ชั้นงานที่สังเคราะห์ใหม่เป็นโครงสร้างที่ปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์สำคัญจากโครงสร้างเก่าในหัวข้อที่แล้ว แบ่งชั้นงานใหม่ออกเป็น 2 ชุดคือ ชั้นงานของควอนตัมดอต InAs ขนาด 1.7 ML และชั้นกั้น GaAs หนา 6 และ 3 nm จำนวน 1 3 และ 5 ชั้น บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ชั้นงานถูกกำหนดชื่อเป็น 301A B C และ 303 A B C ดังสรุปในตารางที่ 4.1

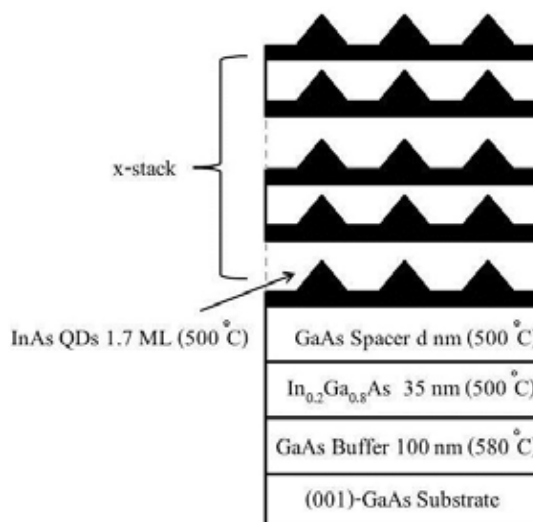
ตารางที่ 4.1 ความหนาของชั้นกั้น GaAs (d) และจำนวนชั้นของ QDs (x)
ของชั้นงาน 301A B C และ 303A B C

ชั้นงาน	ความหนาของชั้นกั้น GaAs หรือ d (nm)	จำนวนชั้นของ QDs หรือ x (ชั้น)
301A	6	1
301B	6	3
301C	6	5
303A	3	1
303B	3	3
303C	3	5

การสังเคราะห์ชั้นงาน 301A เริ่มจากการเตรียมแผ่นฐานตั้งต้น (001)-GaAs ที่ผ่านการทำความสะอาดและกำจัดออกไซด์ที่ผิวหน้าแล้ว ปลูก GaAs ขนาด 100 nm ที่อุณหภูมิ 580 °C เพื่อให้ผิวหน้าของชั้นงานเรียบ จากนั้นปลูกพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ขนาด 25 nm อัตราการปลูก 0.1 ML/s ที่อุณหภูมิ 500 °C แต่ลักษณะของพื้นผิวลายตารางที่ได้มีความหนาแน่นของเส้นลายตารางในปริมาณน้อย ดังแสดงในรูป 4.10(ก) จึงเพิ่มขนาดของพื้นผิวลายตารางมาที่ 35 nm เพื่อให้เกิดความหนาแน่นของเส้นลายตารางในปริมาณมากขึ้นดังแสดงในรูป 4.10(ข) ชั้นถัดมาปลูกชั้นกั้น GaAs ขนาด 6 nm ที่อุณหภูมิ 500 °C และปลูกควอนตัมดอต InAs 1.7 ML อัตราการปลูก 0.1 ML/s แต่ควอนตัมดอตที่เกิดขึ้นนอกจากเกิดบนเส้นลายตารางแล้ว ยังเกิดบริเวณของพื้นผิวเรียบ ดังแสดงในรูป 4.10(ก) จึงต้องลดอัตราการปลูกเพื่อป้องกันไม่ให้ควอนตัมดอตเกิดบริเวณพื้นผิวเรียบลงมาที่ 0.01 ML/s ทำให้ได้โครงสร้างในลักษณะที่ต้องการ



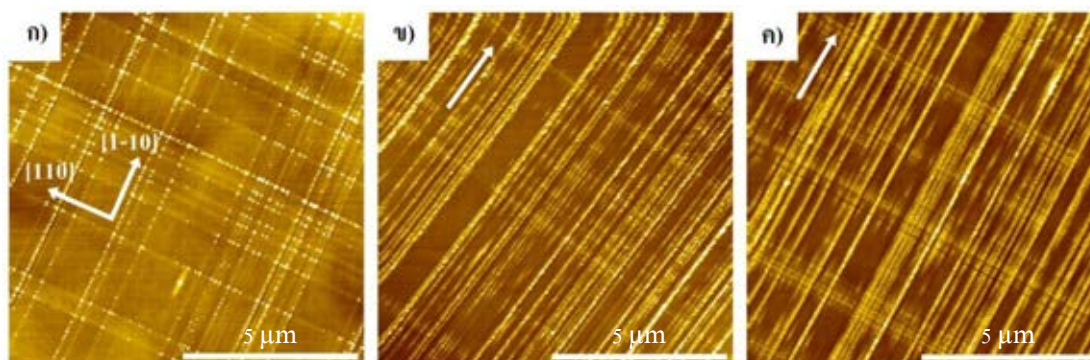
รูปที่ 4.10 ภาพ AFM ขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ และ $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ ของโครงสร้าง ก) ควอนตัมดอต InAs 1.7 ML อัตราการปลูก 0.1 ML/s และชั้นชั้น GaAs ขนาด 6 nm บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ขนาด 25 nm ข) ควอนตัมดอต InAs 1.7 ML อัตราการปลูก 0.01 ML/s และชั้นชั้น GaAs ขนาด 6 nm บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ขนาด 35 nm



