

ผลกระทบของการลดความหนาของชั้นคั่นที่มีต่อสมบัติโพลาริซไฟโพลูมิเนสเซนซ์ของควอนตัมดอต
อินเดียยมอาร์เซไนต์ชั้นซ้อนทับหลายชั้นบนพื้นผิวลายตาราง



นายอภิชาติ จิตตรง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE EFFECTS OF REDUCED SPACER THICKNESS TOWARDS POLARIZED
PHOTOLUMINESCENCE OF MULTI-STACK InAs QUANTUM DOTS ON CROSS-HATCH
PATTERNS

Mr. Apichart Jittrong



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2014
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของการลดความหนาของชั้นคั่นที่มีต่อสมบัติโพลาริซไฟโพลูมิเนสเซนซ์ของควอนตัมดอทอินเดียมอาร์เซไนด์ชั้นทับหลายชั้นบนพื้นผิวลายตาราง
โดย	นายอภิชาติ จิตตรง
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ทรงพล กาญจนชูชัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

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

อภิชาติ จิตตรง : ผลกระทบของการลดความหนาของชั้นคั่นที่มีต่อสมบัติโพลาริซ์โพโตลูมิเนสเซนซ์ของควอนตัมดอตอินเดียมอาร์เซไนด์ซ้อนทับหลายชั้นบนพื้นผิวลายตาราง (THE EFFECTS OF REDUCED SPACER THICKNESS TOWARDS POLARIZED PHOTOLUMINESCENCE OF MULTI-STACK InAs QUANTUM DOTS ON CROSS-HATCH PATTERNS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.ทรงพล กาญจนชูชัย, 54 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของการลดความหนาของชั้นคั่น GaAs ที่มีต่อสมบัติโพลาริซ์ของแสงที่เปล่งจาก InAs ควอนตัมดอตซ้อนทับกัน 1, 3 และ 5 ชั้นบนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ความหนาของชั้นคั่นถูกปรับลดจากเดิม 10 nm เป็น 6 nm ผลกระทบเชิงกายภาพศึกษาโดยเทคนิคจุลทรรศน์แรงอะตอม ขณะที่ผลกระทบเชิงแสงศึกษาโดยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์และโพลาริซ์โพโตลูมิเนสเซนซ์

ควอนตัมดอต 1 ชั้นที่มีความหนาของชั้นคั่น 10 nm นั้นควอนตัมดอตก่อตัวเรียงกันอย่างหนาแน่นบนลายตารางและบนผิวเรียบบางส่วน ผลการเปล่งแสงมีค่า DOP สูงสุด 22% ที่ค่ายอดพลังงาน 1.04 eV ควอนตัมดอตซ้อนทับกัน 3 ชั้น นั้นก่อตัวบนลายตารางบนและผิวเรียบลดลง ผลการเปล่งแสงมีค่า DOP สูงสุด 19% ที่ค่ายอดพลังงาน 1.09 eV ขณะที่ควอนตัมดอตซ้อนทับกัน 5 ชั้นนั้นควอนตัมดอตที่ก่อตัวขึ้นมีลักษณะใกล้เคียงกับควอนตัมดอตซ้อนทับกัน 3 ชั้น ผลการเปล่งแสงมีค่า DOP สูงสุด 18% ที่ค่ายอดพลังงาน 1.12 eV ทั้งสามชั้นงานมีผลการเปล่งแสงจากชั้นลายตารางที่เด่นชัดโดยมีค่า DOP ประมาณ 8% ที่ค่ายอดพลังงานประมาณ 1.27 eV

ควอนตัมดอต 1 ชั้นที่มีความหนาของชั้นคั่น 6 nm นั้นมีการกระจายตัวของขนาดและความสูงที่หลากหลาย และเปล่งแสงที่มีสเปกตรัมกว้างขึ้นมีแอมพลิจูดสูงสุดที่ค่ายอดพลังงาน 1.24 eV มีสมบัติโพลาริซ์ที่ด้อยลงโดยมีค่า DOP ใกล้เคียง 0% ผลดังกล่าวเกิดจากความหนาของชั้นคั่นลดลงทำให้ความเครียดจากชั้นลายตารางกระทบต่อการก่อตัวของควอนตัมดอตในชั้นแรกมากขึ้น ควอนตัมดอตซ้อนทับกัน 3 ชั้นนั้นก่อตัวบนผิวเรียบลดลง เกาะกลุ่มกันของขนาดมากขึ้นจึงเปล่งแสงที่มีสเปกตรัมแคบลงมีแอมพลิจูดสูงสุดที่ค่ายอดพลังงาน 1.20 eV มีค่า DOP ใกล้เคียง 0% เช่นเดียวกันเนื่องจากควอนตัมส่วนใหญ่มีรูปร่างสมมาตรและผลเชื่อมโยงแนวนอนที่ต่ำ และควอนตัมดอตซ้อนทับกัน 5 ชั้นนั้นมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นเรียงต่อกันในแนวลายตาราง มีผลเชื่อมโยงแนวนอนที่สูงจึงเปล่งแสงมีสเปกตรัมที่แคบมีค่า DOP ประมาณ 18% ที่ค่ายอดพลังงาน 1.18 eV และการเปล่งแสงจากชั้นลายตารางในแต่ละชั้นงานไม่เด่นชัดเนื่องด้วยสมบัติกักกันพาหะที่ด้อยลง

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5570446621 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: PHOTOLUMINESCENCE / DEGREE OF POLARIZATION / INDIUM ARSENIDE QUANTUM DOTS / CROSS-HATCH PATTERNS / MOLECULAR BEAM EPITAXY

APICHART JITTRONG: THE EFFECTS OF REDUCED SPACER THICKNESS TOWARDS POLARIZED PHOTOLUMINESCENCE OF MULTI-STACK InAs QUANTUM DOTS ON CROSS-HATCH PATTERNS. ADVISOR: ASSOC. PROF. SONGPHOL KANJANACHUCHAI, Ph.D., 54 pp.

This thesis is aimed to study the effects of reducing GaAs spacer thickness from 10 nm to 6 nm on the polarization properties of light emitted from 1-, 3- and 5-stack InAs quantum dots (QDs) grown on In_{0.2}Ga_{0.8}As cross-hatch patterns (CHPs). The effects on surface morphology are studied by atomic force microscopy while the optical properties are studied by photoluminescence (PL) and polarized PL (PPL).

The 1-stack InAs QDs with a 10-nm spacer densely populate along the CHPs, and some on flat areas. The PL emission gives a 22% degree of polarization (DOP) at 1.04 eV. The density of QDs is lower on the 3-stack sample and the PL emission gives a 19% DOP at 1.09 eV. The formations of the 3- and 5-stack QDs are nearly the same. The PL emission of the 5-stack sample gives an 18% DOP at 1.12 eV. The CHPs evidently emit at around 1.27 eV with about 8% DOPs.

The 1-stack InAs QDs with a 6-nm spacer are widely distributed in size and height. The PL spectrum is broader, with peak at 1.24 eV and nearly 0% DOP. This is due to the reduction of spacer thickness which results in the strain's greater effect on QDs formation in the first layer. The 3-stack QDs are more uniform in size, more symmetric in shape, and have weaker lateral coupling which give narrower PL spectrum, with the highest amplitude at 1.20 eV and nearly 0% DOP also. The 5-stack QDs densely populate along the CHPs with strong lateral coupling, and emit the narrowest PL spectrum with 18% DOP at 1.18 eV. The PL emissions from the CHPs of all 6-nm spacer samples are not evident due to weak carrier confinement.

Department: Electrical Engineering Student's Signature

Field of Study: Electrical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้จากความช่วยเหลือและการสนับสนุนจากผู้มีพระคุณทั้งหลายจากห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาคไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการสอนและแนะนำการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับทำวิจัย

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รศ. ดร. ทรงพล กาญจนชูชัย ที่สละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำปรึกษา แนะนำ แนวคิด และให้ความรู้และประสบการณ์อันมีค่าที่เป็นคุณต่อผู้เขียน

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบอนุมัติหัวข้อวิทยานิพนธ์และสอบจบการศึกษา ประกอบไปด้วย ศ. ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว และ ดร. นพดล นันทวงศ์ ขอขอบคุณบรรดารุ่นพี่และรุ่นน้องสมาชิกห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สละเวลาอันมีค่าให้คำแนะนำ

ขอขอบคุณ นายฐิติพงษ์ โชคอำนวย ที่ได้ส่งเคราะห์ชิ้นงานอันเป็นแก่นของผลการทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พี่จากห้องธุรการและห้องอุปกรณ์ที่สละเวลาอันมีค่าให้ความช่วยเหลือด้านงานธุรการ อุปกรณ์ งานเทคนิค ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ประกอบไปด้วย พี่ศุภโชคและพี่ขวัญ เรือน ไทยน้อย พี่พัฒนา พันธุ์วงศ์ และพี่พรชัย ช่างม่วง

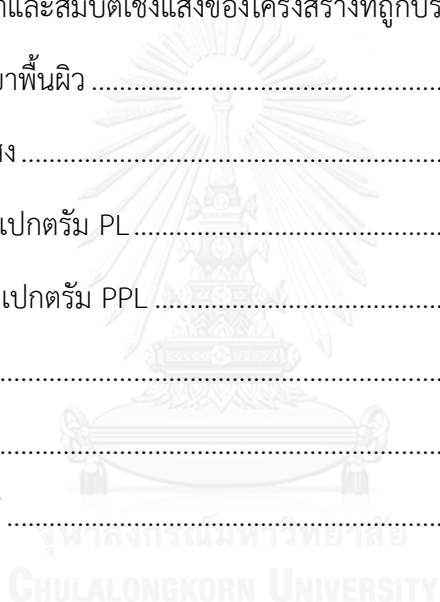
ขอขอบคุณทุนวิจัยจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) โครงการ RSA5580015 สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบคุณครอบครัวประกอบไปด้วย บิดา มารดา ที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนอย่างดีต่อผู้เขียนตลอดมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้พื้นฐาน.....	4
2.1 โครงสร้างนาโน.....	4
2.2 ควอนตัมดอทบนผิวเรียบและผิวลายตาราง.....	5
2.3 การเปล่งแสงจากโครงสร้างควอนตัมดอทและสมบัติโพลาริซซ์.....	7
2.3.1 การเปล่งแสงจากโครงสร้างควอนตัมดอท.....	7
2.3.2 สมบัติโพลาริซซ์.....	8
2.3.2 (a) อัตราส่วนลักษณะ.....	8
2.3.2 (b) ผลเชื่อมโยงแนวนอน.....	9
2.3.2 (c) ผลโพธิโซอิเล็กทริก.....	12
บทที่ 3 การทดลอง.....	14
3.1 การปลูกโครงสร้างควอนตัมดอทบนลายตาราง.....	14
3.1.1 ควอนตัมดอทบนลายตารางโครงสร้างเดิม.....	14
3.1.2 ควอนตัมดอทบนลายตารางโครงสร้างที่ได้ปรับลดความหนาชั้นคั่น.....	15
3.2 สัณฐานวิทยาพื้นผิว.....	16
3.3 เทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์.....	17

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	21
4.1 ผลวัดสัญญาณวิทยาและสมบัติเชิงแสงของโครงสร้างเดิม	21
4.1.1 สัญญาณวิทยาพื้นผิว	21
4.1.2 ผลวัดเชิงแสง	24
4.1.2 (a) สเปกตรัม PL.....	24
4.1.2 (b) สเปกตรัม PPL	30
4.2 ผลวัดสัญญาณวิทยาและสมบัติเชิงแสงของโครงสร้างที่ถูกปรับลดความหนาชั้นคั้น.....	34
4.2.1 สัญญาณวิทยาพื้นผิว	34
4.2.2 ผลวัดเชิงแสง	37
4.2.2 (a) สเปกตรัม PL.....	37
4.2.2 (b) สเปกตรัม PPL	39
บทที่ 5 สรุป.....	42
รายการอ้างอิง	45
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	54



สารบัญตาราง

ตารางที่ 4.1	สรุปค่าความสูง ความยาวฐาน และอัตราส่วนลักษณะเฉลี่ยของควอนตัมดอต ณ บริเวณต่างๆ ของชิ้นงาน A, B และ C.....	22
ตารางที่ 4.2	สรุปค่า DOP ของค่ายอดพลังงานต่างๆ สำหรับชิ้นงาน A, B, C	31
ตารางที่ 4.3	สรุปค่าความสูง ความยาวฐาน และอัตราส่วนลักษณะเฉลี่ยของควอนตัมดอต ณ บริเวณต่างๆ ของชิ้นงาน A', B' และ C'	35
ตารางที่ 4.4	สรุปค่า DOP ของค่ายอดพลังงานต่างๆ สำหรับชิ้นงาน A', B', C'	40



สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางกายภาพและความหนาแน่นของสถานะพลังงานของ (a) ก้อนผลึก (Bulk) (b) ควอนตัมเวลล์ (QD wells) (c) ควอนตัมไวร์ (QD wires) และ (d) ควอนตัมดอท 4	4
รูปที่ 2.2 ภาพ AFM ขนาด $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ ของควอนตัมดอท InAs/GaAs ก่อตัวบน InGaAs WL..... 6	6
รูปที่ 2.3 ภาพ AFM ของควอนตัมดอท InAs บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ เมื่อ x มีค่า (a) 0.08, (a) 0.10, (c) 0.16 และ (d) 0.20 6	6
รูปที่ 2.4 แผนภาพอย่างง่ายของกลไกการเปล่งแสงจากโครงสร้างควอนตัมดอท 7	7
รูปที่ 2.5 Top view ควอนตัมดอทที่มีอัตราส่วนลักษณะเท่ากับ (a) 1, (b) 1.5 และ (c) 2 8	8
รูปที่ 2.6 ผลคำนวณค่า DOP ของการเปล่งแสงที่สถานะพื้นของควอนตัมดอทสัมพันธ์กับอัตรา- ส่วนลักษณะและความสูงของควอนตัมดอท สำหรับควอนตัมดอทที่มีความยาวฐาน เท่ากับ 28.8 nm..... 9	9
รูปที่ 2.7 (บน) Top-view ของควอนตัมดอทที่มีผลเชื่อมโยงแนวนอน (ล่าง) ภาพตัดขวางของ การเรียงตัวของควอนตัมดอทและปริมาณ In..... 10	10
รูปที่ 2.8 (a) ภาพ AFM ของควอนตัมดอท InGaAs สายลูกโซ่บนแผ่นฐาน GaAs (001) จำนวน 16 ชั้น (b) ผล PL สเปกตรัมของแสงโพลาไรซ์ในทิศ [011] และ [01-1]..... 11	11
รูปที่ 2.9 ภาพ (บน) AFM ของควอนตัมดอท $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ จำนวน 15 ชั้น บนแผ่นฐาน GaAs (100) มีชั้นคั่น GaAs หนา 60 ML โดยชั้นงาน (a) $x = 0.3$, (b) = 0.4, (c) = 0.5, (ล่าง) ผล PL signal และกราฟคำนวณ DOP (%) ของชั้นงาน (d) $x = 0.3$, (e) = 0.4, (f) = 0.5 12	12
รูปที่ 2.10 Unit cell แบบซิงค์เบลนด์ (ซ้าย) องค์ประกอบของ Shear strain เป็นศูนย์ และ (ขวา) องค์ประกอบของ Shear strain $\epsilon_{xy} \neq 0$ เมื่อเกิดการเปลี่ยนรูป (Deformation)..... 13	13
รูปที่ 3.1 ภาพตัดขวางโครงสร้างเดิมชั้นงาน (a) A ควอนตัมดอทซ้อนทับกัน 1 ชั้น, (b) B 3 ชั้น และ (c) C 5 ชั้น..... 15	15
รูปที่ 3.2 (a) ภาพตัดขวางของโครงสร้างชั้นงานสำหรับชั้นงาน A' ควอนตัมดอทซ้อนทับกัน 1 ชั้น B' 3 ชั้น และ C' 5 ชั้น และ (b) Temperature profile ของการปลูก 16	16

รูปที่ 3.3 ภาพจริงของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม Seiko รุ่น SPA-400 (b) แผนภาพการทำงาน อย่างง่าย	17
รูปที่ 3.4 ระบบวัดโพโตลูมิเนสเซนซ์ (a) แผนภาพ และ (b) ภาพถ่าย	19
รูปที่ 4.1 ภาพ AFM ขนาด $25 \times 25 \mu\text{m}^2$ (บน) และ $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ (ล่าง) ของชิ้นงาน [(a), (d)] A, [(b), (e)] B และ [(c), (f)] C	21
รูปที่ 4.2 สเปกตรัม PL จากการปรับเปลี่ยนพลังงานแสงกระตุ้นของชิ้นงาน (a) A, (b) B และ (c) C	24
รูปที่ 4.3 สเปกตรัม PL จากการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของชิ้นงาน (a) A, (b) B และ (c) C	26
รูปที่ 4.4 สเปกตรัม PL ของชิ้นงาน (a) A, (b) B และ (c) C ที่ 20 K แสดงแบบ Semi-log.	28
รูปที่ 4.5 สเปกตรัม PPL ของชิ้นงาน (a) A, (b) B, (c) C และ Angle scan ที่ค่ายอดพลังงาน ต่างๆของชิ้นงาน (d) A, (e) B, (f) C	30
รูปที่ 4.6 PPL ของชิ้นงาน A, B, C จาก Previous Setup (สีดำ) และ Current Setup (สีน้ำ- เงิน).....	33
รูปที่ 4.7 ภาพ AFM ขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ (บน) และ $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ (ล่าง) ของชิ้นงาน [(a), (d)] A', [(b), (e)] B', [(c), (f)] C'	34
รูปที่ 4.8 สเปกตรัม PL ของชิ้นงาน (a) A', (b) B', และ (c) C' ที่ 20 K แสดงแบบ Semi-log.	37
รูปที่ 4.9 สเปกตรัม PPL ของชิ้นงาน (a) A', (b) B', (c) C' และ Angle scan ของชิ้นงาน (d) A', (e) B', (f) C'	39

บทที่ 1

บทนำ

ควอนตัมดอต (Quantum dots: QDs) [1] เป็นโครงสร้างขนาดเล็กระดับนาโนเมตร (Nanostructures) และกำลังได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากมีสมบัติกักกันพาหะ (Carriers) ได้ใน 3 มิติ มีระดับชั้นความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เป็นศูนย์โครงสร้างควอนตัมดอตเกิดจากการคลายความเครียดจากความไม่เข้ากันของชั้นสารผลึกที่มีค่าคงตัวผลึก (Lattice constant) ต่างกัน สมบัติเชิงแสงของควอนตัมดอตถูกกำหนดโดยหลายองค์ประกอบ เช่น ขนาด ความสมมาตร การกระจายตัวของความเครียด (Strain distribution) รูปแบบการจัดเรียงตัว ความสม่ำเสมอของขนาด และชนิดของสาร เป็นต้น ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่มุ่งเน้นผลกระทบจากตัวแปรข้างต้น เช่น ควอนตัมดอตทรงพีระมิด (Pyramid QDs) [2] ควอนตัมดอตโมเลกุล (QD molecules) [3] ควอนตัมดอตลูกโซ่ (QD chains) [4] และควอนตัมดอตบนลายตาราง (Cross-hatch patterns: CHPs) [5] เป็นต้น ควอนตัมดอตถูกนำไปประยุกต์ใช้งานที่หลากหลายเนื่องจากมีสมบัติสามารถเปล่งแสงได้ด้วยค่ากระแสขีดเริ่มต่ำ (Low threshold current) เช่น แอลอีดี (LEDs) [6] เลเซอร์ไดโอด (LASER diodes) [7] หรือสังเคราะห์โครงสร้างเพื่อใช้เป็นสิ่งประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells) [8] และอุปกรณ์ตรวจจับแสงเช่น โฟโตดีเทคเตอร์ (Photodetectors) [9], [10] เป็นต้น ความสามารถในการควบคุมตำแหน่งก่อตัวและรูปแบบการจัดเรียงตัวของควอนตัมดอตสามารถนำไปสู่การสร้างวงจรตรรกะ (Logic) ซึ่งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของคอมพิวเตอร์ตามหลักการควอนตัมเซลลูลาอโตมาตา (Quantum cellular automata) [11], [12] นอกจากนี้ยังมีการสร้างควอนตัมดอตคู่ (Coupled QDs) เพื่ออาศัยสมบัติสปิน (Spin) ของอิเล็กตรอนเพื่อสร้างสิ่งประดิษฐ์หน่วยความจำ (Memory) เรียกว่า สปินทรอนิกส์ (Spintronics) [13], [14] เป็นต้น

ควอนตัมดอตสามารถเกิดจากสารประกอบหลายกลุ่ม เช่น III-V ได้แก่ GaAs, InAs, InGaAs [15], [16] หรือ II-VI ได้แก่ CdSe, ZnSe และ CdTe [17], [18] เป็นต้น สารประกอบในกลุ่มแรกได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากมีสมบัติที่สามารถให้แสงที่มีความยาวคลื่นที่ถูกระบุได้สำหรับอุปกรณ์สื่อสารโดยใช้แสง (Optical communication devices) คือ 1.3 μm และ 1.5 μm [19], [20] การสังเคราะห์ควอนตัมดอตกระทำได้ 2 วิธี 1) วิธี Top-down เช่น การ

ปลูกโดยการกำหนดลวดลายโครงสร้างด้วยหน้ากาก (Mask) [21] และ 2) วิธี Bottom-up เป็นการสังเคราะห์ควอนตัมดอตจากการปลูกชั้นสารประกอบที่มีสมบัติความไม่เข้ากันของผลึก (Lattice mismatch) กับแผ่นฐานตั้งต้น (Substrate) เรียกว่า กระบวนการเอพิแทกซี (Epitaxy) ซึ่งในงานวิจัยนิยมใช้วิธีปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล (Molecular beam epitaxy: MBE) เนื่องจากเป็นวิธีสามารถควบคุมความหนาชั้นปลูกได้ในระดับชั้นโมโน (Monolayer: ML) ส่งผลให้มีศักยภาพสูงในการควบคุมลักษณะโครงสร้าง ขนาด สมบัติเชิงไฟฟ้าและสมบัติเชิงแสงของควอนตัมดอต

สมบัติโพลาไรซ์ (Polarized properties) ของแสงที่เปล่งจากควอนตัมดอตเป็นสมบัติหนึ่งที่น่าสนใจ การควบคุมโพลาไรเซชัน (Polarization) ของแสงสามารถนำไปสู่การประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น สัญญาณตรรกะ (Logic signals) อินพุตโค้ด (Input codes) [22], [23] อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ไวต่อโพลาไรเซชัน (Polarization-sensitive opto-electronic devices) [24], [25] เลเซอร์ไดโอดโพลาไรเซชันสวิตช์ (Laser diode polarization switching) [26] และการมอดูเลตเชิงแสง (Optical polarization modulators) [27], [28], ตัวขยายสัญญาณแสง (Optical amplifiers) [29] นอกจากนี้ยังมีการนำไปประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับระบบภาพ 3 มิติ [30] เป็นต้น โดยทั่วไปการควบคุมโพลาไรเซชันของแสงสามารถทำได้โดยการใช้อุปกรณ์ เช่น โพลาไรเซอร์ (Polarizer) เกรตติง (Grating) เป็นต้น ซึ่งมีข้อเสีย คือ ขนาดที่ใหญ่ของอุปกรณ์มีผลทำให้ความแม่นยำในการควบคุมต่ำ สิ้นเปลืองพื้นที่ในการติดตั้ง อีกทั้งมีกำลังงานสูญเสีย (Loss) สูงเนื่องจากเป็นอุปกรณ์ประเภทแพสซีฟ (Passive devices) ส่งผลให้มีประสิทธิภาพต่ำ จึงมีหลายงานวิจัยซึ่งมุ่งหวังที่จะควบคุมสมบัติโพลาไรซ์ของแสงจากโครงสร้างควอนตัมดอต เช่น ปลูกคอลัมน์ควอนตัมดอต (Columnar QDs) InAs บน GaAs [31], [32], [33] ควอนตัมดอต InAs บนชั้นคั่น InGaAsP บนแผ่นฐาน InP (001) [34] และควอนตัมดอตโมเลกุล [35] เป็นต้น อันดับขั้นการโพลาไรซ์ (Degree of polarization: DOP) เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงสมบัติโพลาไรซ์ของแสง ตัวอย่างงานวิจัยซึ่งรายงานค่า DOP จากโครงสร้างควอนตัมดอตซึ่งปลูกจากสารประกอบกลุ่ม III-V ของ InAs, AlInAs, GaAs ค่า DOP ประมาณ 10% โดย D. Ochoaa et al. [36], 17% โดย N. Sellami et al. [37] และ 32% โดย J. Beyer et al. [38] ตามลำดับ

วิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของการลดความหนาของชั้นคั่นที่มีต่อสมบัติโพลาไรซ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Polarized photoluminescence: PPL) ของควอนตัมดอต InAs

ชั้นทับหลายชั้นบนพื้นผิวลายตาราง ผลวิจัยแสดงผลกระทบเชิงกายภาพ เช่น รูปแบบการก่อตัว ความหนาแน่น รูปร่างของควอนตัมดอต และผลกระทบเชิงแสงโดยแสดงสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนส์ กับโพลาริซไฟโตลูมิเนสเซนส์รวมทั้งค่า DOP เพื่อบ่งชี้สมบัติโพลาริซของแสงซึ่งปรากฏผลกระทบชัดเจนเมื่อโครงสร้างถูกปรับลดความหนาแน่นขึ้น อันเกิดจากองค์ประกอบของอัตราส่วนลักษณะ ผลเชื่อมโยงแนวนอน (Lateral coupling) และผลไพโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effects) เป็นต้น

เนื้อหาในบทถัดไปประกอบด้วย บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้พื้นฐาน บทที่ 3 การทดลอง บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ และบทที่ 5 สรุปผลการทดลอง



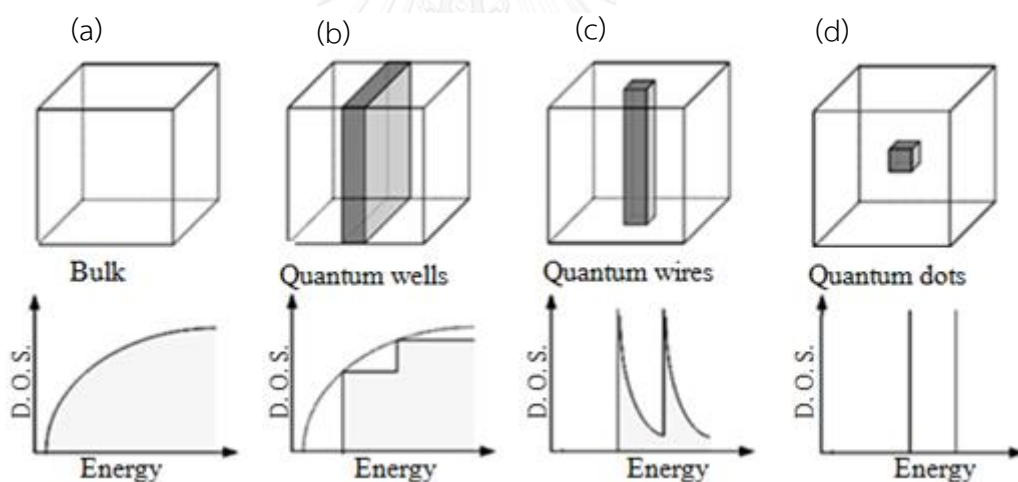
บทที่ 2

ทฤษฎีและความรู้พื้นฐาน

บทนี้จะอธิบายทฤษฎีและความรู้พื้นฐานที่จำเป็นต่อการตีความและอธิบายผลการทดลอง โดยเนื้อหาประกอบไปด้วย 3 หัวข้อ 2.1) โครงสร้างนาโน 2.2) ควอนตัมดอทบนผิวเรียบและผิวลายตาราง และ 2.3) การเปล่งแสงจากโครงสร้างควอนตัมดอทและสมบัติโพลาริซัน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 โครงสร้างนาโน

โครงสร้างนาโนสามารถจำกัดการเคลื่อนที่ของพาหะนำประจุ ซึ่งพาหะจะถูกจำกัดการเคลื่อนที่เมื่อโครงสร้างมีขนาดเล็กลง โครงสร้างของวัสดุในระดับนาโนเมตรสามารถถูกแบ่งตามจำนวนทิศทางที่พาหะถูกจำกัดทิศทางการเคลื่อนที่ใน 0 มิติ 1 มิติ 2 มิติ และ 3 มิติ และมีความหนาแน่นของสถานะ (Density of states: DOS) พลังงานต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางกายภาพและความหนาแน่นของสถานะพลังงานของ (a) ก้อนผลึก (Bulk) (b) ควอนตัมเวลล์ (QD wells) (c) ควอนตัมไวร์ (QD wires) และ (d) ควอนตัมดอท [39]

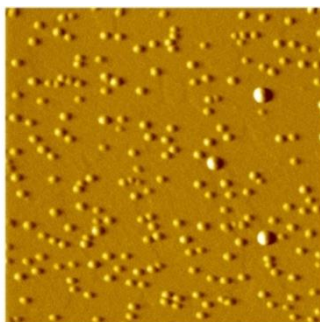
รูปที่ 2.1 (a) คือ โครงสร้างก้อนผลึกซึ่งพาหะภายในสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระทั่วทั้งผลึกโดยไม่ถูกกักกัน พาหะมีระดับพลังงานที่ต่อเนื่อง รูปที่ 2.1 (b) คือโครงสร้างควอนตัมเวลล์ พาหะภายในสามารถเคลื่อนที่เป็นอิสระใน 2 มิติ มีความหนาแน่นของสถานะพลังงานเป็นแบบขั้นบันได อันเป็นผลจากการกักกันพาหะของโครงสร้าง รูปที่ 2.1 (c) คือ โครงสร้างควอนตัมไวร์ซึ่งพาหะภายในถูกจำกัดการเคลื่อนที่ใน 2 มิติ มีความหนาแน่นของสถานะพลังงานดังรูปที่ 2.1 (c) ล่าง และรูปที่ 2.1

(d) คือ โครงสร้างควอนตัมดอทซึ่งมีการกักกันพาหะทั้ง 3 มิติและมีความหนาแน่นของสถานะพลังงานเป็นแบบเดลต้าฟังก์ชัน พาหะสามารถครอบครองพลังงานได้เพียงบางค่าเท่านั้นยังผลให้มีการเปล่งแสงได้เพียงบางความยาวคลื่น

2.2 ควอนตัมดอทบนผิวเรียบและผิวลายตาราง

โครงสร้างควอนตัมดอทที่ศึกษารวบรวมในปัจจุบันนั้นจะเป็นโครงสร้างแบบเฮเทอโร (Heterostructures) ซึ่งเกิดจากการประกอบของชั้นสารกึ่งตัวนำที่ต่างกันตั้งแต่ 2 สารขึ้นไปเข้าด้วยกันเกิดเป็นรอยต่อเฮเทอโร (Heterojunction) ผลจากความไม่เข้ากันของค่าคงตัวผลึกของสารก่อให้เกิดความเครียดขึ้นในชั้นสารผลึก เมื่อชั้นผลึกมีความหนาเพิ่มขึ้นจนถึงความหนาวิกฤติ (Critical thickness) โครงสร้างจะคลายความเครียดเพื่อลดพลังงานของระบบลงโดยก่อตัวเป็นโครงสร้างควอนตัมดอทซึ่งรูปแบบการก่อตัว ขนาด ความสม่ำเสมอ และตำแหน่งก่อตัวของควอนตัมดอทจะถูกกำหนดจากหลายองค์ประกอบ เช่น ชนิดสาร ค่าคงตัวผลึกของสาร อัตราการปลูก ความเครียดแผ่นฐาน เป็นต้น ซึ่งในหัวข้อนี้จะอธิบายเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้ คือ กลไกการเกิดควอนตัมดอทบนผิวเรียบและผิวลายตาราง

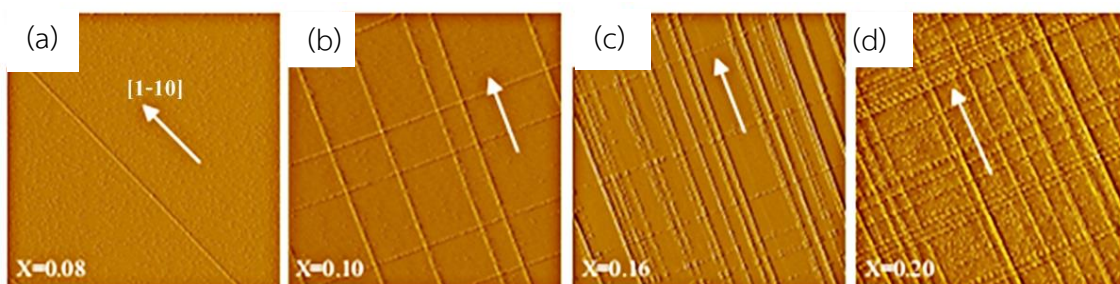
กลไกการเกิดควอนตัมดอทบนผิวเรียบนั้นสามารถอธิบายดังนี้ การปลูกผลึกบนแผ่นฐานจะเริ่มเกิดกระบวนการก่อตัวในแบบ Frank-van de Merwe (FM) [40] และเนื่องจากค่าความเครียดระหว่างชั้นผลึกที่ต่ำ ส่งผลต่อผลึกที่ได้เป็นชั้นฟิล์มบาง (Wetting layer: WL) เรียกโครงสร้างแบบนี้ว่า 2D และเมื่อปลูกชั้นผลึกหนาขึ้นไปอีกจะก่อให้เกิดความเครียดสูงขึ้นจนเมื่อถึงค่าความหนาวิกฤติ โครงสร้างแบบ 2D จะเปลี่ยนเป็นแบบ 3D เพื่อลดพลังงานของระบบลง ซึ่งเรียกว่าการเกิดควอนตัมดอทแบบนี้ว่า Stranski-Krastanow (SK) [41] โหมด การปลูกควอนตัมดอทด้วยวิธีนี้การก่อตัวของควอนตัมดอทจะเป็นแบบสุ่มดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ภาพ AFM ขนาด $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ ของควอนตัมดอต InAs/GaAs ก่อตัวบน InGaAs WL [42]

รูปที่ 2.2 แสดงในภาพ AFM ของ ควอนตัมดอต InAs/GaAs ที่ก่อตัวบนชั้น InGaAs WL สังเกตว่าขนาดของควอนตัมดอตค่อนข้างใกล้เคียงกัน มีลักษณะทรงกลมและตำแหน่งการก่อตัวเป็นแบบสุ่ม

กลไกการเกิดควอนตัมดอตบนลายตารางสามารถนำไปสู่การทำนายตำแหน่งก่อดั้วของควอนตัมดอต โครงสร้างควอนตัมดอตบนลายตารางทำได้โดยการปลูกสร้างชั้นลายตารางเตรียมไว้ก่อนและปลูกควอนตัมดอตทีหลัง พื้นผิวลายตารางสามารถสร้างโดยการปลูกผลึกสารประกอบที่มีค่าคงตัวผลึกต่างกันไม่เกิน 1.5% สารประกอบที่ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย คือ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ บน GaAs [43], [44], [45] เมื่อชั้นที่ปลูกมีค่าความหนาถึงค่าวิกฤติ โครงสร้างผลึกจะคลายความเครียดทำให้เกิดความพร่อง (Dislocations) ขึ้นและปรากฏเป็นพื้นผิวลายตาราง เมื่อปลูก InAs บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ จะได้ควอนตัมดอต InAs ที่ก่อดั้วบนลายตาราง โดยจะเรียงตัวตัดกันเป็นสี่เหลี่ยมคล้ายลายตารางในทิศ [1-10] และ [110] ดังแสดงในรูปที่ 2.3



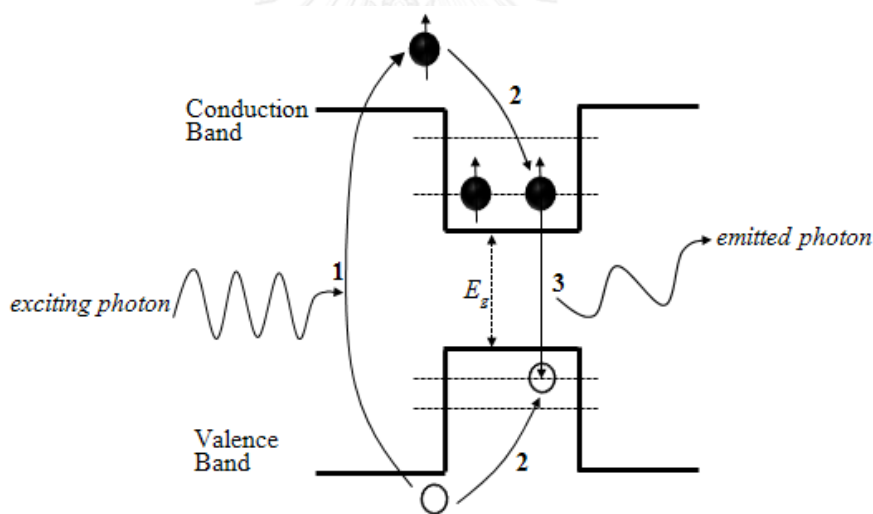
รูปที่ 2.3 ภาพ AFM ของควอนตัมดอต InAs บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ เมื่อ x มีค่า (a) 0.08, (a) 0.10, (c) 0.16 และ (d) 0.20 ตามลำดับ [46]

รูปที่ 2.3 (a) แสดงภาพ AFM ของควอนตัมดอท InAs บนพื้นผิวลายตาราง $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ เมื่อ x เท่ากับ 0.08 พบว่าเมื่อปรับเปลี่ยนเศษส่วนโมลของสารประกอบโดยเพิ่มปริมาณของ In ในชั้น InGaAs ส่งผลให้ปริมาณลายตารางเพิ่มขึ้นดังในรูป (b), (c) และ (d) ตามลำดับ

2.3 การเปล่งแสงจากโครงสร้างควอนตัมดอทและสมบัติโพลาริไซซ์

2.3.1 การเปล่งแสงจากโครงสร้างควอนตัมดอท

ควอนตัมดอทมีความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่ไม่ต่อเนื่อง พาหะสามารถครอบครองที่ค่าระดับพลังงานเจาะจง (Eigen energy) เท่านั้น ส่งผลให้มีการเปล่งแสงในช่วงแคบและมีความเข้มแสงสูงกว่าแสงที่เปล่งจากโครงสร้างแบบก้อนผลึก สมบัติดังกล่าวทำให้ควอนตัมดอทถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายดังได้กล่าวในบทที่ 1 แผนภาพอย่างง่ายของกลไกการเปล่งแสงจากโครงสร้างควอนตัมดอทดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แผนภาพอย่างง่ายของกลไกการเปล่งแสงจากโครงสร้างควอนตัมดอท [47]

รูปที่ 2.4 แสดงแผนภาพอย่างง่ายของกลไกการเปล่งแสงจากควอนตัมดอทอธิบายดังนี้ 1) โฟตอนซึ่งมีพลังงานสูงกว่าค่าแถบพลังงานต้องห้าม กระตุ้นอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ไปยังแถบคอนดักชัน ทำให้เกิดโฮล (Hole) ในแถบวาเลนซ์ 2) อิเล็กตรอนและโฮลพยายามลดระดับพลังงานตัวเองไปยังระดับต่ำที่สามารถครอบครองได้ โดยอิเล็กตรอนจะตกลงมาใกล้ขอบล่างของแถบคอนดักชันและโฮลจะเคลื่อนไปใกล้ขอบบนของแถบวาเลนซ์ และ 3) อิเล็กตรอนรวมตัวกับโฮลเพื่อลดพลังงานรวมของระบบและปลดปล่อยผลต่างพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน

2.3.2 สมบัติโพลาไรซ์

สมบัติโพลาไรซ์ของแสงสามารถแสดงได้ในเทอมค่าอันดับขั้นการโพลาไรซ์ ดัง

$$DOP = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (2.1)$$

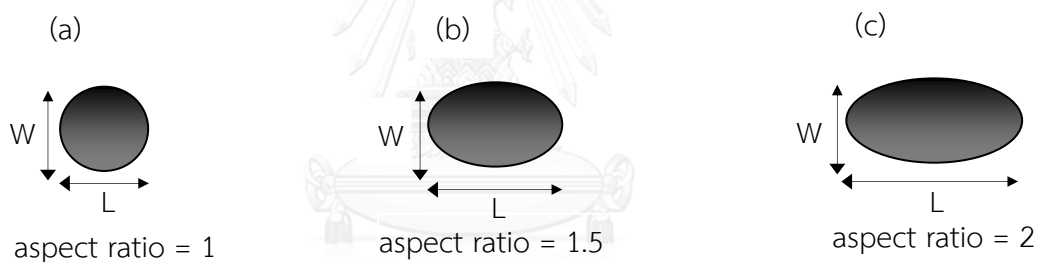
เมื่อ I_{max} และ I_{min} คือ ความเข้มแสงสูงสุดและต่ำสุดสำหรับสองทิศทางที่ตั้งฉากกันตามลำดับ

สมบัติโพลาไรซ์ของแสงที่เปล่งออกจากโครงสร้างควอนตัมดอตขึ้นอยู่กับหลายองค์ประกอบที่สำคัญได้แก่ อัตราส่วนลักษณะ (Aspect ratio) ผลเชื่อมโยงแนวนอน และผลโพอิโซอิเล็กทริก ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.3.2 (a) อัตราส่วนลักษณะ

คำจำกัดความของอัตราส่วนลักษณะ คือ ความยาว (L) ต่อความกว้าง (W) ของวัตถุใดๆ ดัง

รูปที่ 2.5

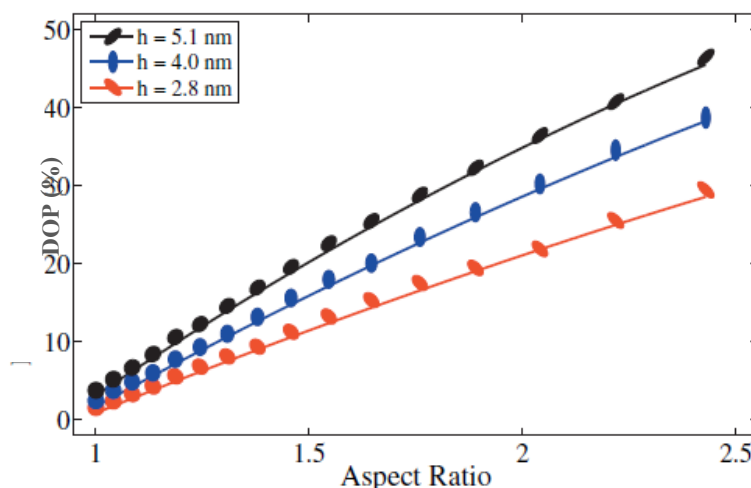


รูปที่ 2.5 Top view ควอนตัมดอตที่มีอัตราส่วนลักษณะเท่ากับ (a) 1, (b) 1.5 และ (c) 2

การเปล่งแสงจากโครงสร้างควอนตัมดอตเกิดจากการที่พาหะเปลี่ยนสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบคอนดักชัน แล้วลดระดับพลังงานลงมา ดังนั้นความน่าจะเป็นของการรวมตัวของพาหะและคายพลังงานซึ่งแปรผันตรงกับความหนาแน่นความน่าจะเป็นของอิเล็กตรอนจึงมีความสัมพันธ์กับสมบัติเชิงแสง ในกรณีควอนตัมดอตที่มีอัตราส่วนลักษณะเท่ากับ 1 ในรูปที่ 2.5 (a) เรียกว่า มีความสมมาตรในแนวระนาบ ซึ่งความหนาแน่นของฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนมีลักษณะสมมาตร แสงที่เปล่งออกจากโครงสร้างจึงมีความเข้มแบบไอโซทรอปิก คือ ความเข้มเท่ากันในทุกทิศทาง ส่งผลให้ค่า DOP ต่ำหรือเป็นศูนย์

ในทางปฏิบัติรูปร่างของควอนตัมดอตที่ปลูกขึ้นนั้นอาจไม่สมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (b) และ (c) ซึ่งอาจเกิดจากการผ่อนคลายความเครียดแต่ละทิศทางไม่เท่ากันขณะที่ควอนตัมดอตก่อตัว

ส่งผลให้ความหนาแน่นของฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนมีลักษณะไม่สมมาตร แสงที่เปล่งออกจากโครงสร้างมีความเข้มแบบแวนไฮเซอร์อปิก ทำให้ DOP มีค่าสูงขึ้น ผลการคำนวณค่า DOP ของการเปล่งแสงที่สถานะพื้นของควอนตัมดอทโดยใช้ Envelope functions ดังรูปที่ 2.6 [48]



รูปที่ 2.6 ผลคำนวณค่า DOP ของการเปล่งแสงที่สถานะพื้นของควอนตัมดอทสัมพันธ์กับอัตราส่วนลักษณะและความสูงของควอนตัมดอท สำหรับควอนตัมดอทที่มีความยาวฐานเท่ากับ 28.8 nm [48]

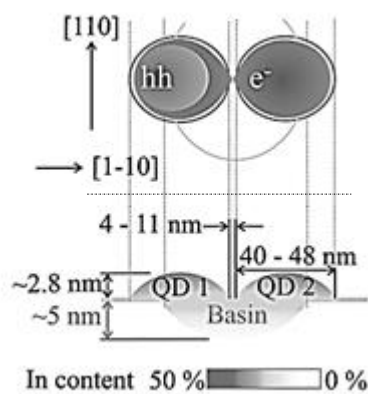
รูปที่ 2.6 แสดงผลการคำนวณค่า DOP สัมพันธ์กับอัตราส่วนลักษณะ ความสูงควอนตัมดอทเท่ากับ 2.8 nm (สีแดง), 4.0 nm (สีน้ำเงิน) และ 5.1 nm (สีดำ) เส้นกราฟแสดงค่า DOP แปรผันตรงกับอัตราส่วนลักษณะ ซึ่งเป็นผลจากความไม่สมมาตรของความหนาแน่นของฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนดังคำอธิบายข้างต้น สังเกตว่าควอนตัมดอทที่มีอัตราส่วนลักษณะเดียวกันแต่ความสูงไม่เท่ากันจะให้ค่า DOP ต่างกันอันเป็นผลจากสมบัติฟังก์ชันคลื่นของโฮลที่ต่างกัน [49], [50]

2.3.2 (b) ผลเชื่อมโยงแนวนอน

ผลเชื่อมโยงแนวนอนเป็นผลอันเนื่องมาจากควอนตัมดอทก่อตัวเรียงต่อกันในแนวนอนสามารถเกิดจากอันตรกิริยาคูลอมบ์ (Coulomb interaction) อันตรกิริยาสปิน และการ Tunneling ของพาหะระหว่างควอนตัมดอทที่ใกล้กัน ซึ่งถูกกำหนดโดยช่องว่างระหว่างควอนตัมดอท ผลเชื่อมโยงแนวนอนพบได้ในควอนตัมดอทบนสายตาราง ควอนตัมดอทสายลูกโซ่ และควอนตัมดอทโมเลกุล เป็นต้น มีความสำคัญต่อการสร้างสิ่งประดิษฐ์สปินทรอนิกส์ การปรับค่าความยาวคลื่นและค่า DOP ของแสงที่เปล่งออกจากโครงสร้างเพื่อให้เหมาะกับการใช้งาน โดยงานวิจัยก่อนหน้าที่อธิบายถึงผล

เชื่อมโยงแวนอนที่มีต่อค่า DOP หลักๆได้แก่งานของ C. Hermannstadter et al. [51], W. Liu et al. [52] และ Yu. I. Mazur et al. [53] ซึ่งสรุปสาระสำคัญได้ดังนี้

