

โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบหนึ่งมิติของอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอทโมเลกุล



นายนิธิเดช รัชศฤงคารสกุล

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

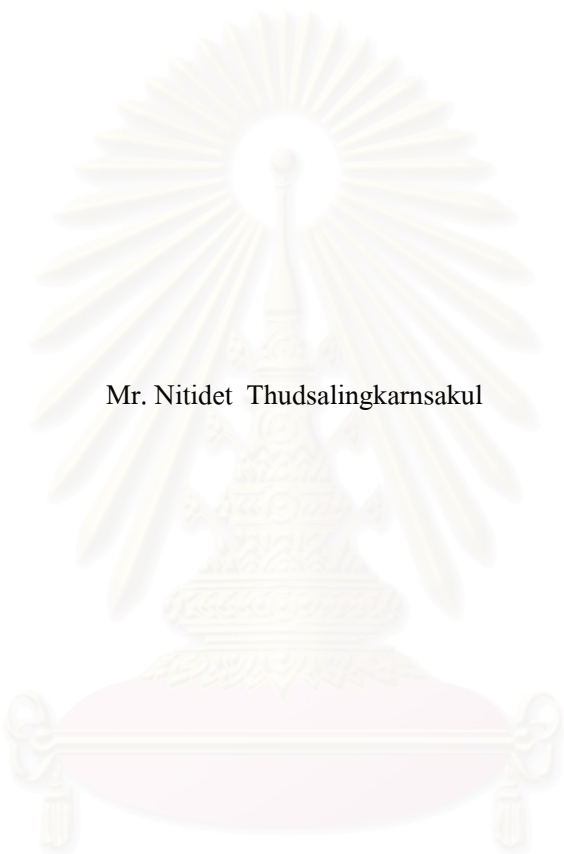
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTIVE ONE-DIMENSIONAL ELECTRONIC STRUCTURE OF InGaAs QUANTUM DOT
MOLECULES



Mr. Nitidet Thudsalingkarnsakul

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

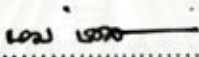
Chulalongkorn University

Academic Year 2008

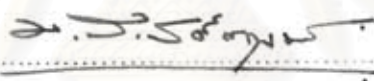
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบหนึ่งมิติของอินเดียมเทลเลไนด์
อาร์เซไนด์ควอนตัมดอทโมเลกุล
โดย นายนิธิเดช รัชศงการสกุล
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ ดร. ทรงพล กาญจนชูชัย
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ดร. สุวัฒน์ ไสภิตพันธ์

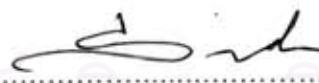
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... กณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร)


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


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร. สุวัฒน์ ไสภิตพันธ์)


..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ชัชชมา ธนชานนท์)

4970389621 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: / InGaAs QD / InGaAs QDM / effective 1D electronic structure / QD effective

NITIDET THUDSALINGKARNSAKUL : EFFECTIVE ONE-DIMENSIONAL ELECTRONIC STRUCTURE OF InGaAs QUANTUM DOT MOLECULES. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SONGPHOL KANJANACHUCHAI, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR : SUWAT SOPITPAN, Ph.D., 99 pp.

This thesis reports simulation results of an effective one dimension (1D) electronic structure of InGaAs quantum dot molecules (QDMs). Samples were grown by molecular beam epitaxy (MBE) using thin capping and regrowth technique. The first layer of InAs quantum dots (QDs) was grown with a thickness of 1.8 ML and capped by 15 ML and 25 ML of GaAs for samples A and B, respectively. Another layer of 1.2-ML InAs was regrown on this capping layer. This process resulted in the formation of ensemble of QDMs, each consists of one large QD at the center surrounded by smaller satellite QDs.

Surface morphology and optical properties of InGaAs QDMs were studied by atomic force microscopy AFM and power- and temperature-dependent photoluminescence (PL) measurements. PL results were used to simulate the effective 1D electronic structure. Eigen energies of carriers obtained from the simulation can be used to explain the PL results at all temperatures. The accuracy of the model is better than 6.3 meV and 7.9 meV for samples A and B, respectively.

The results of the effective 1D electronic structure of InGaAs QDMs show that the effective chemical compositions of QDs and intermediate layers are $\text{In}_{0.77}\text{Ga}_{0.23}\text{As}$ and $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$, respectively. The model can also identify that the PL spectrum of sample A was the emission of the center QDs only, whereas in sample B both the center and satellite QDs contributed to the emission spectrum.

The simulation results of the effective 1D electronic structure of InGaAs QDMs can be used to explain the optical properties of complex InGaAs QDMs with good accuracy in the 20-150 K range. The effective sizes of QDs from the simulation are smaller than those measured by AFM because of the surface state effect of QDs and size uncertainty due to the convolution effect of AFM.

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

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีโอกาสสำเร็จลุล่วงได้ตามเป้าหมายที่วางไว้ หากขาดเครื่องมือทำการทดลองและวิจัย รวมทั้งการช่วยเหลือและสนับสนุนจากผู้มีพระคุณทั้งหลายในห้องปฏิบัติการวิจัย สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาคไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้เขียนขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร. ทรงพล กาญจนชูชัย ที่เอื้อเฟื้อสละเวลาอันมีค่า เพื่อมาช่วยเหลือ ดูแลและให้คำปรึกษาอันมีประโยชน์ยิ่ง แก่ข้าพเจ้ามาตั้งแต่ข้าพเจ้าเรียนปริญญาตรีจนกระทั่งจบการศึกษาระดับปริญญาโท

ผู้เขียนขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. สุวัฒน์ โสภิตพันธ์ ที่เอื้อเฟื้อสละเวลาอันมีค่า ให้คำปรึกษา และให้คำแนะนำตอนสอบขออนุมัติหัวข้อวิทยานิพนธ์

ผู้เขียนขอขอบคุณคณะกรรมการสอบอนุมัติหัวข้อวิทยานิพนธ์ สอบจบการศึกษา ประกอบไปด้วย ศ. ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว รศ.ดร.มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร ดร. ชัญญา ธนชยานนท์ และ อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ผู้เขียนขอขอบคุณพี่ๆห้องธุรการ ที่ให้ความช่วยเหลือด้านงานธุรการ และทางเทคนิค ประกอบไปด้วย พี่สุภโชค และ พี่ขวัญเรือน ไทยน้อย พี่พรชัย ช่างม่วง พี่พัฒนา พันธวงศ์

ผู้เขียนขอขอบคุณพี่ๆปริญญาโท และ ปริญญาเอก ทั้งที่จบไปแล้ว และที่ยังศึกษาอยู่ที่ ให้ความช่วยเหลืออย่างอบอุ่นเรื่อยมา

ผู้เขียนขอขอบคุณสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (NSTDA) รุ่น 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย Asian Office of Aerospace Research and Development (AOARD) Thai Research Fund (TRF) และศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (NANOTEC) ที่ให้ทุนสนับสนุนการศึกษาและทุนวิจัย

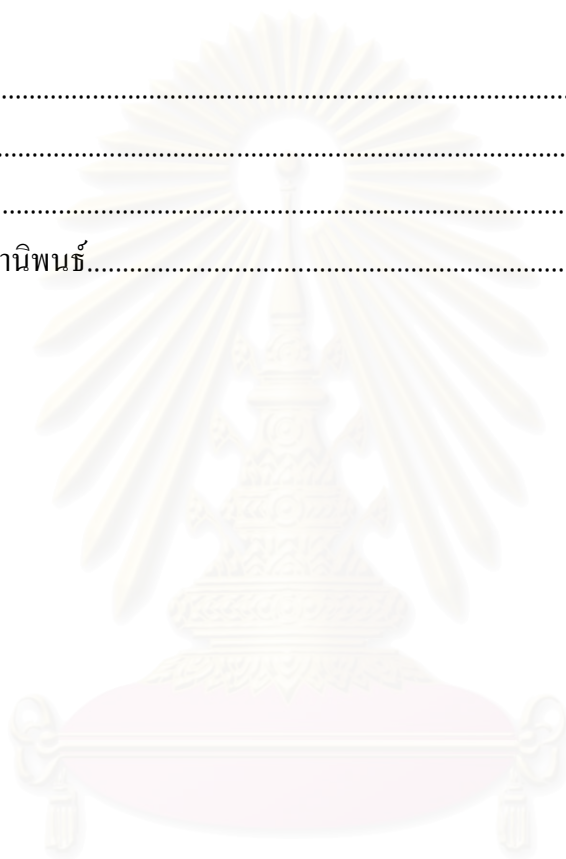
สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบคุณครอบครัว ประกอบไปด้วย บิดา มารดา และญาติพี่น้อง ที่เป็นกำลังใจ และให้คำปรึกษาอย่างดีตลอดมา ประโยชน์อันใดที่เกิดจากข้าพเจ้าขอบเป็นเครื่องบูชา บูรพาจารย์ตลอดจนคุณบิดามารดาที่เป็นผู้มีพระคุณยิ่งต่อข้าพเจ้า

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐาน.....	7
2.1 โครงสร้างขนาดนาโนเมตร.....	7
2.1.1 ควอนตัมเวลล์.....	7
2.1.2 ควอนตัมไวร์.....	8
2.1.3 ควอนตัมดอต.....	9
2.2 การปลูกควอนตัมดอตด้วยวิธีกระบวนการปลูกผลึกอิมพิแทกซ์จากลำโมเลกุล.....	10
2.2.1 ระบบการปลูกผลึกอิมพิแทกซ์จากลำโมเลกุล.....	10
2.2.2 กลไกการเกิดควอนตัมดอต.....	14
2.3 การวัดคุณสมบัติทางแสง โดย Photoluminescence (PL).....	17
2.3.1 ระบบ Photoluminescence.....	17
2.3.2 ผลการทดลองทางแสง.....	21
2.4 การวัดผิวหน้าด้วยเทคนิคแรงอะตอม.....	23
2.4.1 ระบบ Atomic Force Microscope (AFM).....	23
2.4.2 ผลการวัดผิวหน้า.....	23
2.5 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์.....	24
2.5.1 แผนภาพแถบพลังงาน (Energy Band Diagram).....	25
2.5.2 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์แบบ 1 มิติ.....	28
2.5.3 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์แบบ 3 มิติ.....	29

บทที่ 3 การทดลอง.....	31
3.1 การปลูกโครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุลและผลการทดลอง.....	31
3.1.1 วิธีการปลูกควอนตัมดอทโมเลกุล.....	31
3.1.2 การเกิดควอนตัมดอทโมเลกุล.....	33
3.1.3 ลักษณะผิวหน้า.....	34
3.1.4 ลักษณะคุณสมบัติทางแสง.....	35
3.2 Couple Schrödinger-Poisson Equations.....	36
3.2.1 Schrödinger Equation.....	36
3.2.2 Poisson Equation	37
3.2.3 ลำดับการคำนวณโดยใช้ Schrödinger-Poisson Equations.....	38
3.2.4 ตัวแปรอื่นๆที่เกี่ยวข้อง.....	40
3.2.4.1 แถบพลังงานต้องห้าม (Band Gap).....	40
3.2.2.2 ΔE_c และ ΔE_v	41
3.2.2.3 Eigen Energy ของโฮล และ อิเล็กตรอน.....	41
3.2.2.4 ค่าพลังงาน $E_{electron} - E_{hole}$	42
3.3 กำหนดโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบหนึ่งมิติ.....	43
3.3.1 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพในแนวตั้ง.....	44
3.3.2 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพในแนวนอน.....	48
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย.....	51
4.1 ผลการทดลองคุณสมบัติทางแสง.....	51
4.1.1 ผลการวัด PL แบบปรับกำลังของแสงกระตุ้น.....	51
4.1.2 ผลการวัด PL แบบปรับอุณหภูมิของชิ้นงาน.....	56
4.2 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบหนึ่งมิติ.....	58
4.2.1 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแนวตั้งของ A และ B.....	58
4.2.2 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแนวนอนของ A และ B	61
4.2.3 วิเคราะห์ค่าความผิดพลาดจากการจำลองชิ้นงาน A	65
4.2.4 วิเคราะห์ค่าความผิดพลาดจากการจำลองชิ้นงาน B.....	68
4.2.5 ความสมจริงของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	71

4.2.5.1	องค์ประกอบทางเคมี (x และ y).....	71
4.2.5.2	ขนาด (H และ W) เมื่อเทียบกับผล AFM.....	72
4.2.5.3	ขนาด (H) เมื่อเทียบกับกระบวนการปลูกผลึก.....	73
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....		74
รายการอ้างอิง.....		76
ผลงานตีพิมพ์.....		83
ผลงานนำเสนอ.....		84
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....		85



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
4.1 แสดงค่า α, β ของ InAs, InGaAs และ GaAs.....	57
4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานสถานะพื้นกับ อุณหภูมิ.....	58



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
1.1	ลักษณะของวัตถุขนาดต่างๆ.....1
1.2	a) กระบวนการดูดกลืนแสง และ b) กระบวนการเปล่งแสง.....4
2.1	โครงสร้างทางกายภาพและความหนาแน่นของสถานะของ (a) วัสดุขนาดใหญ่ (b) ควอนตัมเวลต์ (c) ควอนตัมไวร์ และ (d) ควอนตัมดอต.....9
2.2	โครงสร้างระบบปลูกผลึกจากลำโมเลกุล RIBER รุ่น 32P.....10
2.3	ลักษณะอุณหภูมิกับเวลาสำหรับทำความสะอาดแผ่นฐาน.....11
2.4	ส่วนประกอบภายในห้องปลูกผลึก.....12
2.5	โครงสร้างของระบบ RHEED14
2.6	แผนภาพเฟสสมดุล (Equilibrium phase diagram) ในรูปของฟังก์ชันระหว่าง H กับ ϵ โดยภาพประกอบด้านบนและล่างแสดงถึงลักษณะของผิวหน้าของโหมดต่างๆทั้ง 6 โหมด สามเหลี่ยมเล็กสีขาวแทนโครงสร้างเกาะสามมิติที่มีเสถียรภาพ สามเหลี่ยมใหญ่ระบายสีข้างในแทนโครงสร้างเกาะสามมิติที่โตเต็มที่ (Ripening island) เฟสแต่ละรูปแบบถูกแบ่งด้วยเส้นขอบเขต $H_c(\epsilon)$: $FM-R_1, FM-SK_1$; $H_c(\epsilon)$: SK_1-R_2 ; $H_c(\epsilon)$: SK_2-SK_1 ; $H_c(\epsilon)$: $VW-SK_2, VW-R_3$15
2.7	Schematic ของ stain energy density ของควอนตัมดอต.....17
2.8	(ก) รูปถ่าย และ (ข) Schematic ของระบบวัด PL17
2.9	ช่วงความยาวคลื่นของสิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสง ชนิด InGaAs.....19
2.10	ผลการวัดทางแสงแบบขึ้นกับกำลังกระตุ้นของแสง.....20
2.11	ผลการวัดทางแสงแบบขึ้นกับอุณหภูมิ.....20
2.12	a) PL ของชิ้นงานตัวอย่างและ b) การวิเคราะห์ระดับพลังงานไอเกิน E_c และ E_v21
2.13	(a) ควอนตัมดอตจะแสดงค่าพลังงานเป็นเคลต้าฟังก์ชันเหมือนกันความหนาแน่นของสถานะ (b) ค่าเฉลี่ยความแตกต่างของขนาดควอนตัมดอตจะแปรผันกับค่า FWHM.....22
2.14	ตัวอย่างผล PL แบบคำนวณจากวิธี Gaussian fitting แบบ multiple Gaussian peaks22
2.15	แผนภาพแสดงการทำงานของ AFM.....23
2.16	ผลการวัดผิวหน้าของควอนตัมดอตโมเลกุลขนาด $2 \times 2 \mu m^2$24
2.17	แผนภาพแถบพลังงาน.....25

2.18 แผนภาพแถบพลังงานของ ตัวนำ สารกึ่งตัวนำ และ ฉนวน.....26

2.19 แผนภาพพลังงาน- โมเมนตัม (E-k) ของ a) InAs, b) GaAs และ c) Si27

2.20 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของ GaAs/InAs/GaAs27

2.21 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์แบบหนึ่งมิติของควอนตัมดอทแบบแนวตั้งและแนวนอน.....28

2.22 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ที่คำนวณได้ค่าพลังงานไอเกินและฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอน และโฮล.....29

2.23 ฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนและโฮลซึ่งได้จากการคำนวณแบบสามมิติ.....29

3.1 a) โครงสร้าง และ b) temperature profile ของการปลูกควอนตัมดอทโมเลกุลในชั้นงาน A32

3.2 a) โครงสร้าง และ b) temperature profile ของการปลูกควอนตัมดอทโมเลกุลในชั้นงาน B33

3.3 แผนภาพลำดับการเกิดควอนตัมดอทโมเลกุล.....33

3.4 ผลการวัดผิวหน้าจาก AFM ขนาด $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ ของ a) ชั้นงาน A และ b) ชั้นงาน B รูปเล็ก แทรก a) และ b) แสดงภาพขยายขนาด $300 \times 300 \text{ nm}^2$ และรูปด้านล่างแสดงผลการทำ Line Scan ของ QDM ด้วยเทคนิค AFM ของแต่ละ QDM34

3.5 ผลการวัดคุณสมบัติทางแสง PL ที่ 77 K แบบ normalized ของ a) ชั้นงาน A และ b) ชั้นงาน B..... 35

3.6 Flow Chart แสดงการคำนวณแบบ Self-Consistent ของสมการชโรดิงเงอร์และสมการปัวส์ซอง a) แบบลำดับขั้นตอนอย่างง่าย และ b) แบบลำดับขั้นสมการ.....39

3.7 เปรียบเทียบ Band gap ของ InGaAs แบบมีความเครียดและไม่มีความเครียดที่ 77 K40

3.8 ΔE_C และ ΔE_V ที่เกิดจากสารประกอบแบบสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิดหัวต่อแบบเฮเทอโร และ b) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ และ ΔE_C 41

3.9 เปรียบเทียบพลังงานที่สามารถครอบครองได้ของอิเล็กตรอนเมื่อ a) บ่อพลังงานกว้างขึ้น b) บ่อพลังงานต่ำลง.....42

3.10 กระบวนการเปล่งแสงของสารกึ่งตัวนำ.....43

3.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิผลในแนวนอนกับผลการทดลองทางแสงด้วยเทคนิค PL44

3.12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานไอเกินของอิเล็กตรอนและโซลกับขนาดความสูงของควอนตัมดอต	45
3.13	ผลการทดลองทางแสง PL ของ a) ชั้นงาน A และ b) ชั้นงาน B ที่ 77 K	46
3.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $In_xGa_{1-x}As$ และความสูงของควอนตัมดอต กับค่าพลังงาน ground state.....	47
3.15	พลังงานไอเกินของอิเล็กตรอนใน CB จะมีค่าต่างกันมากเมื่อมีพลังงานมากขึ้น.....	48
3.16	โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของ QDM ที่ประกอบด้วย InAs QD, wetting และ GaAs.....	49
3.17	ผลการวัดทางแสง PL ที่สอดคล้องกับโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพในแนวนอนของชั้นงาน a) A และ b) B	50
4.1	ผลการวัด PL แบบปรับกำลังของแสงกระตุ้น ที่อุณหภูมิ 20 K ของชั้นงาน a) A และ b) B.....	52
4.2	ผลจากการหาค่ายอดพลังงานจาก Gaussian curve ของชั้นงาน a) A และ b) B ซึ่งทำการทดลองวัด PL ที่อุณหภูมิ 20 K และกำลังของเลเซอร์เป็น 160 mW	53
4.3	ความเข้มของค่ายอดพลังงานของชั้นงาน A แบบ normalized ด้วยค่าพลังงาน s.....	54
4.4	ความเข้มของค่ายอดพลังงานของชั้นงาน B แบบ normalized ด้วย A) พลังงาน s และ b) พลังงาน s'	55
4.5	ผลการวัด PL แบบปรับอุณหภูมิของชั้นงาน เมื่อกำลังของแสงเลเซอร์คงที่ ที่ 160 mW โดยภาพบนแสดงข้อมูลดิบชั้นงาน a) A และ b) B ในขณะที่ภาพล่างแสดงข้อมูลที่ถูกระบุ normalized กับยอดพลังงานแรกของชั้นงาน c) A และ d) B.....	56
4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ายอดพลังงานและอุณหภูมิของชั้นงาน a) A และ b) B	57
4.7	ผลการคำนวณหาพลังงานจากการเปลี่ยนส่วนประกอบทางเคมีของ $In_xGa_{1-x}As$ QD เทียบกับค่ายอดพลังงาน s ที่วัดได้จากเทคนิค PL ของชั้นงาน a) A และ b) B.....	59
4.8	ผลการวัด PL (เส้นทึบ) Gaussian Fit ของยอดพลังงานแรก (เส้นประ) และโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบหนึ่งมิติในแนวดิ่ง (รูปแทรก) ของ a) ชั้นงาน A จากการกำหนดให้ $H= 2.5$ nm และ b) ชั้นงาน B จากการกำหนดให้ $H=4.5$ (สำหรับ s) และ 4 nm (สำหรับ s').....	60
4.9	กราฟแสดงความผลการคำนวณค่าพลังงาน GS จากโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์แนวดิ่ง (■) เทียบกับผล PL (—) ที่อุณหภูมิต่างๆ ของชั้นงาน a) A และ b) B.....	61