รูปที่ 4.11 ภาพตัดขวางแสดงลักษณะ โครงสร้างของชิ้นงาน 301A B C และ 303A B C

ชิ้นงาน 301B และ 301C มีโครงสร้างพื้นฐานเช่นเดียวกับชิ้นงาน 301A ต่างกันที่ชั้นควอนตัมดอต InAs และชั้นชั้น GaAs ที่มีการปลูกซ้อนทับกัน ชิ้นงาน 301B ซ้อนทับกัน 3 ชั้น ขณะที่ชิ้นงาน 301C ซ้อนทับกัน 5 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ชุดชิ้นงาน 303A, 303B และ 303C เหมือนกับชุดชิ้นงาน 301A, 301B และ 301C ตามลำดับแทบทุกประการ ต่างเพียงแต่ความหนาของชั้นชั้น GaAs ที่ลดลงจาก 6 เป็น 3 nm

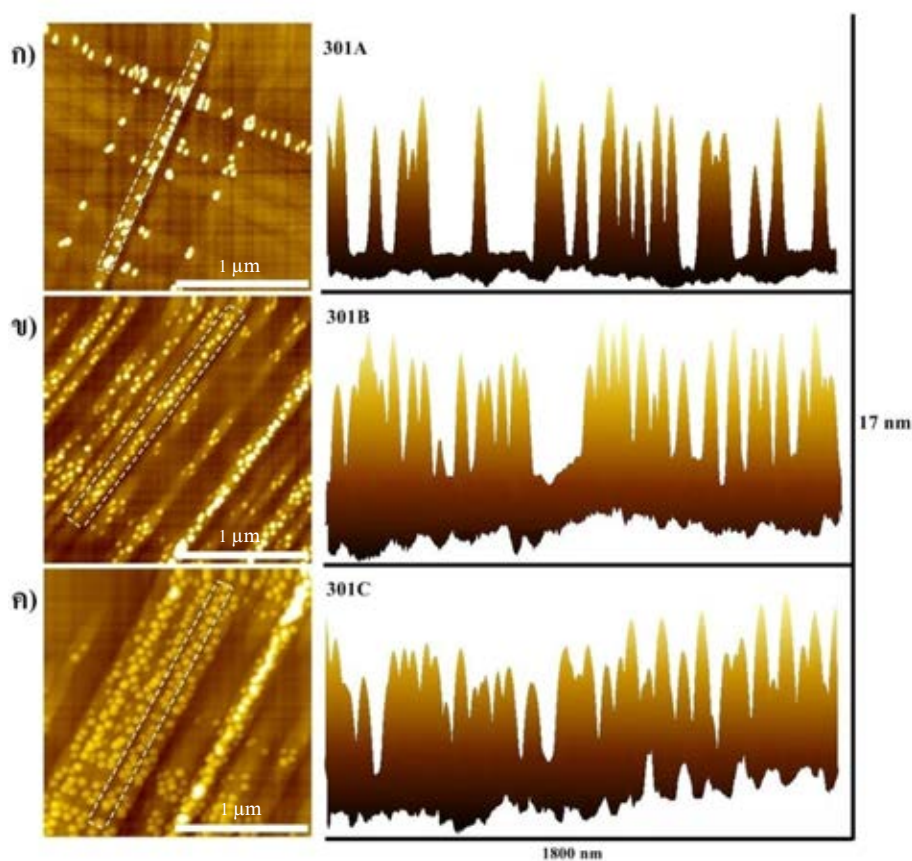
พื้นผิวของชิ้นงานทั้ง 2 ชุด จากการวัดด้วยเครื่อง AFM ถูกแสดงในรูปที่ 4.12 และ 4.14 ซึ่งแสดงภาพ AFM ขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ ของชิ้นงาน 301A B C และ 303A B C ตามลำดับ ในส่วนของกลุ่มชิ้นงาน 301 จำนวนเส้นลายตารางในทิศ [110] ของทั้ง 3 ชิ้นงานมีความหนาแน่นของเส้นลายตารางที่ใกล้เคียงกัน ส่วนในทิศ [1-10] จำนวนเส้นลายตารางของชิ้นงาน 301B และ 301C มีความหนาแน่นของเส้นลายตารางใกล้เคียงกัน และมีค่ามากกว่าชิ้นงาน 301A เนื่องจากเส้นลายตารางในทิศ [1-10] ก่อตัวก่อนทิศ [110] บริเวณเส้นลายตารางที่ปกติเป็นพื้นที่ที่มีความเครียดมากกว่าพื้นผิวเรียบ การปลูกควอนตัมดอตและชั้นกั้นที่ซ้อนทับกันบนพื้นผิวลายตารางส่งผลให้บริเวณของเส้นลายตารางมีความเครียดสะสมเพิ่มขึ้น ยิ่งจำนวนชั้นมากขึ้นความเครียดยิ่งเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของควอนตัมดอตบนเส้นลายตารางของชิ้นงาน 301C มีค่าสูงที่สุด และลดหลั่นลงในชิ้นงาน 301B และ 301A แสดงดังรูปที่ 4.13 ตามลำดับภาพตัดขวางของควอนตัมดอตในทิศ [1-10] แต่ในบริเวณพื้นผิวเรียบยังมีการปลูกซ้อนทับกันมากขึ้นทำให้บริเวณนี้เกิดการคลายความเครียดส่งผลให้การก่อตัวของควอนตัมดอตในบริเวณนี้เกิดขึ้นได้ยากหรืออาจไม่มีการก่อตัวเลย



รูปที่ 4.12 ภาพ AFM ขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ ของชิ้นงาน ก) 301A ข) 301B และ ค) 301C