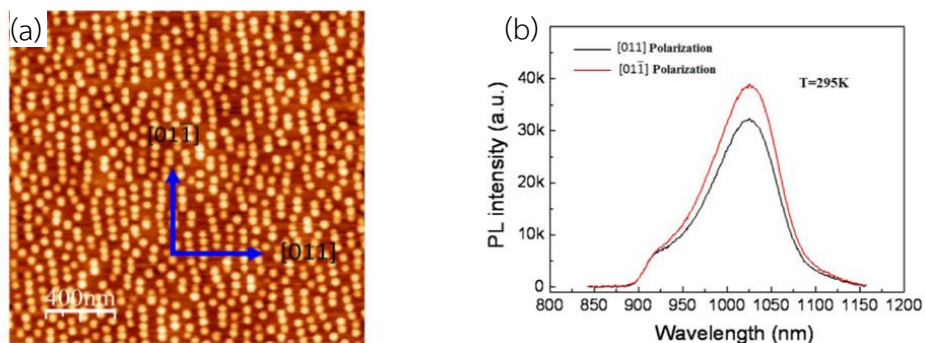
รูปที่ 2.7 แสดงแผนภาพจำลองของการเชื่อมกันในแวนอนของควอนตัมดอต $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ซึ่งถูกปลูกบนแผ่นฐาน GaAs (001) ควอนตัมดอตเรียงตัวกันในทิศ [1-10] ความสูงประมาณ 2.8 nm ยาวประมาณ 40 - 48 nm และระยะห่างระหว่างควอนตัมดอตมีค่าประมาณ 4 - 11 nm เกรเดียนต์ของความสว่างในรูปแสดงถึงปริมาณของสาร In ที่มีอยู่ในควอนตัมดอตซึ่งสูงสุดที่บริเวณยอดและต่ำสุดที่ฐาน



รูปที่ 2.7 (บน) Top-view ของควอนตัมดอตที่มีผลเชื่อมโยงแวนอน (ล่าง) ภาพตัดขวางของการเรียงตัวของควอนตัมดอตและปริมาณ In [51]

รูปที่ 2.7 (บน) แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีควอนตัมดอตสองดอตอยู่ใกล้กันจะมีความน่าจะเป็นของการรวมตัวกันของอิเล็กตรอน (e^-) และ Heavy hole (hh) ในความเป็นจริงแล้ว พาหะสามารถ Tunnel รวมตัวกันและปลดปล่อยแสงออกมาได้แม้ว่าระยะห่างระหว่างควอนตัมดอตสูงกว่ากรณีรูปที่ 2.7 [54], [55], [56] ซึ่งจากสมบัติดังกล่าวมีผลทำให้แสงที่เปล่งออกจากโครงสร้างควอนตัมดอตมีความเข้มสูงในทิศที่มีการเชื่อมโยงกันระหว่างควอนตัมดอต ซึ่งกรณีนี้พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่า DOP ของแสงที่เปล่งจากควอนตัมดอตเดี่ยวพบว่ามีค่าประมาณ 3.6% ขณะที่ควอนตัมดอตที่มีผลเชื่อมโยงแวนอนค่า DOP ประมาณ 12.5% [51]

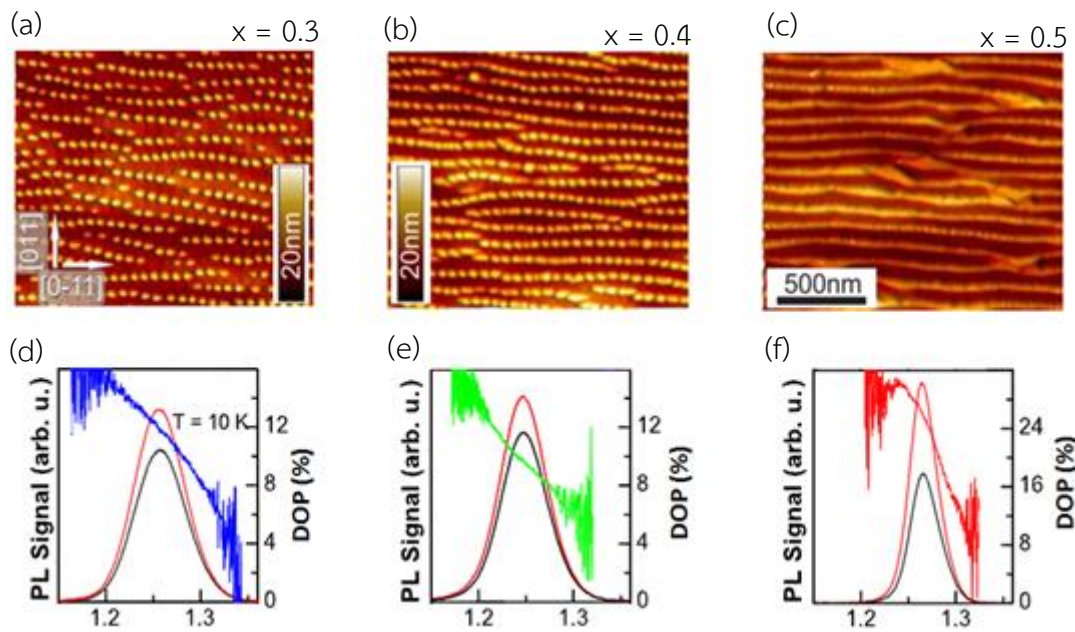
ผลเชื่อมโยงแนวนอนของควอนตัมดอทส่งผลต่อค่า DOP ของแสงที่เปล่งออกจากโครงสร้างชัดเจนจากปลุกควอนตัมดอทที่มีลักษณะเรียงกันแบบสายลูกโซ่ สังเกตได้จากความเข้มแสงในสองทิศที่มีผลเชื่อมโยงแนวนอนต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.8 [52]



รูปที่ 2.8 (a) ภาพ AFM ของควอนตัมดอท InGaAs สายลูกโซ่บนแผ่นฐาน GaAs (001) จำนวน 16 ชั้น (b) ผล PL สเปกตรัมของแสงโพลาไรเซชันในทิศ $[011]$ และ $[01-1]$, [52]

รูปที่ 2.8 แสดงผลของการเชื่อมโยงแนวนอนซึ่งมีผลต่อค่า DOP โดยในรูปที่ 2.8 (a) แสดงภาพ AFM ของควอนตัมดอท InGaAs บนแผ่นฐาน GaAs (001) สังเกตว่าควอนตัมดอทมีลักษณะต่อเรียงกันเป็นสายลูกโซ่ซึ่งแต่ละสายลูกโซ่ของควอนตัมดอทมีการจัดเรียงตัวกันในทิศ $[01-1]$ จำนวนเฉลี่ยประมาณ 5 ควอนตัมดอทต่อ 1 เส้นสายลูกโซ่และผลจากการเชื่อมโยงกันของควอนตัมดอทในทิศ $[01-1]$ ทำให้ความเข้มแสงที่เปล่งออกมาจากโครงสร้างควอนตัมในทิศดังกล่าวสูงกว่าในทิศ $[011]$ ดังแสดงผล PL สเปกตรัมในรูปที่ 2.8 (b)

อีกกรณีหนึ่งที่แสดงให้เห็นผลเชื่อมโยงแนวนอนที่มีไม่เท่ากันในแต่ละชั้นงานและส่งผลต่อค่า DOP ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (บน) เป็นโครงสร้างควอนตัมดอทที่เรียงตัวกันในแนวนอนคือทิศ $[01-1]$ ของโครงผลึก ซึ่งระยะห่างเฉลี่ยระหว่างควอนตัมดอทมีค่าสูงสุดในชั้นงานรูปที่ 2.9 (a) และลดลงในชั้นงานรูปที่ 2.9 (b) และ 2.9 (c) ตามลำดับ ซึ่งจากลักษณะดังกล่าวส่งผลให้ควอนตัมดอทที่ก่อตัวขึ้นมีผลเชื่อมโยงแนวนอนมากที่สุดในชั้นงานรูป 2.9 (c) มีผลให้สมบัติโครงสร้างเปลี่ยนจาก 0 D เป็น 1 D สามารถสังเกตสมบัตินี้ได้จากผลวัดโพลาไรซ์โฟโตลูมิเนสเซนส์ ซึ่งพบว่าแสงที่เปล่งออกมาจากโครงสร้างจะมีโพลาไรเซชันในทิศที่ควอนตัมดอทเรียงตัวกันคล้ายควอนตัมไวร์ ดังแสดงผลของค่า DOP ในรูปที่ 2.9 (ล่าง) [53]

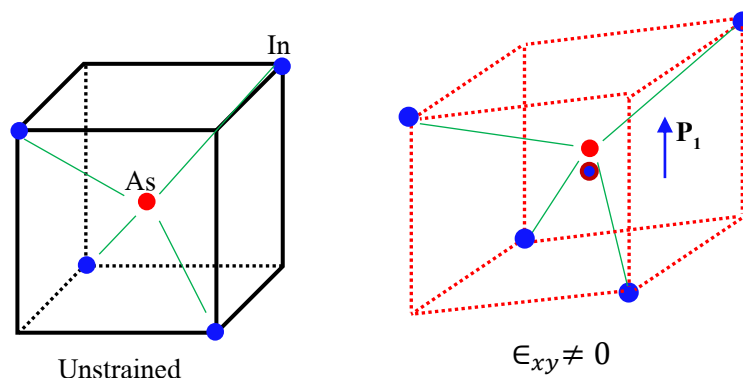


รูปที่ 2.9 ภาพ (บน) AFM ของควอนตัมดอต $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ จำนวน 15 ชั้น บนแผ่นฐาน GaAs (100) มีชั้นคั่น GaAs หนา 60 ML โดยชั้นงาน (a) $x = 0.3$, (b) $x = 0.4$, (c) $x = 0.5$, (ล่าง) ผล PL signal และกราฟคำนวณ DOP (%) ของชั้นงาน (d) $x = 0.3$, (e) $x = 0.4$, (f) $x = 0.5$ ตามลำดับ [53]

จากรูปที่ 2.9 (d), 2.9 (e) และ 2.9 (f) แสดงกราฟของความเข้มแสงในทิศ [0-11] (สีแดง) กับ [110] (สีน้ำเงิน) และ DOP (สีน้ำเงิน) ของแต่ละชั้นงาน จะเห็นได้ว่า DOP มีค่าประมาณ 11.9%, 9.7% และ 25.9% สำหรับชั้นงาน $x = 0.3$, $x = 0.4$ และ $x = 0.5$ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าชั้นงานที่มีผลเชื่อมโยงแนวอนระหว่างควอนตัมดอตที่สูงจะให้ค่า DOP สูงสุด สำหรับค่า DOP ของชั้นงาน $x = 0.3$ และ $x = 0.4$ ที่ไม่เป็นศูนย์ แม้ว่ามึระยะห่างระหว่างควอนตัมดอตค่อนข้างมาก บ่งชี้ถึงรูปทรงของควอนตัมดอตที่ไม่สมมาตร หรืออัตราส่วนลักษณะไม่เท่ากับ 1 ดังอธิบายในหัวข้อ 2.3.2 (a)

2.3.2 (c) ผลไพโซอิเล็กทริก

ผลไพโซอิเล็กทริกเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่ถูกนำมาพิจารณา เนื่องจากโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (Zinc blende) ของสารกึ่งตัวนำซึ่งมีสมบัติไวต่อความไม่สมมาตรของศูนย์กลาง ผลจาก Shear strain ที่มีต่อโครงสร้างควอนตัมดอตนั้นส่วนใหญ่แล้วจะปรากฏให้เห็นบริเวณรอบหรือขอบเขตของควอนตัมดอต ทำให้โครงสร้างมีความไม่สมมาตรของศูนย์กลางมีผลให้เกิดไพโซอิเล็กทริกโพลาไรเซชัน (Piezoelectric polarization) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 [57]



รูปที่ 2.10 Unit cell แบบซิงค์เบลนด์ (ซ่าย) องค์ประกอบของ Shear strain เป็นศูนย์ และ (ขวา) องค์ประกอบของ Shear strain $\epsilon_{xy} \neq 0$ เมื่อเกิดการเปลี่ยนรูป (Deformation) [57]

รูปที่ 2.10 แสดงการเปลี่ยนรูปของโครงผลึกและการเกิดโพซิโวลีแอกทริกโพลาริเซชันเวกเตอร์ ตำแหน่งของอะตอม In ถูกกำหนดด้วยสีน้ำเงิน และของอะตอม As ถูกกำหนดด้วยสีแดง สำหรับ As รูปซ้ายแสดงโครงผลึกขณะไม่มี Shear strain กระทำ ผลรวมของโพลาริเซชันเวกเตอร์มีค่าเป็นศูนย์ เมื่อโครงผลึกเปลี่ยนรูปเนื่องจาก $\epsilon_{xy} \neq 0$ ทำให้ผลรวมของโพลาริเซชันเวกเตอร์มีค่าไม่เป็นศูนย์และปรากฏโพซิโวลีแอกทริกโพลาริเซชันเวกเตอร์ P_1 ดังรูปขวา

ผลของโพซิโวลีแอกทริกโพลาริเซชันจะถูกกำหนดโดยความหนาแน่น ทิศทาง ตำแหน่ง และการกระจายตัวของ Shear strain ซึ่งพบว่าสนามของโพซิโวลีแอกทริกส่วนใหญ่จะปรากฏขึ้นบริเวณริมหรือขอบของโครงสร้างควอนตัมดอต ดังนั้นผลของโพซิโวลีแอกทริกจะส่งผลต่อ DOP มากเมื่อควอนตัมดอตมีขนาดใหญ่ [58], [59]

นอกจากองค์ประกอบทั้งสามซึ่งเป็นสาเหตุหลักแล้ว สมบัติโพลาริเซชันของแสงที่เปล่งจากควอนตัมดอตยังเกิดจากสาเหตุรองอื่น ที่สำคัญได้แก่ การกระจายตัวของความเครียด, Valence-band mixing [60], [61] การเปลี่ยนค่าของมวลยั้งผล (Effective mass) [62], [63] และการกักกันพาหะ [64], [65]

บทที่ 3

การทดลอง

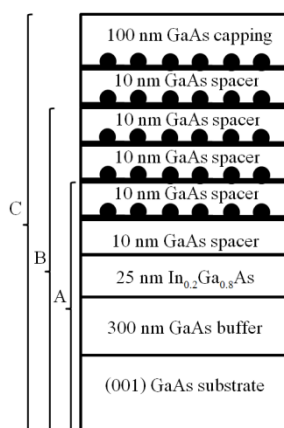
ชิ้นงานทั้งหมดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกสังเคราะห์โดยเครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล ซึ่งได้รับความนิยมในการสังเคราะห์โครงสร้างที่ต้องการความละเอียดสูง เนื่องจากสามารถควบคุมอัตรา การปลูกได้ในระดับ ML ต่อวินาที สอดคล้องต่อการสังเคราะห์ควอนตัมดอต การวัดและวิเคราะห์ สมบัติชิ้นงานประกอบด้วยสมบัติทางกายภาพซึ่งถูกวัดโดยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ข้อมูลสัญญาณ วิทยาพื้นผิว (Surface morphology) ของชิ้นงานที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลที่ได้จากการ วัดสมบัติเชิงแสงโดยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์และโพลาริซโฟโตลูมิเนสเซนซ์ เนื้อหาในบทจึงถูกแบ่ง ออกเป็น 3 หัวข้อ ได้แก่ 3.1) การปลูกโครงสร้างควอนตัมดอตบนลายตาราง 3.2) สัญญาณวิทยา พื้นผิว และ 3.3) เทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 การปลูกโครงสร้างควอนตัมดอตบนลายตาราง

ควอนตัมดอตบนลายตารางถูกสังเคราะห์โดยปลูกโครงสร้างชั้นลายตารางเตรียมไว้ก่อน และปลูกควอนตัมดอตทีหลัง พื้นผิวลายตารางสร้างโดยปลูกผลึกสารประกอบ $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ หนา 25 nm ซึ่งเพียงพอต่อการที่โครงสร้างผลึกจะคลายความเครียดทำให้เกิด Dislocations ขึ้นและปรากฏ เป็นพื้นผิวลายตาราง [66] เมื่อปลูก InAs บนพื้นผิวลายตารางจะได้ควอนตัมดอต InAs ที่ก่อดัวบน ลายตาราง ชิ้นงานถูกแบ่งออกเป็น โครงสร้างเดิม คือ ควอนตัมดอตที่ซ้อนทับกันจำนวน 1, 3 และ 5 ชั้น มีชั้นคั่น GaAs หนา 10 nm และโครงสร้างที่ถูกสังเคราะห์ใหม่ซึ่งได้ปรับลดความหนาชั้นคั่นเป็น 6 nm รวมเป็น 6 ชิ้นงาน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1.1 ควอนตัมดอตบนลายตารางโครงสร้างเดิม

รูปที่ 3.1 แสดงภาพตัดขวางโครงสร้างควอนตัมดอตถูกปลูกบนแผ่นฐานตั้งต้น GaAs (001) โดยมี GaAs Buffer หนา 300 nm เพื่อปรับผิวหน้าของชิ้นงานให้เรียบ จากนั้นปลูกโครงสร้างของพื้น

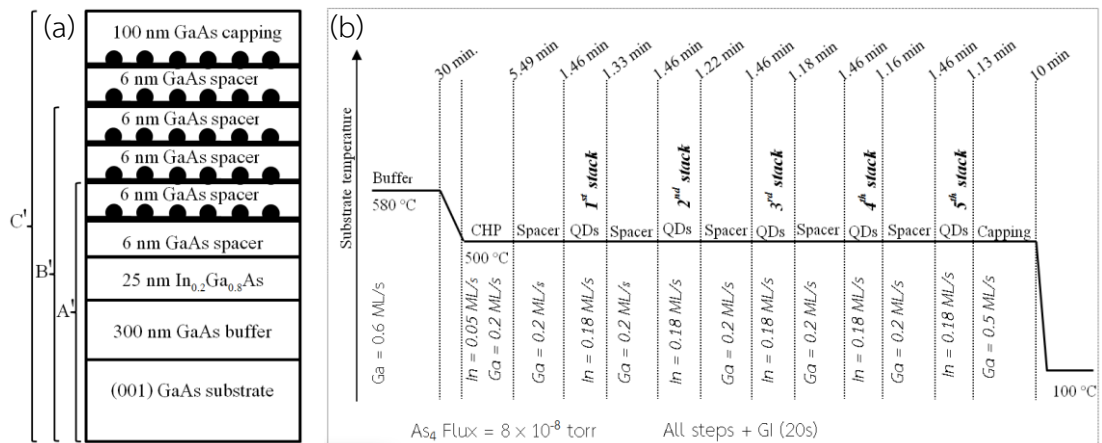


รูปที่ 3.1 ภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างของชั้นงานเดิมซึ่งมีควอนตัมดอตซ้อนทับกัน A 1 ชั้น, B 3 ชั้น และ C 5 ชั้น

ผิวลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ หนา 25 nm ตามด้วยชั้นคั่น GaAs หนา 10 nm และปลูกชั้นของควอนตัมดอต InAs สำหรับชั้นงาน A ขณะที่ B และ C ควอนตัมดอตจะถูกปลูกซ้อนทับกัน 3 และ 5 ชั้น ตามลำดับ สำหรับโครงสร้างที่นำไปวิเคราะห์สมบัติเชิงแสงจะถูกปลูกกลับทับด้วย GaAs (Capping layer) หนา 100 nm รายละเอียดในการปลูกอ่านเพิ่มเติมได้จาก [67]

3.1.2 ควอนตัมดอตบนลายตารางโครงสร้างที่ได้ปรับลดความหนาชั้นคั่น

ภาพตัดขวางของโครงสร้างชั้นงานที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นใหม่ถูกแสดงในรูปที่ 3.2 (a) สำหรับชั้นงาน A' ควอนตัมดอตซ้อนทับกัน 1 ชั้น, B' 3 ชั้น และ C' 5 ชั้น ขั้นตอนและอัตราการปลูกถูกแสดงด้วยภาพ Temperature profile รูปที่ 3.2 (b) เริ่มจากขั้นตอนการเตรียมแผ่นฐานตั้งต้นสำหรับการปลูก เริ่มต้นทำความสะอาดชั้นงานโดยการให้ความร้อนกับแผ่นฐานจนถึงอุณหภูมิที่ 580 °C ทำให้ออกไซด์บริเวณผิวหน้าแผ่นฐานสลายออกไป (De-oxidation) ใช้เวลาทำความสะอาดผิวหน้าเป็นเวลาประมาณ 30 นาที กระทั่งสามารถเห็น Streaky pattern ได้ชัดเจน การทำความสะอาดผิวหน้าอาจทำให้ผิวหน้าไม่เรียบ จึงต้องปลูก GaAs buffer หนา 300 nm เพื่อให้ผิวหน้าแผ่นฐานให้เรียบ หลังจากนั้นลดอุณหภูมิเหลือ 500°C จึงปลูกชั้นลายตาราง $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ หนา 25 nm

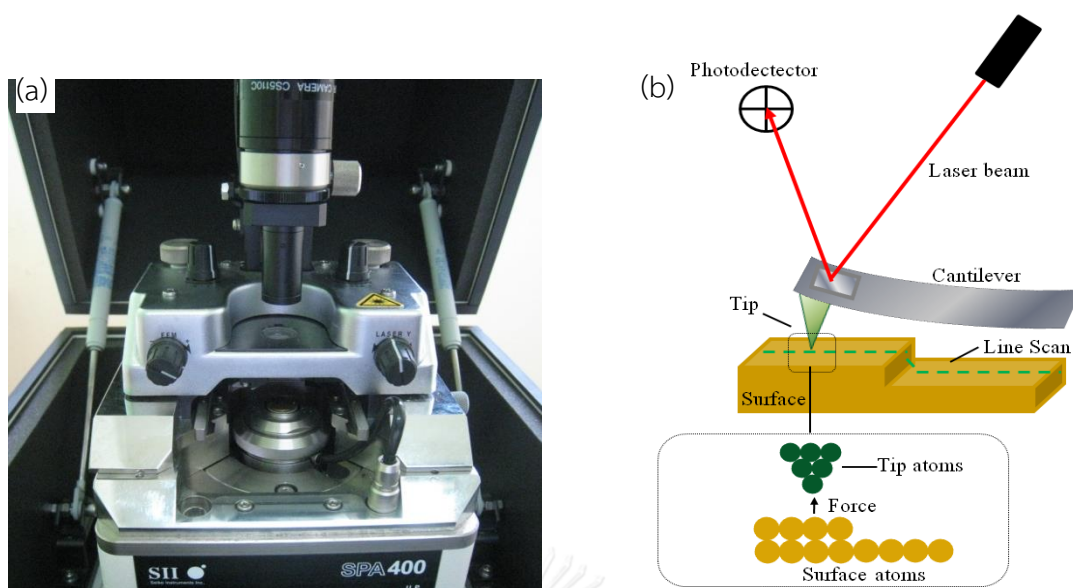


รูปที่ 3.2 (a) ภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างของชิ้นงานใหม่ซึ่งมีควอนตัมดอตซ้อนทับกัน A' 1 ชั้น B' 3 ชั้น และ C' 5 ชั้น และ (b) Temperature profile ของการปลูก