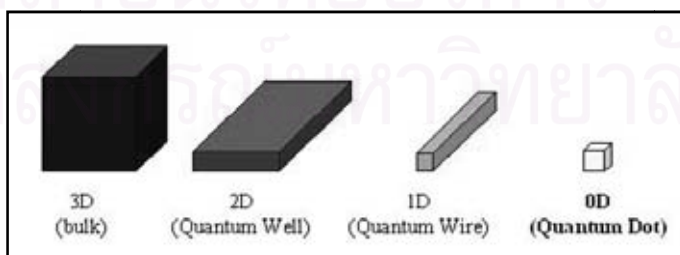
- 4.10 ภาพตัดขวางของโครงสร้าง QD ที่ใช้ในการจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพใน 1 มิติ โดยอาศัยพารามิเตอร์ที่สำคัญในแนวตั้งคือ H และ x และสำหรับแนวนอนคือ W , x และ y62
- 4.11 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบในแนวตั้ง (ซ้าย) และแนวนอน (ขวา) ที่สอดคล้องกับ 9 ผลการวัดทางแสง PL ของชั้นงาน a) A และ b) B.....63
- 4.12 กราฟเปรียบเทียบค่าออกพลังงานที่ได้จากการคำนวณกับผลการวัด PL ของ a) ชั้นงาน A และ b) ชั้นงาน B ที่อุณหภูมิต่างๆ.....65
- 4.13 กราฟแสดงค่าผลต่างพลังงาน s-p และ p-d ที่ได้จากการคำนวณกับผลการวัด PL ที่อุณหภูมิต่างๆ.....66
- 4.14 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบหนึ่งมิติของชั้นงาน A และสรุปพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสำหรับ โครงสร้างเก่าและใหม่.....67
- 4.15 กราฟเปรียบเทียบ a) ค่าพลังงาน GS b) ค่าความต่างพลังงาน s-p c) ค่าความต่างพลังงาน p-d ของผลการคำนวณโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบเก่า แบบใหม่ กับผลการวัด PL ที่อุณหภูมิต่างๆ ของชั้นงาน A.....68
- 4.16 แสดงผลการคำนวณค่าความต่างพลังงานของ a) ควอนตัมดอตขนาดใหญ่ และ b) ควอนตัมดอตขนาดเล็กที่อุณหภูมิต่างๆ.....69
- 4.17 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบหนึ่งมิติของชั้นงาน B และสรุปพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสำหรับ โครงสร้างเก่าและใหม่.....70
- 4.18 กราฟเปรียบเทียบ a) ค่าพลังงาน GS b) ค่าความต่างพลังงาน s-p c) ค่าความต่างพลังงาน p-d และ d) ค่าความต่างพลังงาน s'-p' ของผลการคำนวณโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์แบบเก่า แบบใหม่ กับผลการวัด PL ที่อุณหภูมิต่างๆ ของชั้นงาน B.....71
- 4.19 ผลการวัดความสูงโดยการทำ Line Scan และผลการวัดผิวหน้า จากเทคนิค AFM ของ a) ชั้นงาน A และ b) ชั้นงาน B72

บทที่ 1

บทนำ

สารกึ่งตัวนำถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางเช่นสิ่งประดิษฐ์ทางไฟฟ้า หรือเป็นอุปกรณ์สำคัญ พื้นฐานทางไฟฟ้า เนื่องจากสารกึ่งตัวนำมีคุณสมบัติที่เด่นกว่าตัวนำทางไฟฟ้าหลายประการ ได้แก่ สามารถใส่สารเจือปน (Doping) ในสารกึ่งตัวนำสำหรับเปลี่ยนคุณสมบัติการนำไฟฟ้า คุณสมบัติต่างๆที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทำให้สามารถนำมาประยุกต์เพื่อประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ หรือจำพวกสิ่งประดิษฐ์ไวงาน เช่น ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า (Field Effect Transistor) เป็นต้น

อุปกรณ์ทางไฟฟ้าส่วนมากถูกออกแบบให้มีขนาดที่กระทัดรัดหรือเล็กลงเรื่อยๆ เพื่อสะดวกในการใช้งานหรือประหยัดวัสดุ จึงมีการศึกษาและทดลองเพื่อทดสอบคุณสมบัติต่างๆของวัสดุที่มีขนาดเล็กลงว่าจะเปลี่ยนแปลงอย่างไร ซึ่งขนาดของวัสดุสามารถถูกจำแนกตามมิติที่พาหะอิสระสามารถเคลื่อนที่ได้เป็น แบบ 3 มิติ แบบ 2 มิติ แบบ 1 มิติ และ แบบ 0 มิติ ดังรูปที่ 1 แบบ 3 มิติจะเป็นขนาดใหญ่ที่สุดหรือเรียกได้ว่าเป็นก้อน (Bulk) พาหะจะเคลื่อนที่ได้ในทุกทิศทาง แบบ 2 มิติจะมีขนาดรองลงมา เรียกว่าควอนตัมเวลล์ (Quantum Well) พาหะจะสามารถเคลื่อนที่ได้เพียง 2 มิติหรือในระนาบเดียวเท่านั้น แบบ 1 มิติวัสดุจะมีรูปร่างเป็นแท่งเรียกว่าควอนตัมไวร์ (Quantum Wire) พาหะไฟฟ้าจะสามารถเคลื่อนที่ได้เพียงมิติเดียว และแบบ 0 มิติวัสดุจะเป็นเสมือนจุดเรียกว่าควอนตัมดอต (Quantum Dot) ซึ่งพาหะถูกจำกัดการเคลื่อนที่ทุกทิศทาง



รูปที่ 1.1 ลักษณะของวัสดุขนาดต่างๆ

คุณลักษณะต่างๆของสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบควอนตัมดอต (Quantum Dot) และแบบควอนตัมเวลล์ (Quantum Well) มีการศึกษาอย่างกว้างขวาง [1-4] ทั้งทางด้านโครงสร้าง [5, 6] ขนาดต่างๆ หรือการใช้วัสดุที่แตกต่างกันเพื่อหาคุณสมบัติของโครงสร้างนั้นๆ โดยที่คุณสมบัติพิเศษอย่างหนึ่งคือพาหะนำไฟฟ้าสามารถครอบครองพลังงาน (E) ได้บางค่าเท่านั้น [7-10] ซึ่งเป็นไปตามสมการการแผ่พลังงานของแมกซ์ พลังค์ (Planck's Radiation Theory)

$$E = nhf$$

เมื่อ n เป็นจำนวนเต็มและเรียกว่าเลขควอนตัมหลัก (Principal Quantum Number) h คือค่าคงที่ของพลังค์ และ f คือความถี่ โครงสร้างควอนตัมจึงสามารถเปล่งแสงหรือดูดกลืนแสงได้บางค่าพลังงานเท่านั้น ซึ่งต่างจากวัสดุก้อนขนาดใหญ่ที่พาหะนำไฟฟ้าสามารถครอบครองพลังงานได้แบบค่าต่อเนื่อง คุณสมบัติพิเศษนี้ได้รับผลมาจากการที่พาหะนำไฟฟ้าถูกจำกัดทิศทางเคลื่อนที่ให้มีการเคลื่อนที่ได้เพียงบางทิศทางเท่านั้น เช่นในโครงสร้างแบบควอนตัมเวลล์ พาหะนำไฟฟ้าจะสามารถเคลื่อนที่ได้เพียงสองมิติ หรืออาจกล่าวได้ว่าพาหะถูกจำกัดการเคลื่อนที่หนึ่งมิติ และในโครงสร้างแบบควอนตัมดอต พาหะนำไฟฟ้าจะถูกจำกัดทิศทางในการเคลื่อนที่ทั้งสามมิติ ดังนั้นสิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้างควอนตัมดอตหรือควอนตัมเวลล์เป็นส่วนประกอบสำคัญ จึงเหมาะสำหรับการสร้างสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (Optoelectronics) เช่น สิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสง (Photodetector) เลเซอร์ (Laser) และไดโอดเปล่งแสง (LED) เป็นต้น

สิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสงสามารถตรวจวัดความเข้มและความยาวคลื่นของแสง โดยที่แสงหรือโฟตอนที่เข้ามาตกกระทบกับสิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสงจะต้องมีพลังงานที่มีค่ามากกว่า หรือเท่ากับช่องแถบพลังงานต้องห้าม (Energy Gap: E_g) สิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสงจึงจะสามารถตอบสนองได้ โดยพลังงานของแสงจะกระตุ้นพาหะจากสภาวะพื้น (Ground State) ไปสู่สภาวะถูกกระตุ้น (Excited State) ในกรณีของวัสดุควอนตัม หรือจากแถบวาเลนซ์ (Valence Band) ไปสู่แถบคอนดักชัน (Conduction Band) ในกรณีของวัสดุแบบ bulk ส่งผลให้สิ่งประดิษฐ์ที่สร้างจากวัสดุแบบ bulk หรือวัสดุแบบควอนตัมสามารถวัดความยาวคลื่นและความเข้มแสงได้

สิ่งประดิษฐ์ควอนตัมดอตและควอนตัมเวลล์ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยมี การศึกษาสิ่งประดิษฐ์แบบควอนตัมเวลล์ก่อน เพราะควอนตัมเวลล์มีขนาดโครงสร้างที่ใหญ่กว่าควอนตัมดอตจึงผลิตได้ง่ายกว่า แต่สิ่งประดิษฐ์แบบควอนตัมดอตมีข้อได้เปรียบแบบควอนตัมเวลล์หลายด้าน ได้แก่ โพรราไรเซชัน อัตราขยายของกระแส กระแสมีด และระยะเวลาก่อนชน [11]

ข้อได้เปรียบของควอนตัมคอตเรื่องโพราไรเซชันทำให้ควอนตัมคอต สามารถตรวจรับแสง ที่ตกกระทบแบบตั้งฉากกับควอนตัมคอตหรือตกกระทบในทิศของการปลูกได้ แต่ควอนตัมเวลล์ ไม่สามารถทำได้ [12-14] ดังนั้นเมื่อสร้างสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงแบบควอนตัมเวลล์จึงต้องทำ เกรตติ้งเพื่อเบี่ยงเบนแสงที่ตกกระทบแบบตั้งฉากให้หักเหไปทิศอื่นเพื่อให้สามารถตรวจรับได้ ซึ่ง กระบวนการทำเกรตติ้งจะมีความสลับซับซ้อนมากแม้ว่าจะเป็นการเพิ่ม โครงสร้างขึ้นมาเพียงชั้น เดียวก็ตาม

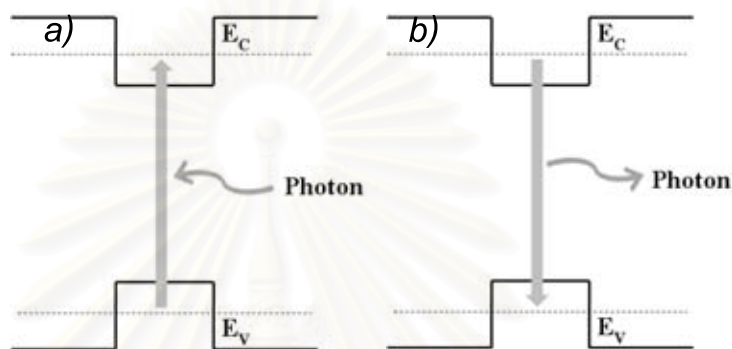
อัตราขยายกระแสของควอนตัมคอตจะมีค่ามากกว่าควอนตัมเวลล์ [15] เนื่องจากความสามารถ ในการดูดกลืนแสงที่มากกว่าของควอนตัมคอต ดังที่ได้อธิบายไปข้างต้น คือ ควอนตัมคอตสามารถ ตรวจรับแสงได้ทุกทิศทาง ต่างจากควอนตัมเวลล์ที่ไม่สามารถตรวจรับแสงที่ตกกระทบตั้งฉากได้ หรือตรวจรับแสงได้บางทิศทางเท่านั้น

โดยทั่วไปควอนตัมคอตจะมีค่ากระแสมืด (Dark Current) ที่น้อยกว่าควอนตัมเวลล์ [16, 17] จึงสามารถตรวจรับแสงได้แม้ว่าแสงที่มากกระทบจะมีค่าความเข้มน้อยกว่าก็ตาม เนื่องจาก ควอนตัมคอตมีคุณสมบัติจำกัดทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะนำไฟฟ้าทั้งสามมิติ จึงต้องใช้พลังงาน มากขึ้นเพื่อกระตุ้นให้พาหะเป็นพาหะอิสระ จึงทำให้ควอนตัมคอตมีความสามารถในการตรวจรับ แสงความเข้มน้อยได้ดีกว่า ดังนั้นควอนตัมคอตมีความไวต่อการตอบสนองดีกว่า [18, 19] นอกจากนี้ความไวต่อการตอบสนองยังขึ้นอยู่กับขนาดของโครงสร้างควอนตัมคอตและ ควอนตัมเวลล์อีกด้วย

ข้อได้เปรียบข้อสุดท้ายของควอนตัมคอต คือ พาหะอิสระมีอายุพาหะ (Carriers Lifetime) สูงกว่าในควอนตัมเวลล์ เนื่องจากการจำกัดทิศทางการเคลื่อนที่ทั้งสามทิศทาง ซึ่งค่าระยะเวลานี้จะมีผลโดยตรงกับการตอบสนองต่อแสงที่มีค่าเพิ่มขึ้น และทำให้โครงสร้างควอนตัมคอตสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่าโครงสร้างควอนตัมเวลล์ด้วย

เมื่อนำควอนตัมคอตและ/หรือควอนตัมเวลล์มาใช้ร่วมกับสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสง ทำให้ สิ่งประดิษฐ์มีความจำเพาะเจาะจงในการตรวจรับแสง โดยสามารถรับแสงได้บางความยาวคลื่น เท่านั้น ต่างจากสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงแบบ Bulk พาหะภายในสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงแบบ ทั่วไปและสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงที่มีโครงสร้างแบบควอนตัมคอตหรือควอนตัมเวลล์จะถูก กระตุ้นจากแถบวาเลนซ์ (Valence Band) ไปยังแถบคอนดักชัน (Conduction Band) [20, 21] ดัง

แสดงในรูปที่ 1.2 a) โดยที่คุณสมบัติพิเศษเป็นผลมาจากคุณสมบัติของโครงสร้างควอนตัมดอทและควอนตัมเวลล์ ด้วยเหตุนี้สิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสงที่มีโครงสร้างแบบควอนตัมดอทและควอนตัมเวลล์จึงมีความจำเพาะเจาะจงต่อแสงบางความยาวคลื่นกว่าสิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสงแบบธรรมดาทั่วไป



รูปที่ 1.2 a) กระบวนการดูดกลืนแสง และ b) กระบวนการเปล่งแสง

สิ่งประดิษฐ์ที่มีคุณสมบัติการเปล่งแสงนั้นจะมีกระบวนการทำงานตรงข้ามกับสิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสง คือจะต้องมีการฉีดพาหะอิสระเข้าไปในโครงสร้างโดยเฉพาะในแถบ CB เมื่อพาหะมีการเปลี่ยนระดับพลังงานจากแถบคอนดักชันสู่แถบวาเลนซ์ดังรูปที่ 1.2 b) จะทำให้เกิดการคายพลังงานออกมาในรูปของแสงหรือโฟตอน ในกรณีที่วัสดุเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด direct พลังงานแสงที่เปล่งออกมาจะขึ้นอยู่กับความกว้างของแถบพลังงานต้องห้าม ยิ่งแถบพลังงานต้องห้ามมีค่ามากก็จะมีเปล่งแสงที่มีพลังงานมากออกมา โดยสิ่งประดิษฐ์เปล่งแสงแบบควอนตัมนี้จะมีลักษณะเด่นคือความบริสุทธิ์ของสีจะสูงมาก และสามารถวัดได้จากความกว้างของ FWHM (Full-Width-at-Half-Maxima) [22, 23]

ควอนตัมดอทสามารถสร้างได้จากการปลูกวัสดุที่เป็นคนละชนิดกับแผ่นฐาน [24] เช่น อินเดียมอาร์เซไนด์บนแกลเลียมอาร์เซไนด์ (InAs/GaAs) [25] อินเดียมอาร์เซไนด์บนอินเดียมฟอสไฟด์ (InAs/InP) [26] หรือ แกลเลียมไนไตรด์บนอะลูมิเนียมแกลเลียมไนไตรด์ (GaN/AlGaN) [27] เป็นต้น ควอนตัมดอทส่วนมากถูกนำมาใช้ในโครงสร้างพื้นฐานของสิ่งประดิษฐ์ทางแสงต่างๆ ได้แก่ โครงสร้างแบบรอยต่อ p-i-n และ รอยต่อ p-n โดยที่โครงสร้างอาจมีการเปลี่ยนแปลง

รายละเอียดเล็กน้อยเช่น ควอนตัมดอตถูกเจือปนโดยสารชนิดอื่น หรือมีการสร้างชั้นกำแพงบางๆ ขึ้นมาเพื่อให้สามารถใช้ได้ที่อุณหภูมิสูง เป็นต้น ควอนตัมดอตชนิด InAs ส่วนใหญ่จะมีคุณสมบัติทางแสงอยู่ในย่านอินฟราเรด เช่น ช่วงกลางของอินฟราเรด (mid-infrared: 3-5 μm) และช่วงไกลของอินฟราเรด (far-infrared: 8-12 μm) [28-30] ซึ่งสอดคล้องกับช่องว่างพลังงาน E_g และขนาดควอนตัมดอตของ InAs

โครงสร้างควอนตัมดอตมีหลายประเภท เช่น ควอนตัมดอตเดี่ยว (Single Dot) [31] ควอนตัมดอตคู่ (Dot Pair) [32] หรือ ควอนตัมดอตโมเลกุล (Quantum Dot Molecule : QDM) [33] โดยโครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุลยังเป็นโครงสร้างที่ค่อนข้างใหม่ ความเข้าใจในธรรมชาติการตอบสนองทางแสงยังไม่สมบูรณ์ ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาคุณสมบัติทางแสงของควอนตัมดอตโมเลกุลที่ขึ้นกับอุณหภูมิเพื่อให้ได้มาซึ่งโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพใน 1 มิติ (Effective 1D Electronic Structure) ของควอนตัมดอตโมเลกุล ซึ่งมีประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้งานสำหรับการออกแบบสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ในอนาคต

การทดลองนี้ได้นำควอนตัมดอตโมเลกุลที่ปลูกด้วยระบบการปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล (MBE) ซึ่งทราบลักษณะทางกายภาพและรูปแบบการเรียงตัวของควอนตัมดอตโมเลกุลจากการวัดผิวหน้าด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM) มาวัดลักษณะทางแสงโดยโฟโตลูมิเนสเซนส์ (Photoluminescence: PL)

การทดสอบคุณสมบัติทางแสงของควอนตัมดอตโมเลกุล โดยการเปลี่ยนอุณหภูมิต่างๆ เนื่องจากอุณหภูมิจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ เมื่อโครงสร้างทางไฟฟ้าเปลี่ยน ค่าพลังงานที่อิเล็กตรอนสามารถครอบครองได้ก็จะเปลี่ยนไป ทำให้คุณสมบัติด้านการเปล่งแสงเปลี่ยนไป [34, 35]

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงที่ได้จากการทดลอง PL จะกระทำโดยการจำลองโครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุล เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Structure) กับคุณสมบัติทางแสง โดยซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการจำลองคือ โปรแกรมหนึ่งมิติของปัวส์ซอง (1D-Poisson) ซึ่งจะใช้ผลการแก้สมการชโรดิงเงอร์ (Schrodinger Equation) [36-38] และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) สำหรับหาค่าพลังงานไอเกน (Eigen Energy) ที่อิเล็กตรอน

และโพลสามารถครอบครองได้ จึงสามารถวิเคราะห์ถึงสาเหตุที่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางแสงของควอนตัมดอทโมเลกุลได้

กระบวนการทดลองและการจำลองข้างต้น สามารถทำให้เข้าใจถึงคุณสมบัติเชิงแสงของควอนตัมดอทโมเลกุลที่แปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ ผลการศึกษาจะทำให้สามารถนำควอนตัมดอทโมเลกุลไปประยุกต์ใช้เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางแสงที่มีความเหมาะสมได้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบไปด้วย ทฤษฎีความรู้พื้นฐานต่างๆ ในบทที่ 2 ได้แก่ โครงสร้างระดับควอนตัม การปลูกควอนตัมดอทด้วยวิธีกระบวนการปลูกผลึกอิมัลชันจากล้าโมเลกุล การวัดคุณสมบัติทางแสง การวัดผิวหน้าด้วยเทคนิคแรงอะตอม และโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ บทที่ 3 เป็นการทดลองและการจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งกล่าวถึง ผลการทดลองของคุณสมบัติทางแสงและลักษณะผิวหน้า สมการและตัวแปรต่างๆ ลำดับวิธีการคำนวณ และการกำหนดโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิผลแบบหนึ่งมิติ บทที่ 4 เป็นผลการทดลองและอภิปราย ตามด้วยบทสรุปของวิทยานิพนธ์ในบทที่ 5



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐาน

บทนี้จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานต่างๆที่จำเป็นกับวิทยานิพนธ์ในฉบับนี้ ซึ่งประกอบด้วย คุณสมบัติทางกายภาพของโครงสร้างแบบต่างๆ ในระดับนาโนเมตร กระบวนการวิจัยภายใน วิทยานิพนธ์นี้มีลำดับขั้นตอนดังนี้ เริ่มต้นจากปลูกควอนตัมดอทโมเลกุลด้วยกระบวนการ ปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุล หลังจากปลูกควอนตัมดอทโมเลกุลเสร็จแล้วจะนำโครงสร้าง ควอนตัมดอทโมเลกุลที่ปลูกได้มาวัดคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ การวัดคุณสมบัติการเปล่งแสง การวัด ผิวหน้าชิ้นงานด้วยเทคนิคแรงอะตอม และศึกษาถึงโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบหนึ่ง มิติ เพื่อให้สอดคล้องกับลำดับการทำวิจัยที่ได้กล่าวมา ภายในบทนี้จึงกล่าวถึง พื้นฐานความเข้าใจ ของโครงสร้างขนาดนาโนเมตร วิธีการปลูกควอนตัมดอทด้วยกระบวนการปลูกผลึกอพิแทกซ์จาก ลำโมเลกุล วิธีการวัดและผลการวัดคุณสมบัติทางแสง การวัดผิวหน้าและผลการวัดผิวหน้าด้วย เทคนิคแรงอะตอม และโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ ตามลำดับ