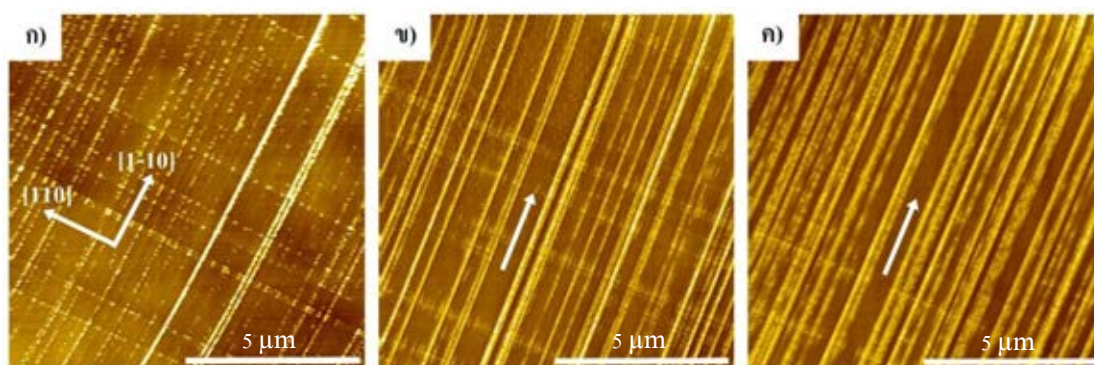
เมื่อนำพื้นผิวของชิ้นงานมาวิเคราะห์หาเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงเฉลี่ยของควอนตัมดอตบนเส้นลายตาราง จากการสุ่มวัดควอนตัมดอตในแต่ละตำแหน่งและหาค่าเฉลี่ย ในทิศ [1-10] ชิ้นงาน 301A และ 301B มีเส้นผ่านศูนย์กลางของควอนตัมดอตใกล้เคียงกันที่ 72 nm และมีค่ามากขึ้นในชิ้นงาน 301C ที่ 85 nm ในทิศ [110] ชิ้นงาน 301A มีเส้นผ่านศูนย์กลางของควอนตัมดอตที่ 68 nm และมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ ในชิ้นงาน 301B และ 301C ที่ 72 และ 87 nm ผลที่ได้แสดงถึงเส้น

ผ่านศูนย์กลางของควอนตัมดอทที่มีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 2 ทิศทางในทุกชั้นงาน จากความหนาแน่นของควอนตัมดอทบนเส้นลายตาราง จึงมีพื้นที่ให้ควอนตัมดอทก่อตัวได้อย่างอิสระและมีลักษณะคล้ายรูปวงกลมมากขึ้น ความสูงเฉลี่ยของควอนตัมดอทในชั้นงาน 301A คือ 4.01 nm และเพิ่มขึ้นในชั้นงาน 301B ที่ 4.77 nm แต่ลดลงในชั้นงาน 301C ที่ 4.30 nm ดังรูปที่ 4.16(ข) เนื่องจากความเครียดที่เพิ่มขึ้นบนเส้นลายตารางเมื่อปลูกซ้อนทับกัน ส่งผลให้การก่อตัวของควอนตัมเกิดได้เร็วขึ้น ทำให้ควอนตัมดอทในชั้นงาน 301B สูงกว่า 301A แต่ความหนาแน่นของควอนตัมดอทบนเส้นลายตารางที่ต่ำ ทำให้ควอนตัมดอทเลือกก่อตัวบนที่ว่างของเส้นลายตารางจึงทำให้ความสูงของควอนตัมดอทในชั้นงาน 301C ลดลง ส่งผลให้ความหนาแน่นสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ภาพ AFM ขนาด $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ และภาพตัดขวางในทิศ [1-10] (บริเวณเส้นประ) ของชั้นงาน ก) 301A, ข) 301B และ ค) 301C

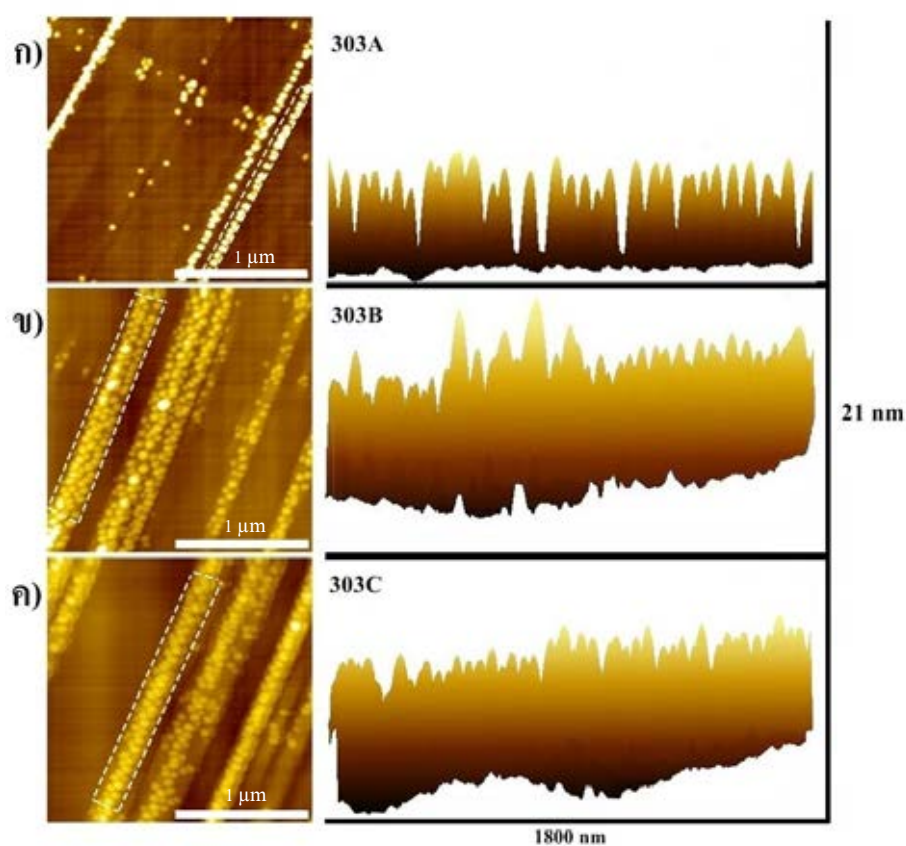
รูปที่ 4.14 แสดงภาพ AFM ขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ ของกลุ่มชิ้นงาน 303 ความหนาแน่นของเส้นลายตารางในทิศ [1-10] ของชิ้นงาน 303C สูงกว่าของชิ้นงาน 303B และ 303A ชิ้นงาน 303A และ 303B มีความหนาแน่นของเส้นลายตารางใกล้เคียงกัน ส่วนในทิศ [110] ชิ้นงาน 303A มีความหนาแน่นมากกว่าชิ้นงาน 303B และ 303C ที่มีค่าลดหลั่นกันลงไป ตามลำดับ จากภาพ AFM ขนาด $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ ดังรูปที่ 4.15 แสดงถึงความหนาแน่นของควอนตัมดอตบนเส้นลายตาราง โดยทั้ง 3 ชิ้นงาน ควอนตัมดอตมีความหนาแน่นสูง และชิ้นงาน 303A มีรูปแบบการก่อตัวบนเส้นลายตารางในลักษณะเป็นเส้นเดี่ยว ชิ้นงาน 303B รูปแบบการก่อตัวบนเส้นลายตารางมีทั้งที่มีลักษณะเป็นเส้นเดี่ยวและกระจายตัว แต่รูปแบบที่มีลักษณะเป็นเส้นเดี่ยวมีปริมาณมากกว่า ชิ้นงาน 303C รูปแบบการก่อตัวบนเส้นลายตารางเป็นแบบกระจายตัว และในชิ้นงาน 303B มีระยะห่างระหว่างควอนตัมดอตบนเส้นลายตารางมากกว่าในชิ้นงาน 303C