ด้วยอัตราการปลูก $\text{In} = 0.05$ ML/s, $\text{Ga} = 0.2$ ML/s ใช้เวลา 5.49 min ตามด้วยชั้นคั่น GaAs หนา 6 nm อัตราการปลูก $\text{Ga} = 0.2$ ML/s ใช้เวลา 1.46 min และปลูกควอนตัมดอต InAs สำหรับชิ้นงาน A อัตราการปลูก $\text{In} = 0.18$ ML/s ใช้เวลาในการก่อตัว 1.33 min ขณะที่ในชิ้นงาน B จะปลูกชั้นคั่น GaAs และควอนตัมดอต InAs รวมเป็น 3 ชั้น ควอนตัมดอตในชั้นที่ 3 ใช้เวลาก่อตัว 1.18 min และในชิ้นงาน C จะปลูกควอนตัมดอตและชั้นคั่นรวมเป็น 5 ชั้น ควอนตัมดอตในชั้นที่ 5 ใช้เวลาก่อตัว 1.13 min โดยแต่ละชั้นตอนจะแทรกช่วงเวลาขัดจังหวะ (Growth interruption: GI) 20 sec ควอนตัมในชั้นแรกมีความหนาประมาณ 1.7 ML [68] ขณะที่ชั้นถัดมามีความหนาประมาณ 1.3 ML ชิ้นงานที่นำไปวัดเชิงแสงจะกลบทับด้วย GaAs หนา 100 nm ด้วยอัตราการปลูก $\text{Ga} = 0.5$ ML/s ใช้เวลา 10 min

3.2 สันฐานวิทยาพื้นผิว

สันฐานวิทยาพื้นผิวสามารถวัดได้โดยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมซึ่งเป็นการวัดผิวหน้าของชิ้นงานที่ได้หลังจากการปลูก ข้อมูลที่ได้จะบ่งบอกถึง ขนาด ความสูงต่ำ และรูปแบบการเรียงตัวของควอนตัมดอต ข้อมูลสันฐานจะถูกนำไปวิเคราะห์ร่วมกับผลวัดเชิงแสงเพื่อตีความและอธิบายสเปกตรัมของแสงที่โครงสร้างเปล่งออกมา ภาพจริงและแผนภาพการทำงานอย่างง่ายของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมถูกแสดงในรูปที่ 3.3 (a) และ (b) ตามลำดับ



รูปที่ 3.3 ภาพจริงของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม Seiko รุ่น SPA-400 (b) แผนภาพการทำงานอย่างง่าย [69]

กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมจะตรวจสอบลักษณะผิวหน้าของชิ้นงานโดยใช้เข็มวัด โดยจะเลื่อนตำแหน่งไปแต่ละจุดบนพื้นผิวชิ้นงาน เข็มจะรักษาระยะห่างคงตัวค่าหนึ่งจากผิวหน้าของชิ้นงาน โดยอาศัยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) ค่าความสูงต่ำที่แตกต่างกันของพื้นผิวชิ้นงาน ส่งผลให้เข็มเลื่อนขึ้นลงในแนวตั้งด้วยค่าต่างกัน ขณะวัดจะมีแสงเลเซอร์ยิงมาที่ปลายคานของเข็มและสะท้อนต่อไปยังตัวตรวจรับแสง แสงเลเซอร์ที่ตรวจจับได้เมื่อเข็มวัดเลื่อนไปตลอดผิวหน้าของชิ้นงาน จะแสดงผลสัญญาณวิทยาของชิ้นงาน

3.3 เทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์

โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence: PL) เป็นเทคนิคที่ใช้วัดสมบัติเชิงแสงของชิ้นงาน ผลของสเปกตรัมของแสงจะถูกนำไปพิจารณาร่วมกับข้อมูลสัญญาณที่ได้จากการวัดผิวหน้าชิ้นงานดังอธิบายในหัวข้อแรก ชิ้นงานที่ถูกออกแบบมาเพื่อการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์จะถูกกลบด้วยชั้นกลบเพื่อให้มีสมบัติเชิงแสงที่ดี

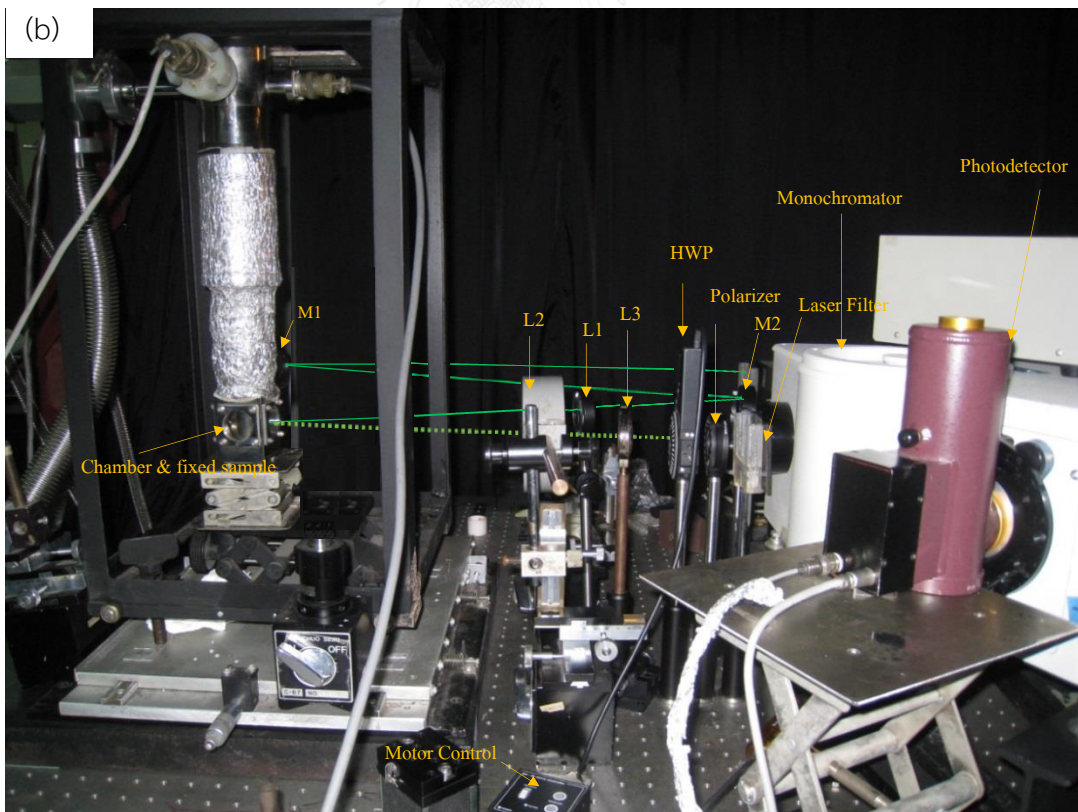
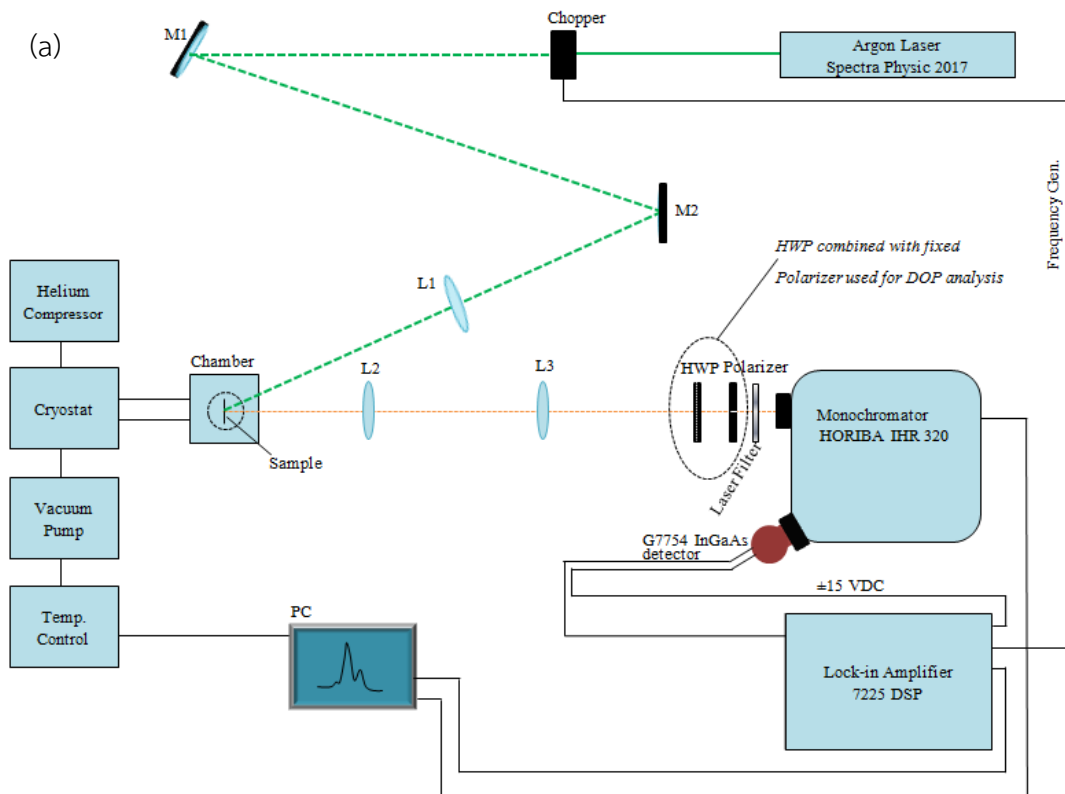
การวัด PL ถูกแบ่งย่อยเป็น 2 รูปแบบ คือ PL ที่รวมแสงในทุกทิศทาง และที่รวมแสงเฉพาะบางทิศทางเรียกว่า โพลารไรซ์โฟโตลูมิเนสเซนส์ (PPL) อุปกรณ์หลักที่ใช้ทดลองดังรูปที่ 3.4

ประกอบด้วย 1) แสงเลเซอร์ 2) อุปกรณ์ลำเลียงแสง 3) ระบบตรวจจับแสง และ 4) ระบบควบคุมอุณหภูมิ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) แสงเลเซอร์ (Ar^+ laser) ความยาวคลื่น 514.5 nm ใช้กระตุ้นชิ้นงานให้เกิดพลาสมา ซึ่งแสงเลเซอร์หรือโฟตอนนั้นได้ถ่ายเทพลังงานให้กับพลาสมาที่อยู่ในสถานะพื้นไปยังสถานะที่ถูกกระตุ้น จากนั้นเมื่อพลาสมาลดระดับพลังงานลงมาจะคายโฟตอนหรือเปล่งแสงออกมา แสงเลเซอร์ที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดเป็นลำแสงต่อเนื่องถูกยิงผ่าน Chopper ซึ่งทำหน้าที่ปิด-เปิดแสง ด้วยความถี่ประมาณ 333 Hz โดยทำงานร่วมกับสล็อตอินแอมป์เพื่อเลือกขยายสัญญาณที่ความถี่ที่ต้องการ (333 Hz) เท่านั้น

2) อุปกรณ์ลำเลียงแสง คือ เลนส์และกระจกสะท้อน ใช้ควบคุมทิศทางแสงไปยังอุปกรณ์เป้าหมาย กระจก M1 และ M2 ถูกใช้เพื่อควบคุมแสงให้สะท้อนมายังชิ้นงานที่ติดตั้งไว้ในห้อง Chamber เลนส์ L1 ถูกใช้เพื่อโฟกัสแสงเลเซอร์ให้มีความเข้มสูงไปตกกระทบชิ้นงาน แสงที่เปล่งออกมาจากชิ้นงานจะมีทิศทางแบบสุ่ม ซึ่งต้องใช้เลนส์ L2 และ L3 รวมแสงที่เปล่งออกมาจากชิ้นงานให้เข้าสู่ระบบตรวจจับแสงให้ได้มากที่สุด การวัด PPL จะติดตั้ง Polarizer และ Half-wave plate (HWP) เพิ่ม สมบัติโพลาไรซ์ของแสงถูกวิเคราะห์โดยการหมุน HWP จนอ่านได้ค่าความเข้มแสงสูงสุด ซึ่งจะถูกกำหนดเป็นมุม 0° อ้างอิงหรือ I_{max} ความสม่ำเสมอของการหมุน HWP ถูกควบคุมโดยสเตปเปอร์มอเตอร์ซึ่งมีความละเอียด 2° ต่อ 1 จังหวะ และเพื่อเลี่ยงผลกระทบของเกรตติงของโมโนโครมาเตอร์ในการตอบสนองแสงที่มีทิศทางของการโพลาไรเซชันต่างกัน ดังนั้น Fixed Polarizer จึงถูกวางไว้ก่อนขาเข้าของโมโนโครมาเตอร์ ความเข้มแสงที่โฟโตดีเทคเตอร์ตรวจจับได้จะถูกขยายโดยสล็อตอินแอมป์และเก็บข้อมูลโดยคอมพิวเตอร์

3) ระบบตรวจจับแสง ประกอบด้วยโฟโตดีเทคเตอร์และโมโนโครมาเตอร์ซึ่งมี F number คือ $f/4.1$ และมีฟิลเตอร์วางไว้ก่อนขาเข้าของโมโนโครมาเตอร์เพื่อกรองแสงเลเซอร์ออก ขาออกจะเชื่อมต่อกับโฟโตดีเทคเตอร์เพื่อตรวจจับแสงและวัดความเข้มแสงที่ความยาวคลื่นนั้น โฟโตดีเทคเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง คือ InAs G7754-03 ไวต่อแสงย่านอินฟราเรดในย่านความยาวคลื่น 800 nm - 2000 nm [70] ถูกออกแบบมาให้ทำงานที่ 77 K ก่อนการทดลองจึงต้องเติมไนโตรเจนเหลวและให้อุณหภูมิอยู่ตัวเสียก่อน



รูปที่ 3.4 ระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (a) แผนภาพ และ (b) ภาพถ่าย

4) ระบบควบคุมอุณหภูมิ Cryostat ก่อนเปิดระบบให้ทำงานจะต้องใช้ปั๊มสุญญากาศเพื่อดูดอากาศออก จากนั้นจึงเปิดระบบของฮีเลียมเหลวเพื่อดึงความร้อนออกจากห้อง Chamber ฮีเลียมเหลวนำความร้อนออกจากระบบโดยการถ่ายความร้อนให้แก่ระบบน้ำเย็นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20°C นอกจากนี้ในห้อง Chamber ยังมีฮีทเตอร์ไว้เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นไปยังเงื่อนไขวัด ระบบควบคุมอุณหภูมิ Cryostat สามารถปรับค่าได้ตั้งแต่ 15 K ถึง 300 K โดยทั่วไปเงื่อนไขการวัดถูกแบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบปรับเปลี่ยนพลังงานแสงกระตุ้น (Power dependence) เพื่อทราบถึงการเปล่งแสงจากสถานะพื้นและสถานะกระตุ้นของโครงสร้างควอนตัมดอต และแบบปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ (Temperature dependence) เพื่อทราบถึงการอพยพของพาหะ



บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

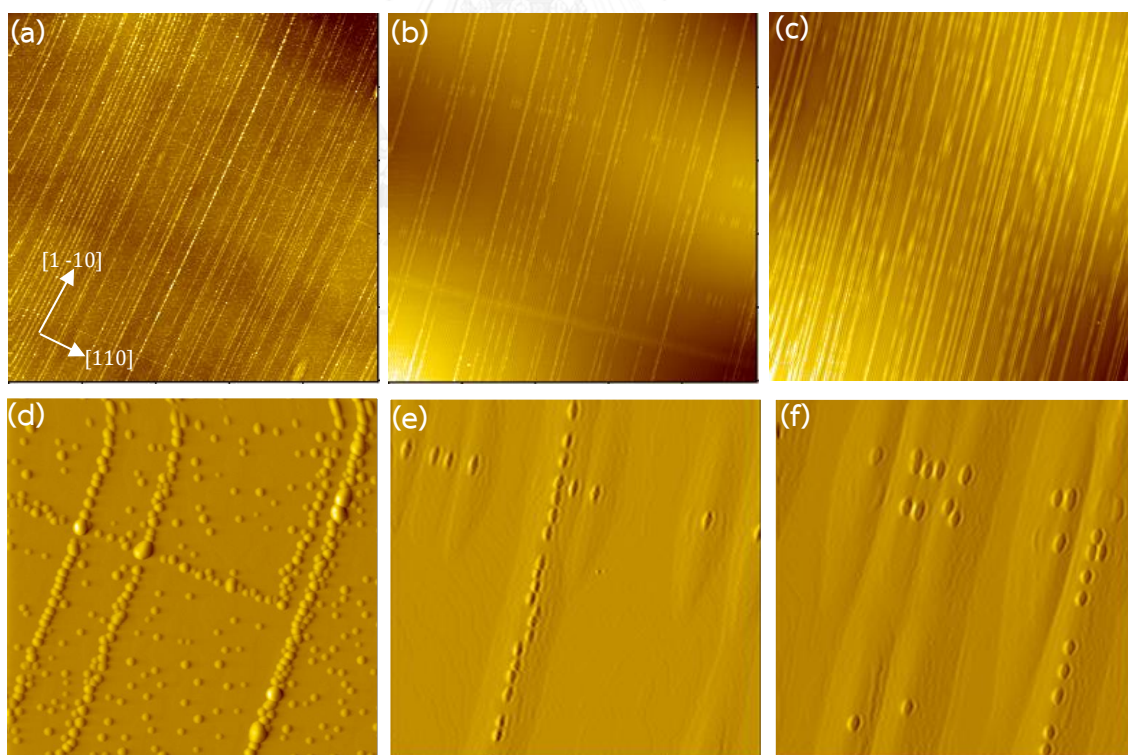
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ชิ้นงานแบ่งออกเป็นหัวข้อ 4.1) ผลวัดสัญญาณวิทยาและสมบัติเชิงแสงของโครงสร้างเดิมชิ้นงาน A, B, C และ 4.2) ผลวัดสัญญาณวิทยาและสมบัติเชิงแสงของโครงสร้างที่ถูกปรับลดความหนาชั้นคั่นชิ้นงาน A', B', C'

4.1 ผลวัดสัญญาณวิทยาและสมบัติเชิงแสงของโครงสร้างเดิม

แบ่งเป็นหัวข้อย่อย 4.1.1) สัญญาณวิทยาพื้นผิว และ 4.1.2) ผล PL และ PPL ดังต่อไปนี้

4.1.1 สัญญาณวิทยาพื้นผิว

สัญญาณวิทยาพื้นผิวของชิ้นงาน A, B และ C จากการวัด AFM ถูกแสดงในรูปที่ 4.1 (a), (b) และ (c) ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 ภาพ AFM ขนาด $25 \times 25 \mu\text{m}^2$ (บน) และ $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ (ล่าง) ของชิ้นงาน [(a), (d)] A, [(b), (e)] B และ [(c), (f)] C [67]

ผล AFM ของชั้นงาน A ในรูปที่ 4.1 (a) และ (d) แสดงให้เห็นว่าควอนตัมดอทก่อตัวทั้งบริเวณพื้นผิวเรียบและพื้นผิวลายตาราง โดยบนพื้นผิวลายตารางในทิศ [1-10] มีความหนาแน่นสูงสุด ถัดมาเป็นทิศ [110] และบนพื้นผิวเรียบตามลำดับ ผลของชั้นงาน B ในรูปที่ 4.1 (b) และ (e) ควอนตัมดอทส่วนใหญ่ก่อตัวบริเวณบนพื้นผิวลายตาราง พบบนผิวเรียบน้อยมาก ส่วนใหญ่เรียงตัวกันบนพื้นผิวลายตารางในทิศ [1-10] และถัดมาเป็นทิศ [110] สำหรับผลของชั้นงาน C ในรูปที่ 4.1 (c) จะเห็นได้ว่าควอนตัมดอทมีรูปร่างใกล้เคียงกับชั้นงาน B การเรียงตัวของควอนตัมดอทมีความเป็นระเบียบลดลง ระยะช่องว่างระหว่างควอนตัมดอทเพิ่มขึ้นดังในรูปที่ 4.1 (f)

ค่าความสูง ความยาวฐาน และอัตราส่วนลักษณะเฉลี่ยของควอนตัมดอทในแต่ละบริเวณของชั้นงาน A, B, C สรุปได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สรุปค่าความสูง ความยาวฐาน และอัตราส่วนลักษณะเฉลี่ยของควอนตัมดอท ณ บริเวณต่างๆ ของชั้นงาน A, B และ C

ชั้นงาน	ควอนตัมดอทบริเวณ	Height (nm)	Lenght (L) (nm)	Aspect ratio (L/W)
A (1-Stack)	ทิศ [1-10]	6.0	40	1.36
	ทิศ [110]	4.5	30	1.2
	ผิวเรียบ	3.0	25	1.0
B (3-Stacks)	ทิศ [1-10]	8.0	76	2.19
	ทิศ [110]	6.0	76	2.19
	ผิวเรียบ	-	-	-
C (5-Stacks)	ทิศ [1-10]	6.0	72	2.06
	ทิศ [110]	5.0	72	2.06
	ผิวเรียบ	-	-	-

จากรูปที่ 4.1 (a) และ (d) เห็นได้ว่าความหนาแน่นของควอนตัมดอทที่ก่อตัวในทิศ [1-10] และ [110] ไม่เท่ากัน สาเหตุเกิดจากความไม่สมมาตรของ Dislocations จากชั้นลายตาราง โดยเมื่อปลูก $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ บนแผ่นฐาน GaAs (001) จะก่อให้เกิดความไม่สมมาตรของ Dislocations ตามแนวทิศ [1-10] และ [110] ของโครงผลึกเนื่องด้วยสมบัติของสารประกอบที่มีสมบัติโครงผลึก ความ

A ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนลักษณะเพิ่มขึ้นเป็น 2.19 เนื่องจากความหนาแน่นของควอนตัมดอทลดลง จะเห็นได้ว่าระยะห่างระหว่างควอนตัมดอทเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับชิ้นงาน A เป็นผลให้ควอนตัมดอทสามารถยึดตัวในทิศ [1-10] ได้มากขึ้นทำให้มีลักษณะเป็นทรงรีดังในรูปที่ 4.1 (e)

จากรูปที่ 4.1 (c), (f) เมื่อจำนวนชั้นปลูกเพิ่มเป็น 5 ชั้น จะเห็นได้ว่าควอนตัมดอทมีรูปร่างใกล้เคียงกับในชิ้นงาน B เนื่องจากควอนตัมดอทในชั้นที่ 5 ถูกชักนำโดยรูปแบบการก่อตัวของควอนตัมดอทในชั้นที่ 3 มากกว่าผลของความเครียดจากชั้นลายตาราง ขณะที่การเรียงตัวของควอนตัมดอทในแนวเส้นลายตารางมีความเป็นระเบียบน้อยกว่าในชิ้นงาน A และ B สาเหตุเกิดจากการปลูกชั้นคั่น GaAs มีความหนารวมเพิ่มขึ้นเป็น 50 nm ทำให้ความเครียดจากชั้นลายตารางมีผลต่อการก่อตัวของควอนตัมดอทในชั้นที่ 5 น้อยกว่าควอนตัมดอทในชั้นที่ 1 และ 3

4.1.2 ผลวัดเชิงแสง

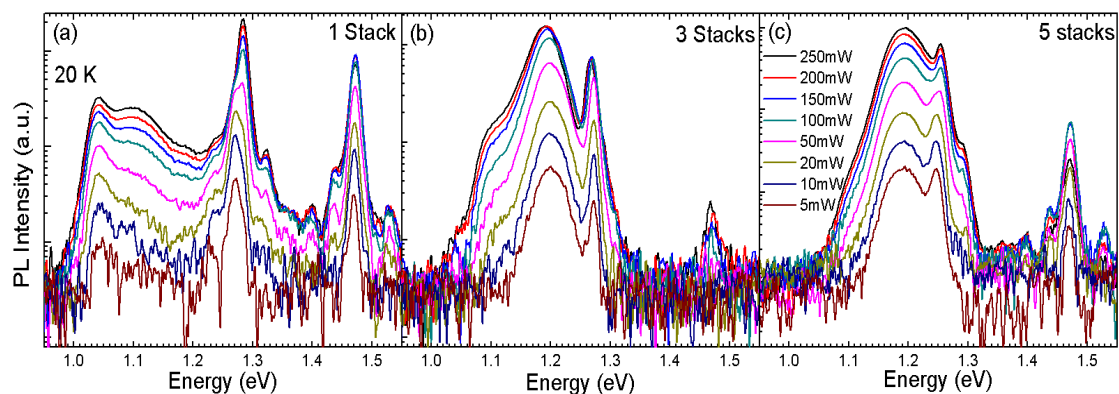
ผลวัดเชิงแสงของชิ้นงานโครงสร้างเดิมถูกแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อ คือ 4.1.2 (a) สเปกตรัม PL และ 4.1.2 (b) สเปกตรัม PPL ดังต่อไปนี้