2.1 โครงสร้างขนาดนาโนเมตร

คุณสมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้าของวัสดุต่างๆในระดับนาโนเมตรนั้น จะถูกกำหนด ด้วยลักษณะของโครงสร้างในระดับนาโนเมตรของวัสดุชิ้นนั้นๆ โดยที่พาหะนำไฟฟ้าภายในวัสดุ จะเคลื่อนที่ในทิศทางที่ถูกจำกัดมากขึ้นเมื่อวัสดุมีขนาดเล็กลง ดังนั้นลักษณะโครงสร้างของวัสดุใน ระดับนาโนสามารถถูกแบ่งประเภทตามจำนวนทิศทางที่ถูกจำกัดการเคลื่อนที่ของพาหะนำไฟฟ้า ซึ่งได้แก่ ควอนตัมเวลล์ (Quantum Well) ควอนตัมไวร์ (Quantum Wire) และควอนตัมดอท (Quantum Dot) ซึ่งพาหะถูกจำกัดทิศทางเคลื่อนที่ใน 1 มิติ 2 มิติ และ 3 มิติตามลำดับ

2.1.1 ควอนตัมเวลล์

โครงสร้างนี้พาหะนำไฟฟ้าถูกจำกัดทิศทางเคลื่อนที่ 1 มิติ นั่นคือ พาหะนำไฟฟ้า สามารถเคลื่อนที่ได้เพียง 2 มิติ หรือระนาบ x-y เท่านั้น ซึ่งมีพลังงาน E_{QW} ดังสมการที่ (2.1) และ ความหนาแน่นพลังงาน D_{QW} ดังสมการที่ (2.2) ซึ่งเป็นแบบขั้นบันได ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (b)

$$E_{QW} = E(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} + E_{n_z} = \frac{\hbar^2}{2m^*} \left[k_{//}^2 + \left(\frac{n_z \pi}{L_z} \right)^2 \right] \quad (2.1)$$

$$D_{QW}(E) = \frac{m^*}{\pi \hbar^2 L_{QW}} \sum_{n_z} \Theta(E - E_{n_z}) \quad (2.2)$$

โดยที่ $k_{//}^2 = k_x^2 + k_y^2$

Θ คือ Heaviside's unit step function

$$n_z = 1, 2, 3, \dots$$

L_{QW} คือ ผลรวมความหนาของ Well และ Barrier regime

จากสมการ (2.1) จะเห็นได้ว่าพลังงานแต่ละระดับจะแตกต่างกันมากขึ้นเมื่อความกว้างของ Well มีค่ามากขึ้น

2.1.2 ควอนตัมไวร์

โครงสร้างนี้พาหะนำไฟฟ้าถูกจำกัดทิศทางการเคลื่อนที่ 2 มิติ นั่นคือ พาหะนำไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ได้เพียง 1 มิติ หรือทิศ x เท่านั้น ซึ่งมีพลังงาน E_{QWR} ดังสมการที่ (2.3) และความหนาแน่นพลังงาน D_{QWR} ดังสมการที่ (2.4) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (c)

$$E_{QWR} = E(k) = \frac{\hbar^2 k_1^2}{2m^*} + E_{n_y} + E_{n_z} = \frac{\hbar^2}{2m^*} \left[k_1^2 + \left(\frac{n_y \pi}{L_y} \right)^2 + \left(\frac{n_z \pi}{L_z} \right)^2 \right] \quad (2.3)$$

$$D_{QWR}(E) = \frac{N_{wi} \sqrt{2m^*}}{\pi \hbar} \sum_{n_y, n_z} \frac{1}{\sqrt{E - E_{n_y} - E_{n_z}}} \quad (2.4)$$

โดยที่ $k_1^2 = k_x^2$

$$n_y, n_z = 1, 2, 3, \dots$$

N_{wi} คือ ความหนาแน่นพื้นที่ของควอนตัมไวร์

2.1.3 ควอนตัมดอต

โครงสร้างควอนตัมดอตพาหะนำไฟฟ้าจะถูกจำกัดการเคลื่อนที่ทั้ง 3 ทิศทาง และค่าพลังงานที่พาหะนำไฟฟ้าสามารถครอบครองได้จะมีได้เพียงบางค่าเท่านั้น ซึ่งมีพลังงาน E_{QD} ดังสมการที่ (2.5) และความหนาแน่นพลังงาน D_{QD} ดังสมการที่ (2.6) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (d)

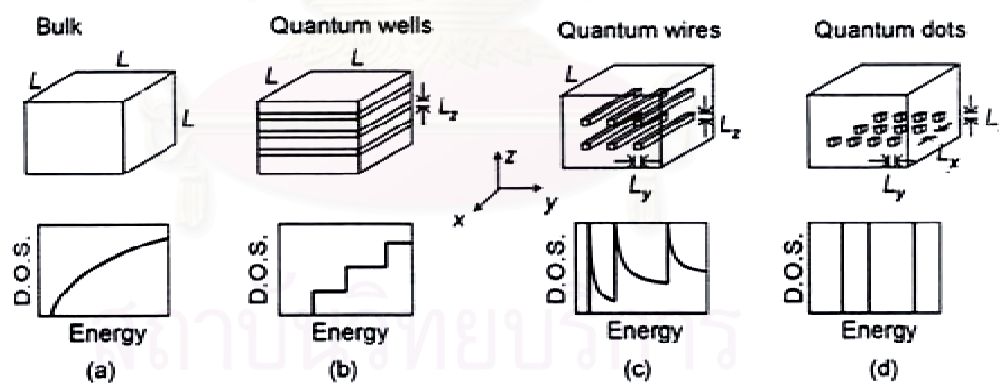
$$E_{QD} = E_{n_x} + E_{n_y} + E_{n_z} = \frac{\hbar^2}{2m^*} \left[\left(\frac{n_x \pi}{L_x} \right)^2 + \left(\frac{n_y \pi}{L_y} \right)^2 + \left(\frac{n_z \pi}{L_z} \right)^2 \right] \quad (2.5)$$

$$D_{QD}(E) = 2N_D \sum_{n_x, n_y, n_z} \delta(E - E_{n_x} - E_{n_y} - E_{n_z}) \quad (2.6)$$

δ คือ เดลต้าฟังก์ชัน (Delta Function)

N_D คือ ปริมาตรความหนาแน่นของควอนตัมดอต

เนื่องจากพลังงานที่พาหะนำไฟฟ้าสามารถครอบครองได้มีลักษณะเป็นค่าไม่ต่อเนื่อง เหมือนกับคุณสมบัติของพาหะนำไฟฟ้าในระดับอะตอม ดังนั้น ควอนตัมดอตจึงถูกเรียกอีกชื่อว่า “อะตอมเสมือน” (Artificial Atom)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางกายภาพและความหนาแน่นของสถานะของ (a) วัสดุขนาดใหญ่ (b)

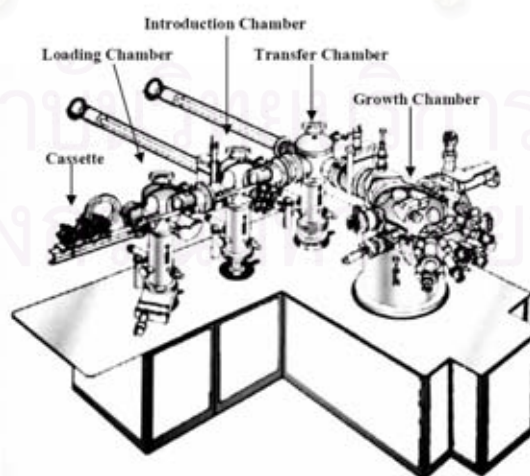
ควอนตัมเวลล์ (c) ควอนตัมไวร์ และ (d) ควอนตัมดอต [39]

2.2 การปลูกควอนตัมดอตด้วยวิธีกระบวนการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล

ชิ้นงานถูกเตรียมด้วยกระบวนการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxial : MBE) ซึ่งเป็นกระบวนการปลูกชั้นผลึกของสารประกอบที่ต้องการลงบนแผ่นฐาน (Substrate) ที่เป็นผลึกเดี่ยว (Single Crystal) โดยการพ่นลำโมเลกุลของสารประกอบที่ต้องการจะปลูกไปยังแผ่นฐาน กระบวนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบที่ทำการปลูกและแผ่นฐานจะอยู่ในสถานะสุญญากาศระดับสูงพิเศษ (Ultra-High Vacuum) โดยที่โครงสร้างที่เกิดขึ้นบนแผ่นฐานนอกจากจะขึ้นอยู่กับสารประกอบที่ต้องการปลูกและแผ่นฐานแล้วยังขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น อัตราส่วนของสารประกอบที่ต้องการปลูกซึ่งสามารถควบคุมด้วยความดันไอของลำโมเลกุล ค่าอุณหภูมิแผ่นฐานที่ทำการปลูก ความสะอาดของผิวหน้าแผ่นฐาน เป็นต้น ซึ่งหัวข้อนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ระบบการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล การเกิดควอนตัมดอต

2.2.1 ระบบการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล

ระบบปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล (MBE) ในงานวิจัยชิ้นนี้เป็นระบบของบริษัท RIBER รุ่น 32P ซึ่งมีส่วนประกอบหลักแบ่งเป็น 4 ห้อง (Chamber) ได้แก่ ห้องบรรจุผลึกแผ่นฐาน (Lock Load Chamber) ห้องเตรียมแผ่นฐาน (Introduction Chamber) ห้องเคลื่อนย้ายแผ่นฐาน (Transfer Chamber) และห้องปลูกผลึก (Growth Chamber) ดังแสดงในรูปที่ 2.2

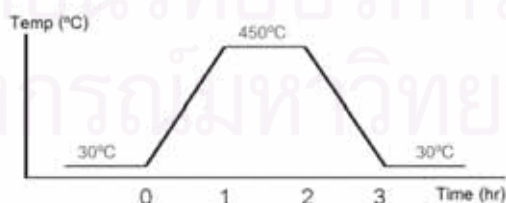


รูปที่ 2.2 โครงสร้างระบบปลูกผลึกจากลำโมเลกุล RIBER รุ่น 32P

ห้องแต่และห้องจะถูกเชื่อมและกันด้วยประตู (Gate Valve) ประตูจะถูกเปิดเมื่อต้องการเคลื่อนย้ายชิ้นงานไปยังห้องต่างๆ และจะปิดเมื่อต้องการให้แต่ละห้องทำงานแยกออกจากกัน

ห้องบรรจุแผ่นฐานจะอยู่นอกสุดใช้สำหรับเป็นทางเข้าของแผ่นฐานเพื่อนำไปปลูกและเป็นทางออกสำหรับชิ้นงานที่ทำการปลูกผลึกเสร็จเรียบร้อยแล้ว ห้องนี้จึงต้องมีทั้งสภาวะความดันบรรยากาศเมื่อเปิดประตูระหว่างห้องบรรจุแผ่นฐานกับภายนอก และสภาวะสุญญากาศเมื่อเปิดประตูระหว่างห้องบรรจุแผ่นและห้องเตรียมแผ่นฐาน ด้วยเหตุนี้ห้องนี้จึงต้องมีปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump) เพื่อสำหรับปรับให้ห้องบรรจุแผ่นฐานเป็นสภาวะสุญญากาศ โดยที่ปั๊มสุญญากาศมีด้วยกัน 2 ชุด คือ ปั๊มไดอะแฟรม (Diaphragm Pump) และ ปั๊มดูดซับ (Sorption Pump) ปั๊ม 2 ชุดนี้จะสามารถสร้างสภาวะสุญญากาศปานกลาง (10^{-4} Torr) ในกรณีต้องการเปิดประตูระหว่างห้องบรรจุแผ่นฐานกับภายนอกจะทำการเติมก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ในห้องบรรจุแผ่นฐาน

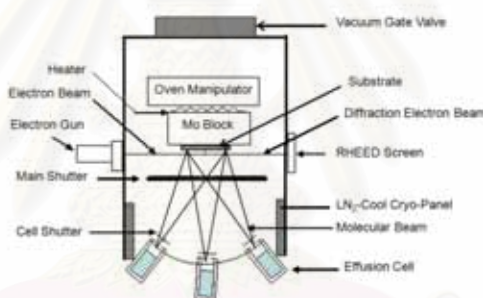
ห้องเตรียมแผ่นฐานมีหน้าที่สำหรับทำความสะอาดแผ่นฐาน โดยการกำจัดไอน้ำที่ผิวหน้าแผ่นฐานก่อนการปลูก ด้วยการให้ความร้อนแก่แผ่นฐาน ซึ่งจะเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นฐานจาก 30°C ไปเป็น 450°C และคงไว้ที่ 450°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงใช้เวลาอีก 1 ชั่วโมงสำหรับเปลี่ยนอุณหภูมิของแผ่นฐานกลับมาเป็น 30°C ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เพื่อให้ไอน้ำระเหยออกจากแผ่นฐาน ในห้องเตรียมแผ่นฐานนี้มีสภาวะสุญญากาศด้วยเช่นกัน ดังนั้นห้องเตรียมแผ่นฐานจึงมีปั๊มไอออน (Ion Pump) และ ปั๊มไทเทเนียม (Titanium Sublimation Pump) เพื่อรักษาความเป็นสุญญากาศและกำจัดสารสกปรกที่ เช่น ไอน้ำ ออกไป



รูปที่ 2.3 ลักษณะอุณหภูมิกับเวลาสำหรับทำความสะอาดแผ่นฐาน

ห้องเคลื่อนย้ายแผ่นฐานจะเป็นห้องสำหรับนำแผ่นฐานจากห้องเตรียมแผ่นฐานไปยังห้องปลูกผลึก โดยระบบการปลูกนี้แผ่นฐานจะถูกเคลื่อนย้ายโดยการนำแผ่นฐานไว้บนพาหนะใส่แผ่นฐาน (Cassette) โดยแผ่นฐานจะถูกยึดด้วยตัวยึดแผ่นฐาน (Substrate Holder) ตัวนำพาหนะใส่แผ่นฐานสามารถเคลื่อนที่ได้ระหว่างห้องบรรจุแผ่นฐาน ห้องเตรียมแผ่นฐาน และห้องเคลื่อนย้ายแผ่นฐาน แต่การเคลื่อนย้ายจากห้องเคลื่อนย้ายแผ่นฐานไปยังห้องปลูกผลึกจะใช้ก้านแม่เหล็ก (Magnetic Arm) เปลี่ยนตำแหน่งแผ่นฐานระหว่างตัวนำพาหนะใส่แผ่นฐานและที่ยึดสำหรับปลูกในห้องปลูกผลึก

ห้องปลูกผลึกประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก ได้แก่ เซลล์บรรจุสาร (Effusion Cell) เครื่องให้ความร้อน (Heater) อุปกรณ์ควบคุม (Monitoring Equipment) ระบบสุญญากาศ (Vacuum System) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบภายในห้องปลูกผลึก

ภายในห้องปลูกจะมีจำนวนเซลล์บรรจุสารอยู่หลายเซลล์ แต่ละเซลล์จะทำหน้าที่เก็บสารที่ต้องการปลูกไว้ โดยที่ 1 เซลล์จะเก็บสารไว้เพียง 1 ธาตุเท่านั้น เซลล์บรรจุสารจะทำจาก Pyrolytic Boron Nitride (PBN) ด้านหน้าของเซลล์บรรจุสารจะมีบานเซลล์ (Cell Shutter) และบานหลัก (Main Shutter) ทำหน้าที่ควบคุมการปิด-เปิดการฟุ้งไอของสารที่อยู่ในเซลล์และควบคุมการปิด-เปิดหน้าแผ่นชิ้นงานตามลำดับ

เครื่องให้ความร้อนทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่เซลล์บรรจุสาร เพื่อควบคุมอัตราเร็วของการปลูกผลึก ถ้าให้ความร้อนสูงกับเซลล์บรรจุสาร เซลล์นั้นก็จะมีฟุ้งไอของสารออกมาในปริมาณมาก

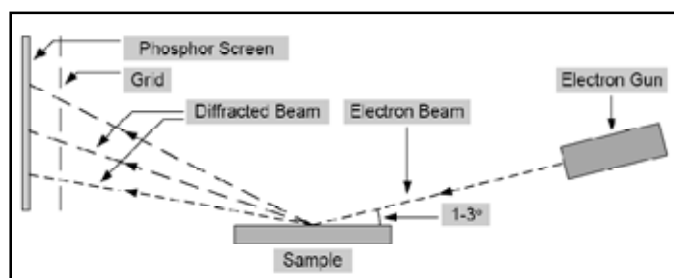
ซึ่งแสดงด้วยการวัดความดันไอ (Flux) ของสาร รวมทั้งการให้ความร้อนที่แตกต่างกันในแต่ละเซลล์ที่มีธาตุต่างกัน จะได้สารประกอบของธาตุนั้นๆ ซึ่งมีอัตราส่วนของธาตุขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใส่อีกด้วย นอกจากนี้จะมีการให้ความร้อนกับเซลล์บรรจุสารแล้ว ที่แผ่นฐานก็จะถูกให้ความร้อนด้วย เพราะโครงสร้างของผลึกที่ปลูกลงนั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแผ่นฐานด้วย

อุปกรณ์วัดคุมสามารถแบ่งแยกได้เป็น 4 ประเภท คือ อุปกรณ์วัดคุมอุณหภูมิ วัดคุมความดันไอของสาร วัดมวลของอนุภาค และ วัดสภาพของผิวหน้า อุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกผลึกมีความสำคัญอย่างมากเพราะหากอุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกเปลี่ยนไปไม่กี่องศาก็อาจทำให้ผลการปลูกแตกต่างกันออกไป ดังนั้นจึงมีคู่วัดอุณหภูมิ (Thermocouple) วัดอุณหภูมิบริเวณเซลล์บรรจุสาร และแผ่นฐานที่ทำการปลูก

ความดันไอของสารจะถูกวัดด้วยเครื่องวัดการเกิดไอออน (Ionization Gauge) การวัดความดันไอจะถูกวัด 2 บริเวณ คือการวัดที่ด้านหน้าของปั๊มไอออนเพื่อเป็นการวัดความดันไอพื้นหลัง (Background Pressure) และที่ด้านหน้าของแผ่นฐานเพื่อเป็นการวัดความดันไอสำหรับหาอัตราเร็วในการปลูก

การตรวจวัดชนิดของอนุภาคในห้องปลูกกระทำโดยใช้ เครื่องวิเคราะห์มวล (Quadrupole Mass Spectrometer) ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ว่ามีอนุภาคชนิดใดบ้างอยู่ในห้องปลูก ถ้าตรวจพบอนุภาคที่ไม่จำเป็นสำหรับการปลูก ผู้ทำการปลูกผลึกจะต้องรอให้ปั๊มดูดสารเจือปนเหล่านั้นออกจากห้องปลูกก่อนที่จะดำเนินการปลูกจริง

ระบบการปลูกผลึกมีระบบการแสดงผลการปลูกที่บริเวณผิวหน้าชิ้นงานในขณะที่กำลังทำการปลูก คือ ระบบการสร้างภาพที่ได้จากการสะท้อนของการหักเหลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง (Reflection High Energy Electron Diffraction; RHEED) ระบบนี้ประกอบด้วย ปืนยิงอิเล็กตรอน (Electron Gun) 20 keV ใช้สำหรับยิงใส่ผิวหน้าของชิ้นงานที่กำลังปลูกเพื่อให้สะท้อนไปตกกระทบบนฉากเรืองแสง (Fluorescent Screen) เป็นมุมแคบ ประมาณ $1-3^{\circ}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ภาพที่ตกกระทบบนฉากเรืองแสงจะบ่งบอกถึงสถานะของพื้นผิวว่าเรียบในระดับอะตอมหรือมีโครงสร้าง 3 มิติของควอนตัมคอตอยู่



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของระบบ RHEED

2.2.2 กลไกการเกิดควอนตัมดอต

โครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุลในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นควอนตัมดอตที่ก่อตัวขึ้นเอง (Self-Assamble) การเกิดควอนตัมดอตมีผลจากวัสดุที่ใช้ในการปลูกและแผ่นฐานมีค่าคงตัวผลึก (Lattice Constant) ที่มีค่าแตกต่างกัน ทำให้เกิดการไม่พอดีกันของค่าคงตัวผลึก (Lattice Mismatched) ทำให้วัสดุที่ปลูกบนแผ่นฐานเกิดความเครียด โดยอาจเกิดความเครียดแบบอัด (Compressive) หรือแบบดึง (Tensile) ทั้งในแนวระนาบ และ/หรือแนวตั้งฉากกับความสัมพันธ์กับค่าคงตัวผลึกของวัสดุที่ใช้ปลูกและแผ่นฐานดังนี้ [40]

ความเครียดในระนาบ ϵ_0

$$\epsilon_- = \epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \frac{(a_s - a_e)}{a_s} \quad (2.7)$$

โดยที่ a_e คือ ค่าคงตัวผลึกของวัสดุที่ปลูก

a_s คือ ค่าคงตัวผลึกของแผ่นฐาน

ความเครียดแนวตั้งฉากกับระนาบการปลูก

$$\epsilon_+ = \epsilon_{zz} = -\left(\frac{2\sigma}{1-\sigma}\right)\epsilon_- \quad (2.8)$$