รูปที่ 4.14 ภาพ AFM ขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ ของชิ้นงาน ก) 303A ข) 303B และ ค) 303C

เมื่อนำภาพ AFM มาวิเคราะห์เส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของควอนตัมดอตด้วยวิธีเดียวกันกับชุดชิ้นงาน 301 โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของควอนตัมดอตบนเส้นลายตารางในทิศ [1-10] ที่ชิ้นงาน 303A มีขนาด 60 nm และมีค่ามากขึ้นในชิ้นงาน 303B และ 303C ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกันที่ 78 nm ในทิศ [110] มีเส้นผ่านศูนย์กลางของควอนตัมดอตในชิ้นงาน 303A ที่ 77 nm และมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ ในชิ้นงาน 303B และ 303C ที่ 83 และ 111 nm ตามลำดับ ผลที่ได้แสดงถึงเส้นผ่านศูนย์กลางของควอนตัมดอตในทิศ [110] มีค่ามากกว่าทิศ [1-10] โดยควอนตัมดอตที่ได้มีลักษณะเป็นรูปวงรี เนื่องจากชั้นคั่น GaAs ที่ลดลงทำให้เกิดการคลายความเครียดบริเวณเส้นลายตารางน้อยลง ควอนตัมดอตที่ก่อตัวบนเส้นลายตารางจึงมีความหนาแน่นสูง โดยควอนตัมดอตที่ก่อ

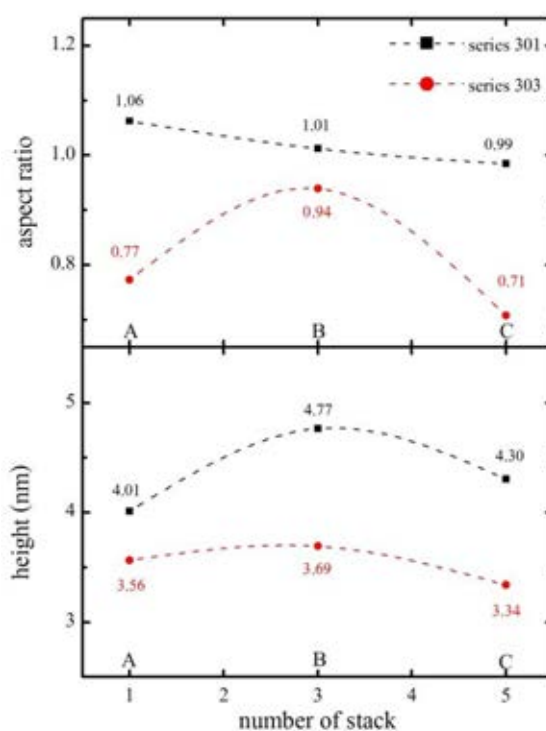
ตัวกันอย่างหนาแน่นในทิศ [1-10] เมื่อปลูกควอนตัมดอตและชั้นกั้นซ้อนทับลงไปทำให้ควอนตัมดอตที่พื้นผิวเกิดการบีบอัดกันเพื่อที่จะเรียงตัวบนเส้นลายตาราง ดังรูปที่ 4.15 ทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของควอนตัมดอตในทิศ [110] มีค่ามากกว่าในทิศ [1-10] และยังส่งผลให้ความสูงเฉลี่ยของควอนตัมดอตในชิ้นงาน 303A, 303B และ 303C มีค่าใกล้เคียงกันที่ 3.56, 3.69 และ 3.34 nm ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.16(ข)



รูปที่ 4.15 ภาพ AFM ขนาด $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ และภาพตัดขวางในทิศ [1-10] (บริเวณเส้นประ) ของชิ้นงาน ก) 303A, ข) 303B และ ค) 303C

รูปที่ 4.16(ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงของ aspect ratio ของชิ้นงานทั้ง 2 ชุด ในชุดชิ้นงาน 301 ค่า aspect ratio มีค่าลดลงเรื่อย ๆ เมื่อจำนวนชั้นควอนตัมดอตและชั้นกั้นมีค่าเพิ่มขึ้น ในชิ้นงาน 301A, 301B และ 301C มีค่า 1.06, 1.01 และ 0.99 ตามลำดับ ในชุดชิ้นงาน 303 การเปลี่ยนแปลงมีค่าแตกต่างกันมาก โดยชิ้นงาน 303A มีค่า 0.77 และเพิ่มขึ้นอย่างมากในชิ้นงาน 303B ที่ 0.94 แต่