4.1.2 (a) สเปกตรัม PL

ผล PL ของชิ้นงานมี 2 ส่วน คือ 1) ผลจากการปรับเปลี่ยนพลังงานแสงกระตุ้น และ 2) ผลจากการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) ผล PL จากการปรับเปลี่ยนพลังงานแสงกระตุ้น

ผล PL ชิ้นงานโครงสร้างเดิมทั้ง 3 ชิ้นงานซึ่งถูกวัดแบบปรับเปลี่ยนพลังงานแสงกระตุ้นถูกแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 สเปกตรัม PL จากการปรับเปลี่ยนพลังงานแสงกระตุ้นของชิ้นงาน (a) A, (b) B และ (c) C

ผลสเปกตรัม PL ของชิ้นงาน A ในรูปที่ 4.2 (a) แสดงให้เห็นว่าแสงที่โครงสร้างเปล่งที่สถานะพื้นของพลังงานก็กักกันมีแอมพลิจูดของสเปกตรัมเด่นชัดที่ค่ายอดพลังงาน 1.04 eV, 1.10 eV, 1.27 eV และ 1.47 eV ส่วนแอมพลิจูดของสเปกตรัมอื่นที่สังเกตได้ คือ ที่ค่ายอดพลังงาน 1.24 eV, 1.30 eV, 1.36 eV, 1.40 eV, 1.44 eV และ 1.52 eV ตามลำดับ

ผลสเปกตรัม PL ของชิ้นงาน B ในรูปที่ 4.2 (b) จะเห็นได้ว่าจำนวนค่ายอดพลังงานที่เด่นชัดลดลงเมื่อเทียบกับชิ้นงาน A มีแอมพลิจูดของสเปกตรัมเด่นชัดที่ค่ายอดพลังงาน 1.09 eV, 1.20 eV, 1.27 eV และที่ 1.47 eV ตามลำดับ

สำหรับชิ้นงาน C ผลสเปกตรัม PL ใกล้เคียงกับชิ้นงาน B ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (c) มีแอมพลิจูดของสเปกตรัมเด่นชัดที่ค่ายอดพลังงาน 1.20 eV, 1.25 eV และ 1.47 eV ส่วนแอมพลิจูดของสเปกตรัมอื่นที่สังเกตได้ คือ ที่ค่ายอดพลังงาน 1.12 eV, 1.28 eV, 1.36 eV, 1.44 eV, และ 1.52 eV ตามลำดับ

จากสเปกตรัม PL ของชิ้นงาน A ในรูปที่ 4.2 (a) ซึ่งแต่ละค่ายอดพลังงานสามารถระบุโดยใช้สมมติฐานจากสมบัติค่าพลังงานก็กักกันของโครงสร้างกับความสูงของควอนตัมดอท คือ ควอนตัมดอทที่ก่อตัวก่อนจะมีความสูงมากกว่าควอนตัมดอทที่ก่อตัวหลัง และให้สเปกตรัมที่ค่ายอดพลังงานต่ำกว่าเนื่องจากค่าพลังงานก็กักกันของโครงสร้างต่ำกว่า [75] ดังนั้นสเปกตรัมที่ค่ายอดพลังงาน 1.04 eV, 1.10 eV และ 1.24 eV ควรเปล่งจากควอนตัมที่ก่อตัวเรียงกันในทิศ [1-10], [110] และบนผิวเรียบตามลำดับ ส่วนที่ค่ายอดพลัง 1.27 eV เป็นการเปล่งแสงจากชั้นลายตาราง [76], [77] เนื่องด้วยชั้นลายตารางถูกประกบด้วยชั้นคั่น GaAs หนา 10 nm และ Buffer หนา 300 nm สมบัติจึงเสมือนโครงสร้างควอนตัมเวลล์ สำหรับค่ายอดพลังงาน 1.30 eV สันนิษฐานว่าอาจเปล่งจากชั้นลายตารางขณะที่ค่ายอดพลังงาน 1.36 eV, 1.40 eV, 1.44 eV เปล่งจากชั้น WL [78], [79] ที่ 1.47 eV เป็นการเปล่งแสงของ GaAs ที่มีการปนเปื้อนของคาร์บอน และการเปล่งแสงที่ค่ายอดพลังงาน 1.52 eV สอดคล้องกับค่าพลังงานแถบต้องห้ามของ GaAs bulk ที่อุณหภูมิต่ำ

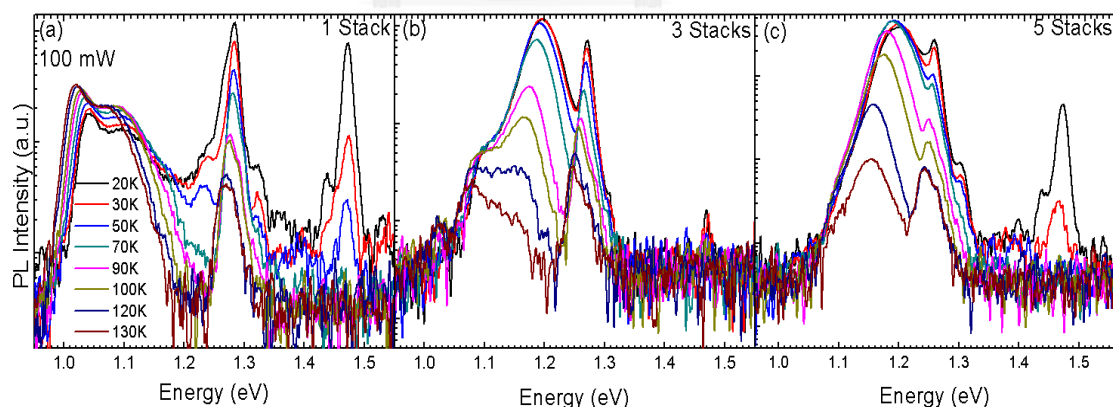
จากสเปกตรัม PL ของชิ้นงาน B ในรูปที่ 4.2 (b) จะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนชั้นปลูกเพิ่มขึ้นจำนวนค่ายอดพลังงานที่เปล่งออกจากโครงสร้างลดลง สาเหตุเกิดจากความหนาแน่นควอนตัมดอทที่ก่อตัวลดลง สเปกตรัมของแต่ละค่ายอดพลังงานสามารถกำหนดโดยใช้สมมติฐานเดียวกับชิ้นงาน A

ดังนั้นที่ค่ายอดพลังงาน 1.09 eV, 1.20 eV ควรแปลงจากควอนตัมที่ก่อตัวในทิศ [1-10] และ [110] ตามลำดับ เนื่องจากภาพ AFM ในรูปที่ 4.1 (e) แสดงให้เห็นถึงการก่อตัวของควอนตัมดอตบนผิวเรียบน้อยมาก ดังนั้นจึงไม่ปรากฏแอมพลิจูดของสเปกตรัมที่แปลงควอนตัมดอตบนผิวเรียบเด่นชัดเหมือนในชั้นงาน A ส่วนที่ค่ายอดพลังงาน 1.27 eV เป็นการแปลงแสงจากชั้นลายตารางดังอธิบายในชั้นงาน A ขณะที่ค่ายอดพลังงาน 1.47 eV เป็นการแปลงแสงจาก GaAs ที่มีการปนเปื้อนของคาร์บอนตามลำดับ

จากสเปกตรัม PL ของชั้นงาน C ในรูปที่ 4.2 (c) จะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนชั้นปลูกเพิ่มขึ้นเป็น 5 ชั้น จะมีสเปกตรัมและค่ายอดพลังงานที่ใกล้เคียงกับชั้นงาน B เนื่องจากความหนาแน่นและขนาดของควอนตัมดอตที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นที่ค่ายอดพลังงาน 1.12 eV, 1.20 eV ควรแปลงจากควอนตัมที่เรียงกันในทิศ [1-10] และ [110] ตามลำดับ ที่ 1.25 eV, 1.28 eV แปลงจากชั้นลายตาราง ที่ 1.36 eV, 1.44 eV จาก WL และที่ 1.47 eV และ 1.52 eV จาก GaAs bulk เช่นเดียวกับชั้นงาน A

2) ผล PL จากการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ

ผลสเปกตรัม PL ของชั้นงานโครงสร้างเดิมทั้ง 3 ชั้นงานซึ่งถูกวัดแบบปรับเปลี่ยนอุณหภูมิถูกแสดงในรูปที่ 4.3 อุณหภูมิที่ใช้ทดลองได้แก่ 20, 30, 50, 70, 90, 100, 120, 130 K



รูปที่ 4.3 สเปกตรัม PL จากการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของชั้นงาน (a) A, (b) B และ (c) C

ผลสเปกตรัม PL ของชั้นงาน A ดังรูปที่ 4.3 (a) แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น 1) ค่ายอดพลังงานที่แปลงจากควอนตัมดอตทั้งหมดต่างมีค่าลดลงหรือเลื่อนในแกนพลังงานแบบ Red-shift อย่างชัดเจน เว้นแต่ค่ายอดพลังงานที่แปลงจากจากชั้นลายตาราง WL และ GaAs Bulk เลื่อนแบบ

Red-shift ไม่มาก และ 2) แอมพลิจูดของสเปกตรัมของแต่ละค่ายอดพลังงานลดลง ยกเว้นที่ค่ายอดพลังงาน 1.04 eV และ 1.10 eV กลับมีแอมพลิจูดสูงขึ้น

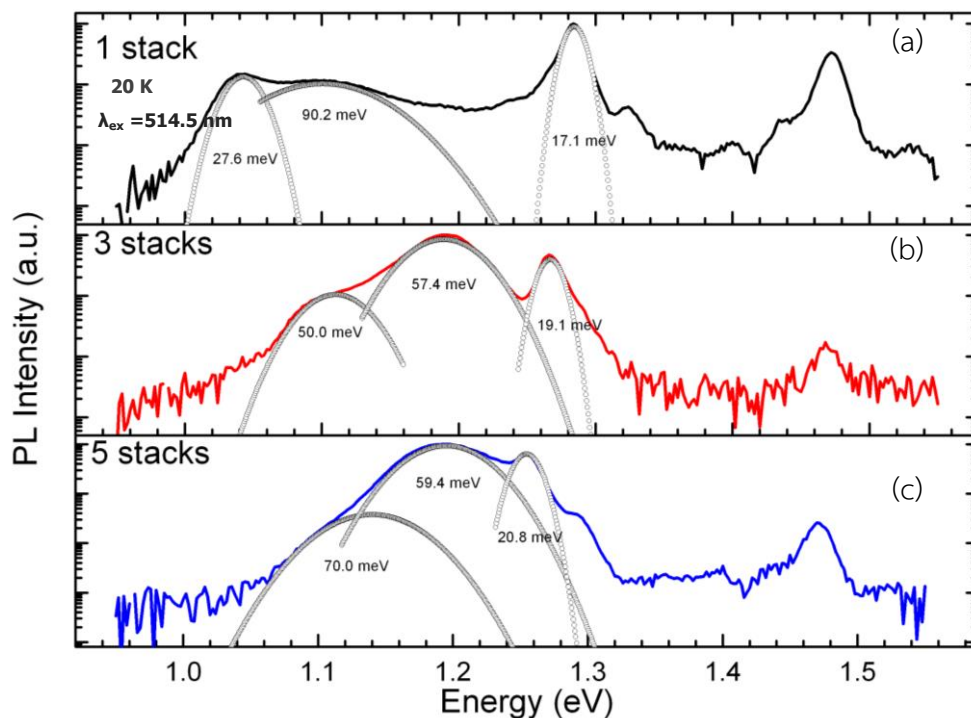
สำหรับผลของชิ้นงาน B และ C ในรูปที่ 4.3 (b) และ (c) จะเห็นได้ว่า 1) ค่ายอดพลังงานที่เปล่งจากควอนตัมดอทเกิด Red-shift อย่างชัดเจน ขณะที่ยอดพลังงานที่เปล่งจากชั้นลายตารางและ GaAs เกิด Red-shift ไม่มาก และ 2) แอมพลิจูดของทุกค่ายอดพลังงานมีแนวโน้มลดลง

การเกิด Red-shift ข้างต้นสามารถอธิบายได้โดย Varshni's law [80] คือ อุณหภูมิที่สูงขึ้นมีผลทำให้ค่าพลังงานแถบต้องห้ามลดลง ทำให้ค่ายอดพลังงานมีการเลื่อนแบบ Red-shift โดยค่ายอดที่เปล่งจากควอนตัมดอทเลื่อนแบบ Red-shift มากกว่าค่ายอดที่เปล่งจากชั้นลายตาราง, WL และ GaAs เนื่องจากควอนตัมดอทมีขนาดเล็กทำให้โครงสร้างไว (Sensitive) ต่ออุณหภูมิมากกว่า

สาเหตุที่สเปกตรัมที่เปล่งจากควอนตัมดอทในทิศ [1-10] และ [110] มีแอมพลิจูดสูงขึ้น แม้ว่าอุณหภูมิสูงขึ้น สามารถอธิบายโดยใช้สมบัติการเคลื่อนย้ายของพาหะเนื่องด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้นคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมีผลทำให้พาหะส่วนใหญ่เคลื่อนย้ายไปยังโครงสร้างที่มีระดับพลังงานกักกันต่ำกว่า [81] ซึ่งสังเกตได้ในรูปที่ 4.3 (a) แอมพลิจูดของสเปกตรัมของค่ายอดที่เปล่งจากโครงสร้างควอนตัมดอทบนผิวเรียบและชั้น WL ลดต่ำลง ในทางกลับกัน แอมพลิจูดของค่ายอดที่เปล่งจากควอนตัมดอทในทิศ [1-10] และ [110] สูงขึ้น สืบว่าพาหะถูกเคลื่อนย้ายจากบริเวณผิวเรียบและ WL ไปยังควอนตัมดอทในทิศ [1-10] และ [110]

จากรูปที่ 4.3 (b) และ (c) เมื่อจำนวนชั้นปลูกเพิ่มขึ้นเป็น 3 ชั้น และ 5 ชั้น จะเห็นได้ว่าแต่ละค่ายอดพลังงานเลื่อนแบบ Red-shift เช่นเดียวกับชิ้นงาน A อย่างไรก็ตาม แอมพลิจูดของสเปกตรัมของค่ายอดที่เปล่งจากควอนตัมดอทกลับลดลงอย่างต่อเนื่อง สาเหตุเกิดจากการก่อดัวของควอนตัมดอทมีความหนาแน่นลดลงโดยเฉพาะบนผิวเรียบดังแสดงในภาพ AFM รูปที่ 4.1 (e) และ (f) มีผลทำให้การเคลื่อนย้ายพาหะระหว่างโครงสร้างมีน้อย ดังนั้นการเลื่อนแบบ Red-shift ของแต่ละค่ายอดงานและแอมพลิจูดของสเปกตรัมที่ลดลง เกิดจากค่าพลังงานแถบต้องห้ามลดลง และผลจากการกระเจิงกับโฟนอน

ความสม่ำเสมอของขนาดควอนตัมดอทที่ก่อตัวขึ้นในแต่ละทิศทางและบริเวณ สามารถระบุได้จากค่า Full-Width-Half-Maximum (FWHM) ของสเปกตรัม PL ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (a), (b) และ (c) สำหรับชิ้นงาน A, B และ C ตามลำดับ ค่า FWHM สามารถคำนวณได้จากการทำ Gaussian Fitting (เส้นประในรูป)



รูปที่ 4.4 สเปกตรัม PL ของชิ้นงาน (a) A, (b) B และ (c) C ที่ 20 K แสดงแบบ Semi-log.

ค่า FWHM ของสเปกตรัม PL ของชิ้นงาน A มีค่าแตกต่างกันตามพลังงานเรียงลำดับจากพลังงานต่ำไปสูงดังนี้ ค่ายอด 1.04 eV มี FWHM = 27.6 meV, ค่ายอด 1.10 eV มี FWHM = 90.2 meV และค่ายอด 1.27 eV มี FWHM = 17.1 meV ชิ้นงาน B ค่ายอด 1.09 eV มี FWHM = 50.0 meV, ค่ายอด 1.20 eV มี FWHM = 57.4 meV และค่ายอด 1.27 eV มี FWHM = 19.1 meV ขณะที่ชิ้นงาน C ค่ายอด 1.12 eV มี FWHM = 70.0 meV, ค่ายอด 1.20 eV มี FWHM = 59.4 meV และค่ายอด 1.25 eV มี FWHM = 20.8 meV

จากรูปที่ 4.4 (a) จะเห็นได้ว่าแอมพลิจูดของสเปกตรัมที่ค่ายอดพลังงาน 1.04 eV, 1.10 eV และ 1.24 eV แยกออกจากกันค่อนข้างชัดเมื่อเทียบกับชิ้นงานอื่น สอดคล้องกับผล AFM ของชิ้นงาน A ในรูปที่ 4.1 (d) จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของขนาดของควอนตัมดอทสามารถถูกแบ่งเป็น 3

กลุ่ม คือ 1) ควอนตัมดอทที่ก่อตัวเรียงกันบนพื้นผิวเส้นลายตารางในทิศ [1-10] 2) ทิศ [110] และ 3) บนผิวเรียบตามลำดับ ควอนตัมดอทในทิศ [1-10] เปล่งแสงที่มีสเปกตรัมค่อนข้างแคบโดย FWHM มีค่า 27.6 meV ขณะที่ควอนตัมดอทในทิศ [110] เปล่งแสงที่มีสเปกตรัมกว้างกว่า FWHM มีค่า 79.3 meV สาเหตุเกิดจากควอนตัมดอทในทิศ [1-10] ก่อเรียงตัวติดกันมากกว่า ทำให้มีการกระจายตัวของขนาดน้อยกว่าจึงเปล่งแสงที่มีสเปกตรัมแคบกว่า

จากรูปที่ 4.4 (b) จะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนชั้นปลูกเพิ่มขึ้นเป็น 3 ชั้น ทำให้สเปกตรัมของแสงโดยรวมแคบลง ที่ค่ายอดพลังงาน 1.09 eV, 1.20 eV สเปกตรัมมีลักษณะซ้อนกัน สาเหตุเกิดจากควอนตัมดอทก่อตัวหนาแน่นลดลงทั้งบริเวณพื้นผิวลายตารางและบนผิวเรียบดังในภาพ AFM ในรูปที่ 4.1 (e)

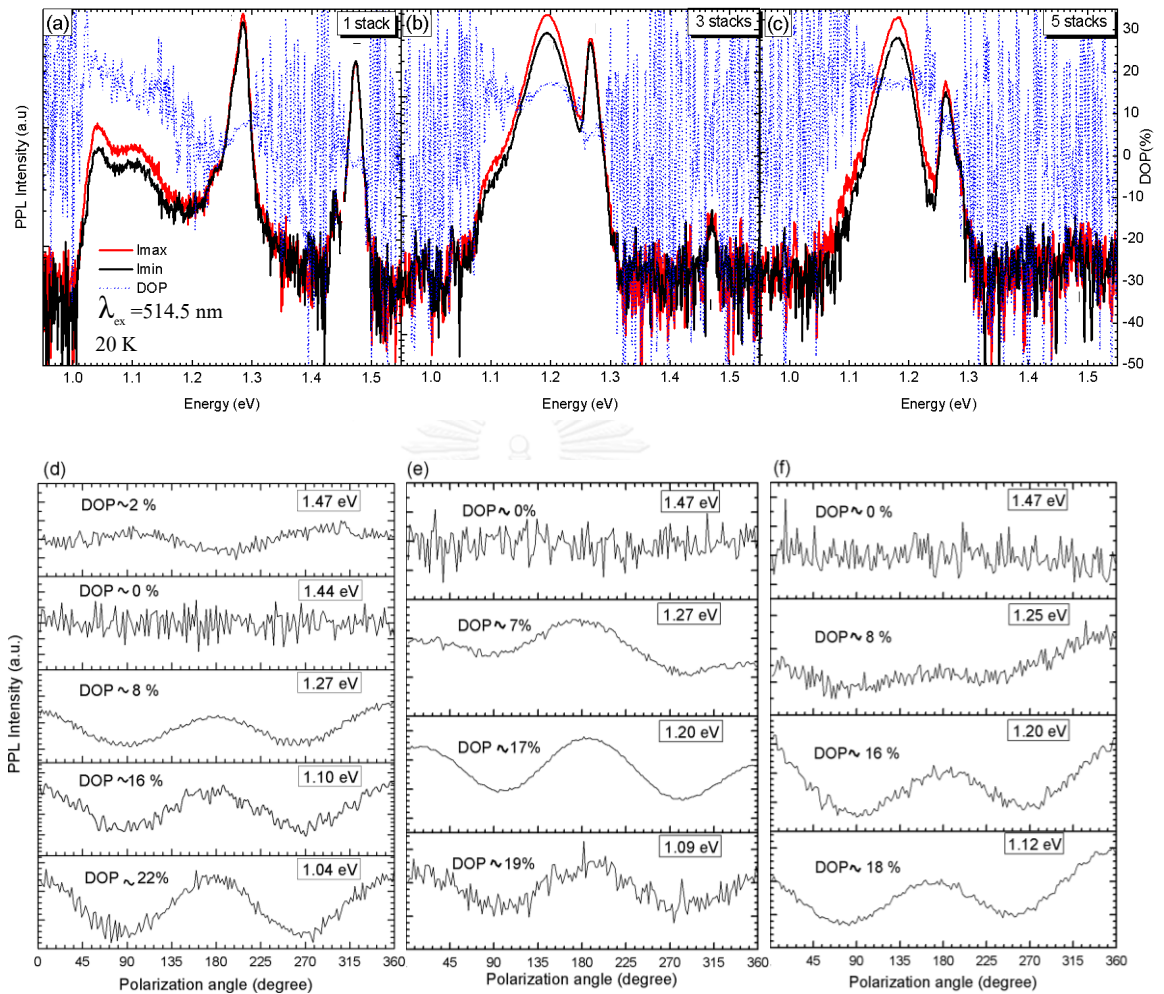
จากรูปที่ 4.4 (c) จะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนชั้นปลูกเพิ่มขึ้นเป็น 5 ชั้นทำให้สเปกตรัมโดยรวมแคบลงเมื่อเทียบกับชั้นงาน A และใกล้เคียงกับชั้นงาน B ที่ค่ายอดพลังงาน 1.12 eV, 1.20 eV สเปกตรัมมีลักษณะซ้อนกันคล้ายผลในชั้นงาน B สาเหตุเกิดจากควอนตัมดอทในชั้นงาน C มีการกระจายตัวของขนาดและทิศทางไม่ต่างจากชั้นงาน B มากนัก

จากตารางที่ 4.1 ความสูงควอนตัมดอทในทิศ [1-10] มีค่า 6 nm สำหรับชั้นงาน A และ C น้อยกว่าชั้นงาน B ซึ่งมีค่า 8 nm อย่างไรก็ตาม ควอนตัมดอทในทิศ [1-10] ของชั้นงาน A เปล่งแสงที่ค่ายอดพลัง 1.04 eV ต่ำกว่าชั้นงาน B และ C ที่ 1.09 eV และ 1.12 eV สาเหตุน่าจะเกิดจากผลเชื่อมโยงแนวนอน และควอนตัมดอทที่เรียงตัวติดกันบนเส้นลายตารางเป็นลักษณะควอนตัมไวโรในทิศดังกล่าว ทำให้มีโครงสร้างโดยรวมใหญ่ขึ้น จึงเปล่งแสงที่ค่ายอดพลังงานต่ำกว่า [82]