โดยที่ σ คือ ค่า Poisson's Ratio

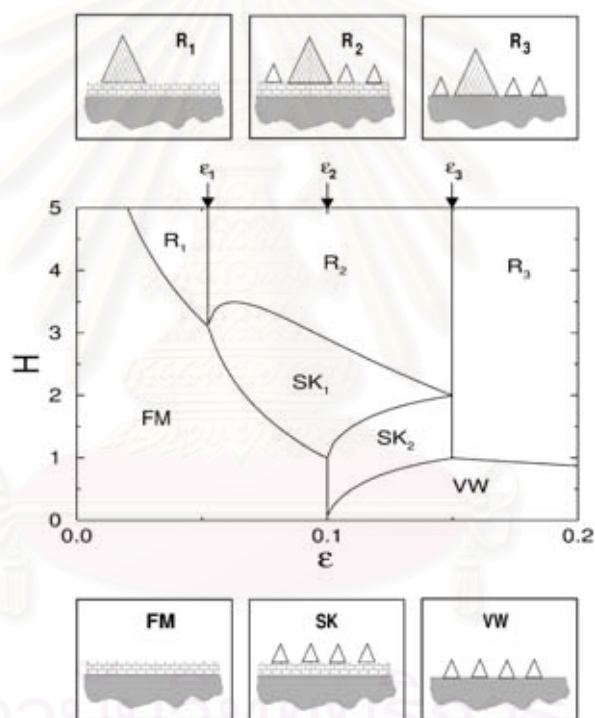
แรงเครียดรวม (Uniaxial Strain), ϵ_{ax}

$$\epsilon_{ax} = \epsilon_+ - \epsilon_- \quad (2.9)$$

แรง Hydrostatic, ϵ_{vol}

$$\epsilon_{vol} = \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz} \approx \epsilon_- \quad (3.0)$$

ค่าความเครียดรวม ϵ และค่า Hydrostatic H จะมีความสำคัญต่อค่าความหนาวิกฤติ (Critical Thickness) และต่อโหมดการเกิดควอนตัมดอต ดังแสดงในกราฟความสัมพันธ์ $H - \epsilon$ ในรูปที่ 2.6

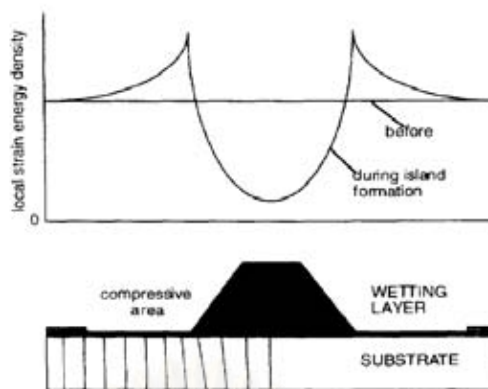


รูปที่ 2.6 แผนภาพเฟสสมดุล (Equilibrium phase diagram) ในรูปของฟังก์ชันระหว่าง H กับ ϵ โดยภาพประกอบด้านบนและล่างแสดงถึงลักษณะของผิวหน้าของโหมดต่างๆ ทั้ง 6 โหมด สามเหลี่ยมเล็กสีขาวแทนโครงสร้างเกาะสามมิติที่มีเสถียรภาพ สามเหลี่ยมใหญ่ระบายสีข้างในแทนโครงสร้างเกาะสามมิติที่โตเต็มที่ (Ripening island) เฟสแต่ละรูปแบบถูกแบ่งด้วยเส้นขอบเขต $H_c(\epsilon)$: FM- R_1 , FM-SK₁; $H_c_2(\epsilon)$: SK₁- R_2 ; $H_c_3(\epsilon)$: SK₂-SK₁; $H_c_4(\epsilon)$: VW-SK₂, VW- R_3 [40]

จากรูปจะเห็นได้ว่าลักษณะการเกิดโครงสร้าง 3 มิติจะเป็นไปได้ 7 สถานะดังต่อไปนี้

- 1) โหมด Frank van der Merve (FM) อยู่ในกรณีที่มีค่า lattice-mismatched ระหว่าง $0-\mathcal{E}_2$ และค่าความหนายังมีค่าไม่มาก จะทำให้เกิดผลึกในระนาบ 2 มิติขึ้น
- 2) โหมด R_1 ค่า lattice-mismatched จะมีค่าระหว่าง $0-\mathcal{E}_1$ และมีความหนาของชั้นอะตอมเกินกว่าจะเป็นโหมด FM จะทำให้เกิดชั้น wetting และเกาะที่มีขนาดใหญ่ขึ้น
- 3) โหมด Stranski Krastanow (SK_1) ค่า lattice-mismatched จะมีค่าระหว่าง $\mathcal{E}_1-\mathcal{E}_2$ และจำนวนชั้นอะตอมมีค่ามากกว่าจะเป็น FM จะทำให้เกิดชั้น wetting และเกิดเกาะแบบ 3 มิติที่มีขนาดใกล้เคียงกัน
- 4) โหมด R_2 ค่า lattice-mismatched จะมีค่าระหว่าง $\mathcal{E}_1-\mathcal{E}_3$ และมีความหนาของชั้นอะตอมเกินกว่าจะเป็นโหมด SK_1 จะทำให้เกิดชั้น wetting และเกิดเกาะที่มีขนาดต่าง ๆ กัน
- 5) โหมด Volmer-Weber (VW) lattice-mismatched จะมีค่ามากกว่า \mathcal{E}_2 จะทำให้เกิดผลึกเป็นเกาะที่มีขนาดใกล้เคียงกันแต่ไม่มีชั้น wetting
- 6) โหมด SK_2 ค่า lattice-mismatched จะมีค่าระหว่าง $\mathcal{E}_2-\mathcal{E}_3$ มีจำนวนชั้นของอะตอมมากกว่าที่จะคงโหมด VW จะทำให้เกิดเกาะที่มีขนาดใกล้เคียงกันและมีชั้น wetting
- 7) โหมด R_3 ค่า lattice-mismatched จะมีค่ามากกว่า \mathcal{E}_3 และจำนวนชั้นของอะตอมมีค่ามากกว่าที่จะคงโหมด VW จะทำให้เกิดเกาะที่มีขนาดแตกต่างกันมากแต่ไม่มีชั้น wetting

ในกรณีการเกิดควอนตัมดอตแบบโหมด SK ในระบบ InAs บน GaAs ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ซึ่งมีค่า lattice-mismatched 7 % เมื่อจำนวนของอะตอมของสารที่ปลูกบนแผ่นฐานมีมากกว่าค่าความหนาวิกฤติ จะทำให้การเกาะตัวของกลุ่มอะตอมจาก 2 มิติ กลายเป็น 3 มิติ เพื่อลดความเครียดบริเวณควอนตัมดอต ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งบริเวณยอดตรงกลางควอนตัมดอตจะมีความเครียดน้อยที่สุด และบริเวณขอบควอนตัมดอตจะมีความเครียดมากที่สุดซึ่งไม่เหมาะกับการที่จะมีอะตอมมาเกาะบริเวณขอบมากขึ้น

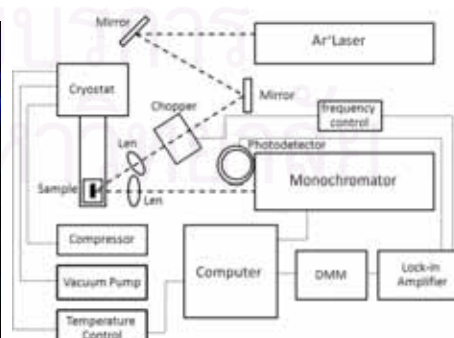


รูปที่ 2.7 Schematic ของ strain energy density ของควอนตัมดอต [41]

2.3 การวัดคุณสมบัติทางแสงโดย Photoluminescence (PL)

2.3.1 ระบบ Photoluminescence

ระบบวัดคุณสมบัติเชิงแสงด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence: PL) แสดงดังรูปที่ 2.8 ซึ่งระบบประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ได้แก่ อาร์กอนไอออนเลเซอร์ (Ar^+ Laser) ที่มีความยาวคลื่น 488 nm และสามารถปรับความเข้มแสงได้สูงสุด 2 W เพื่อใช้สำหรับกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในชั้นงานมีพลังงานสูงขึ้นและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น (Excited State) สำหรับเปลี่ยนระดับพลังงานไปยังแถบคอนดักชัน เมื่อถึงระยะเวลาหนึ่งอิเล็กตรอนจะคายพลังงานเพื่อลดระดับมายังแถบวาเลนซ์หรือสภาวะพื้น (Ground State) ผลต่างของพลังงานถูกปล่อยออกมาในรูปของ photon โดยที่แสงเลเซอร์นี้จะถูกเลนส์รวมแสงให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงเล็กลงสำหรับใช้กระตุ้นชิ้นงาน

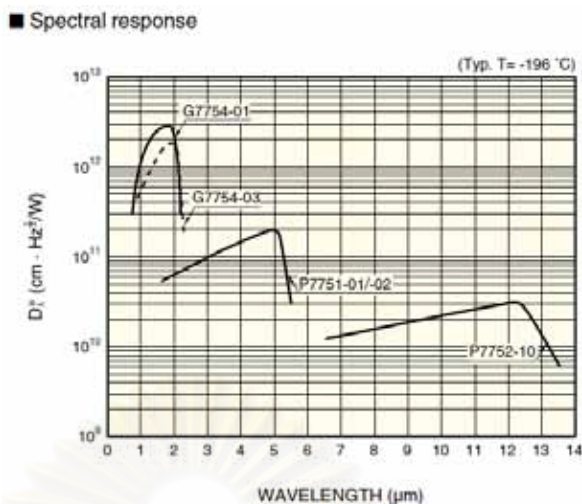


รูปที่ 2.8 (ก) รูปถ่าย และ (ข) Schematic ของระบบวัด PL

ระบบควบคุมอุณหภูมิ Cryostat สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 15 K - 300 K ใช้สำหรับควบคุมอุณหภูมิการทดสอบการเปล่งแสงของชิ้นงาน ซึ่งประกอบด้วยห้องสุญญากาศสำหรับบรรจุชิ้นงาน โดยที่จะมีปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump) ทำหน้าที่ดูดอากาศและไอน้ำออกจากห้องสุญญากาศก่อนเป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงเปิดระบบหมุนเวียนฮีเลียมเหลวเพื่อดึงความร้อนออกจากห้องสุญญากาศ ฮีเลียมเหลวจะนำความร้อนออกจากระบบโดยการถ่ายความร้อนให้กับระบบน้ำเย็นอุณหภูมิ 0-20°C เนื่องจากระบบหมุนเวียนฮีเลียมเหลวมีความสามารถลดอุณหภูมิในห้องสุญญากาศเท่านั้น ดังนั้นในระบบนี้จึงมีอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิสำหรับใส่ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ชิ้นงาน เพื่ออุณหภูมิที่ต้องการทำการวัดได้ตามที่ต้องการ

เครื่องโมโนโครมาเตอร์ (Monochromator) มีหน้าที่กรองแสงหลายความยาวคลื่นออกให้เหลือเพียงบางความยาวคลื่นเดียวเท่านั้น ซึ่งโมโนโครมาเตอร์นี้สามารถให้ความละเอียดถึงระดับอังสตรอม โดยที่ภายในโมโนโครมาเตอร์จะมีเกรตติงทำหน้าที่แยกลำแสงเดี่ยวที่มีหลายความยาวคลื่นปนกันออกเป็นแถบความยาวคลื่น และเกรตติงจะสามารถหมุนเพื่อเลือกให้ช่วงความยาวคลื่นใดของแสงออกจากโมโนโครมาได้

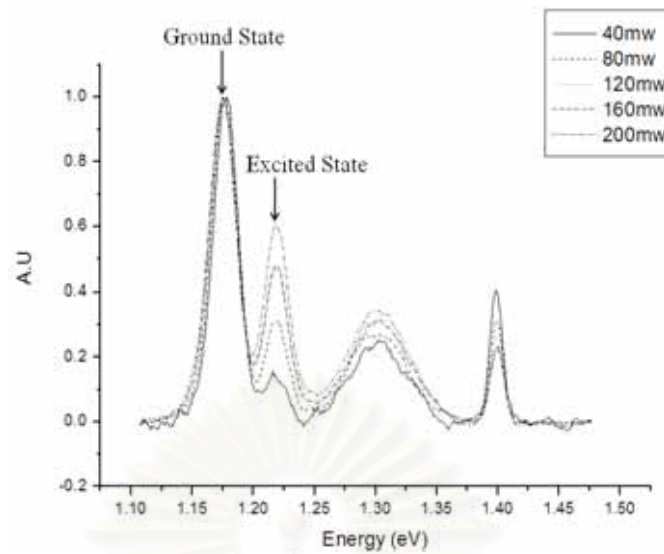
ความเข้มของแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ จะถูกวัดโดยโฟโตดีเทคเตอร์ (Photodetector) แบบ InGaAs รุ่น G7754-01 ถูกหล่อเย็นด้วยไนโตรเจนเหลวเพื่อเพิ่มความสามารถในการตรวจจับแสง และสามารถวัดแสงช่วงความยาวคลื่น 800-2000 nm ได้ ดังแสดงรูปที่ 2.9 โดยที่ความเข้มแสงจะแปรผันกับความต่างศักย์ที่ออกจากโฟโตดีเทคเตอร์ นอกจากภายในโฟโตดีเทคเตอร์จะมีส่วนขยายสัญญาณแล้วยังมีการขยายสัญญาณเพิ่มโดยการใช้ Lock-in-Amplified (LIA) และ Chopper ในระบบด้วย โดยที่เลเซอร์ที่ยิงใส่ชิ้นงานจะผ่าน Chopper เพื่อเปลี่ยนแสงเลเซอร์จาก DC เป็นแบบ AC ที่ความถี่ 80 Hz เพื่อลดสัญญาณรบกวนจากแหล่งไฟฟ้า 50 Hz โฟโตดีเทคเตอร์และ chopper จะถูกต่อเข้ากับ LIA เพื่อให้ chopper ส่งข้อมูลความถี่การหมุนและโฟโตดีเทคเตอร์ส่งสัญญาณของแสงที่ได้จากการวัด จากนั้น LIA จะตัดจับและขยายสัญญาณจากโฟโตดีเทคเตอร์ที่มีความถี่และเฟสตรงกับ chopper เท่านั้น ความต่างศักย์ที่ถูกขยายจาก LIA จะถูกต่อเข้ากับ Digital multimeter (DMM) เพื่อส่งสัญญาณที่ได้เข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อเก็บข้อมูลผลการวัดทางแสง



รูปที่ 2.9 ช่วงความยาวคลื่นของสิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสง ชนิด InGaAs [42]

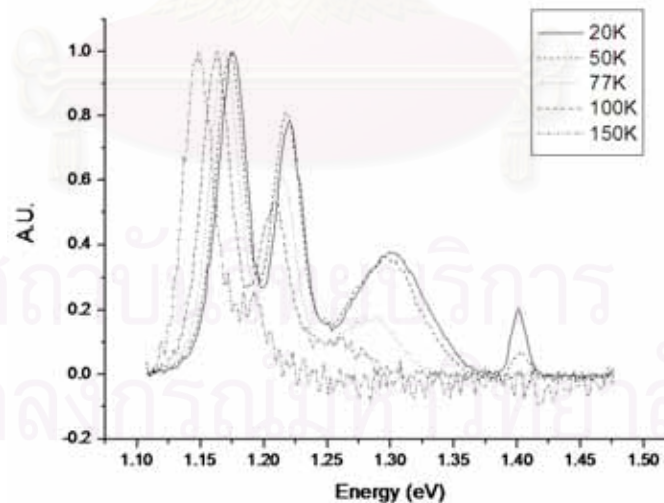
การวัดคุณสมบัติทางแสงจะเริ่มจากการยิงแสงเลเซอร์ผ่าน chopper เพื่อให้เลเซอร์เป็นแบบ AC จากนั้นแสงเลเซอร์จะผ่านเลนส์เพื่อรวมแสงเข้าสู่ชิ้นงานที่อยู่ภายในห้องบรรจุสุญญากาศ แสงหรือโฟตอนที่ชิ้นงานปล่อยออกมาจะถูกรวมโดยเลนส์เพื่อเข้าโมโนโครมาเตอร์ จากแสงหลายความยาวคลื่นที่เข้าสู่โมโนโครมาเตอร์ จะถูกกรองออกให้เหลือเพียงแค่บางความยาวคลื่นเท่านั้น และแสงบางความยาวคลื่นจะถูกส่งต่อไปยังโฟโตดีเทคเตอร์ เพื่อวัดความเข้มแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ โฟโตดีเทคเตอร์จะเปลี่ยนความเข้มแสงและขยายสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบความต่างศักย์ ซึ่งความต่างศักย์จากโฟโตดีเทคเตอร์จะถูกขยายสัญญาณอีกครั้งด้วย LIA สัญญาณที่ถูกขยายด้วย LIA จะถูกอ่านค่าด้วย DMM โดยที่ DMM ถูกต่ออยู่กับเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บข้อมูลแบบคู่อันดับ เมื่อเก็บข้อมูลของความยาวคลื่นเดิมเสร็จแล้ว คอมพิวเตอร์จะสั่งให้โมโนโครมาเตอร์เลื่อนไปยังความยาวคลื่นอื่นถัดไปเพื่อเก็บความเข้มของความยาวคลื่นช่วงถัดไป

การวัด PL แบบขึ้นกับกำลังของแสงกระตุ้น (Power dependent) จะเปลี่ยนความเข้มของแสงเลเซอร์เป็นค่าต่างๆ ต่อการวัดหนึ่งครั้ง เช่น 40, 80, 120, 160 และ 200 mW ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ผลการวัดนี้สามารถแยกค่ายอดพลังงานแบบ ground state และ excite state ได้ โดยที่ค่ายอดพลังงานของ ground stage จะมีแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นตามกำลังของแสงเลเซอร์ได้ถึงค่าหนึ่งและจะไม่สามารถเพิ่มตามกำลังของแสงกระตุ้นได้ในขณะที่ excite state ยังคงเพิ่มแอมพลิจูดตามกำลังแสงที่เพิ่มได้



รูปที่ 2.10 ผลการวัดทางแสงแบบขึ้นกับกำลังกระตุ้นของแสง

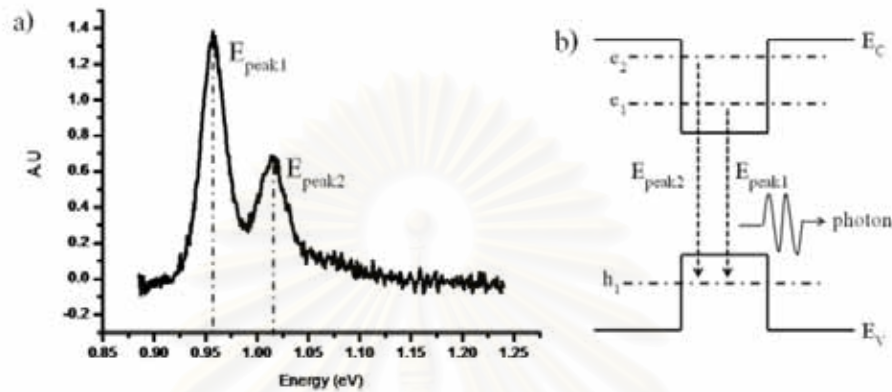
การวัด PL แบบขึ้นกับอุณหภูมิ (Temperature dependent) จะเปลี่ยนอุณหภูมิของชิ้นงานในการวัดแต่ละครั้ง เช่น 20, 50, 77, 100 และ 150 K ดังแสดงในรูปที่ 2.11 การวัดจะเริ่มจากอุณหภูมิต่ำไปสูง โดยที่จะต้องรอให้ระบบทำความเย็นทำอุณหภูมิได้ต่ำที่สุดก่อน จึงจะเริ่มกำหนดอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดเพื่อทำการวัดครั้งแรกก่อน เมื่อวัดเสร็จแล้วจึงทำการเปลี่ยนอุณหภูมิให้สูงขึ้นตามลำดับ



รูปที่ 2.11 ผลการวัดทางแสงแบบขึ้นกับอุณหภูมิ

2.3.2 ผลการทดลองทางแสง

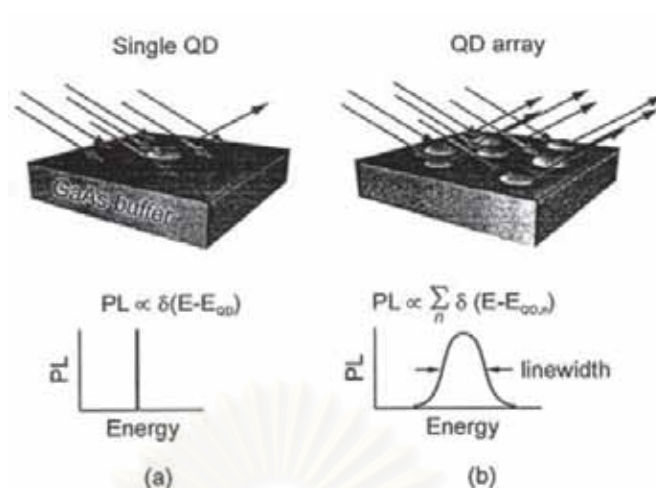
ผลการวัดคุณสมบัติทางแสง เป็นข้อมูลแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของแสง กับค่าพลังงาน ดังรูปที่ 2.12 (a)



รูปที่ 2.12 a) PL ของชิ้นงานตัวอย่างและ b) การวิเคราะห์ระดับพลังงานไอแก๊น E_c และ E_v