ลดลงในชั้นงาน 303C ที่ 0.71 ผลการเปลี่ยนแปลงของ aspect ratio มาจากการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นคั่น GaAs ซึ่งผลต่อการก่อตัวของควอนตัมคอตบนเส้นลายตารางและทำให้ขนาดของควอนตัมคอตเปลี่ยนแปลงไป ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จากผลการทดลองของโครงสร้างเดิมแสดงให้เห็นว่า aspect ratio ส่งผลกระทบต่อสมบัติโพลาไรซ์ของแสง โดย aspect ratio ที่เปลี่ยนแปลงจาก 1 เป็น 2.19 ส่งผลให้ DOP สูงขึ้นถึง 38 % จึงเป็นไปได้ว่า aspect ratio ของชุดชั้นงาน 303 ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน จะส่งผลกระทบต่อสมบัติโพลาไรซ์ เช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.16 แสดงการเปลี่ยนแปลง ก) aspect ratio และ ข) ความสูงของควอนตัมคอตของชุดชั้นงาน 301 และ 303

รูปที่ 4.16(ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้นงานทั้ง 2 ชุด โดยแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของทั้ง 2 ชุดมีลักษณะที่คล้ายกันคือ เมื่อจำนวนชั้นของควอนตัมคอตและชั้นคั่น GaAs เพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 3 ชั้น ความสูงของชั้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มจาก 3 ชั้นเป็น 5 ชั้น ทำให้ชั้นงานมีความสูงลดลง โดยชั้นงาน 301A, 301B และ 301C มีความสูงเฉลี่ยที่ 4.01, 4.77 และ 4.30 ตามลำดับ ส่วนชั้นงาน 303A, 303B และ 301C มีความสูงเฉลี่ยที่ 3.56, 3.69 และ 3.34 ตามลำดับ

บทที่ 5

สรุป

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาสมบัติเชิงแสงและสัณฐานวิทยาพื้นผิวของควอนตัมดอทบนพื้นผิวลายตาราง หัวข้อหลักที่ศึกษาประกอบไปด้วย 1) ผลการวัดและวิเคราะห์สมบัติเชิงแสงของโครงสร้างเดิม (โครงสร้างควอนตัมดอท InAs และชั้นคั่น GaAs หนา 10 nm จำนวน 1, 3 และ 5 ชั้นบนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$) จากในอดีต ด้วยเทคนิค PL และ PPL 2) ผลการวัดและวิเคราะห์สัณฐานวิทยาพื้นผิวของโครงสร้างใหม่ (ปรับความหนาของชั้นคั่น GaAs เป็น 6 และ 3 nm จากโครงสร้างเดิม) ด้วยเทคนิค AFM

ผลทางสัณฐานวิทยาของควอนตัมดอท InAs และชั้นคั่น GaAs หนา 10 nm จำนวน 1 (ชั้นงาน A), 3 (ชั้นงาน B) และ 5 (ชั้นงาน C) ชั้นบนพื้นผิวลายตาราง พบว่าเส้นลายตารางในชั้นงาน C มีความหนาแน่นสูงที่สุด และมีค่าลดหลั่นลงในชั้นงาน B และ A เนื่องจากบริเวณเส้นลายตารางที่ปกติเป็นพื้นที่ที่ความเครียดสะสมสูงกว่าบริเวณผิวเรียบ เมื่อปลูกควอนตัมดอทและชั้นคั่นซ้อนทับกันบนพื้นผิวลายตารางส่งผลให้บริเวณของเส้นลายตารางมีความเครียดสะสมสูงขึ้น ทำให้ผิวหน้าในชั้นถัดไปมีจำนวนเส้นลายตารางที่เพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามควอนตัมดอทบนเส้นลายตารางของชั้นงาน A มีความหนาแน่นสูงที่สุด และมีค่าลดหลั่นลงในชั้นงาน B และ C ตามลำดับ จากการกระจายตัวในการก่อตัวของควอนตัมดอทไปยังเส้นลายตารางที่เกิดใหม่ เส้นผ่านศูนย์กลางของควอนตัมดอทในทิศ [110] ที่ชั้นงาน B และ C มีค่าใกล้เคียงกัน และยาวกว่าชั้นงาน A เพียงเล็กน้อย ส่วนทิศ [1-10] มีเส้นผ่านศูนย์กลางของควอนตัมดอทในชั้นงาน B และ C มีค่าเพิ่มขึ้น 25 nm และมีค่าเป็นสองเท่าของชั้นงาน A จากการก่อตัวของควอนตัมดอทที่ขยายตัวไปในทิศ [110] อ้อมตัว จึงบังคับให้ควอนตัมดอทขยายตัวไปในทิศ [1-10] แทน และจากความหนาแน่นของควอนตัมดอททำให้ชั้นงาน B และ C ขยายตัวได้อย่างอิสระ ส่งผลให้ความสูงเฉลี่ยควอนตัมดอทของชั้นงาน A อยู่ที่ 6 nm และเพิ่มขึ้นในชั้นงาน B ที่ 8 nm แต่ลดลงในชั้นงาน C ที่ 6 nm

ผลการเปล่งแสงของโครงสร้างเดิมด้วยเทคนิค PL แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) Power Dependent พบว่าเมื่อค่าพลังงานของแสงกระตุ้นมีค่าสูงที่สุด แสงที่เปล่งออกมามีความเข้มสูงสุด

และแสงที่เปล่งออกมามีค่าลดหลั่นลงตามค่าพลังงานของแสงกระตุ้นที่ลดลง กล่าวได้ว่าสเปกตรัมทั้งหมดเกิดจากพาหะในสถานะพื้น เนื่องจากความเข้มไม่อิ่มตัว 2) Temperature Dependent พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ความเข้มโฟโตลูมิเนสเซนซ์ลดลงจนกระทั่งอยู่ในระดับเดียวกับสัญญาณรบกวนที่อุณหภูมิ 250 K สำหรับชิ้นงาน A และที่อุณหภูมิ 150 K สำหรับชิ้นงาน B และ C และยอดพลังงานมีพลังงานลดลง (red-shift) จากการลดลงของช่องว่างพลังงานมาจากการขยายตัวของพลังงานความร้อนส่งผลให้อิเล็กตรอนในแถบพลังงานมีเสถียรภาพที่ลดลง ซึ่งแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสอดคล้องกับกฎของ Varshni เมื่อวิเคราะห์ผลการเปล่งแสงของแต่ละชิ้นงานในเชิงเปรียบเทียบ ควอนตัมดอตในชิ้นงาน B และ C เปล่งแสงที่ระดับพลังงานสูงกว่าชิ้นงาน A ที่ 154 meV