จะเห็นได้ว่าค่า FWHM ของสเปกตรัมของแสงที่เปล่งจากชั้นลายตารางมีค่า 17.1 meV, 19.07 meV และ 20.8 meV สำหรับชั้นงาน A, B, C ตามลำดับ ซึ่งค่อนข้างกว้างสำหรับควอนตัมเวลล์ เนื่องจากโครงสร้างมีชั้นไวงานหนา 25 nm แทรกอยู่ระหว่างชั้น Buffer และชั้นคั่น GaAs ซึ่งมีความหนาเพียง 10 nm ทำให้กักพาหะได้ไม่ดีนัก ขณะที่ค่า FWHM ใกล้เคียงกันทั้งสามชั้นงานแสดงถึงความแม่นยำของการสังเคราะห์โครงสร้างควอนตัมเวลล์ ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าความหนาของชั้นปลูก ค่าโมล รวมทั้งของ Dislocations ของชั้นไวงานที่ใกล้เคียงกัน

4.1.2 (b) สเปกตรัม PPL

ผล PPL ของชิ้นงานโครงสร้างเดิมทั้ง 3 ชิ้นงานถูกแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 สเปกตรัม PPL ของชิ้นงาน (a) A, (b) B, (c) C และ Angle scan ที่ค่ายอดพลังงานต่างๆ ของชิ้นงาน (d) A, (e) B, (f) C

รูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัม PPL ของชิ้นงาน A, B และ C, I_{max} (เส้นสีแดง) และ I_{min} (เส้นสีดำ) คือ ความเข้มแสงสูงสุดและต่ำสุดสำหรับสองทิศทางที่ตั้งฉากกันตามลำดับ ส่วนกราฟ DOP (เส้นสีน้ำเงิน) คำนวณจาก I_{max} และ I_{min} โดยใช้สมการที่ 2.1

ผลสเปกตรัม PPL ของชิ้นงาน A ในรูปที่ 4.5 (a) และ (d) แสดงให้เห็นว่าแสงที่โครงสร้างเปล่งออกมามี DOP สูงสุดที่ค่ายอดพลังงาน 1.04 eV ถัดมาเป็น 1.10 eV, 1.27 eV ส่วนที่ 1.44 eV และ 1.47 eV มีค่า DOP น้อยมาก สำหรับผลสเปกตรัม PPL ของชิ้นงาน B ในรูปที่ 4.5 (b) และ (e)

จะเห็นได้ว่า DOP ลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับชั้นงาน A โดยมี DOP สูงสุดที่ค่ายอดพลังงาน 1.09 eV, 1.20 eV และ 1.27 eV ตามลำดับ สุตทำยผลสเปกตรัม PPL ของชั้นงาน C ในรูปที่ 4.5 (c) และ (f) แสดงให้เห็นว่า DOP ใกล้เคียงกับชั้นงาน B โดยมีค่าสูงสุดที่ค่ายอดพลังงาน 1.12 eV, 1.20 eV, 1.25 eV ดังสรุปในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สรุปค่า DOP ของค่ายอดพลังงานต่างๆ สำหรับชั้นงาน A, B, C

ชั้นงาน	ค่ายอดพลังงาน (eV)	DOP (%)	หมายเหตุ		
			โครงสร้าง	Aspect ratio	Lateral coupling
A (1-Stack)	1.04	22	QDs, [1-10]	1.36	high
	1.10	16	QDs, [110]	1.2	medium
	1.27	8	CHP	-	-
	1.44	0	WL	-	-
	1.47	2	GaAs bulk	-	-
B (3-Stacks)	1.09	19	QDs, [1-10]	2.19	medium
	1.20	17	QDs, [110]	2.19	low
	1.27	7	CHP	-	-
	1.47	0	GaAs bulk	-	-
C (5-Stacks)	1.12	18	QDs, [1-10]	2.06	medium
	1.20	16	QDs, [110]	2.06	low
	1.27	8	CHP	-	-
	1.47	0	GaAs bulk	-	-

จากตารางที่ 4.2 ชั้นงาน A จะเห็นได้ว่าค่า DOP ที่ 1.04 eV จากควอนตัมดอตบนลายตารางในทิศ [1-10] สูงกว่าที่ค่า 1.10 eV ในทิศ [110] ประมาณ 6 % เนื่องจากสาเหตุ 3 ประการ 1) รูปร่างของควอนตัมดอตที่เรียงตัวในทิศ [1-10] มีอัตราส่วนลักษณะเฉลี่ย 1.36 สูงกว่าควอนตัมดอตที่เรียงตัวในทิศ [110] ซึ่งมีค่า 1.2 2) ผลของโพซิโวลีเทกทริกโพลาริเซชันซึ่งมีผลต่อ DOP มากขึ้นเมื่อควอนตัมดอตนั้นไม่สมมาตรและมีขนาดใหญ่ซึ่งจากสัณฐานวิทยาของชั้นงาน A ที่ได้สรุปไปในตารางที่ 4.1 จะพบว่าควอนตัมดอตในทิศ [1-10] มีความยาวฐานเฉลี่ย 40 nm สูง 6 nm และในทิศ

[110] มีความยาวฐานเฉลี่ย 30 nm สูง 4.5 nm และ 3) ผลเชื่อมโยงแนวอนซึ่งสังเกตว่าควอนตัมดอตที่ก่อตัวบนพื้นผิวตารางในทิศ [1-10] นั้นมีการเรียงตัวติดกันเสมือนควอนตัมไวร์ดังภาพ AFM ในรูปที่ 4.1 (f) เหตุผลทั้งสามทำให้ค่า DOP ที่ 1.04 eV สูงกว่าที่ 1.10 eV

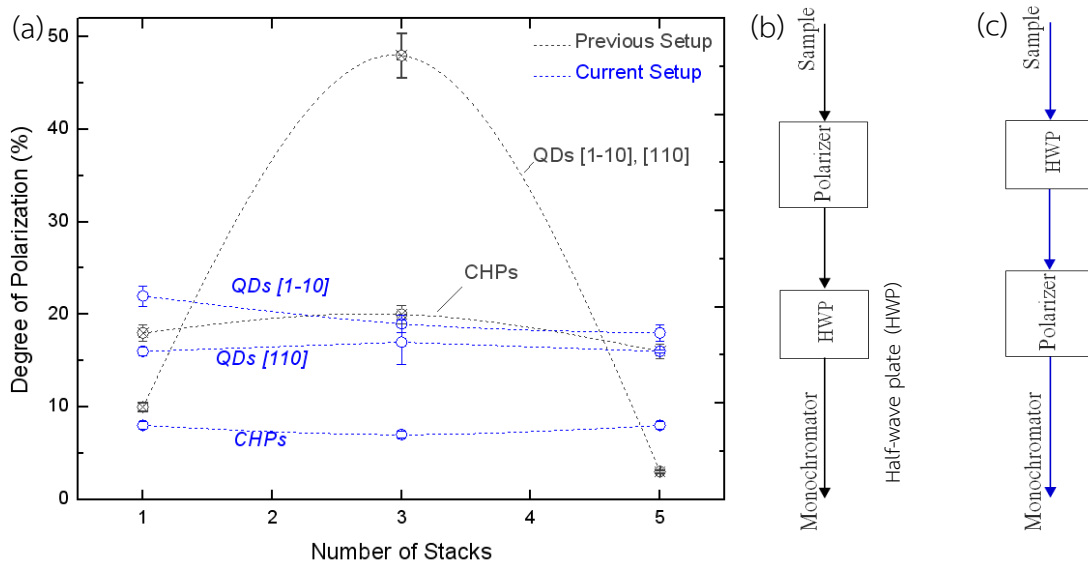
DOP ของแสงที่เปล่งจากชั้นลายตารางมีค่าประมาณ 8% คาดว่าเกิดจากความไม่สมมาตรของ Dislocations บนชั้นลายตาราง เนื่องจากการปลูก $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ หนา 25 nm นั้นเพียงพอสำหรับการเกิด Dislocation ขณะที่ DOP ที่ค่ายอดพลัง 1.44 eV และ 1.47 eV ซึ่งเปล่งจากชั้น WL และ GaAs นั้นให้ค่า DOP น้อยมาก เนื่องจากสมบัติของโครงสร้างไอโซทรอปิกส่งผลให้ความหนาแน่นของฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนมีลักษณะสมมาตร [83] ทำให้ความเข้มแสงเป็นแบบไอโซทรอปิก

เมื่อจำนวนชั้นปลูกเพิ่มขึ้นเป็น 3 ชั้น DOP ที่ค่ายอดพลังงาน 1.09 eV ซึ่งเปล่งจากควอนตัมดอตบนลายตารางในทิศ [1-10] มีค่าประมาณ 19% ลดลงเล็กน้อยจาก 22% ของชั้นงาน A สาเหตุส่วนหนึ่งเกิดจากควอนตัมดอตที่ก่อตัวมีผลเชื่อมโยงแนวอนต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม ผลจากควอนตัมดอตมีรูปร่างทรงรีทำให้มีอัตราส่วนลักษณะสูงกว่า ค่า DOP จึงลดลงไม่มาก ส่วน DOP ที่ค่ายอดพลังงาน 1.20 eV ซึ่งเปล่งจากควอนตัมดอตบนลายตารางในทิศ [110] มีค่าใกล้เคียงกับ DOP ที่ค่ายอดพลังงาน 1.10 eV ของชั้นงาน A สันนิษฐานว่าเกิดจากการชดเชยกันของอัตราส่วนลักษณะกับผลเชื่อมโยงแนวอนระหว่างสองชั้นงาน ขณะที่ DOP ที่ค่ายอดพลัง 1.47 eV ซึ่งเปล่งจาก GaAs นั้นต่ำมากเนื่องจากสมบัติของโครงสร้างไอโซทรอปิก

เมื่อจำนวนชั้นปลูกเพิ่มขึ้นเป็น 5 ชั้นค่า DOP สูงสุดของค่ายอดพลังงานที่เปล่งจากควอนตัมดอตมีค่า 18% ใกล้เคียงกับชั้นงาน B และลดลงเล็กน้อยจาก 22% ของชั้นงาน A สาเหตุเกิดจาก 3 องค์ประกอบคือ 1) ผลเชื่อมโยงแนวอนของควอนตัมดอตในชั้นงาน C น้อยกว่าชั้นงาน A แต่ไม่ต่างจากชั้นงาน B มาก 2) อัตราส่วนลักษณะเฉลี่ยของควอนตัมดอตในชั้นงาน C มีค่า 2.06 ซึ่งสูงกว่าชั้นงาน A แต่ใกล้เคียงกับชั้นงาน B ที่มีค่า 2.19 และ 3) ขนาดของควอนตัมดอตในชั้นงาน C ใหญ่กว่าชั้นงาน A แต่ใกล้เคียงกับชั้นงาน B ขณะที่ DOP ที่ค่ายอดพลัง 1.47 eV ซึ่งเปล่งจาก GaAs นั้นมีค่า DOP ใกล้เคียงกันทั้งสามชั้นงาน

DOP ของแสงที่เปล่งจากโครงสร้างชั้นลายตารางของชั้นงาน A, B และ C มีค่าใกล้เคียงกัน คือ ประมาณ 7 - 8% แสดงถึงความไม่สมมาตรของ Dislocations ที่เกิดขึ้นบนชั้นลายตารางของ ชั้นงานทั้งสามมีลักษณะใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับค่า FWHM ของยอดพลังงานของชั้นลายตารางที่ วัดได้ คือ 17 - 21 meV

ก่อนหน้านี้ผล PPL ของชั้นงานทั้ง 3 ถูกตีพิมพ์โดย T. Chokamnuai, et. al. [67] ดัง แสดงในรูปที่ 4.6 (a) เส้นสีดำ ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ค่ายอดพลังงานที่เปล่งจากควอนตัมดอต DOP เท่ากับ 10%, 48% และ 3% สำหรับชั้นงาน A, B และ C ตามลำดับ แต่จากผลในรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.6 PPL ของชั้นงาน A, B, C จาก Previous Setup (สีดำ) และ Current Setup (สีน้ำเงิน) [67], [84]

จะพบว่ามี DOP ของค่ายอดพลังงานที่เปล่งจากควอนตัมดอตในทิศ [1-10] เท่ากับ 22%, 19% และ 18% ความแตกต่างระหว่างผลจาก T. Chokamnuai ซึ่งใช้ Setup ในรูปที่ 4.6 (b) และผลจากการทดลองนี้ซึ่งใช้ Setup ในรูปที่ 4.7 (c) เกิดจากตำแหน่งของ Polarizer และ Half-wave plate (HWP) ถูกวางเรียงสลับกัน โดย Setup ในรูป (b) เป็น Setup ที่ไม่ถูกต้อง ที่ถูกต้องตั้ง Setup เดียวกับ N. Chit-Swe, et. al. [84] นั้นตำแหน่งของ Polarizer จะต้องถูกติดตั้งไว้ก่อนขาเข้าของโมโนโครมาเตอร์ดังรูป (c) เพื่อเลี่ยงผลกระทบของเกรตติงของโมโนโครมาเตอร์ในการตอบสนองแสงที่มีทิศทางของการโพลาไรเซชันต่างกัน สมบัติโพลาไรซ์ของแสงที่เปล่งออกจากชั้นงานจะถูกวิเคราะห์ โดยการหมุน HWP ซึ่งในผลวัดนี้สามารถแสดงให้เห็นถึงผลของโพไซอิเล็กทริกซึ่งส่งผลให้ DOP มีค่า

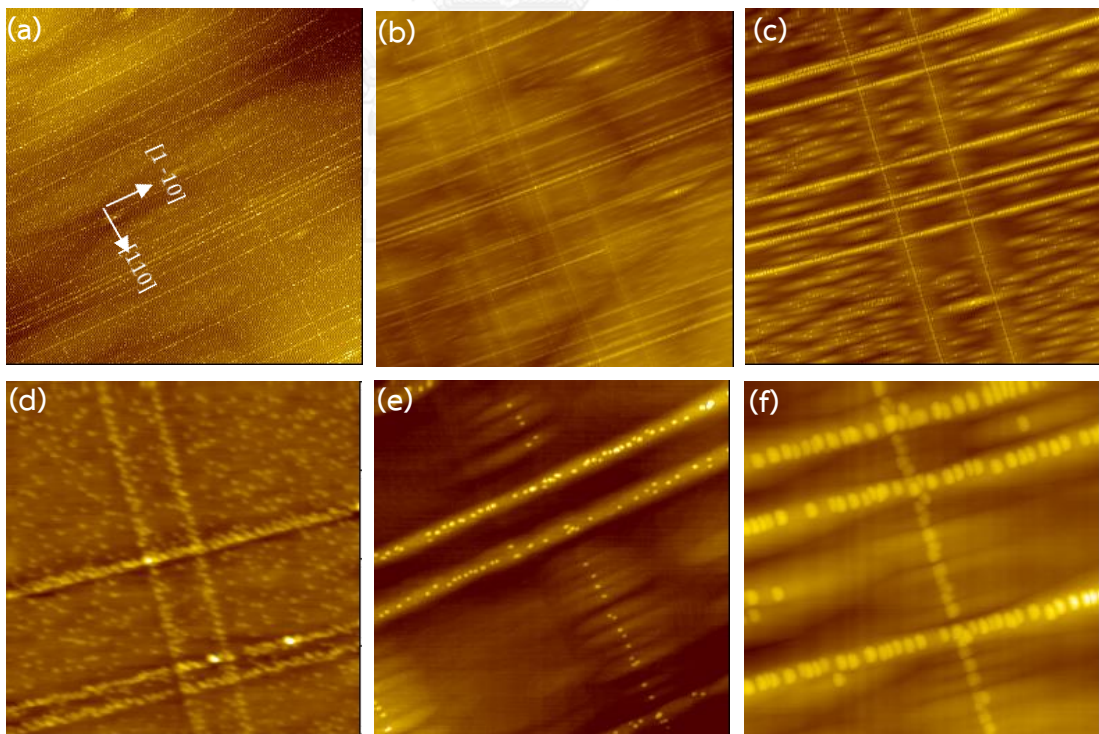
ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นขณะที่ตำแหน่งของค่ายอดพลังงานลดลง หรือเมื่อควอนตัมดอตมีขนาดใหญ่ขึ้น สามารถสังเกตแนวโน้มการเพิ่มขึ้นได้ชัดจากผลสเปกตรัม PPL ของสามชั้นงาน ในรูปที่ 4.5 ซึ่งทำให้กราฟ DOP (สีน้ำเงิน) ในรูปที่ 4.6 (a) ที่ค่ายอดพลังงานที่แปลงจากควอนตัมดอตในทิศ [1-10] และ [110] แยกออกจากกันชัดเจน ซึ่งไม่สามารถสังเกตได้จากผลวัดก่อนหน้า อีกทั้งผลวัดยังแสดงให้เห็นสมบัติไอโซทรอปิกของโครงสร้าง เช่น WL, GaAs bulk ซึ่งเปล่งแสงที่ไม่มีสมบัติโพลาไรซ์ สามารถใช้เป็นจุดอ้างอิงในการยืนยันว่าแสงที่แปลงจากควอนตัมดอตมีสมบัติโพลาไรซ์จริง

4.2 ผลวัดสัญญาณวิทยาและสมบัติเชิงแสงของโครงสร้างที่ถูกปรับลดความหนาชั้นคั่น

แบ่งออกเป็นหัวข้อย่อย 4.2.1) สัญญาณวิทยาพื้นผิว และ 4.2.2) ผลสเปกตรัม PL และ PPL ดังต่อไปนี้

4.2.1 สัญญาณวิทยาพื้นผิว

พื้นผิวของชั้นงาน A', B' และ C' ถูกแสดงโดยภาพ AFM ขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ ในรูปที่ 4.7 (a), (b), (c) และขนาด $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ ในรูปที่ 4.7 (d), (e) และ (f) ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 ภาพ AFM ขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ (บน) และ $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ (ล่าง) ของชั้นงาน [(a), (d)] A', [(b), (e)] B', [(c), (f)] C'

ผล AFM ของชั้นงาน A' ในรูปที่ 4.7 (a) แสดงให้เห็นว่าควอนตัมดอทก่อตัวทั้งบริเวณพื้นผิวเรียบและพื้นผิวลายตาราง จากรูปที่ 4.7 (d) จะเห็นว่าควอนตัมดอทบนพื้นผิวเรียบมีปริมาณค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับลายตาราง ส่วนใหญ่มีลักษณะไม่สมมาตร และมีการกระจายตัวของขนาดและความสูงที่หลากหลาย

ผล AFM ของชั้นงาน B' ในรูปที่ 4.7 (b) และ (e) แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นปลูกเป็น 3 ชั้น ควอนตัมดอทไม่ก่อตัวบนพื้นผิวเรียบ ขณะที่ความหนาแน่นของควอนตัมดอทบนลายตารางลดลงเมื่อเทียบกับชั้นงาน A' ส่วนใหญ่มีลักษณะสมมาตร

สำหรับผล AFM ของชั้นงาน C' ในรูปที่ 4.7 (c) และ (f) แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นปลูกเป็น 5 ชั้น ควอนตัมดอทก่อตัวทั้งบนพื้นผิวเรียบและผิวลายตาราง ปริมาณควอนตัมดอทบนพื้นผิวเรียบน้อยกว่าในชั้นงาน A' ขณะที่ความถี่ของเส้นลายตารางลดลงเมื่อเทียบกับชั้นงานทั้งสอง แต่ควอนตัมดอทเรียงตัวติดกันมากขึ้นเป็นลักษณะสายลูกโซ่ ควอนตัมดอทส่วนใหญ่มีลักษณะแตกต่างไปจากชั้นงานอื่น คือคล้ายสี่เหลี่ยมและมีขนาดใหญ่ ข้อมูลความสูง ความยาวฐาน และอัตราส่วนลักษณะเฉลี่ย ของควอนตัมดอทในแต่ละบริเวณของชั้นงาน A', B', C' สรุปดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สรุปค่าความสูง ความยาวฐาน และอัตราส่วนลักษณะเฉลี่ยของควอนตัมดอท ณ บริเวณต่างๆ ของชั้นงาน A', B' และ C'

ชั้นงาน	ควอนตัมดอทบริเวณ	Height (nm)	Lenght (L) (nm)	Aspect ratio (L/W)
A' (1-Stack)	ทิศ [1-10]	4.0	60	1.8
	ทิศ [110]	3.2	40	1.6
	ผิวเรียบ	2.0	30	1.4
B' (3-Stacks)	ทิศ [1-10]	5.0	40	1.2
	ทิศ [110]	4.0	30	1.1
	ผิวเรียบ	-	-	-
C' (5-Stacks)	ทิศ [1-10]	8.0	110	1.6
	ทิศ [110]	5.5	90	1.1
	ผิวเรียบ	4.2	65	1.0

จากรูปที่ 4.7 (a) และ (d) ของชิ้นงาน A' จะเห็นได้ว่าเมื่อความหนาชั้นคั่นถูกปรับลดจาก 10 nm เป็น 6 nm การก่อดัวของควอนตัมดอตบนพื้นผิวเรียบค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับบนพื้นผิวลายตาราง ต่างจากโครงสร้างเดิมที่ควอนตัมดอตก่อดัวบนพื้นผิวลายตารางหนาแน่นกว่าบนผิวเรียบ สาเหตุเกิดจากชั้นคั่น GaAs ที่แทรกระหว่างชั้นลายตารางและควอนตัมดอตชั้นที่ 1 ถูกปรับลดความหนา มีผลทำให้ความเครียดจากชั้นลายส่งผลต่อการก่อดัวของควอนตัมดอตในชั้นที่ 1 ทั่วบริเวณทั้งบนผิวเรียบและในแนวเส้นลายตาราง ควอนตัมดอตจึงก่อดัวบนผิวเรียบได้ง่ายขึ้น จากตารางที่ 4.3 ค่าอัตราส่วนลักษณะเฉลี่ย 1.8, 1.6 และ 1.4 สำหรับควอนตัมดอตทิศ [1-10], [110] และผิวเรียบตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าควอนตัมดอตส่วนใหญ่มีลักษณะไม่สมมาตร ซึ่งเป็นผลจากชั้นคั่นที่บางลง ทำให้การก่อดัวของควอนตัมดอตแต่ละบริเวณแม้กระทั่งบนพื้นผิวเรียบยังคงมีผลจากความเครียดของชั้นลายตารางที่สูง ทำให้ควอนตัมดอตมีลักษณะไม่สมมาตรดังกล่าว ขณะที่ความสูงของควอนตัมดอตซึ่งไม่เท่ากันในแต่ละบริเวณ สามารถอธิบายด้วยลำดับการก่อดัวของควอนตัมดอต

จากรูปที่ 4.7 (b), (e) ชิ้นงาน B' จะเห็นได้ว่าเมื่อชั้นปลูกเพิ่มขึ้นเป็น 3 ชั้น ปริมาณควอนตัมดอตบนพื้นผิวเรียบและผิวลายตารางลดลงชัดเจนเมื่อเทียบกับชิ้นงาน A' ซึ่งสอดคล้องกับผล AFM ของโครงสร้างเดิมในรูปที่ 4.1 (b) เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นปลูกเป็น 3 ชั้น สาเหตุเกิดจากการปลูกชั้นคั่น GaAs มีความหนารวมเพิ่มขึ้นเป็น 12 nm ทำให้ผลกระทบจากความเครียดของชั้นลายตารางลดลง ทำให้ควอนตัมดอตจึงก่อดัวยากขึ้น จากตารางที่ 4.3 อัตราส่วนลักษณะเฉลี่ย 1.2 และ 1.1 สำหรับควอนตัมดอตทิศ [1-10] และ [110] ซึ่งแสดงให้เห็นว่าควอนตัมดอตส่วนใหญ่มีลักษณะสมมาตร อันเป็นผลจากความเครียดของชั้นลายตารางที่ลดลง ทำให้ควอนตัมดอตก่อดัวไม่หนาแน่นมากนัก จึงมีอิสระในการยึดตัว