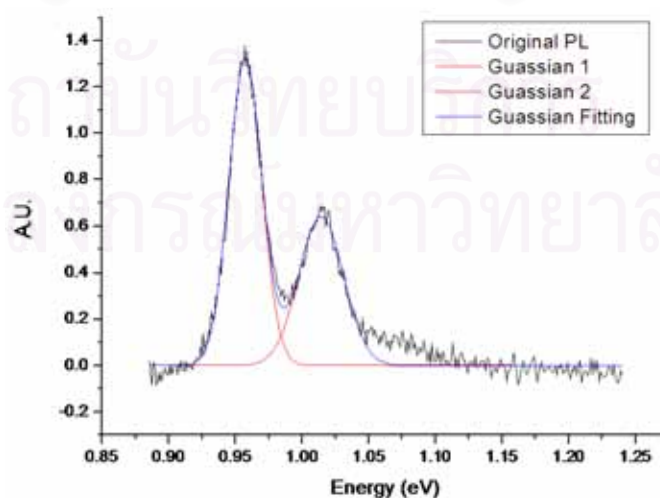
ผลการทดลองคุณสมบัติทางแสงจะมีเพียงบางช่วงของความยาวคลื่นที่มีค่าความเข้มสูง ค่าพลังงานสูงสุดนี้ แสดงให้เห็นว่าสิ่งประดิษฐ์ชนิดนี้สามารถเปล่งแสงได้ดีที่สุดที่ค่าความยาวคลื่นเท่าใด ซึ่งค่ายอดพลังงานนี้จะสอดคล้องกับค่าความต่างพลังงานไอแก๊นของอิเล็คตรอนในแถบคอนดักชันกับพลังงานไอแก๊นของโฮลในแถบวาเลนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 b)

นอกจากผลการทดลองคุณสมบัติทางแสงจะได้แสดงถึงค่าพลังงานสูงสุดแล้ว ผลการทดลองคุณสมบัติทางแสง PL ยังแสดงถึงค่า Full-Width-Half-Maxima (FWHM) ซึ่งค่านี้แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานนี้มีขนาดของควอนตัมดอตในชิ้นงานมีขนาดใกล้เคียงกันเท่าไร จากรูปที่ 2.13 (a) เมื่อควอนตัมดอตมีเพียงแค่ 1 ควอนตัมดอตจะมีค่า FWHM จะมีลักษณะเป็นเคลด้าฟังก์ชัน แต่เมื่อมีควอนตัมจำนวนมากและขนาดของควอนตัมดอตมีความแตกต่างกันจะมีผลทำให้ค่า FWHM มีค่ามากขึ้น ดังรูปที่ รูปที่ 2.13 (b)



รูปที่ 2.13 (a) ควอนตัมดอตจะแสดงค่าพลังงานเป็นเคลต้าฟังก์ชันเหมือนกันความหนาแน่นของสถานะ (b) ค่าเฉลี่ยความแตกต่างของขนาดควอนตัมดอตจะแปรผันกับค่า FWHM [43]

ค่ายอดพลังงานและค่า FWHM สามารถหาได้อย่างแม่นยำในระดับ 1meV จากการทำ curve fitting แบบ multiple Gaussian peaks [44] รวมทั้งสามารถแสดงผลของการรวมค่าพลังงานหลายพลังงานเป็นผล PL แบบค่านวน และ PL แบบค่านวนสามารถเปรียบเทียบกับผลของ PL ที่วัดจริงเพื่อแสดงค่าความผิดพลาดให้เห็นว่า ผล PL แบบค่านวนมีความใกล้เคียงกับผล PL จริงมากเท่าไร ดังแสดงในรูปที่ 2.14

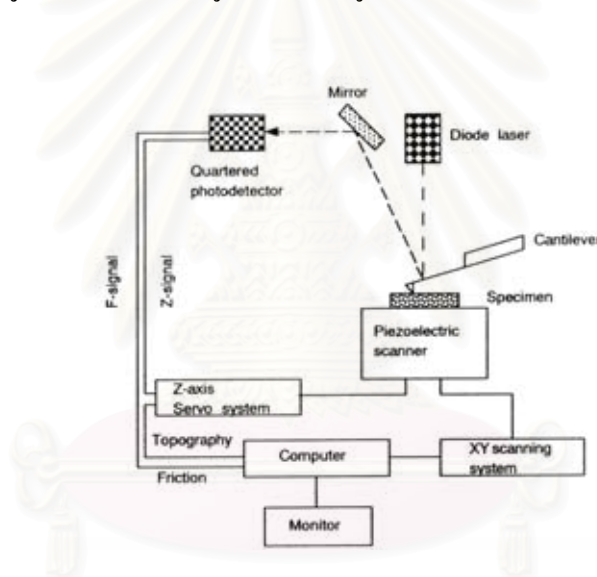


รูปที่ 2.14 ตัวอย่างผล PL แบบค่านวนจากวิธี Gaussian fitting แบบ multiple Gaussian peaks

2.4 การวัดผิวหน้าด้วยเทคนิคแรงอะตอม

2.4.1 ระบบ Atomic Force Microscope (AFM)

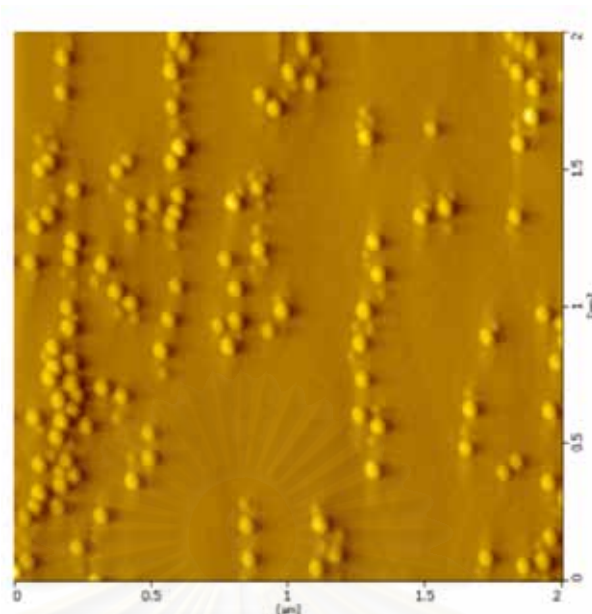
กระบวนการนี้เป็นการวัดผิวหน้าของชิ้นงานหลังจากปลูกผลึกเสร็จแล้ว เพื่อศึกษาว่ากระบวนการปลูกผลึกที่ผ่านมาได้โครงสร้างเป็นอย่างไร ระบบการวัดด้วยเทคนิคแรงอะตอมสามารถแสดงด้วยแผนภาพอย่างง่ายดัง รูปที่ 2.15 การวัดจะอาศัยแรงระหว่างเข็ม (Tip) ขนาดนาโนที่ปลายคาน (Cantilever) กับโครงสร้างผิวหน้าที่ใกล้กันในระดับนาโนเมตร โดยที่คานจะเกิดการโค้งงอตามลักษณะของผิวหน้าชิ้นงาน ภายในระบบประกอบด้วยเลเซอร์ไดโอด (Laser Diode) สำหรับยิงแสงให้ตกกระทบบกับปลายคาน เพื่อให้แสงสะท้อนจากปลายคานตกกระทบบสิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสง (Photodetector) เพื่อวัดลักษณะความสูงต่ำของคานที่มีความสัมพันธ์กับความสูงของผิวหน้าชิ้นงาน ข้อมูลทั้งหมดที่ได้จะถูกแสดงเป็นรูปผิวหน้าของชิ้นงานดังจะ ได้กล่าวต่อไป



รูปที่ 2.15 แผนภาพแสดงการทำงานของ AFM

2.4.2 ผลการวัดผิวหน้า

ผลการวัดผิวหน้าจะทำให้ทราบว่า กระบวนการที่ใช้ปลูกผลึกนั้นให้ผลการปลูกเป็นโครงสร้างผลึกแบบใด ดังรูปที่ 2.16 การวัดด้วยเทคนิคนี้สามารถให้ข้อมูลที่สำคัญต่างๆ เช่น รูปแบบการเรียงตัวของควอนตัมดอต ลักษณะการกระจายตัวของควอนตัมดอต ความหนาแน่นของควอนตัมดอต ความสูงของควอนตัมดอตโดยดูได้จากความเข้มของสี โดยที่สีขาวคือบริเวณสูงและสีเหลืองที่บคือบริเวณต่ำ



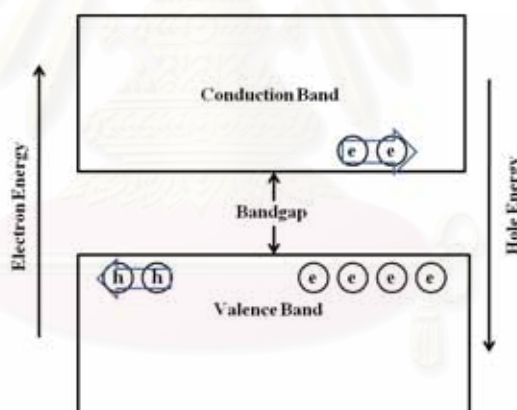
รูปที่ 2.16 ผลการวัดผิวหน้าของควอนตัมดอทโมเลกุลขนาด $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ [45]

2.5 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์

โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Structure) คือโครงสร้างของอะตอม, โมเลกุลหรือวัสดุลักษณะต่างๆ ที่มีผลต่อการกำหนดพฤติกรรมต่างๆ ของอิเล็กตรอนเมื่ออยู่ภายในวัสดุชิ้นนั้น เช่น สมบัติการนำไฟฟ้า การเรียงตัวของอิเล็กตรอน พลังงานของอิเล็กตรอน เป็นต้น ดังนั้น โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์จึงสามารถใช้อธิบายสมบัติต่างๆ เช่น สมบัติการเปล่งแสง ค่าพลังงานไอออน การนำไฟฟ้า เป็นต้น สารประกอบหลายๆประเภทจะมีโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ที่แตกต่างกัน แม้เป็นสารชนิดเดียวกัน แต่โครงสร้างทางกายภาพแตกต่างกันก็สามารถส่งผลให้มีโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ที่แตกต่างกันได้ ดังนั้นถ้าสามารถหาโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของแต่ละโครงสร้างวัสดุได้ก็จะทำให้สามารถเข้าใจถึงคุณสมบัติต่างๆของโครงสร้างวัสดุนั้นๆได้ เมื่อมีความเข้าใจคุณสมบัติต่างๆของวัสดุ จะทำให้สามารถนำโครงสร้างวัสดุพื้นฐานต่างๆไปประยุกต์ใช้เป็นโครงสร้างพื้นฐานของเครื่องมือชิ้นอื่นๆได้

2.5.1 แผนภาพแถบพลังงาน (Energy Band Diagram)

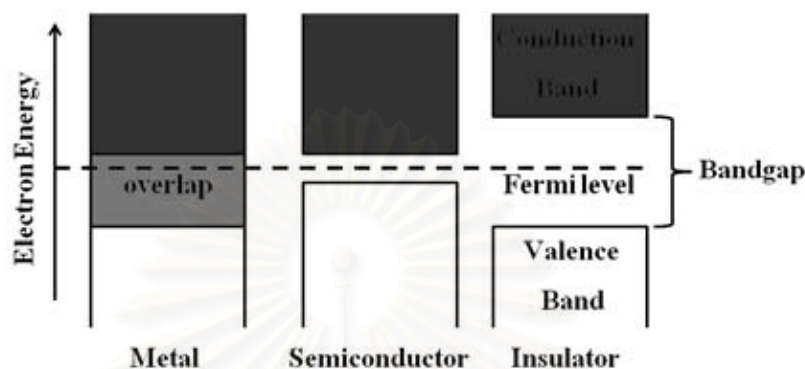
แถบพลังงานอย่างง่ายจะถูกแบ่งเป็น 3 แถบ ได้แก่ Valence Band (VB), Band gap (Eg) และ Conduction Band (CB) และมีตัวนำไฟฟ้า 2 ประเภท ได้แก่ โฮล (hole) และ อิเล็กตรอน (Electron) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 โดยที่อิเล็กตรอนส่วนมากมักจะอยู่ใน VB แต่จะสามารถถูกกระตุ้นด้วยพลังงานให้ขึ้นมายัง CB ได้ อิเล็กตรอนสามารถจะนำไฟฟ้าได้เมื่ออยู่ใน CB แต่ไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ใน VB โดยที่อิเล็กตรอนจะมีพลังงานมากขึ้นเมื่ออยู่ห่างจาก VB มาก โฮลเกิดจากที่ว่างบน VB ซึ่งที่ว่างนี้เกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้กระโดดจาก VB ไปยัง CB และโฮลนี้สามารถนำไฟฟ้าและมีคุณสมบัติเหมือนมีประจุบวก ซึ่งจะวิ่งเข้าหาศักย์ไฟฟ้าค่าลบเมื่อได้รับการไบแอส โดยที่โฮลจะมีพลังงานมากเมื่ออยู่ไกลจาก CB แต่มีช่วง Band gap ที่อิเล็กตรอนและโฮลไม่สามารถครอบครองพลังงานในช่วงนี้ได้ ดังนั้นการกระตุ้นอิเล็กตรอนจะต้องใช้พลังงานที่มีความมากกว่า E_g จึงจะทำให้อิเล็กตรอนขึ้นไปยัง CB และเกิดโฮลใน VB จนพาหะทั้งสองกลายเป็นพาหะนำไฟฟ้าได้



รูปที่ 2.17 แผนภาพแถบพลังงาน

ของแข็งสามารถถูกจำแนกได้เป็น 3 ประเภท ตามความสามารถในการนำไฟฟ้า ได้แก่ ตัวนำ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำ ดังรูปที่ 2.18 ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยแถบพลังงาน โดยที่ ตัวนำจะมี CB และ VB ซ้อนทับกันทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้ง่าย ฉนวนจะมี CB และ VB ที่ห่างกันมากกว่า จะกระตุ้นด้วยพลังงาน ทำให้ไม่สามารถมีพาหะนำไฟฟ้าได้ แต่สารกึ่งตัวนำจะมี CB และ VB ที่

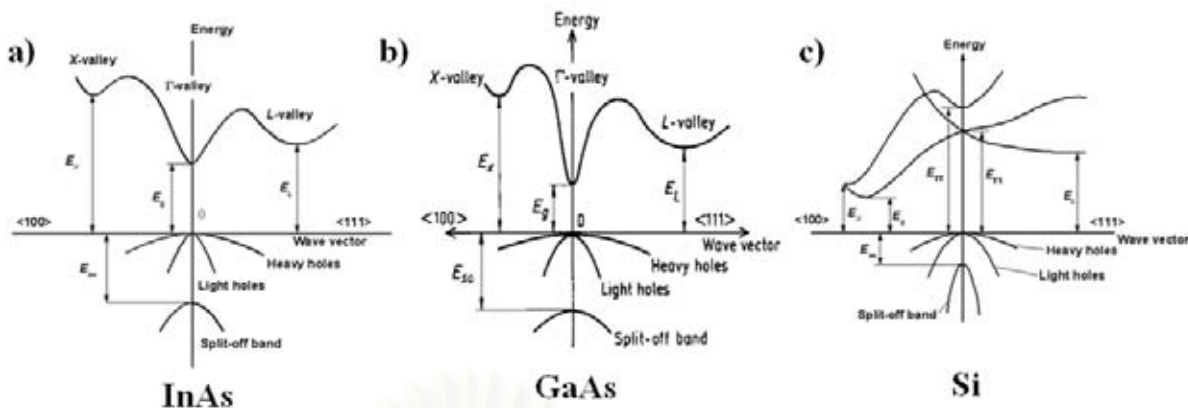
ห่างกันไม่มาก สามารถกระตุ้นได้ด้วยแสงหรืออุณหภูมิให้อิเล็กตรอนขึ้นไปยัง CB และ กระตุ้นให้โฮลขึ้นไปยัง VB เพื่อนำไฟฟ้าได้



รูปที่ 2.18 แผนภาพแถบพลังงานของ ตัวนำ สารกึ่งตัวนำ และ ฉนวน

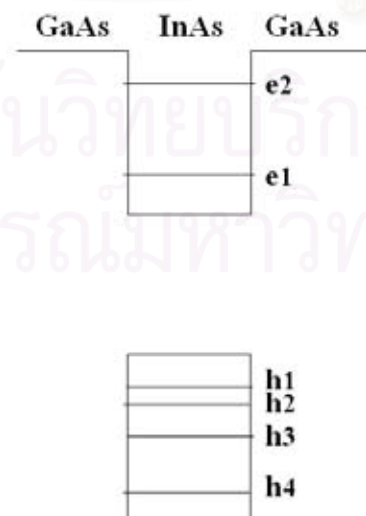
โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้กล่าวมานั้นเป็นโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์อย่างง่าย แต่ในความเป็นจริงโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของวัสดุแม้จะเป็นขึ้นเดียวกันก็จะไม่เหมือนกันเมื่อเทียบกับทิศทางของผลึก ดังรูปที่ 2.19 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์อย่างง่ายจะเลือกทิศทางที่มี CB และ VB ใกล้กันมากที่สุด แต่วัสดุที่เปล่งแสงได้จะมีค่าต่ำสุดของ VB ตรงกับ ค่าสูงสุดของ CB จะเรียกว่า “direct” เช่น InAs และ GaAs และวัสดุที่มีค่าต่ำสุดของ VB ไม่ตรงกับค่าสูงสุดของ CB ว่า “indirect” เช่น Si

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้สารประกอบ InAs และ GaAs ที่เป็น direct ทั้งคู่ดังนั้นจึงงานในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเป็นแบบ direct ซึ่งทำการวัดคุณสมบัติทางแสงแบบ PL ได้เพราะชิ้นงานสามารถเปล่งแสงได้



รูปที่ 2.19 แผนภาพพลังงาน-โมเมนตัม (E-k) ของ a) InAs, b) GaAs และ c) Si [46]

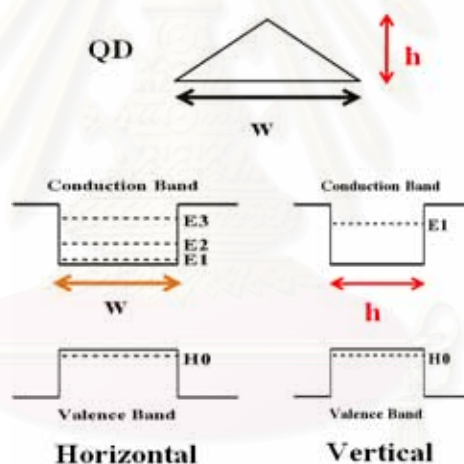
จะเห็นได้ว่าเมื่อเป็นสารประกอบเดียวกันทั้งชิ้น อิเล็กตรอนและโฮลจะสามารถมีพลังงานได้เป็นแถบต่อเนื่องบน CB และ VB ตามลำดับ แต่เมื่อมีสารประกอบมากกว่า 2 ชนิดมาต่อกัน เช่น GaAs/InAs/GaAs จะมีโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ ดังรูปที่ 2.20 โดยทั่วไปอิเล็กตรอนและโฮลนั้นต้องการอยู่ในสถานะพลังงานงานต่ำ ดังนั้นอิเล็กตรอนและโฮลจึงมักอยู่ใน บ่อพลังงาน (Well) แต่ถ้า InAs มีขนาดเล็กมาก มีผลทำให้พลังงานของอิเล็กตรอนและโฮลที่อยู่ในบ่อพลังงานนี้มีค่าพลังงานได้แค่บางค่าเท่านั้น พลังงานนี้เรียกว่า พลังงานไอเกิน (Eigen Energy)



รูปที่ 2.20 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของ GaAs/InAs/GaAs

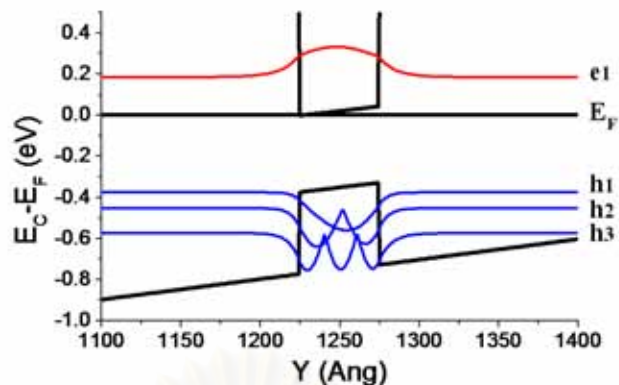
2.5.2 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์แบบ 1 มิติ

โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์แบบหนึ่งมิติเป็นการมองวัสดุที่ละมิติเช่น มิติของความสูง มิติของความยาว มิติของความกว้าง เนื่องจากควอนตัมคอตส่วนมากจะมีฐานแบบสมมาตร ดังนั้นควอนตัมคอตจึงถูกมองแบบหนึ่งมิติเป็นแบบแนวตั้งซึ่งเป็นไปตามทิศทางด้านความสูงและแบบแนวนอนซึ่งเป็นไปตามทิศความยาวฐานของควอนตัมคอต ดังรูปที่ 2.21 เนื่องจากความสูง และความกว้างของฐานควอนตัมคอตมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นค่าพลังงานไอเก้นของอิเล็กตรอนและโฮลจึงมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละด้าน ถ้าด้านใดมีความยาวมากกว่าบ่อพลังงานก็จะมีค่ากว้างมากกว่าทำให้มีจำนวนค่าไอเก้นของอิเล็กตรอนและโฮลมากกว่าบ่อพลังงานแบบแคบ ซึ่งค่าพลังงานไอเก้นสามารถหาได้จากสมการชโรดิงเจอร์แบบหนึ่งมิติเป็นหลัก



รูปที่ 2.21 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์แบบหนึ่งมิติของควอนตัมคอตแบบแนวตั้งและแนวนอน

นอกจากการคำนวณโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์เพื่อหาค่าพลังงานไอเก้นของอิเล็กตรอนและโฮลแล้ว การคำนวณแบบ 1 มิติยังให้ค่าฟังก์ชันคลื่น (Wave Function) ดังรูปที่ 2.22 ซึ่งฟังก์ชันคลื่นยกกำลังสองเท่ากับความน่าจะเป็นที่จะพบอนุภาค ณ ตำแหน่งนั้นๆ