ผลการเปล่งแสงของควอนตัมดอตเมื่อวัดแยกในแต่ละทิศทางด้วยเทคนิค PPL เมื่อเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลง aspect ratio และความสูงของควอนตัมดอตได้ดังนี้ ในระหว่างชิ้นงาน A และ B เกิด aspect ratio ที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและมีความสูงเพิ่มขึ้น 2 nm ทำให้ DOP เพิ่มขึ้นถึง 38 % เมื่อ aspect ratio อิ่มตัวและความสูงลดลง 2 nm ในระหว่างชิ้นงาน B และ C ทำให้ DOP มีค่าลดลงเหลือเพียง 3 % เท่านั้น แสดงถึง aspect ratio และความสูงของควอนตัมดอตส่งผลกระทบต่อสมบัติโพลาไรซ์ของแสงที่เปล่งออกมา ชิ้นงาน B ที่ให้ DOP ที่สูงมาจากความแตกต่างอย่างมากของจำนวนเส้นลายตารางในทิศ [1-10] มีความหนาแน่นมากกว่าในทิศ [110] มาก และความหนาแน่นของควอนตัมดอตบนเส้นลายตารางที่เหมาะสม

ผลทางสัญญาณวิทยาของโครงสร้างใหม่ พบว่าความหนาแน่นของเส้นลายตารางในทิศ [1-10] ของชิ้นงานที่ปรับความหนาแน่นชั้นคั่นเป็น 6 และ 3 nm ที่ปลูกซ้อนทับกันจำนวน 5 ชั้น มีความหนาแน่นมากที่สุด และมีค่าลดหลั่นกันลงไปจำนวน 3 และ 1 ชั้น ตามลำดับ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกันกับชิ้นงานในโครงสร้างเดิม ส่วนทิศ [110] ชิ้นงานที่ความหนาแน่นของชั้นคั่น 6 nm ของทั้ง 1,3 และ 5 ชั้นมีความหนาแน่นของเส้นลายตารางใกล้เคียงกัน แตกต่างจากชิ้นงานที่ความหนาแน่นของชั้นคั่น 3 nm ชิ้นงาน 5 ชั้นมีความหนาแน่นของเส้นลายตารางมากที่สุด และลดหลั่นลงไปชิ้นงาน 3 และ 1 ชั้น ตามลำดับ ความหนาแน่นของควอนตัมดอตบนเส้นลายตารางของชิ้นงานความหนาแน่นของชั้นคั่น 6 nm ชิ้นงาน 5 ชั้น มีค่าสูงที่สุด และลดหลั่นลงในชิ้นงาน 3 และ 1

ชั้น ตามลำดับ จากการปลูกควอนตัมดอตและชั้นคั่นที่ซ้อนทับกันบนพื้นผิวลายตารางส่งผลให้บริเวณของเส้นลายตารางมีความเครียดสะสมเพิ่มขึ้น ยิ่งจำนวนชั้นมากขึ้นความเครียดยิ่งเพิ่มขึ้น ควอนตัมดอตจึงก่อตัวได้มากขึ้น แต่ชั้นงานความหนาของชั้นคั่น 3 nm มีความหนาแน่นของควอนตัมดอตสูงทั้ง 3 ชั้นงาน เนื่องจากชั้นคั่นที่บางมากทำให้มีความเครียดสะสมสูง

เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของควอนตัมดอตของชั้นงานที่ความหนาชั้นคั่น 6 nm ในทิศ [1-10] ชั้นงาน 1 และ 3 ชั้นมีค่าใกล้เคียงกันที่ 72 nm และมีค่ามากขึ้นในชั้นงาน 5 ชั้นที่ 85 nm ส่วนทิศ [110] ชั้นงาน 1 ชั้นมีค่า 68 nm และมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ ในชั้นงาน 3 และ 5 ชั้นที่ 72 และ 87 nm ตามลำดับ ส่วนชั้นงานที่ความหนาของชั้นคั่น 3 nm ในทิศ [1-10] ชั้นงาน 1 มีค่า 60 nm และมีค่ามากขึ้นในชั้นงาน 3 และ 5 ชั้นที่ใกล้เคียงกันที่ 78 nm ในทิศ [110] ชั้นงาน 1 ชั้นมีค่า 77 nm และมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ ในชั้นงาน 3 และ 5 ชั้นที่ 83 และ 110 nm โดยควอนตัมดอตที่ได้เป็นรูปร่างรีผลเป็นผลมาจากควอนตัมดอตที่ก่อตัวกันอย่างหนาแน่นในทิศ [1-10] จึงเกิดการบีบอัดกันเพื่อที่ก่อตัวบนเส้นลายตารางทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของควอนตัมดอตในทิศ [110] มีค่ามากกว่าในทิศ [1-10] aspect ratio ที่ได้ของชั้นงานที่ความหนาชั้นคั่น 6 nm มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ของชั้นงานที่ความหนาชั้นคั่น 3 nm ค่าที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงกันอย่างชัดเจนของชั้นงาน 1, 3 และ 5 ชั้นที่ 0.77, 0.94 และ 0.71 ตามลำดับ