จากรูปที่ 4.7 (c) และ (f) ชิ้นงาน C' เมื่อจำนวนชั้นปลูกเพิ่มขึ้นเป็น 5 ชั้น จะเห็นได้ว่าควอนตัมดอตมีลักษณะคล้ายสี่เหลี่ยมก่อดัวเรียงติดกันในทิศ [1-10] และ [110] และจากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า ควอนตัมดอตมีขนาดใหญ่กว่าในชิ้นงาน A', B' สาเหตุเกิดจากควอนตัมดอตในชั้นที่ 5 เริ่มก่อดัวเร็วกว่าชั้นที่ 1 และ 3 ดังได้แสดงข้อมูลของการปลูกในรูปที่ 3.2 (b) ทำให้มีขนาดที่ใหญ่กว่าและมีระยะห่างระหว่างควอนตัมดอตลดลง อัตราส่วนลักษณะของควอนตัมดอตในทิศ [1-10] มีค่า 1.6 สูงกว่าทิศ [110] ซึ่งมีค่า 1.1 ซึ่งสาเหตุเกิดจากความหนาแน่นของการก่อดัวของควอนตัมดอตในทิศ [1-10] ที่สูงกว่า สำหรับรูปร่างของควอนตัมดอตที่คล้ายสี่เหลี่ยมเกิดจากขณะที่ควอนตัม

ดอตก๊อตตัวมีคลายความเครียดในทิศ [1-10] และ [110] สูงกว่าทิศอื่นมาก สาเหตุส่วนหนึ่งเชื่อว่าเกิดจากความหนาชั้นคั่นซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ถูกปรับลดลงจากโครงสร้างเดิม รวมทั้งความหนาและค่าโมลของสารประกอบที่ใช้ ส่งผลกระทบต่อเนื่องต่อการก๊อตตัวของควอนตัมดอตในแต่ละชั้นรวมทั้งความไม่สมมาตรของการคลายความเครียดขณะที่ควอนตัมดอตในชั้นที่ 5 ก๊อตตัว

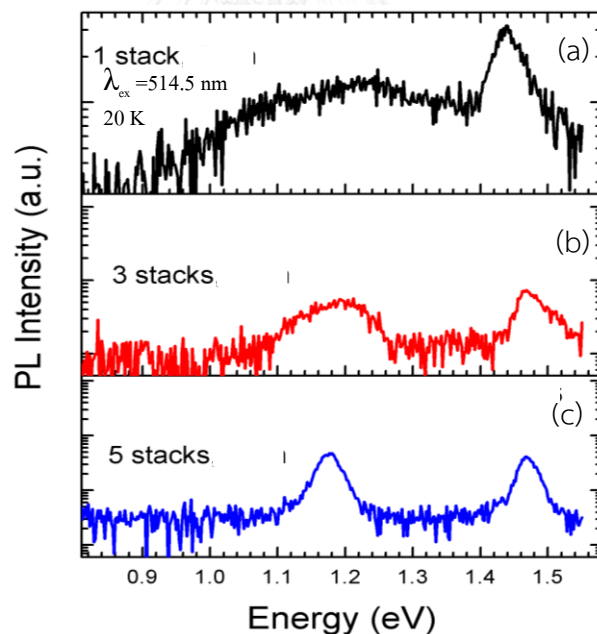
4.2.2 ผลวัดเชิงแสง

แบ่งออกเป็น 2 หัวข้อ คือ 4.2.2 (a) สเปกตรัม PL และ 4.2.2 (b) สเปกตรัม PPL ดังต่อไปนี้

ผลสเปกตรัม PL และ PPL ของชั้นงาน A', B', C' มีรายละเอียดดังนี้

4.2.2 (a) สเปกตรัม PL

ผลสเปกตรัม PL ของชั้นงาน A', B', C' ถูกแสดงในรูปที่ 4.8 (a), (b) และ (c) ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 สเปกตรัม PL ของชั้นงาน (a) A', (b) B', และ (c) C' ที่ 20 K แสดงแบบ Semi-log.

ชั้นงาน A' เปล่งแสงที่มีสเปกตรัมค่อนข้างกว้าง มีแอมพลิจูดสูงสุดที่ค่ายอดพลังงาน 1.24 eV และ 1.44 eV ขณะที่ชั้นงาน B' เปล่งแสงที่มีสเปกตรัมที่แคบลง มีแอมพลิจูดของสเปกตรัมเด่นชัดที่ค่ายอดพลังงาน 1.20 eV, และ 1.47 eV และชั้นงาน C' เปล่งแสงที่มีสเปกตรัมที่แคบกว่าชั้นงาน

A', B' รวมทั้งโครงสร้างเดิม มีแอมพลิจูดของสเปกตรัมเด่นชัดที่ค่ายอดพลังงาน 1.18 eV และ 1.47 eV

จากสเปกตรัม PL ของชิ้นงาน A' ในรูปที่ 4.8 (a) จะเห็นได้ว่าสเปกตรัมกว้างกว่าสเปกตรัมจากโครงสร้างเดิมในรูปที่ 4.4 (a) แอมพลิจูดของสเปกตรัมแยกออกกันไม่ชัด สาเหตุเกิดจากการกระจายตัวของขนาดและความสูงของควอนตัมดอทที่หลากหลาย เนื่องจากความเครียดจากชั้นลายตารางส่งผลต่อการก่อตัวของควอนตัมดอททั้งบนพื้นผิวเรียบและผิวลายตาราง อัตราการก่อตัวของควอนตัมดอทบนพื้นผิวเรียบสูงกว่าบนผิวลายตาราง และกระจายตัวทั่วทุกบริเวณดังในภาพ AFM รูปที่ 4.7 (d) สเปกตรัมที่กว้างเกิดจากผลรวมสเปกตรัมของแสงที่เปล่งจากควอนตัมดอทแต่ละบริเวณขณะที่ค่ายอดพลังงาน 1.44 eV เปล่งจากชั้น WL ซึ่งสเปกตรัมบางส่วนอาจรวมกับการเปล่งแสงของ GaAs ที่มีการปนเปื้อนของคาร์บอน จะเห็นว่าไม่ปรากฏสเปกตรัมของแสงที่เปล่งจากชั้นลายตารางในโครงสร้างนี้ สาเหตุเกิดจากชั้นคั่นที่บางลง ทำให้สมบัติกักกันพาหะด้อยลง มีผลทำให้พาหะส่วนใหญ่สามารถ Tunnel ไปยังชั้น WL และควอนตัมดอทแทนทำให้การเปล่งแสงจากชั้นลายตารางไม่เด่นชัดเท่าโครงสร้างเดิม

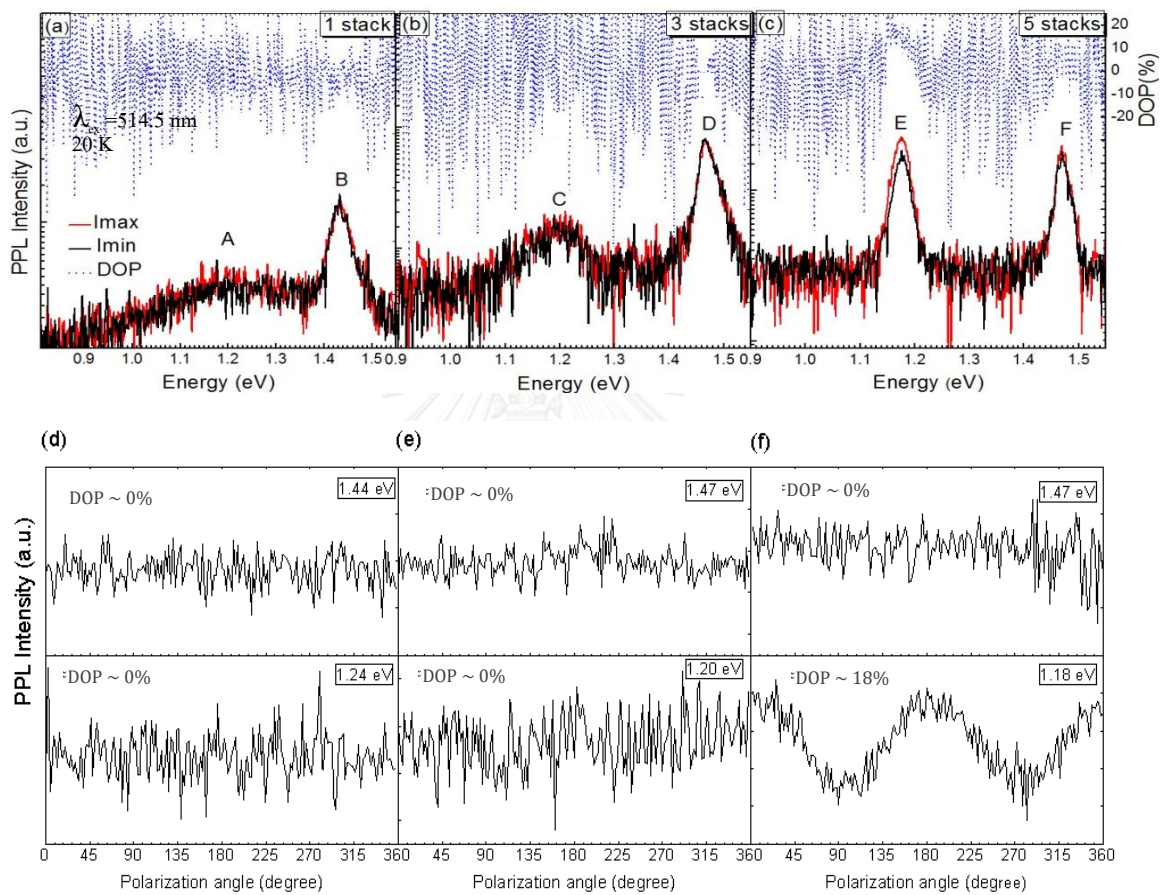
จากสเปกตรัม PL ของชิ้นงาน B' ในรูปที่ 4.8 (b) จะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนชั้นปลูกเพิ่มขึ้นทำให้เปล่งแสงที่มีสเปกตรัมที่แคบกว่าชิ้นงาน A' ซึ่งผลดังกล่าวยังสอดคล้องโครงสร้างเดิมที่มีสเปกตรัมโดยรวมแคบลงเมื่อชั้นปลูกเพิ่มขึ้น สาเหตุเกิดจากควอนตัมดอทก่อนบนผิวเรียบและผิวลายตารางลดลง มีความสม่ำเสมอของขนาดมากขึ้นซึ่งสังเกตจากภาพ AFM รูปที่ 4.7 (e) และที่ค่ายอดพลังงาน 1.47 eV เป็นการเปล่งแสงจาก GaAs ที่มีการปนเปื้อนของคาร์บอน

จากสเปกตรัม PL ของชิ้นงาน C' ในรูปที่ 4.8 (c) จะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนชั้นปลูกเพิ่มขึ้นเป็น 5 ชั้น จะให้สเปกตรัมของแสงที่แคบกว่าชิ้นงาน A', B' รวมทั้งโครงสร้างเดิม สาเหตุเกิดจากการกระจายตัวของขนาดควอนตัมดอทที่ลดลงดังในแสดงภาพ AFM ในรูปที่ 4.7 (c), (f) ซึ่งเห็นได้ว่าความถี่ของเส้นลายตารางลดลงเมื่อเทียบกับชิ้นงาน A', B' ควอนตัมดอทมีการเรียงตัวติดกันทำให้การกระจายตัวของขนาดลดลง จากข้อมูลของชิ้นงาน C' ในตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าควอนตัมดอทมีความสูงเฉลี่ยมากกว่าในชิ้นงาน A', B' และเปล่งแสงที่ค่ายอดพลังงาน 1.18 eV ซึ่งต่ำกว่าชิ้นงาน A', B' ที่ 1.24 eV และ 1.20 eV ตามลำดับซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานค่าพลังงานกักกันกับความสูงของ

ควอนตัมดอต สำหรับค่ายอดพลังงาน 1.47 eV เป็นการเปล่งแสงจาก GaAs ที่มีการปนเปื้อนของคาร์บอนเช่นเดียวกับชิ้นงาน B'

4.2.2 (b) สเปกตรัม PPL

ผล PPL ของชิ้นงานทั้งสามถูกแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 สเปกตรัม PPL ของชิ้นงาน (a) A', (b) B', (c) C' และ Angle scan ของชิ้นงาน (d) A', (e) B', (f) C'

รูปที่ 4.9 แสดงสเปกตรัม PPL ของชิ้นงาน A', B' และ C', I_{max} (เส้นสีแดง) และ I_{min} (เส้นสีดำ) คือ ความเข้มแสงสูงสุดและต่ำสุดสำหรับสองทิศทางที่ตั้งฉากกันตามลำดับ ส่วนกราฟ DOP (เส้นสีน้ำเงิน) คำนวณจาก I_{max} และ I_{min} โดยใช้สมการที่ 2.1

ผลสเปกตรัม PPL ของชิ้นงาน A' ในรูปที่ 4.9 (a) แสดงให้เห็นว่าสเปกตรัมของแสงที่ค่ายอดพลังงาน 1.24 eV และ 1.44 eV ไม่มีสมบัติโพลาไรซ์ ดังแสดงผล Line scan ในรูป (d) ขณะที่

ชั้นงาน B' รูปที่ 4.9(b) มีลักษณะใกล้เคียงกับชั้นงาน A' แม้ว่าที่ค่ายอดพลังงาน 1.20 eV มีลักษณะของการโพลาไรเซชันแต่น้อยมาก สังเกตได้จากผล Line scan ในรูป (e) และผลสเปกตรัม PPL ของชั้นงาน C' ในรูปที่ 4.9(c), (f) นั้นต่างจากชั้นงาน A' และ B' โดยที่ค่ายอดพลังงาน 1.18 eV มีค่า DOP สูงสุด ดังสรุปในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สรุปค่า DOP ของค่ายอดพลังงานต่างๆ สำหรับชั้นงาน A', B', C'

ชั้นงาน	ค่ายอดพลังงาน (eV)	DOP (%)	หมายเหตุ		
			โครงสร้าง	Aspect ratio	Lateral coupling
A' (1 Stack)	1.24	0	QDs, [1-10]	1.8	medium
			QDs, [110]	1.6	medium
			QDs, ผิว	1.4	low
	1.44	0	WL	-	-
B' (3 Stacks)	1.20	0	QDs, [1-10]	1.2	low
			QDs, [110]	1.1	low
	1.47	0	GaAs bulk	-	-
C' (5 Stacks)	1.18	18	QDs, [1-10]	1.6	high
			QDs, [1-10]	1.1	high
			QDs, ผิวเรียบ	1.0	low
	1.47	0	GaAs bulk	-	-

จากข้อมูล DOP ของชั้นงาน A' ในตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าเมื่อโครงสร้างเดิมถูกปรับลดความหนาชั้นคั่น ทำให้เปล่งแสงที่ไม่มีสมบัติโพลาไรซ์ แม้ว่าควอนตัมดอตส่วนใหญ่มีลักษณะไม่สมมาตร แต่เนื่องจากการเกาะกลุ่มกันของขนาดและทิศทางมากนัก การก่อตัวของควอนตัมดอตส่วนใหญ่มีลักษณะแบบสุ่มและกระจายตัวทั่วบริเวณ อัตราการก่อตัวของควอนตัมดอตบนพื้นผิวเรียบค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับบนผิวลายตารางดังแสดงในภาพ AFM รูปที่ 4.7 (a) และ (d) ซึ่งจากผลดังกล่าวทำให้แสงที่เปล่งออกจากชั้นงานไม่มีสมบัติโพลาไรซ์ สำหรับค่ายอดพลัง 1.44 eV ซึ่งเปล่งจากชั้น WL นั้น ไม่มีสมบัติโพลาไรซ์เช่นกัน เนื่องจากสมบัติของโครงสร้างไอโซทรอปิก

จากข้อมูล DOP ของชั้นงาน B' จะเห็นว่าเมื่อจำนวนของชั้นปลูกเพิ่มขึ้นเป็น 3 ชั้น แสงที่เปล่งออกจากชั้นงานถือว่ายังไม่มีสมบัติโพลาไรซ์เหมือนกับชั้นงาน A' ขณะที่โครงสร้างเดิมให้ค่า DOP ประมาณ 19% แม้ว่าในชั้นงาน B' ปริมาณควอนตัมดอทที่ก่อตัวแบบสุ่มบนพื้นผิวเรียบลดลง มีการเกาะกลุ่มกันของขนาดและทิศทางมากขึ้น สังเกตได้จากภาพ AFM รูปที่ 4.7 (b) และ ค่า FWHM ของสเปกตรัมที่ลดลงในรูปที่ 4.8 (b) ดังนั้นสาเหตุที่แสงที่เปล่งออกจากโครงสร้างไม่แสดงสมบัติโพลาไรซ์ น่าจะเกิดจากควอนตัมดอทส่วนใหญ่มีลักษณะสมมาตรและมีระยะห่างระหว่างกันค่อนข้างมาก ดังนั้นความไม่สมมาตรของฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนและผลเชื่อมโยงแนวนอนมีได้น้อย ส่งผลให้แสงที่เปล่งออกจากชั้นงานไม่มีสมบัติโพลาไรซ์ สำหรับค่ายอดพลัง 1.47 eV ซึ่งเปล่งจาก GaAs นั้นไม่มีสมบัติโพลาไรซ์เช่นกันดังอธิบายในชั้นงาน A'

จากข้อมูล DOP ของชั้นงาน C' สังเกตว่าเมื่อจำนวนชั้นปลูกเพิ่มขึ้นเป็น 5 ชั้นพบว่าแสงที่เปล่งออกจากชั้นงานแสดงสมบัติโพลาไรซ์ที่ค่ายอดพลัง 1.18 eV สาเหตุเกิดจากควอนตัมดอทในชั้นงาน C' ก่อตัวบนผิวเรียบลดลง และรูปร่างของควอนตัมดอทคล้ายสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีอัตราส่วนลักษณะเฉลี่ยที่สูง และมีขนาดใหญ่เรียงตัวติดกันหนาแน่นกว่าชั้นงาน A', B' ซึ่งจากผลดังกล่าวทำให้เกิดผลเชื่อมโยงแนวนอน ความไม่สมมาตรของฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอน และผลของโพโซอิเล็กทริก ดังได้อธิบายในบทที่ 2 นำไปสู่การมีสมบัติโพลาไรซ์ของแสงที่เปล่งออกจากโครงสร้าง ค่า DOP ประมาณ 18% ซึ่งใกล้เคียงกับโครงสร้างเดิมชั้นงาน B, C แม้ว่าอัตราส่วนลักษณะต่ำกว่า แต่เนื่องจากควอนตัมดอทก่อตัวเรียงติดกันหนาแน่นทำให้มีผลเชื่อมโยงแนวนอนสูงกว่า จากรูปที่ 4.9 (c) จะเห็นได้ว่าที่บริเวณค่ายอดพลังงาน 1.18 eV นั้น DOP มีค่าเพิ่มขึ้นขณะที่ตำแหน่งของค่ายอดพลังงานลดลงซึ่งเป็นผลจากผลโพโซอิเล็กทริก สำหรับค่ายอดพลัง 1.47 eV ซึ่งเปล่งจาก GaAs ไม่มีสมบัติโพลาไรซ์เช่นเดียวกับชั้นงาน A' และ B'

สาเหตุอีกประการหนึ่งที่ทำให้ผลวัด DOP ของชั้นงาน A' และ B' ต่ำ คือ ระดับสัญญาณที่วัดได้ต่ำ จึงแสดงค่า DOP ได้ไม่ละเอียดนัก อันเกิดจากความสะอาดของห้องปลูก (Growth-chamber) ที่ลดลง เนื่องด้วยชั้นงานโครงสร้างใหม่ถูกสังเคราะห์ขึ้นภายหลังทำการซ่อมบำรุงเครื่อง MBE เนื่องจากการปนเปื้อนของสารจากห้องเตรียมชั้นงานแพร่ไปยังห้องปลูก ซึ่งสาเหตุดังกล่าวอาจทำให้ชั้นงานมีการปนเปื้อนขณะปลูกสูงกว่าชั้นงานโครงสร้างเดิม จึงเปล่งแสงได้ไม่ดีเท่า การปนเปื้อนเห็นได้อย่างชัดเจนจากค่ายอดพลัง 1.47 eV ซึ่งเด่นชัดกว่าค่ายอดที่เปล่งจากควอนตัมดอท

บทที่ 5

สรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาผลกระทบของการลดความหนาของชั้นคั่นที่มีต่อสมบัติกายภาพและสมบัติเชิงแสงของควอนตัมดอท InAs ที่ซ้อนทับกัน 1, 3, และ 5 ชั้นบนพื้นผิวลายตาราง ชั้นคั่น GaAs เดิมหนา 10 nm ถูกปรับลดลงเป็น 6 nm ส่งผลกระทบต่อสมบัติกายภาพและสมบัติเชิงแสง (PL และ PPL) ดังนี้

ผลกระทบเชิงกายภาพ

ควอนตัมดอทในชั้นงาน A' ก่อตัวบนผิวเรียบได้ง่ายขึ้น ปริมาณควอนตัมดอทบนพื้นผิวเรียบค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับผิวลายตาราง เนื่องจากชั้นคั่นที่บางลงทำให้ความเครียดของชั้นลายส่งผลต่อการก่อตัวของควอนตัมดอทในชั้นที่ 1 เป็นบริเวณกว้างทั้งบนผิวเรียบและในแนวเส้นลายตาราง ทำให้ควอนตัมดอทสามารถก่อตัวบนผิวเรียบได้ง่ายขึ้น ขณะที่ควอนตัมดอทในชั้นงาน B' มีลักษณะสมมาตรและก่อตัวบนผิวเรียบลดลง ซึ่งเป็นผลต่อเนื่องจากควอนตัมดอทในชั้นงาน A' เมื่อมีความหนาของชั้นคั่นเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความเครียดบริเวณผิวเรียบในโครงสร้างชั้นที่ 3 ลดลง สำหรับควอนตัมดอทในชั้นงาน C' มีลักษณะคล้ายสี่เหลี่ยมต่างจากควอนตัมดอทในโครงสร้างเดิมและที่สังเคราะห์ใหม่ทุกชั้นงาน ควอนตัมดอทมีขนาดใหญ่เรียงติดกัน ซึ่งส่วนหนึ่งเกิดจากความหนาชั้นคั่นซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ถูกปรับลดลงจากโครงสร้างเดิม ค่าโมล ความหนาของสารประกอบของชั้นลายตาราง และจำนวนชั้นปลูก ส่งผลกระทบต่อเนื่องต่อการก่อตัวของควอนตัมดอทในแต่ละชั้น และควอนตัมดอทในชั้นที่ 5 มีรูปร่างคล้ายสี่เหลี่ยมเพราะขณะที่ก่อตัวมีคลายความเครียดในทิศ [1-10] และ [110] สูงกว่าทิศอื่นมาก

ผลกระทบต่อสมบัติเชิงแสงโดยรวม (PL)

ควอนตัมดอทในชั้นงาน A' เปล่งแสงที่มีสเปกตรัมกว้างขึ้น อันเกิดจากการกระจายตัวของขนาดและความสูงของควอนตัมดอทที่หลากหลาย และไม่มีปรากฏค่ายอดพลังงานที่เปล่งจากชั้นลายตารางชัดเจนเหมือนโครงสร้างเดิมเนื่องจากชั้นคั่นที่บางลง ทำให้สมบัติกักกันพาหะด้อยลง มีผลทำให้พาหะส่วนใหญ่สามารถ Tunnel ไปยังชั้น WL และควอนตัมดอทแทน ขณะที่ควอนตัมดอทในชั้นงาน B' ให้สเปกตรัม PL ไม่ต่างจากเดิมมาก เนื่องจากการกระจายตัวของขนาดควอนตัมดอทไม่ต่างจากในโครงสร้างเดิมมาก ควอนตัมดอทก่อบนผิวเรียบน้อย มีความสม่ำเสมอของขนาด และควอนตัมดอทในชั้นงาน C' ให้สเปกตรัมของแสงที่แคบลงกว่าเดิม เนื่องจากปริมาณควอนตัมดอทที่ก่อตัวบนผิวเรียบมีน้อย ควอนตัมดอทก่อตัวการเรียงตัวติดกันในแนวเส้นลายตารางทำให้การกระจายตัวของขนาดลดลง