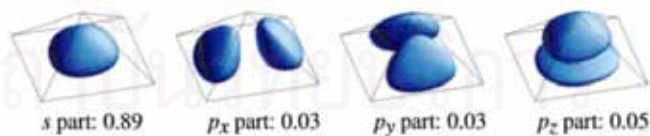


รูปที่ 2.22 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ที่คำนวณได้ค่าพลังงานไอเกินและฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอน และ โฮล

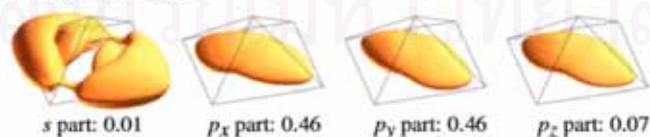
2.5.3 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์แบบ 3 มิติ

โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์แบบ 3 มิติจะเป็นการมองควอนตัมดอตแบบสมจริงในทุกมิติ ซึ่งพลังงานและฟังก์ชันคลื่นจะหาได้จากสมการชโรดิงเจอร์แบบสามมิติเป็นหลัก ผลการคำนวณจะได้ข้อมูลมากกว่าการคำนวณแบบหนึ่งมิติ เช่น ค่าพลังงานไอเกินของอิเล็กตรอนและโฮล ตำแหน่งที่มีโอกาสพบอิเล็กตรอนและโฮลแยกเป็นค่าไอเกินต่างแบบสามมิติ ดังรูปที่ 2.23

Electron Ground State



Hole Ground State



รูปที่ 2.23 ฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนและโฮลซึ่งได้จากการคำนวณแบบสามมิติ [47]

แต่ในปัจจุบันรูปร่างของควอนตัมดอตยังไม่สามารถสรุปได้แบบสิ้นสุด ซึ่งทำให้การคำนวณแบบสามมิติมีหลายรูปแบบซึ่งขึ้นกับรูปร่างของควอนตัมดอต เช่น ควอนตัมดอตแบบปริมาตร ควอนตัมดอตแบบกรวย ควอนตัมดอตแบบโดม [48] หรือขึ้นกับวิธีการคำนวณ เช่น eight-band kp theory [49], tight-binding method [50] หรือ Valence Force Field Theory [51] เป็นต้น รวมทั้งการคำนวณแบบสามมิติจะต้องใช้เวลาที่นานและคอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูง ดังเช่น Nemo-3D [52] หรือ Nanohub [53] และผลที่ได้ต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับเรื่องนี้เป็นอย่างดีจึงจะสามารถเข้าใจได้อย่างลึกซึ้ง ซึ่งต่างจากการคำนวณแบบหนึ่งมิติที่แสดงผลในรูปแบบอย่างง่ายเพียงพอต่อการใช้งาน และยังใช้เวลาคำนวณเพียงไม่กี่วินาที ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมุ่งทำความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิผลแบบหนึ่งมิติของ InGaAs ควอนตัมดอตโมเลกุลเพื่อเป็นการศึกษาความเข้าใจเกี่ยวกับควอนตัมดอตโมเลกุล โดยใช้โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์อธิบายพฤติกรรมต่างๆของชิ้นงานที่ทำการทดสอบอย่างง่าย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การทดลอง

บทนี้กล่าวถึงวิธีเตรียมการปลูกโครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุล ด้วยเทคนิคการปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล และอธิบายถึงสาเหตุการเกิดควอนตัมดอทโมเลกุล ต่อมาจะกล่าวถึงผลการวัดผิวหน้าชิ้นงานและผลวัดคุณสมบัติทางแสง ซึ่งใช้เป็นข้อมูลสำหรับวิเคราะห์หาโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพ โดยสมการที่ใช้เป็นหลักในการจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพ คือ สมการชโรดิงเงอร์และสมการปัวซองส์ควบคู่กัน

3.1 การปลูกโครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุลและผลการทดลอง

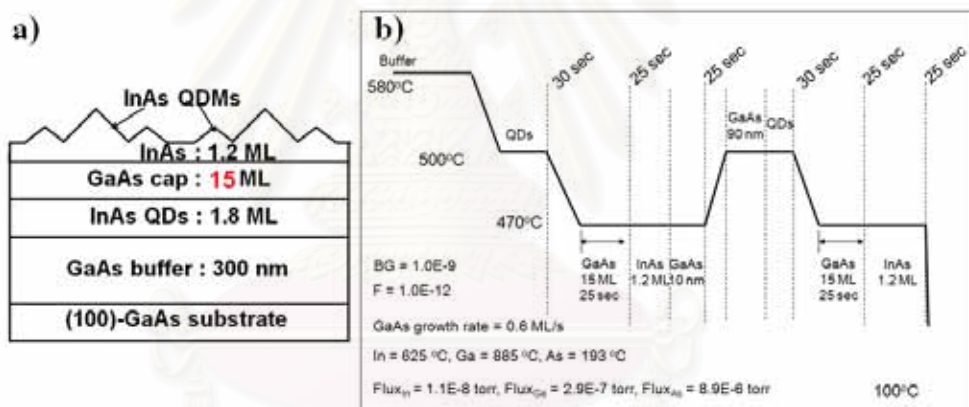
ขั้นตอนการปลูกผลึกด้วยกระบวนการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุลที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยอาจทำให้โครงสร้างที่ได้แตกต่างกันโดยสิ้นเชิง ดังนั้นกระบวนการปลูกเช่นลำดับการปลูกชั้นสารประกอบและอุณหภูมิของสารประกอบทางเคมี และแผ่นฐานจะต้องได้รับการควบคุมอย่างถูกต้องแม่นยำจึงจะได้โครงสร้างที่สามารถควบคุมได้จากชั้นงานหนึ่งสู่อีกชั้นงานหนึ่ง ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงวิธีการปลูกและการเกิดควอนตัมดอทโมเลกุล ตามด้วยผลการวัดลักษณะผิวหน้า AFM และอธิบายผลการวัดคุณสมบัติทางแสงจาก PL

3.1.1 วิธีการปลูกควอนตัมดอทโมเลกุล

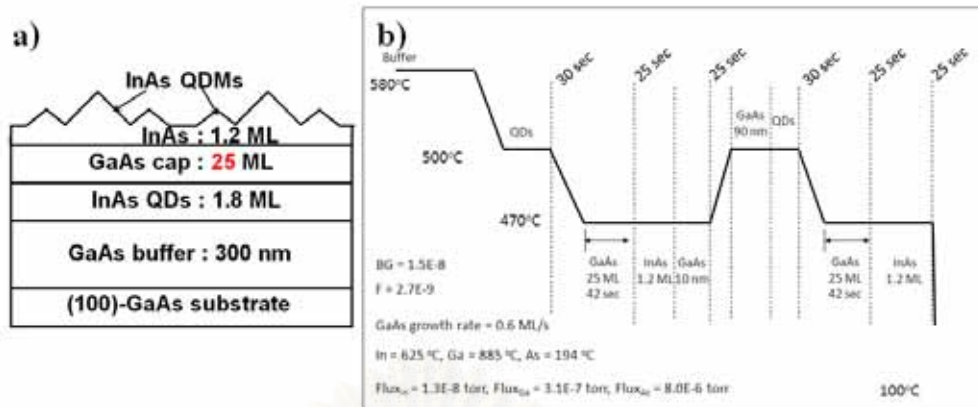
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษาชิ้นงานควอนตัมดอทโมเลกุล 2 ชิ้นงาน คือ ชิ้นงาน A และชิ้นงาน B ซึ่งมีขั้นตอนการปลูกผลึกดังนี้ เริ่มจากขั้นตอนการเตรียมแผ่นฐานสำหรับการปลูกควอนตัมดอทโมเลกุลของชิ้นงาน A และชิ้นงาน B ซึ่งมีวิธีเดียวกัน โดยเริ่มต้นจากการทำความสะอาดชิ้นงานทำโดยการให้ความร้อนกับแผ่นฐานจนถึงอุณหภูมิที่ 580 °C ทำให้ออกไซด์บริเวณผิวหน้าแผ่นฐานสลายตัวออกไป (de-oxidation) ใช้เวลาทำความสะอาดผิวหน้าเป็นเวลาประมาณ 30 นาที กระทั่งสามารถเห็น streaky pattern ได้ชัดเจน การทำความสะอาดผิวหน้าอาจทำให้ผิวหน้าไม่เรียบ จึงต้องปลูกชั้น GaAs Buffer หนา 300 nm เพื่อให้ผิวหน้าแผ่นฐานเรียบ หลังจากนั้นลดอุณหภูมิเหลือ 500 °C

ขั้นตอนการปลูกควอนตัมดอทโมเลกุล ของชิ้นงาน A และชิ้นงาน B หลังจากอุณหภูมิ ลดลงเหลือ 500°C จะเป็นดังนี้ ปลูก InAs ควอนตัมดอทหนา 1.8 Monolayer (ML) จากนั้นทำการ ลดอุณหภูมิแผ่นฐานลงมาที่ 470°C แล้วจึงปลูกชั้น GaAs กลบบาง (Thin Cap) ด้วยความบาง 15 ML ในชิ้นงาน A และ 25 ML ในชิ้นงาน B ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 ตามลำดับ ตามด้วยการปลูกชั้น InAs ควอนตัมดอทกลับทับ 1.2 ML ส่งผลให้เกิดควอนตัมดอทโมเลกุล ทั้งสองชิ้นงาน มีอัตราการปลูก InAs และ GaAs เท่ากับ 0.01 ML/s และ 0.6 ML/s ตามลำดับ

เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่สามารถใช้วัดคุณสมบัติทางแสงและลักษณะผิวหน้าภายในชิ้นเดียวกัน ได้ หลังจากปลูกควอนตัมดอทโมเลกุลจากขั้นตอนที่ผ่านมา จึงได้มีการปลูกชั้น GaAs หนา 100 nm ตามด้วยการปลูกควอนตัมดอทโมเลกุล โครงสร้างเดิมอีกครั้งสำหรับการวัดลักษณะผิวหน้า



รูปที่ 3.1 a) โครงสร้าง และ b) temperature profile ของการปลูกควอนตัมดอทโมเลกุลในชิ้นงาน A

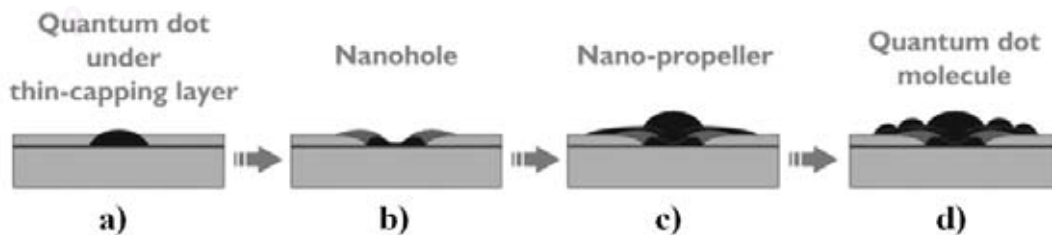


รูปที่ 3.2 a) โครงสร้าง และ b) temperature profile ของการปลูกควอนตัมดอทโมเลกุลในชั้นงาน B

[45]

3.1.2 การเกิดควอนตัมดอทโมเลกุล

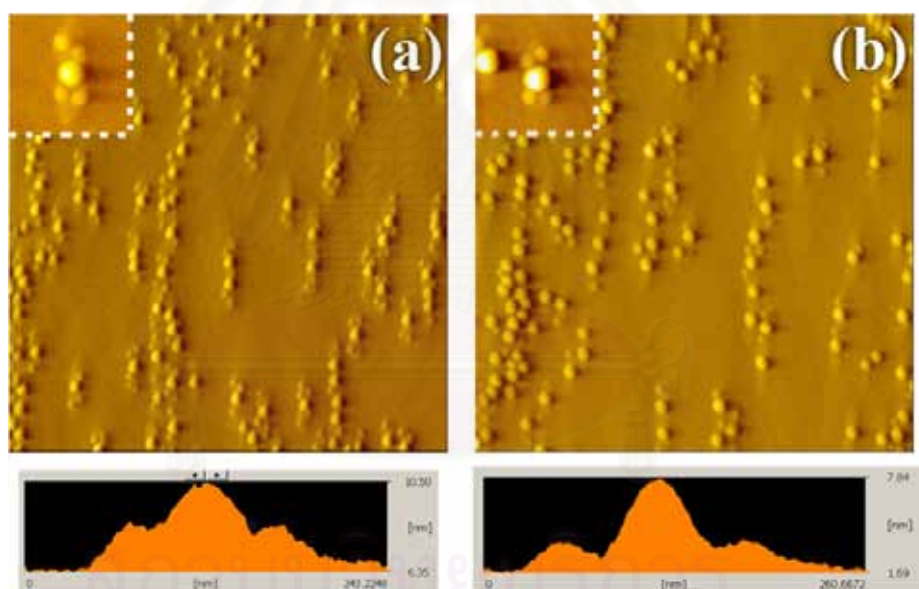
ลำดับขั้นตอนการเกิดควอนตัมดอทโมเลกุลมีดังนี้ เมื่อปลูก InAs ควอนตัมดอทชั้นแรกแล้ว จึงปลูกชั้น GaAs กลบบาง ดังรูปที่ 3.3 a) ชั้น GaAs จะดึง In ออกจากควอนตัมดอททำให้เกิดหลุมนาโน (Nano-Hole) บริเวณตรงกลางของควอนตัมดอทเดิม และเกิดโครงสร้างปีกนาโน (Nano-Propeller) รอบหลุมนาโน ดังรูปที่ 3.3b) หลังจากนั้นจึงปลูกชั้น InAs ซ้ำอีกครั้ง โดยจะพบการก่อตัวของควอนตัมดอทบนหลุมนาโนก่อน เพราะเป็นบริเวณที่มีความเครียดแบบดึงที่เกิดจาก GaAs โดยรอบสูงที่สุด ดังรูปที่ 3.1 c) และเมื่อปลูกชั้น InAs หนาขึ้น ควอนตัมดอทกลางซึ่งเกิดจากการเติมหลุมนาโนถูกเติมจนกระทั่งถึงจุดของการคลายความเครียดต่ำที่สุด หรือควอนตัมดอทกลางมีขนาดที่อิ่มตัวแล้วจึงจะเกิดการก่อตัวของควอนตัมดอทบนโครงสร้างปีกนาโนถัดมา ดังรูปที่ 3.3d) โดยที่ควอนตัมดอทตรงกลาง (Center Dot) มีขนาดใหญ่กว่าควอนตัมดอทด้านข้าง (Satellite Dot) [45]



รูปที่ 3.3 แผนภาพลำดับการเกิดควอนตัมดอทโมเลกุล [45]

3.1.3 ลักษณะผิวหน้า

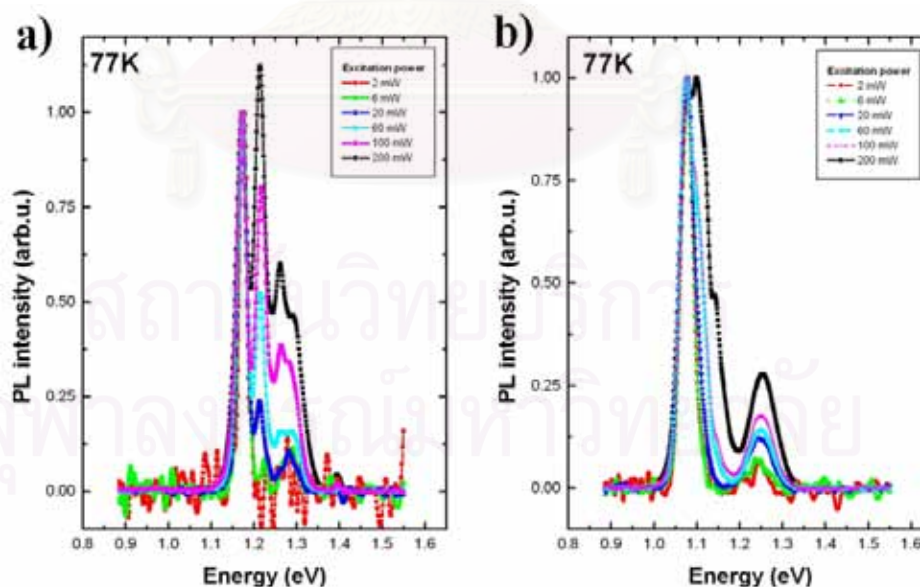
ผลการวัดลักษณะผิวหน้าด้วย AFM ได้ถูกแสดง ดังรูปที่ 3.4 เห็นได้ว่าชิ้นงานทั้งสอง ประกอบด้วยกลุ่มของควอนตัมดอทโมเลกุลที่เกิดจากการรวมกลุ่มกันของควอนตัมดอทจำนวน 5 ดอท ซึ่งภายในกลุ่มควอนตัมโมเลกุลจะประกอบด้วยควอนตัมดอท 2 ขนาด โดยที่ควอนตัมดอทตรงกลางจะเป็นควอนตัมดอทขนาดใหญ่ซึ่งถูกล้อมรอบด้วยควอนตัมดอทขนาดเล็กด้านข้าง ดังแสดงภาพขยายขนาด $300 \times 300 \text{ nm}^2$ ในรูปที่ 3.4 โดยที่ชิ้นงาน A จะมีความสูงและความกว้างของดอทกลางเป็น 4 nm และ 76 nm ส่วนดอทด้านข้างสูง 2.2 nm และกว้าง 60 nm ดังรูปที่ 3.4a) ชิ้นงาน B มีดอทกลางสูงและกว้างเป็น 6 nm และ 80 nm และมีดอทด้านข้างสูง 1.9 nm และกว้างเป็น 65 nm ดังรูปที่ 3.4b)



รูปที่ 3.4 ผลการวัดผิวหน้าจาก AFM ขนาด $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ ของ a) ชิ้นงาน A และ b) ชิ้นงาน B รูปเล็กแทรก a) และ b) แสดงภาพขยายขนาด $300 \times 300 \text{ nm}^2$ และรูปด้านล่างแสดงผลการทำ Line Scan ของ QDM ด้วยเทคนิค AFM ของแต่ละ QDM [45]

3.1.4 ลักษณะคุณสมบัติทางแสง

จากผลการวัดผิบน้ําจะเห็นว่าชิ้นงานทั้งสองมีโครงสร้างเป็นควอนตัมดอทโมเลกุลเหมือนกัน แต่ขนาดความกว้างและความสูงของควอนตัมดอทของชิ้นงานทั้งสองมีค่าไม่เท่ากัน ทำให้ผลการวัดคุณสมบัติทางแสง PL ของชิ้นงาน A และชิ้นงาน B ให้ผลที่แตกต่างกัน เมื่อทำการวัด PL ของชิ้นงาน A และ B พบว่าไม่สามารถทดสอบคุณสมบัติทางแสง PL ได้ที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นชิ้นงานทั้งสองจึงถูกทดสอบภายใต้สภาวะไนโตรเจนเหลว (Liquid N₂) ที่อุณหภูมิ 77 K โดยที่ชิ้นงานทั้งสองถูกทดสอบด้วยความเข้มแสงที่ 2, 6, 20, 60, 100 และ 200 mW เพื่อบ่งชี้ว่าคายพลังงานแต่ละยอดไม่ใช่สัญญาณรบกวน (Noise Signal) และสามารถบ่งบอกได้ว่าคายพลังงานใดเป็น Ground State หรือ Excited State โดยผลที่วัดได้จะแสดงอยู่ในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงเทียบกับค่าพลังงานของแสงที่เปล่งออกมาจากชิ้นงาน ซึ่งจะนำผลการวัด PL ของแต่ละความเข้มของเลเซอร์ที่ได้มาทำให้ค่าสูงสุดมีค่าเป็น 1 (Normalize) ดังรูปที่ 3.5 โดยที่ชิ้นงาน A มีค่าพลังงานสูงสุดเท่ากับ 1.1705, 1.214, 1.2585 และ 1.298 eV ดังรูปที่ 3.5a) และชิ้นงาน B มีค่าพลังงานสูงสุดเท่ากับ 1.078, 1.101, 1.119, 1.145 และ 1.167 eV ดังรูปที่ 3.5b)



รูปที่ 3.5 ผลการวัดคุณสมบัติทางแสง PL ที่ 77 K แบบ normalized ของ a) ชิ้นงาน A และ b) ชิ้นงาน B [45]

อย่างไรก็ตาม ผลการวัดทางแสง PL ดังกล่าวยังไม่ได้มีการวิเคราะห์เกี่ยวกับโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพของโครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุล ทั้งนี้เนื่องจาก มีการวัดที่อุณหภูมิ 77 K อุณหภูมิเดียว และยังไม่มีการวัดหรือ โมเดลที่ใช้จำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพ

ดังนั้นเพื่อให้ความเข้าใจถึงโครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุลได้ดีขึ้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึง ได้ทำการทดลอง PL เพิ่มเติมที่ 20, 50, 77, 100 และ 150 K และได้จำลองหาโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบหนึ่งมิติของ InGaAs QD โดยใช้สมการปัวซองค์และสมการชโรดิงเจอร์แบบ 1 มิติเป็นสมการที่ใช้คำนวณควบคู่กันไป

3.2 Couple Schrödinger-Poisson Equations

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงสมการที่สำคัญสำหรับการคำนวณค่าพลังงานไอเก้น (Eigen Energy) และฟังก์ชันคลื่น (Wave Function) ของพาหะในโครงสร้าง Heterostructure ซึ่งใช้สมการชโรดิงเจอร์ (Schrödinger equation) และ สมการปัวซองค์ (Poisson equation) และสมการเสริมอีก 2 สมการ ดังรายละเอียดต่อไปนี้ [48]