ความสูงเฉลี่ยของควอนตัมดอตของชั้นงานที่ความหนาชั้นคั่น 6 และ 3 nm มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงคล้ายกันคือ มีค่าสูงขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงจำนวนชั้นปลูกจาก 1 ไป 3 ชั้น และลดลงเมื่อเปลี่ยนแปลงจำนวนชั้นปลูกจาก 3 ไป 5 ชั้น ความสูงเฉลี่ยของชั้นงานที่ความหนาของชั้นคั่น 3 nm มีค่าต่ำกว่าที่ความหนา 6 nm ในจำนวนการปลูกทั้ง 3 ชั้น เนื่องจากความหนาของชั้นคั่นที่บางลงส่งผลให้มีการผ่อนคลายความเครียดระหว่างชั้นได้น้อยส่งผลให้ควอนตัมดอตที่ถูกปลูกทับจึงก่อตัวเร็วขึ้น จากแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง aspect ratio และความสูงของควอนตัมดอตจากชั้นงานที่ความหนาของชั้นคั่น 3 nm มีลักษณะคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างเดิม จึงเป็นไปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อสมบัติโฟลาร์ไรซ์ของแสงที่เปล่งออกมา

รายการอ้างอิง

- [1] Kate Greene. Quantum Dot Camera Phone. [online]. Available from :
<http://www.technologyreview.com/news/418113/quantum-dot-camera-phones/>
[2010 March]
- [2] Prachi Patel. Color Quantum-Dot Displays. [online]. Available from :
<http://www.technologyreview.com/news/411242/color-quantum-dot-displays/?a=f> [2008 November]
- [3] A. E. Zhukov, V. M. Ustinov, A. R. Kovsh, A. Yu Egorov, N. A. Maleev, N. N. Ledentsov, A. F. Tsatsul'nikov, M. V. Maximov, Yu G. Musikhin, N. A. Bert, P. S. Kop'ev, D. Bimberg and Zh. I. Alferov. Control of the emission wavelength of self-organized InGaAs quantum dots : main achievements and present status. Semiconductor Science and Technology 14 (1999) : 575–581.
- [4] C. K. Hahn, Y. J. Park, E. K. Kim, S. K. Min, S. K. Jung and J. H. Park. Selective formation of one- and two-dimensional arrayed InGaAs quantum dots using Ga₂O₃ thin film as a mask material. Applied Physics Letters 73 (1998) : 2479-2481.
- [5] S. Suraprapich, S. Thainoi, S. Kanjanachuchai and S. Panyakeow. n-GaAlAs on p-GaAs heterostructure solar cells grown by molecular beam epitaxy. Solar Energy Materials and Solar Cells 90 (2006) : 2968-2974
- [6] S. H. Xin, P. D. Wang, A. Yin, C. Kim, M. Dobrowolska, J. L. Merz and J. K. Furdana. Formation of self-assembling CdSe quantumdots on ZnSe by molecular beam epitaxy. Applied Physics Letters 69 (1996) : 3884-3886

- [7] Piotr Wojnar, Elzbieta Janik, Lech T. Baczewski, Slawomir Kret, G. Karczewski, Tomasz Wojtowicz, Mateusz Goryca, Tomasz Kazimierczuk and Piotr Kossacki. Growth and optical properties of CdTe quantum dots in ZnTe nanowires. Applied Physics Letters 99 (2011) : 109-113
- [8] D. Leonard, M. Krishnamurthy, C. M. Reeves, S. P. Denbaars and P. M. Petroff. Direct formation of quantum-sized dots from uniform coherent islands of InGaAs on GaAs surfaces. Applied Physics Letters 63 (1993) : 3203-3205.
- [9] H. J. Kim and Y. H. Xie. Influence of the wetting-layer growth kinetics on the size and shape of Ge self-assembled quantum dots on Si (001). Applied Physics Letters 79 (2001) : 263-265.
- [10] T. Limwongse. Evolution of InAs Quantum Dots Grown on Cross-hatch Substrates. Master's thesis, Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2008
- [11] A. M. Andrews, A. E. Romanov, J. S. Speck, M. Bobeth and W. Pompe. Modeling cross-hatch surface morphology in growing mismatched layers. Journal of Applied Physics 91 (2002) : 1933-1943.
- [12] Z. M. Wang, K. Holmes, Yu. I. Mazur and G. J. Salamo. Fabrication of (In,Ga)As quantum-dot chains on GaAs(100). Applied Physics Letters 84 (2004) : 1931-1933.
- [13] C. C. Thet, S. Panyakeow and S. Kanjanachuchai. Growth of InAs quantum-dot hatches on InGaAs/GaAs cross-hatch virtual substrates. Microelectronic Engineering 84 (2007) : 1562-1565.

- [14] Y.H. Xie, S. B. Samavedam, M. Bulsara, T.A. Langdo and E. A. Fitzgerald. Relaxed template for fabricating regularly distributed quantum dot arrays. Applied Physics Letters 71 (1997) : 3567-3568.
- [15] H. J.Kim, Z. M. Zhao and Y. H. Xie. Three-stage nucleation and growth of Ge self-assembled quantum dots grown on partially relaxed SiGe buffer layers. Physical Review B 68 (2003) : 205312.
- [16] T. S. Yeoh, R. B. Swint, V. C. Elarde, J. J. Coleman. The role of the InGaAs surface in selective area epitaxy of quantum dots by indium segregation. Applied Physics Letters 84 (2004) : 3031-3033.
- [17] R. Leon, S. Chaparro, S. R. Johnson, C. Navarro, X. Jin, Y. H. Zhang, J. Siegert, S. Marcinkevicius, X. Z. Liao and J. Zou. Dislocation-induced spatial ordering of InAs quantum dots: Effects on optical properties. Journal of Applied Physics 91 (2002) : 5826-5830.
- [18] S. Kiravittaya, Y. Nakamura and O. G. Schmidt. Photoluminescence linewidth narrowing of InAs/GaAs self-assembled quantum dots. Physica E 13 (2002) : 224-228.
- [19] H. Welsch, T. Kipp, T. Koppen, Ch. Heyn and W. Hansen. Spatially and energetically resolved optical mapping of self-aligned InAs quantum dots. Semiconductor Science and Technology 23 (2008) : 045016.
- [20] L. Jacak, P. Hawrylak, and A. Wójs. Quantum Dots. Berlin, Germany : Springer-Verlag. 1998.