ระดับสัญญาณของสเปกตรัม PL ของชิ้นงาน A', B' และ C' ที่วัดได้ต่ำอาจเกิดจากสาเหตุ 2 ประการ คือ 1) ชิ้นงานมีการปนเปื้อนเนื่องจากโครงสร้างใหม่ (A', B', C') ปลุกหลังจากโครงสร้างเก่า (A, B, C) และเป็นการปลุกหลังจากห้องปลุกเปิดสู่บรรยากาศได้ไม่นานเพื่อเปลี่ยนจ่อ RHEED ที่ถูกปนเปื้อนโดยฟอสฟอรัสก่อนหน้านี้ 2) ผลกระทบจากการปรับลดความหนาของชั้นคั้นทำให้ความเครียดจากชั้นลายตารางส่งผลต่อการก่อตัวของควอนตัมดอตมากขึ้น โดยควอนตัมดอตก่อตัวได้ง่ายและมีขนาดใหญ่ ความน่าจะเป็นของการเกิดตำหนิ (defects) ในโครงผลึกจึงสูงขึ้น ส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพการเปล่งแสง

ผลสเปกตรัม PL จากการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของชิ้นงาน A นั้นแอมพลิจูดของสเปกตรัมของค่ายอดพลังงานที่เปล่งจากควอนตัมดอตในทิศทาง [1-10] และ [110] สูงขึ้นขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องด้วยพาหะส่วนใหญ่ถูกเคลื่อนย้ายจากควอนตัมดอตบริเวณผิวเรียบและ WL ไปยังควอนตัมดอตในทิศทาง [1-10] และ [110] ซึ่งโครงสร้างมีระดับพลังงานก็กกันต่ำกว่า และไม่พบปรากฏการณ์นี้ในชิ้นงาน B และ C เนื่องจากไม่มีควอนตัมดอตบนผิวเรียบ

ผลกระทบต่อสมบัติโพลาไรซ์ของแสง (PPL)

ควอนตัมดอตในชิ้นงาน A' ให้สเปกตรัมของแสงที่ไม่มีสมบัติโพลาไรซ์ เนื่องจากควอนตัมดอตไม่มีการเกาะกลุ่มของขนาดและทิศทางมากนัก การก่อตัวส่วนใหญ่มีลักษณะแบบสุ่มและกระจายตัวทั่วบริเวณ ขณะที่โครงสร้างเดิมให้สเปกตรัมที่มีค่า DOP สูงสุดเนื่องด้วยผลเชื่อมโยงแนวนอน ขณะที่ควอนตัมดอตในชิ้นงาน B' ให้สเปกตรัมของแสงที่มีค่า DOP น้อยมาก เนื่องด้วยควอนตัมดอตส่วนใหญ่มีลักษณะสมมาตร และมีระยะห่างระหว่างควอนตัมดอตที่ก่อตัว ดังนั้นผลเชื่อมโยงแนวนอนมีน้อย ขณะที่โครงสร้างเดิมให้แสงที่มีค่า DOP ประมาณ 18% อันเป็นผลมาจากควอนตัมดอตมีรูปร่างแบบทรงรีและก่อตัวไม่ห่างกันมาก สำหรับควอนตัมดอตในชิ้นงาน C' ให้สเปกตรัมของแสงที่มีค่า DOP ใกล้เคียงโครงสร้างเดิม แม้ว่าอัตราส่วนลักษณะต่ำกว่า แต่เนื่องด้วยควอนตัมดอตก่อตัวเรียงติดกันหนาแน่นทำให้มีผลเชื่อมโยงแนวนอนสูงกว่า อนึ่งเป็นไปได้ว่าค่า DOP ที่ค่อนข้างต่ำของชิ้นงานที่สังเคราะห์ขึ้นใหม่นั้นเกิดจากการปนเปื้อนในโครงสร้างในขณะที่ปลุก ทำให้ผลวัดไม่สามารถแสดงผลสเปกตรัมที่ละเอียดมากนัก

DOP ของแสงที่เปล่งจากโครงสร้างชั้นลายตารางของชิ้นงานโครงสร้างเดิม มีค่าใกล้เคียงกันคือ ประมาณ 7 - 8% แสดงถึงความไม่สมมาตรของ Dislocations ที่เกิดขึ้นบนชั้นลายตารางของชิ้นงานทั้งสามมีลักษณะใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับค่า FWHM ของยอดพลังงานของชั้นลายตารางที่วัดได้ คือ 17 - 21 meV และไม่ปรากฏสเปกตรัมของแสงที่เปล่งจากชั้นลายตารางของชิ้นงาน

โครงสร้างที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นใหม่เนื่องจากชั้นคั่นที่บางลง ทำให้สมบัติกักกันพาหะของโครงสร้างด้อยลง

ผลสเปกตรัม PPL แสดงให้เห็นถึงผลของโพซิซีโออิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดจาก Shear strain ส่งผลให้ DOP มีค่าค่อย ๆ เพิ่มขึ้นขณะที่ตำแหน่งของค่ายอดพลังงานลดลง หรือเมื่อควอนตัมดอตมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น สามารถสังเกตแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่า DOP ได้ชัดจากผลสเปกตรัม PPL ของชิ้นงานโครงสร้างเดิม A, B, C และโครงสร้างที่ถูกปรับความหนาชิ้นงาน C'

อนึ่งเป็นไปได้ว่า ค่า DOP ที่ค่อนข้างต่ำของชิ้นงานโครงสร้างที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นใหม่นั้น เกิดจากระดับสัญญาณที่วัดได้ต่ำ จึงทำให้ผลวัดไม่สามารถแสดงผลสเปกตรัมที่ละเอียดมากนัก ดังได้สรุปสาเหตุในหัวข้อก่อนหน้านี้

ผลการศึกษารูปได้ว่าสมบัติโพลาไรซ์ของแสงที่เปล่งจากควอนตัมดอต InAs ที่ซ้อนทับกันหลายชั้นบนแผ่นลายตาราง InGaAs/GaAs ขึ้นอยู่กับหลายองค์ประกอบ เช่น อัตราส่วนลักษณะ ผลเชื่อมโยงแนวนอน และผลโพซิซีโออิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น การปรับค่าพารามิเตอร์เพียงหนึ่งค่าของการสังเคราะห์ควอนตัมดอต ส่งผลกระทบต่อสมบัติโพลาไรซ์ของแสงที่เปล่งออกจากโครงสร้างชัดเจน ในการประยุกต์ใช้งาน ค่า DOP ต้องถูกควบคุมให้เหมาะสม เนื่องจากงานบางประเภทจำเป็นต้องใช้แสงที่มีค่า DOP สูง ปานกลาง หรือบางครั้งต้องไม่มีสมบัติของการโพลาไรเซชัน เห็นได้ว่าเมื่อปรับลดความหนาชั้นคั่นทำให้สมบัติโพลาไรซ์ของแสงด้อยลงในชิ้นงาน A', B' แต่มีแนวโน้มดีขึ้นในชิ้นงาน C' ซึ่งการสังเคราะห์ควอนตัมดอตสามารถปรับค่าพารามิเตอร์อื่น เช่น จำนวนชั้น ค่าโมลของสารประกอบและความหนาชั้นลายตาราง เป็นต้น จากแนวทางดังกล่าวสามารถนำมาปรับใช้เพื่อควบคุมโพลาไรเซชันของแสงให้เหมาะต่อการใช้งาน

รายการอ้างอิง

1. D. Bimberg, M. Grundmann, and N.N. Ledentsov, *Quantum dot heterostructures*. 1999: New York: Wiley.
2. J. Wang, et al., *Electrically tunable electron g factors in coupled InAs/GaAs pyramid quantum dots*. Applied Physics Letters, 2010. **96**(062108).
3. M. Baira, et al., *Broken symmetry in laterally coupled InAs/GaAs quantum dots molecule*. Journal of Applied Physics, 2010. **104**(064314).
4. J. H. Teng, et al., *One-dimensional aligned InAs/InP quantum dots chain growth by metalorganic vapor phase epitaxy for 1.55 μm application*. Journal of Crystal Growth, 2007. **305**(1): p. 45 – 49.
5. C. C. Thet, S. Panyakeow, and S. Kanjanachuchai, *Growth of InAs quantum-dot hatches on InGaAs/GaAs cross-hatch virtual substrates*. Microelectronic Engineering, 2007. **84**(5): p. 1562 – 1565.
6. S. Yuncheng and L.L. Minjoo, *Room temperature electroluminescence from light-emitting diodes based on In_{0.5}Ga_{0.5}As/GaP self-assembled quantum dots*. Applied Physics Letters, 2012. **100**(251904).
7. E. S. Semenova, et al., *Metal organic vapor-phase epitaxy of InAs/InGaAsP quantum dots for laser applications at 1.5 μm* . Applied Physics Letters, 2011. **99**(101106).
8. L. Caudra, A. Marti, and A. Luque, *Present status of intermediate band solar cell research*. Thin Solid Films, 2004. **451**: p. 593 – 599.
9. J. O. Kim, et al., *Multi-stack InAs/InGaAs sub-monolayer quantum dots infrared photodetectors*. Applied Physics Letters, 2013. **102**(011131).
10. S. Krishna, *Quantum dots-in-a-well infrared photodetectors*. Journal of Physics D: Applied Physics, 2008. **38**(2142).
11. C. S. Lent, P. D. Tougaw, and W. Porod, *Bistable saturation in coupled quantum dots for quantum cellular automata*. Applied Physics Letters, 1993. **62**(714).
12. K. Yanggratoke and S. Kanjanachuchai, *Hybrid quantum cellular automata memory*. Proceedings of ECTI-CON, 2008. **5**.

13. S. A. Wolf, et al., *The promise of nanomagnetism and spintronics for future logic and universal memory*. Proceedings of the IEEE, 2010. **98**(12): p. 2155 – 2168.
14. P. Wolfgang, et al., *Quantum-dot cellular automata: computing with coupled quantum dots*. International Journal of Electronics, 1999. **86**(5): p. 549 – 590.
15. M. Grundmann, et al., *Nature of optical transitions in self-organized InAs/GaAs quantum dots*. Physics Review B, 1996. **53**(R10509R).
16. M. Grundmann, et al., *Excited states in self-organized InAs/GaAs quantum dots: theory and experiment*. Applied Physics Letters, 1996. **68**: p. 979 – 981.
17. S. H. Xin, P. D. Wang, and A. Yin, *Formation of self-assembling CdSe quantum dots on ZnSe by molecular beam epitaxy*. Applied Physics Letters, 1996. **69**: p. 3884 – 3886.
18. P. Wojnar, E. Janik, and L.T. Baczewski, *Growth and optical properties of CdTe quantum dots in ZnTe nanowires*. Applied Physics Letters, 2011. **99**: p. 109 – 113.
19. K. Nishi, H. Saito, and S. Sugou, *Narrow photoluminescence linewidth of 21 meV at 1.35 μm from strain-reduced InAs quantum dots covered by In_{0.2}Ga_{0.8}As grown on GaAs substrates*. Applied Physics Letters, 1999. **74**(1111).
20. J. Tatebayashi, M. Nishioka, and Y. Arakawa, *Over 1.5 μm light emission from InAs quantum dots embedded in InGaAs strain-reducing layer grown by metalorganic chemical vapor deposition*. Applied Physics Letters, 2001. **78**(3469).
21. C. K. Hahn, Y. J. Park, and E.K. Kim, *Selective formation of one and two-dimensional arrayed InGaAs quantum dots using Ga₂O₃ thin film as a mask material*. Applied Physics Letters, 1998. **73**: p. 2479 – 2481.
22. L. Zhang and L. Liu, *An optoelectronic architecture is optoelectronic implementation of local cellular logic with polarization coding*. Microwave and Optical Technology Letters, 1990. **3**(7): p. 242 – 244.

23. J. Z. Munt and C. Masoller, *Numerical implementation of a VCSEL-based stochastic logic gate via polarization bistability*. Optics Express, 2010. **18**(6): p. 16418 – 16429.
24. P. Kiesel, et al., *Polarization-sensitive opto-electronic devices based on spontaneous self-ordering in semiconductor alloys*. Materials Science & Engineering B, 2002. **88**(2): p. 307 – 311.
25. P. Wiedemann, et al., *MOVPE growth of ternary and quaternary tensile strained MQW structures for polarization insensitive devices*. Materials Science & Engineering B, 2002. **88**(2): p. 307 – 311.
26. K. D. Choquette, et al., *Vertical-cavity laser diode polarization switching and control*. Electron Devices, IEEE Transactions, 2002. **40**(11): p. 2117 – 2118.
27. W. Niblack and E. Wolf, *Polarization modulation and demodulation of light*. Applied Optics, 1964. **3**(2): p. 277 – 279.
28. H. Nour and E. Wolf, *Fluorescence nanoscopy by polarization modulation and polarization angle narrowing*. Nature Methods, 2014: p. 579 – 584.
29. P. Podemski, et al., *Columnar quantum dashes for an active region in polarization independent semiconductor optical amplifiers at 1.55 μm* . Applied Physics Letters 2008. **93**(17).
30. <http://www.focux.us/polarization-modulator-news.html>.
31. T. Kita, et al., *Polarization-independent photoluminescence from columnar InAs/GaAs self-assembled quantum dots*. Japanese Journal of Applied Physics, 2002. **41**: p. L1143 – L1145.
32. T. Kita, et al., *Artificial control of optical gain polarization by stacking quantum dot layers*. Applied Physics Letters, 2006. **88**: p. 211106(1) – 211106(3).
33. P. Ridha, et al., *Polarization dependence study of electroluminescence and absorption from InAs/GaAs columnar quantum dots*. Applied Physics Letters, 2007. **91**(191123).
34. K. Kawaguchi, et al., *Controlling polarization of 1.55 μm columnar InAs quantum dots with highly tensile-strained InGaAsP barriers on InP (001)*. Japanese Journal of Applied Physics, 2006. **45**: p. L1244 – L1246.

35. C. Hermannstädter, et al., *Polarization fine structure and enhanced single-photon emission of self-assembled lateral InGaAs quantum dot molecules embedded in a planar microcavity*. Journal of Applied Physics, 2009. **105**(122408).
36. D. Ochoa, et al., *Emission energy and polarization tuning of InAs/GaAs self-assembled quantum dots by growth interruption*. Journal of Crystal Growth, 2003. **251**: p. 192 – 195.
37. N. Sellami, et al., *The effect of the excitation and of the temperature on the photoluminescence circular polarization of AlInAs/AlGaAs quantum dots*. Applied Surface Science, 2009. **256**: p. 1409 – 1412.
38. J. Beyer, et al., *Strong room-temperature optical and spin polarization in InAs/GaAs quantum dot structures*. Applied Physics Letters 2011. **98**(203110).
39. E. U. Rafailov, M. A. Cataluna, and E.A. Avrutin, *Semiconductor quantum dots for ultrafast optoelectronics*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2011.
40. M. A. Herman and H. Sitter, *Molecular Beam Epitaxy Fundamentals and Current Status*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1981.
41. I. N. Stranski and L. Krastanow, *Zur Theorie der orientierten Ausscheidung von Ionenkristallen aufeinander*. Sitzungsberichte-Akademie Der Wissenschaften in Wien, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse Abteilung IIb, 1938. **146**: p. 797 – 810.
42. T. Limwongse, et al., *InGaAs quantum dots on cross-hatch patterns as a host for diluted magnetic semiconductor medium*. Journal of Nanomaterials, 2013. **6**(791782).
43. T. Limwongse, S. Panyakeow, and S. Kanjanachuchai, *Evolution of InAs quantum dots grown on cross-hatch substrates*. Physica Status Solidi (c), 2009. **6**(4): p. 806 – 809.
44. S. Kanjanachuchai, et al., *Self-assembled InAs quantum dots on cross-hatch InGaAs templates: Excess growth, growth rate, capping and preferential alignment*. Microelectronic Engineering, 2009. **86**: p. 844 – 849.

45. C. C. Thet, et al., *The effects of relaxed InGaAs virtual substrates on the formation of self-assembled InAs quantum dots*. Semiconductor Science and Technology, 2008. **23**(055007).
46. Limwongse, T., *Evolution of InAs quantum dots grown on cross-hatch substrates master's thesis*. Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2008.
47. <http://sites.udel.edu/dotygroup/research/quantum-dots-nanoparticles/>.
48. S. Weidong, *Polarization of emission from self-assembled quantum dots and its application to the optical characterization of structure*. Physica Status Solidi (b), 2009. **264**(4): p. 876 – 879.
49. S. Weidong and S.J. Xu, *Optical characterization of structure for semiconductor quantum dots*. Physical review. B, Condensed Matter and Materials, 2008. **77**(113305).
50. T. Vittorianna, et al., *Understanding polarization properties of InAs quantum dots by atomistic modeling of growth dynamics*. AIP Proceeding Conference on the Physics of Semiconductors, 2012.
51. C. Hermannstädter, et al., *Polarization anisotropic luminescence of tunable single lateral quantum dot molecules*. Journal of Applied Physics, 2012. **111**(6)(063526).
52. W. Liu, et al., *Anisotropic electro-optic effect on InGaAs quantum dot chain modulators*. Optics Letters, 2013. **30**(20): p. 4262-4264
53. Y. I. Mazur, V. G. Dorogan, and M.E. Ware, *Effect of dimensionality and morphology on polarized photoluminescence in quantum dot-chain structures*. Journal of Applied. Physics, 2012. **112**(8), (084314).
54. J. Peng, et al., *Heterogeneous confinement in laterally coupled InGaAs/GaAs quantum dot molecules under lateral electric fields*. Physical review. B, Condensed matter, 2010. **81**(235314).
55. J. Peng and G. Bester, *Charged excitons and biexcitons in laterally coupled (In,Ga)As quantum dots*. Physical Review B, 2010. **82**(235314).

56. C. Hermannstadter, *Optical properties of single charge-tunable and laterally coupled (In,Ga)As/GaAs quantum dots*. Ph.D. dissertation, Verlag Dr. Hut, Munchen, 2010.
57. A. Schliwa and D. Bimberg, *Electronic Properties of Self-organized Quantum Dots*. Doctoral Thesis, Technische University Berlin, 2007.
58. G. Bester and A. Zunger, *Cylindrically shaped zinc-blende semiconductor quantum dots do not have cylindrical symmetry: Atomistic symmetry, atomic relaxation, and piezoelectric effects*. Physical Review B, 2005. **71**(045318).
59. M. Grundmann, O. Stier, and D. Bimberg, *InAs/GaAs pyramidal quantum dots: Strain distribution, optical phonons, and electronic structure*. Physical Review B, 1995. **52**(11969).
60. F. Vouilloz, et al., *Effect of lateral confinement on valence-band mixing and polarization anisotropy in quantum wires*. Physical Review B, 1998. **57**(12378).
61. F. Vouilloz, et al., *Polarization anisotropy and valence band mixing in semiconductor quantum wires*. Physical Review Letters, 1997. **78**(1580).
62. H. P. Seoung, et al., *Partial strain relaxation effects on polarization anisotropy of semipolar (112-2) InGaN/GaN quantum well structures*. Physical Review Letters, 2013. **103**(221108).
63. S. Fan and Z. Qin, *Strain effect on the optical polarization properties of c-plane Al_{0.26}Ga_{0.74}N/GaN superlattices*. Optics Express, 2014. **22**(6): p. 6322 – 6328.
64. U. Woggon, *Optical Properties of Semiconductor Quantum Dots*. Springer-Verlag, Berlin, 1997.
65. L. V. Lelovsky, et al., *Anisotropic confinement, electronic coupling and strain induced effects detected by valence-band anisotropy in self-assembled quantum dots*. Nanoscale Research Letters, 2011. **6**(56).
66. J. W. Matthews and A.E. Blakeslee, *Defect in epitaxial multilayers I. misfit dislocations*. Journal of Crystal Growth, 1974. **27**: p. 118 – 125.
67. T. Chokamnuai, et al., *Polarized photoluminescence of vertically stacked InAs quantum dots*. Master's Thesis, Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering, 2013.

68. J. M. Gérard, et al., *Optical investigation of the selforganized growth of InAs/GaAs quantum boxes*. Journal of Crystal Growth, 1995. **05**.
69. <http://analyticalprofessional.blogspot.com/2013/05/atomic-force-microscopy.html>.
70. *Infrared detector module with preamp Metal Dewar type Manual, Model G7754 – 03*.
71. M. S. Abrahams, J. Blanc, and C.J. Buiocchi, *Like sign asymmetric dislocations in zinc blende structure*. Applied Physics Letters, 1972. **21**(5): p. 185 – 186.
72. H. Steinhardt and P. Haasen, *Creep and dislocation velocities in gallium arsenide*. Physics Status Solidi (A), 1978. **49**: p. 93 – 101
73. S. Kanjanachuchai and T. Limwongse, *Nucleation sequence of InAs quantum dots on cross-hatch patterns*. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2011. **11**: p. 10787 – 10791.
74. S. Kanjanachuchai and T. Limwongse, *Complete formation sequence of InAs quantum dots on lattice-mismatched InGaAs/GaAs substrates*. Nanoelectronics Conference (INEC) 2010, 2010: p. 626 – 627.
75. M. Sabaeian and A.K. Nasab, *Size-dependent intersubband optical properties of dome-shaped InAs/GaAs quantum dots with wetting layer*. Optical Society of America (OSA)-Applied Optics, 2012. **51**(18): p. 4176 – 4185.
76. C. Himwas, S. Panyakeow, and S. Kanjanachuchai, *Optical properties of as-grown and annealed InAs quantum dots on InGaAs cross-hatch patterns*. Nanoscale Research Letters, 2011(6:496).
77. C. C. Thet, S. Kanjanachuchai, and S. Panyakeow, *The effects of substrate mounds and pits on the periodicity of cross-hatch surface and subsequent formation of quantum dots*. Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, 2007. **2007**: p. 1141 – 1144.
78. S. Kiravittaya, et al., *Multi-scale ordering of self-assembled InAs/GaAs(001) quantum dots*. Nanoscale Research Letters, 2006. **1**: p. 1 – 10
79. A.T Winzer, et al., *Optical properties of wettinglayers in stacked InAs/GaAs quantum dot structures*. Physica E, Low-dimensional Systems and Nanostructure, 2002. **13**(2-4): p. 289 – 292.

80. Y. P. Varshni, *Temperature dependence of the energy gap in semiconductors*. Physica, 1967. **34**: p. 149 – 154.
81. Y. C. Zhanga, et al., *Temperature dependence of electron redistribution in modulation-doped InAs/GaAs quantum dots*. Journal of Crystal Growth, 2000. **219**: p. 199 – 204.
82. P. Sanjay, M. Roderick, and P. Sunil, *Band structures of laterally coupled quantum dots accounting for electromechanical effects*. Journal of Physics, Conference Series (Quantum Dots), Nottingham, UK, 2010.
83. H. Saito, K. Nishi, and S. Sugou, *Polarization of quantum-dot surface-emitting lasers by using structurally anisotropic self-assembled quantum dots*. Applied Physics Letters, 1997. **71**(5).
84. Nan Thider Chit Swe, et al., *Optical polarization property of laterally aligned quantum dots*. Doctor's Thesis, Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering, 2007.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย อภิชาติ จิตตรง อาศัยอยู่บ้านเลขที่ 29/99 ซอย เสรีไทย 5 ถนน เสรีไทย แขวง คลองจั่น เขต บางกะปิ จังหวัด กรุงเทพมหานคร ศึกษาชั้นประถม, มัธยมต้น ที่โรงเรียนวัดชนสังฆารณพิจิตร ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นต้น ที่วิทยาลัยเทคนิคสีชล ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูงที่วิทยาลัยเทคนิคสุราษฎร์ธานี ได้รับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิตเมื่อปี พ.ศ. 2548 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