3.2.1 Schrödinger Equation

สมการชโรดิงเจอร์หนึ่งมิติ (One-Dimension Schrödinger Equation) มีไว้เพื่อหาค่าพลังงานไอเก้นของอิเล็กตรอนและโฮล

$$\frac{-\hbar^2}{2} \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{m^*} \frac{d}{dx} \right) \Psi(x) + V(x)\Psi(x) = E\Psi(x) \quad (3.1)$$

เมื่อ $\Psi(x)$ คือ ฟังก์ชันคลื่น (Wave Function) ของพาหะนำไฟฟ้า

E คือ พลังงานไอเก้นของพาหะ

$V(x)$ คือ พลังงานศักย์ (Potential Energy)

\hbar คือ ค่าคงตัวของพลังค์หารด้วย 2π ($h = \text{Planck's Constant}$)

m^* คือ มวลประสิทธิผล (Effective Mass) ของพาหะ

3.2.2 Poisson Equation

สมการปัวส์ซงหนึ่งมิติ (One-Dimension Poisson Equation) มีไว้เพื่อคำนวณหาค่า ศักย์ไฟฟ้าสถิตย์ ซึ่งอยู่ในสมการ

$$\frac{d}{dx} \left(\epsilon_s(x) \frac{d}{dx} \right) \phi(x) = -\frac{q}{\epsilon_0} [N_D(x) - n(x)] \quad (3.2)$$

เมื่อ $\epsilon_s(x)$ คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant)

$\phi(x)$ คือ ศักย์ไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Potential)

$N_D(x)$ คือ ความเข้มข้นของไอออนของตัวให้ (Ionized Donor Concentration)

$n(x)$ คือ การกระจายความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (Electron Density Distribution)

นอกจากนี้ยังมีสมการที่เกี่ยวข้องในการคำนวณหาโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ด้วยอีก 2 สมการ

สมการความสัมพันธ์ระหว่าง พลังงานศักย์ $V(x)$ และ ศักย์ไฟฟ้าสถิตย์ $\phi(x)$

$$V(x) = -q\phi(x) + \Delta E_c(x) \quad (3.3)$$

เมื่อ $\Delta E_c(x)$ คือ ผลแตกต่างพลังงานระหว่างรอยต่อชั้นสาร (Pseudopotential Energy due to The Band Offset at The Heterointerface)

สมการความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันคลื่น $\Psi(x)$ และความหนาแน่นของอิเล็กตรอน $n(x)$

$$n(x) = \sum_{k=1}^m \Psi_k^*(x) \Psi_k(x) n_k \quad (3.4)$$

เมื่อ m คือ จำนวนสถานะ (Number of Bound State)

n_k คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่ครอบครองแต่ละสถานะ (Electron Occupation for Each State) ซึ่งถูกกำหนดโดย

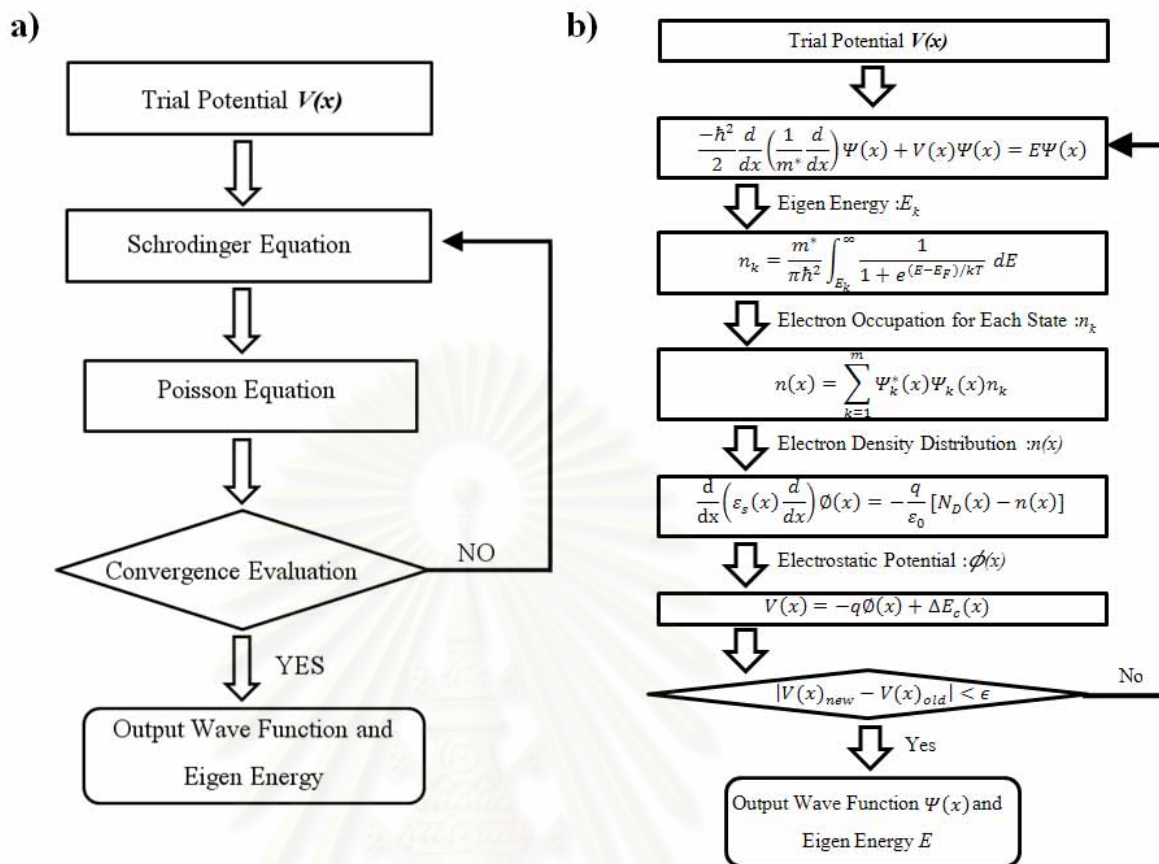
$$n_k = \frac{m^*}{\pi \hbar^2} \int_{E_k}^{\infty} \frac{1}{1 + e^{(E - E_F)/kT}} dE \quad (3.5)$$

เมื่อ E_k คือ Eigen Energy

3.2.3 ลำดับการคำนวณโดยใช้ Schrödinger-Poisson Equations

การคำนวณหาค่า Eigen Energy และ Wave Function สามารถดำเนินการได้ตาม Flow Chart อย่างง่ายดังรูปที่ 3.6a) และอย่างละเอียดพร้อมสมการดังรูปที่ 3.6b)

1. สมมุติค่า $V(x)$ แบบสุ่ม
2. ใส่ค่า $V(x)$ และแทนค่า Wave Function ลงในสมการที่ (3.1) จะได้ค่า Eigen Energy (E_k)
3. แทนค่า Eigen Energy (E_k) ในสมการที่ (3.5) จะได้ค่า n_k
4. แทนค่า n_k ในสมการที่ (3.4) จะได้ $n(x)$
5. แทนค่า $n(x)$ ในสมการที่ (3.2) จะได้ค่า $\phi(x)$
6. นำค่า $\phi(x)$ แทนใน (3.3) อีกครั้ง ทำให้ได้ค่า $V(x)$ ใหม่
7. นำ $V(x)$ ค่าเก่าและค่าใหม่เปรียบเทียบกัน โดยต้องมีค่าต่างกันน้อยกว่าค่าความผิดพลาดที่กำหนดไว้ ในกรณีที่มีค่ามากกว่าจะเริ่มทำจากข้อ 2 จนถึงข้อ 6 และเปรียบเทียบ $V(x)$ อีกครั้งจนกว่าจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ (ค่าความผิดพลาดที่ใช้คือ 10^{-5} eV นั่นคือ ผลต่างของ $V(x)$ ใหม่และเก่าต้องมีค่าน้อยกว่า 10^{-5} eV)
8. เมื่อเปรียบเทียบ $V(x)$ เรียบร้อยแล้วจึงสรุปค่า Eigen Energy และ Wave Function



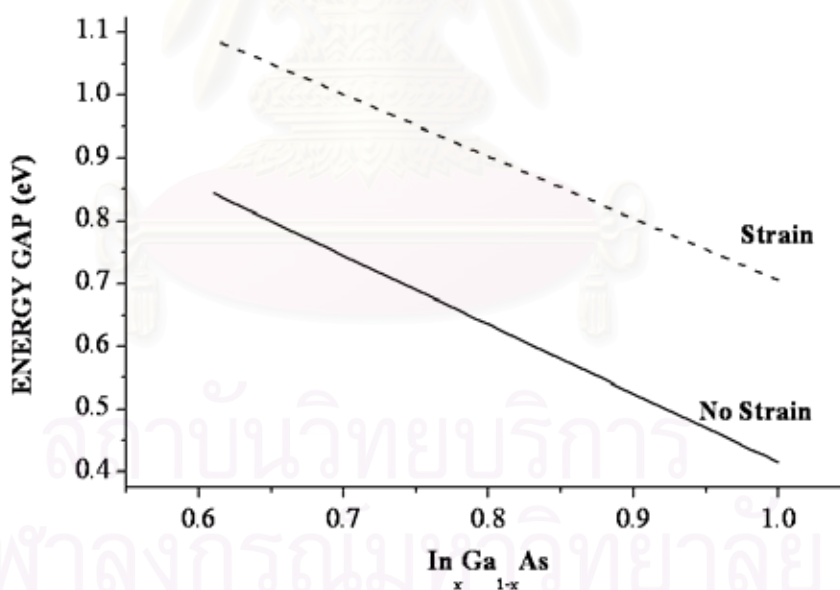
รูปที่ 3.6 Flow Chart แสดงการคำนวณแบบ Self-Consistent ของสมการชโรดิงเงอร์และสมการ
 ปัวส์ซง a) แบบลำดับขั้นตอนอย่างง่าย และ b) แบบลำดับขั้นสมการ [49]

3.2.4 ตัวแปรอื่นๆที่เกี่ยวข้อง

การคำนวณหาโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพนอกจากใช้สมการที่กล่าวมาข้างต้น ยังมีตัวแปรและสมการที่ทำให้สามารถหาโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ให้ตรงกับผลการทดลองคุณสมบัติทางแสงและคุณสมบัติทางผิวหน้าได้ดังต่อไปนี้

3.2.4.1 แถบพลังงานต้องห้าม (Band Gap)

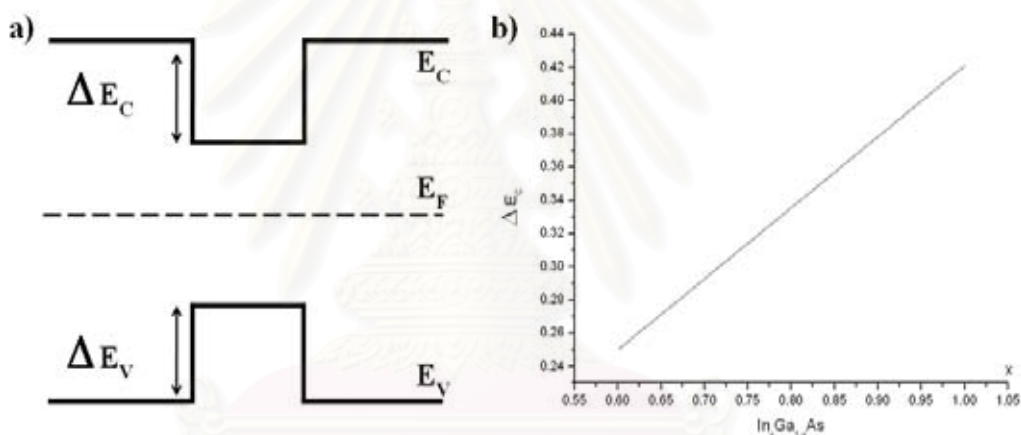
การเกิดควอนตัมดอทในโหมด SK จะมีความเครียดระหว่างแผ่นฐานและชั้นสารที่ปลูก นอกจากความเครียดเป็นสาเหตุทำให้เกิดควอนตัมดอทแล้ว ยังเป็นสาเหตุทำให้แถบพลังงานต้องห้ามเปลี่ยนแปลงด้วย ซึ่ง InAs QD มีค่าคงที่โครงสร้างผลึกมากกว่าบนแผ่นฐาน GaAs จึงทำให้ InAs เกิดความเครียดแบบบีบอัด ซึ่งทำให้แถบพลังงานต้องห้ามมีความกว้างมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เปรียบเทียบ Band gap ของ InGaAs แบบมีความเครียดและไม่มีความเครียดที่ 77 K [50]

3.2.2.2 ΔE_C และ ΔE_V

ในกรณีโครงสร้างแบบหัวต่อเฮเทอโร (Heterojunction) ประกอบไปด้วยสารประกอบมากกว่า 2 ชนิดขึ้นไป เช่น InAs/GaAs หรือ InAs/GaP เป็นต้น ซึ่งสารประกอบแบบสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดจะมี Band gap ไม่เท่ากัน ดังนั้นเมื่อนำสารประกอบแบบสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกันมาต่อกัน สารประกอบทั้ง 2 ชนิดจะปรับค่า E_F ให้อยู่ในระดับเดียวกัน แต่เนื่องจากแถบพลังงานต้องห้ามของสารประกอบ 2 ชนิดไม่เท่ากัน จึงทำให้เกิดความไม่พอดีกันของแถบคอนดักชันและแถบวาเลนซ์ ซึ่งค่าความแตกต่างระหว่างแถบคอนดักชันและค่าความแตกต่างระหว่างแถบวาเลนซ์ เรียกว่า ΔE_C และ ΔE_V ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.8a) และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ΔE_C กับ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ที่อุณหภูมิ 77 K [51, 52] ดังรูปที่ 3.8b)



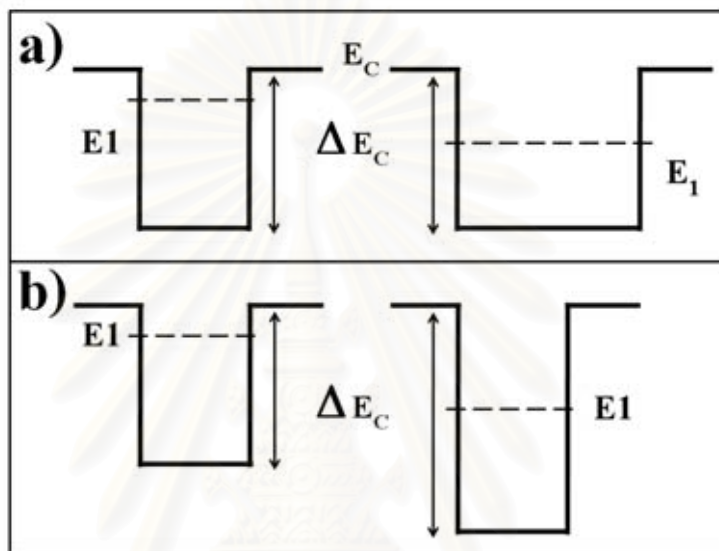
รูปที่ 3.8 a) ΔE_C และ ΔE_V ที่เกิดจากสารประกอบแบบสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิดหัวต่อแบบเฮเทอโร และ

b) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ กับ ΔE_C

3.2.2.3 Eigen Energy ของโฮล และ อิเล็กตรอน

การคำนวณด้วยสมการข้างต้นทำให้ได้ค่าพลังงานของโฮลและอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นพลังงานที่โฮลและอิเล็กตรอนสามารถครองได้เท่านั้น ค่าพลังงานนี้จะขึ้นกับขนาดของบ่อพลังงาน (Well) ทั้งความสูงและความกว้างที่เกิดระหว่างสารประกอบ 2 ชนิด โดยที่ความกว้างของบ่อพลังงานจะขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นสารประกอบที่อยู่ระหว่างกลาง และความสูงของบ่อพลังงานจะขึ้นอยู่กับ

กับชนิดของสารประกอบ 2 ชนิด ความสูงของบ่อจะมากเมื่อสารประกอบ 2 ชนิดมีความแตกต่างของแถบพลังงานมาก บ่อพลังงานที่มีขนาดใหญ่ทำให้ค่าพลังงานไอเก้นที่พาหะสามารถครองได้จะมีค่าน้อยลง ดังรูปที่ 3.9 a) และพลังงานไอเก้นของอิเล็กตรอนจะลดลงเมื่อบ่อพลังงานมีความลึกมากขึ้นดังรูปที่ 3.9 b)

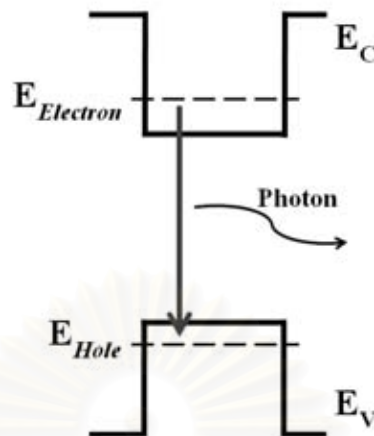


รูปที่ 3.9 เปรียบเทียบพลังงานที่สามารถครอบครองได้ของอิเล็กตรอนเมื่อ a) บ่อพลังงานกว้างขึ้น
b) บ่อพลังงานต่ำลง

3.2.2.4 ค่าพลังงาน $E_{electron} - E_{hole}$

คุณสมบัติทางแสงของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำจะขึ้นกับความแตกต่างระหว่างพลังงานของอิเล็กตรอนและโฮล การคายพลังงานในรูปแบบแสงหรือโฟตอน (Photon) เกิดจากอิเล็กตรอนในแถบคอนดักชันตกสู่แถบวาเลนซ์โดยการคายพลังงานในรูปแบบของแสง พลังงานของแสงจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างพลังงานที่สามารถครอบครองได้ในแถบคอนดักชันและแถบวาเลนซ์ ดังรูปที่ 3.10 พลังงานแสงจะมีค่ามากขึ้นก็ต่อเมื่อพลังงานของอิเล็กตรอนในแถบคอนดักชันและพลังงานของโฮลในแถบวาเลนซ์มีความแตกต่างกันมากขึ้น ดังสมการที่ (3.6)

$$E_{Photon} = E_{Electron} - E_{Hole} \quad (3.6)$$



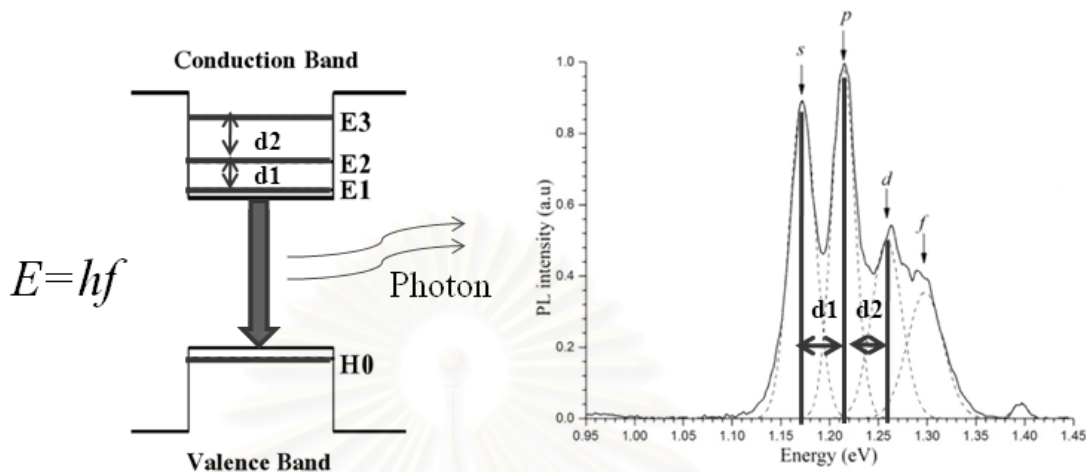
รูปที่ 3.10 กระบวนการเปล่งแสงของสารกึ่งตัวนำ

3.3 กำหนดโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบหนึ่งมิติ

การคำนวณขนาดประสิทธิภาพของ QD จากการจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพ จะใช้ข้อมูลจากผลการวัดขนาด QDM ของผิวหน้าซึ่งงานด้วยเทคนิค AFM และผลการทดลองทางแสง PL ควบคู่กัน โดยขนาดประสิทธิภาพของ QD ที่ได้จากการจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์จะมีค่ามากที่สุดได้ไม่เกินขนาด QD ที่ได้ผลจากการวัด AFM ผลการทดลองทางแสงจะมีความสัมพันธ์เกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีของ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ QDM และขนาดประสิทธิภาพของ QD ที่ได้จากการจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพ การจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบหนึ่งมิติจะถูกแบ่งเป็นสองส่วนคือ การจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพในแนวตั้งและการจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพในแนวนอน เพื่อหาความสูงประสิทธิภาพและความกว้างประสิทธิภาพของ QD

ควอนตัมดอตแบบสารกึ่งตัวนำประเภท direct สามารถเปล่งแสงได้หลายค่าพลังงาน ซึ่งค่าพลังงานสูงสุด (เรียงจากพลังงานน้อยไปมาก) ลำดับที่ 1, 2, 3, และ 4 จะถูกเรียกถูกว่า s, p, d และ f ตามลำดับ โดยที่ระดับพลังงาน s จะสอดคล้องกับการจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพในแนวตั้ง และความต่างของค่ายอดพลังงานของ s-p และ p-d จะสอดคล้องกับความต่างพลังงาน

ไอแก๊นของอิเล็กตรอน E1-E2 และ E2-E3 ตามลำดับ [49] ซึ่งค่าความต่างพลังงานสามารถหาได้จาก โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพในแนวนอน ดังแสดงในรูปที่ 3.11