- [21] D. K. Guthrie and T. K. Gaylord. Number and Density of state in quantum semiconductor Structure. IEEE transactions on education 39 (1996) : 4.
- [22] P. Bhattacharya. Properties of Lattice matched and Strained Indium Gallium Arsenide. London : INSPEC. 1993.
- [23] I. Daruka and A. L. Barabasi. Dislocation-free island formation in heteroepitaxial growth: A study at equilibrium. Physical Review Letters 79 (1997) : 3708-3711.
- [24] S. Franchi, G. Trevisi, L. Seravalli and P. Frigeri. Quantum Dot Nanostructures and Molecular Beam Epitaxy. Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials 47 (2003) : 166-195.
- [25] A. E. Romanov, W. Pompe, S. Mahtis, G. E. Beltz and J. S. Speck. Threading Dislocation Reduction in Strained Layers. Journal of Applied Physics 85 (1999) : 182-192.
- [26] A. M. Andrews, R. LeSar, M. A. Kerner, J. S. Speck, A. E. Romanov, A. L. Kolesnikova, M. Bobeth and W. Pompe. Modeling crosshatch surface morphology in growing mismatched layers Part II: Periodic boundary conditions and dislocation groups. Journal of Applied Physics 95 (2004) : 6032-6047.
- [27] M. Tamura, A. Hashimoto and Y. Nakatsugawa. Threading dislocations in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ heterostructure. Journal of Applied Physics 72 (1992) : 3398-3405.
- [28] S. Kayali, G. Ponchak and R. Shaw. GaAs MMIC Reliability Assurance Guideline for Space Application. Jet Propulsion Laboratory. 1996.

- [29] Y. H. Xie, S. B. Samavedam, M. Bulsara, T. A. Lango and E. A. Fitzgerald. Relaxed Template of Fabricating Regularly Disturbed QuantumDot Arrays. Applied Physics Letter 71 (1997) : 3567-3568.
- [30] J. W. Matthews and A. E. Blanksee. Defects in epitaxial multilayers* i. misfit dislocations. Journal of Crystal Growth 27 (1974): 118-125.
- [31] C. C. Thet, S. Panyakeow and S. Kanjanachuchai. The Effects of relaxed InGaAs virtual substrates on the formation of self-assembled InAs Quantum Dots. Semiconductor Science Technology 23 (2008) : 055007.
- [32] T. Limwongse, S. Panyakeow and S. Kanjanachuchai. Evolution of InAs Quantum Dots Grown on Cross-hatch Substrates. Physica Status Solidi C6 (2009) : 806-809.
- [33] Cho Cho Thet. Growth and Characterisation of Ordered Indium Arsenide Quantum Dots on Cross-Hatch Virtual Substrate. Ph. D.'s thesis, Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2006.
- [34] M. Maitreeboriraks. Alignment of Self-Assembled InAs Quantum Dots Grown on GaAs/InGaAs/GaAs Cross-Hatch Templates. Master's thesis, Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2010.
- [35] Chalermchai Himwas, Somsak Panyakeow and Songphol Kanjanachuchai. Optical properties of as-grown and annealed InAs quantum dots on InGaAs cross-hatch patterns. Nanoscale Research Letters 6 (2011) : 496.
- [36] Y. Nabetani, T. Ishikawa, S. Noda and A. Sasaki. Initial growth stage and optical properties of a three-dimensional InAs structure on GaAs. Journal of Applied Physics 76 (1994) : 347-351.

- [37] S. Montanari. GaAs, AlAs grown by MBE. [online] Available from :
http://web.tiscali.it/decartes/phd_html/node4.html. [2005 Febuary]
- [38] D. Bimberg, M. Grundmann and N. N. Ledentsov. Quantum Dot Heterostructure.
Chichester : Wiley. 1998.
- [39] N. Patanasemakul. Optical Emission from InAs Quantum Dot Molecules. Master's
thesis, Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering,
Chulalongkorn University, 2011.
- [40] W. Paul and H. Steinwedel. Apparatus for Separating Charged Particles of Different
Specific Charges. Patent number: 2939952: 1960.
- [41] M. B. Panish and H. Temkin. Gas Source Molecular Beam Epitaxy. Berlin, Germany :
Springer-Verlag, 1993.
- [42] T. Chokamnuai. Polarized Photoluminescence of Vertically Stacked InAs Quantum
Dots on Cross-Hatch Patterns. Master's thesis, Department of Electrical
Engineering Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2013.
- [43] T. Chokamnuai, P. Rattanadon, S. Thainoi, S. Panyakeow and S. Kanjanachuchai.
Polarization Anisotropy of Stacked InAs Quantum Dots on InGaAs/GaAs Cross-
Hatch Patterns. Journal of Crystal Growth 378 (2013) : 524–528
- [44] Y.P. Varshni. Temperature dependence of the energy gap in semiconductors. Physica
34 (1967) : 149-154.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ภาณุพงศ์ รัตนดอน อาศัยอยู่บ้านเลขที่ 73/200 ถนนนครสวรรค์ ตำบลตลาด อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม จบการศึกษาระดับมัธยมจากโรงเรียนสารคามพิทยาคม และสำเร็จการศึกษาระดับมหาวิทาลัย จากคณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์อิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปีการศึกษา 2553 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีผลงานตีพิมพ์และนำเสนอคือ

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

Optical Properties of Stacked InAs Quantum Dots Grown on Cross-Hatch Patterns. P. Rattanadon, T. Chokamnuai, S. Thainoi, S. Panyakeow and S. Kanjanachuchai. Proceeding of the 35th Electrical Engineering Conference (2012), Nakhon Nayok, Thailand.