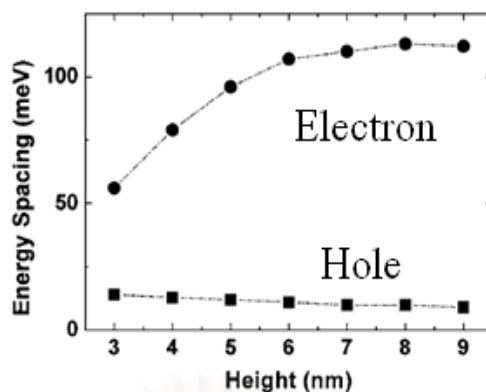


รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพในแนวนอนกับผลการทดลองทางแสงด้วยเทคนิค PL

3.3.1 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพในแนวตั้ง

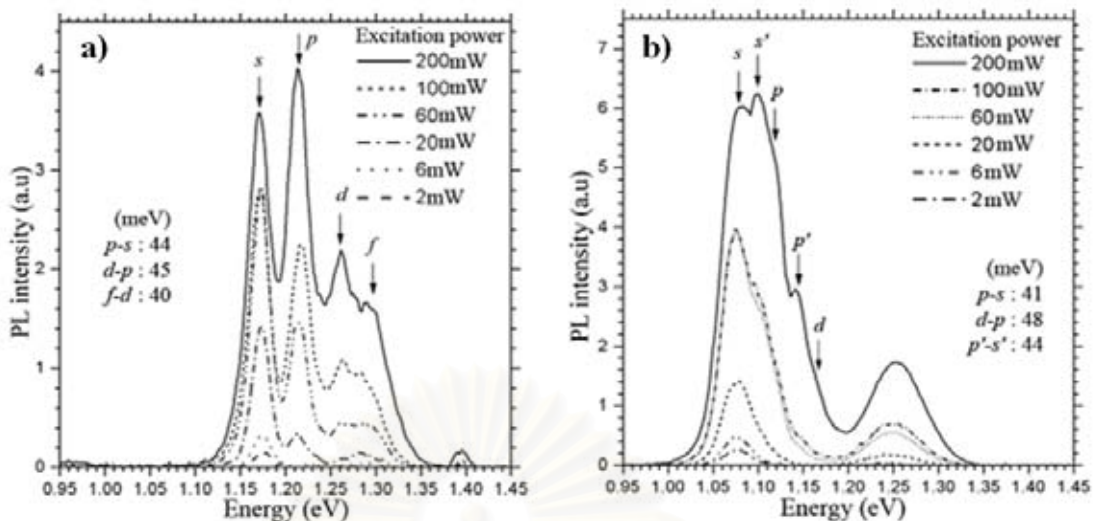
โดยทั่วไปควอนตัมดอต 1 คอตอาจมีค่าพลังงานไอแก๊นของอิเล็กตรอนและโฮลได้หลายค่า โดยที่ความต่างพลังงานไอแก๊นของโฮลเมื่อเทียบกับขนาดของควอนตัมดอตนั้นมีความแตกต่างกัน น้อยมากจนสามารถละเลยได้ ในขณะที่ความต่างพลังงานไอแก๊นของอิเล็กตรอนจะเปลี่ยนแปลงตามขนาดของควอนตัมดอตซึ่งจะมีค่า 40-70 meV ดังแสดงในรูปที่ 3.12

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างต่างค่าพลังงานไอเก้นของอิเล็กตรอนและโฮลกับขนาดความสูงของควอนตัมดอท [53]

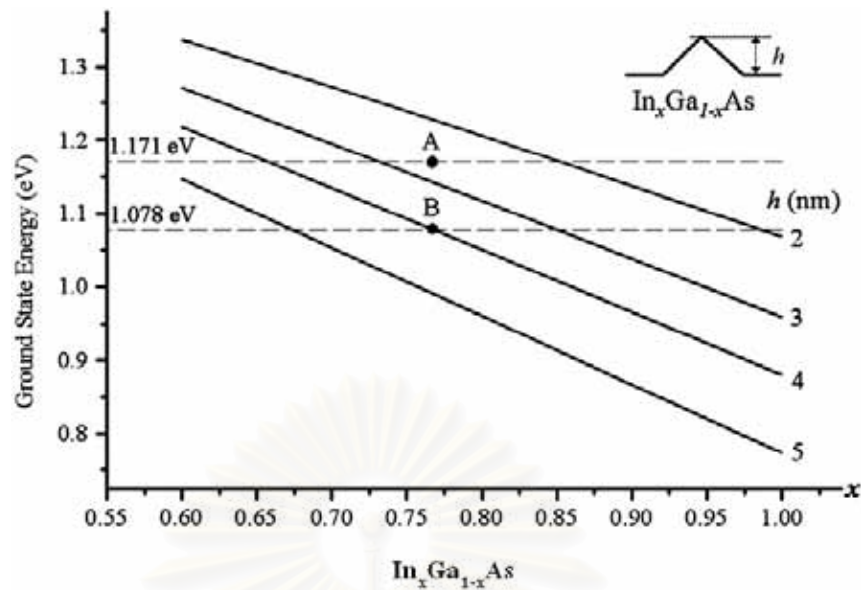
จากผลการวัดคุณสมบัติทางแสง PL ของชั้นงาน A และ B มีอุณหภูมิ 77 K มีค่าความแตกต่างของค่ายอดพลังงานเป็น 40-45 meV และ 20-30 meV ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเปล่งแสงของชั้นงาน A อาจเกิดจากควอนตัมดอทกลุ่มเดียว ดังรูปที่ 13.3a) แต่การเปล่งแสงของชั้นงาน B อาจเป็นผลมาจากควอนตัมดอท 2 กลุ่ม นั่นคือชั้นงาน B จะมีค่ายอดพลังงาน s, p, d จากควอนตัมดอทกลุ่มแรกซึ่งมีค่าความแตกต่างของพลังงานสูงสุดเป็น 41-48 meV และ s', p' จากควอนตัมดอทกลุ่มที่สอง ซึ่งมีค่าความแตกต่างของค่ายอดพลังงานเป็น 44 meV ดังแสดงในรูปที่ 3.13b) ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อกำหนดให้การเปล่งแสงของชั้นงาน B เกิดจากควอนตัมดอท 2 กลุ่ม จะมีค่าความต่างของค่ายอดพลังงานสอดคล้องกับผลจากการเปล่งแสงของควอนตัมดอทกลุ่มเดียวของชั้นงาน A



รูปที่ 3.13 ผลการทดลองทางแสง PL ของ a) ชี้นงาน A และ b) ชี้นงาน B ที่ 77 K

พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบทางเคมีของ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ QD กับความสูงประสิทธิภาพของควอนตัมดอตที่ได้จากการจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพ เทียบกับค่าพลังงาน ground state แบบมีความเครียด ดังแสดงในรูปที่ 3.14 โดยทั่วไปโครงสร้าง InGaAs QD จะมี In เป็นอัตราส่วน 60-100% ดังนั้นการคำนวณเพื่อหาอัตราส่วน $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ จึงควรมีค่า x มากกว่า 0.6 ขึ้นไป

เนื่องจากกระบวนการปลูกชี้นงาน A และ B ใช้อัตราเร็วและเวลาในการปลูกของชั้น InAs และ GaAs เท่ากัน มีเพียงค่าความหนาของชั้น GaAs capping หลังปลูก InAs QD ชั้นแรกเท่านั้นที่แตกต่างกัน ดังนั้นสูตรทางเคมีของ InGaAs QD ควรเท่ากันทั้งชี้นงาน A และ B ดังนั้นจึงทำการเลือกอัตราส่วนของ InGaAs ให้ตรงกับค่าพลังงาน s ทั้งชี้นงาน A และ B โดยที่อัตราส่วนความสูงประสิทธิภาพ QD ที่ได้จากการจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพของชี้นงาน A ต่อชี้นงาน B จะต้องมามีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนความสูงของ QD ของชี้นงาน A ต่อชี้นงาน B ที่ได้ผลจากการวัดผิวหน้าด้วยเทคนิค AFM



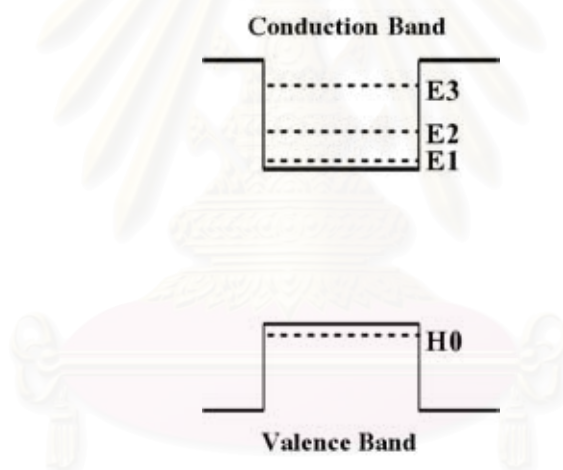
รูปที่ 3.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ และความสูงของควอนตัมดอต กับค่าพลังงาน ground state

เมื่อพิจารณาชั้นงาน A ที่มีค่าพลังงาน s เป็น 1.171 eV และชั้นงาน B ที่มีค่าพลังงาน s และ s' เป็น 1.078 eV และ 1.119 eV ตามลำดับ จึงกำหนดให้ชั้นงาน A และ B มีสูตรทางเคมีของ QD เป็น $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ ซึ่งเปลี่ยนค่า x เป็นค่าต่างๆ เช่น 0.7, 0.77, 0.80 ซึ่งให้ผลการคำนวณแม่นยำตรงกับค่ายอดพลังงาน s ของทั้งชั้นงาน A และ B ซึ่งเป็นไปตามเส้นประ(--) ดังแสดงในรูปที่ 3.14 โดยเส้นทึบ (—) แสดงถึงค่าพลังงานการเปล่งแสงเทียบกับความสูงประสิทธิผลที่ได้จากการจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิผลในแนวตั้ง ซึ่งอัตราส่วนความสูงประสิทธิผลของชั้นงาน A ต่อชั้นงาน B ของ $\text{In}_{0.77}\text{Ga}_{0.23}\text{As}$ มีค่าตรงกับอัตราส่วนความสูงของชั้นงาน A ต่อชั้นงาน B ที่วัดได้จาก AFM มากที่สุด ดังนั้นจึงกำหนดให้ชั้นงาน A และ B มีสูตรทางเคมีของ QD เป็น $\text{In}_{0.77}\text{Ga}_{0.23}\text{As}$ โดยที่ QD ของชั้นงาน A มีความสูงประสิทธิผลเป็น 2.6 nm และชั้นงาน B มีความสูงประสิทธิผลของ QD ใหญ่และเล็กเป็น 4 และ 3.6 nm ตามลำดับ

3.3.2 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพในแนวนอน

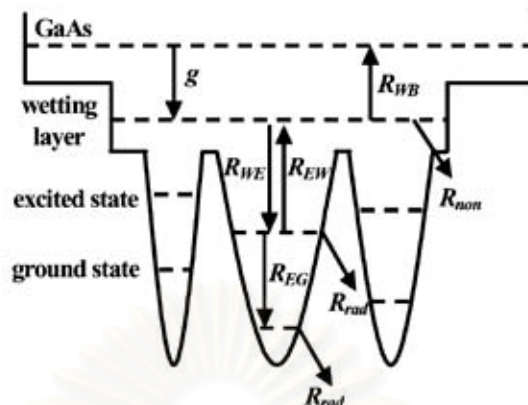
เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างควอนตัมคอตโมเลกุลในแนวนอนพบว่าประกอบไปด้วยชั้น GaAs / InGaAs QD / Intermediate / GaAs ซึ่งสูตรทางเคมีของ InGaAs QD เป็น $\text{In}_{0.77}\text{Ga}_{0.23}\text{As}$ QD เช่นเดียวกับการจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ในแนวตั้งเพราะเป็น QD เดียวกัน ดังนั้นการคำนวณโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ในแนวนอนจำเป็นต้องหาค่าความหนาของชั้น InGaAs QD และสูตรทางเคมีของ InGaAs ที่เป็นชั้นระหว่างกลาง (Intermediate layer: IL) รวมทั้งความหนาของชั้น IL นี้ด้วย

จากการคำนวณพบว่าพลังงานไอเก้นของอิเล็กตรอนในบ่อพลังงาน จะมีความแตกต่างกันมากเรื่อยๆตามระดับพลังงาน ดังเช่น ค่าความต่างพลังงาน E1-E2 จะมีค่าน้อยกว่าค่าความต่างพลังงาน E2-E3 ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 พลังงานไอเก้นของอิเล็กตรอนในแถบคอนดักชันจะมีค่าต่างกันมากเมื่อมีพลังงานมาก

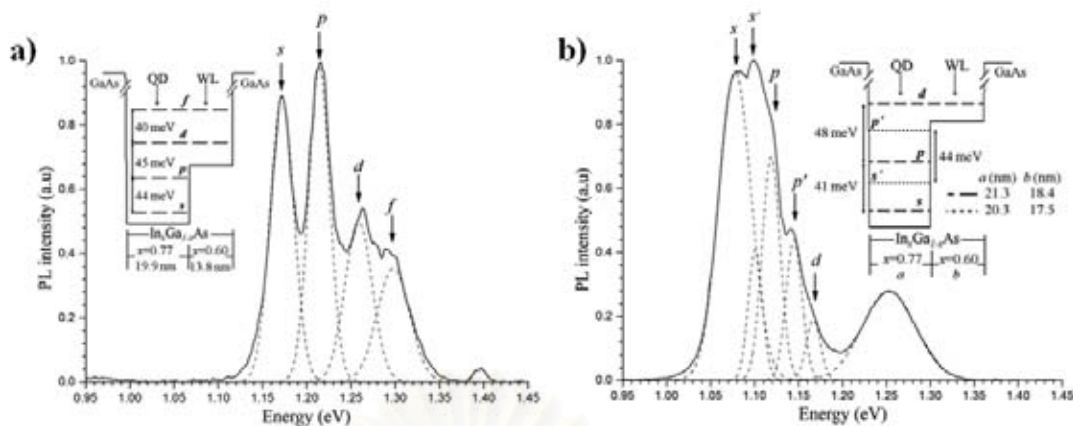
ชั้นงาน A มีค่าความต่างของพลังงานไอเก้น s-p, p-d และ d-f เป็น 44, 45 และ 40 meV ตามลำดับ และชั้นงาน B มีค่าความต่างของพลังงานไอเก้น s-p, p-d และ s'-p' เป็น 41, 48 และ 44 meV ตามลำดับ ซึ่งความต่างของพลังงานไอเก้นไม่เพิ่มขึ้นตลอดตามหลักการของพลังงานไอเก้นในบ่อพลังงานแบบสี่เหลี่ยม (Square well) บ่อเดียว แสดงว่าในโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์อาจไม่ได้มีบ่อพลังงานแบบสี่เหลี่ยมเพียงแค่อบ่เดียว



รูปที่ 3.16 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของ QDM ที่ประกอบด้วย InAs QD, wetting และ GaAs [54]

จากรูปที่ 13.6 แสดงตัวอย่างของโครงสร้าง QDM แบบ 2 มิติ มีการนำชั้น wetting มาคำนวณรวมไว้ด้วย ซึ่งพลังงานไอเกินในชั้น wetting อาจมีผลต่อการเปล่งแสงของชั้นงาน การจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพในแนวนอนของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะคำนวณหาชั้นของ IL แต่ไม่ได้ศึกษาถึง wetting ดังนั้น QD ที่ได้จากผลการจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพที่ได้จึงมีความคล้ายคลึงกับรูปที่ 3.16

ลำดับการคำนวณจะเริ่มจากการหาความกว้างของ $\text{In}_{0.77}\text{Ga}_{0.23}\text{As}$ QD ก่อน โดยที่ความกว้างจะสัมพันธ์กับค่าความต่างของระดับพลังงาน s-p จากนั้นจึงทำการคำนวณหาสูตรทางเคมีของ InGaAs ที่เป็นชั้น IL โดยที่สูตรทางเคมีของชั้น IL นี้จะสัมพันธ์กับความต่างระดับพลังงานของ p-d จากนั้นจึงคำนวณหาความหนาของ IL ชั้นนี้เป็นขั้นสุดท้าย โดยที่ความหนาชั้น IL จะสัมพันธ์กับค่าความต่างระดับพลังงานของ d-f ซึ่งจะทำให้ได้โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพในแนวนอน ดังนี้



รูปที่ 3.17 ผลการวัดทางแสง PL ที่สอดคล้องกับโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพในแนวนอนของชิ้นงาน a) A และ b) B

ชิ้นงาน A จะมีความกว้างของ $\text{In}_{0.77}\text{Ga}_{0.23}\text{As}$ QD เป็น 19.9 nm และชั้น IL มีสูตรทางเคมีเป็น $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ หนา 13.8 nm ดังแสดงในรูปที่ 3.17 a)

ชิ้นงาน B จะมีความหนาของ 2 ขนาดได้แก่ ความหนาของขนาดเล็กและความหนาของขนาดใหญ่ ซึ่งจะมีความกว้างของ $\text{In}_{0.77}\text{Ga}_{0.23}\text{As}$ QD เป็น 20.3 และ 21.3 nm และชั้น IL มีสูตรทางเคมีเป็น $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ หนา 17.5 และ 18.4 nm ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.17 b)

แม้ผลการจำลองนี้สามารถให้ความถูกต้องแม่นยำในระดับ 1 meV แต่เป็นเพียงการใช้ผลการวัดแสง PL ที่อุณหภูมิเดียวกันเท่านั้น ซึ่งอาจไม่ถูกต้องที่เงื่อนไขอุณหภูมิต่างกัน จึงทำการวัดทางแสง PL ที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อให้ได้โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกต้องมากขึ้น

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปราย

โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบหนึ่งมิติของ InGaAs QDM ที่ได้อธิบายในบทที่แล้วจะถูกปรับปรุงให้มีความสมจริงมากขึ้นเพื่อให้สามารถอธิบายผลการวัด PL ของโครงสร้างจริงได้ดียิ่งขึ้น โดยทำการทดลองวัด PL แบบปรับกำลังของแสงกระตุ้น เพื่อใช้วิเคราะห์หาค่ายอดสูงสุดสำหรับใช้หาค่าความสูงของ InGaAs QD และการวัด PL แบบปรับอุณหภูมิของชั้นงานเพื่อปรับค่าความกว้างของ InGaAs QD และความกว้างของชั้นระหว่างกลาง (Intermediate Layer : IL) เพื่อใช้ในการจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบ 1 มิติ จากนั้นจึงนำผลการจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบหนึ่งมิติแบบเก่าและใหม่เปรียบเทียบความแม่นยำกับผลการวัด PL จริง รวมทั้งสรุปขนาดของ QD ประสิทธิภาพการจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพเทียบกับขนาดจริงของ QD จากการวัดผิวหน้าชั้นงานด้วยเทคนิค AFM

4.1 ผลการทดลองคุณสมบัติทางแสง

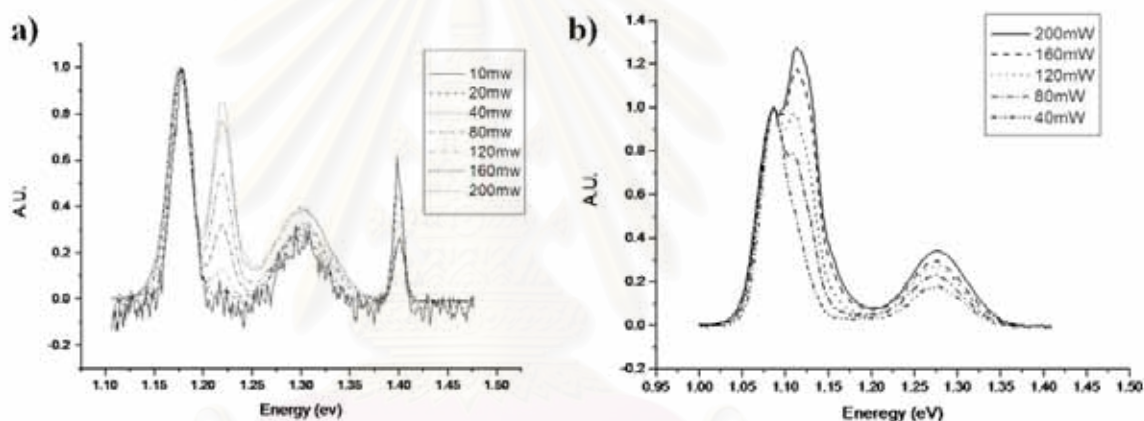
การวัดคุณสมบัติทางแสงของชั้นงานด้วยเทคนิค PL จะทำ 2 กรณี คือ 1) ปรับกำลังของแสงเลเซอร์ที่กระตุ้นชั้นงานแต่คงอุณหภูมิของชั้นงานไว้ 2) ปรับอุณหภูมิของชั้นงานแต่คงกำลังของแสงเลเซอร์ที่กระตุ้นชั้นงานไว้ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1.1 ผลการวัด PL แบบปรับกำลังของแสงกระตุ้น

เพื่อให้ได้ข้อมูลการเปล่งแสงของชั้นงานเพียงพอสำหรับการจำแนก ว่าช่วงใดเป็นการเปล่งแสงของสถานะพื้นหรือสถานะกระตุ้น จึงจำเป็นต้องทำการทดลองวัด PL ที่อุณหภูมิกงที่ โดยปรับกำลังของเลเซอร์เป็น 40, 80, 120, 160 และ 200 mW และมีอุณหภูมิกงที่เป็น 20 K

ผลการวัด PL ของชั้นงาน A และชั้นงาน B ถูกแสดงในรูปที่ 4.1 a) และ 4.2 b) ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลที่ทำการ normalized กับค่ายอดพลังงานค่าแรก ซึ่งเห็นได้ว่าตำแหน่งค่ายอดพลังงานทั้ง 4 ค่า ในรูปที่ 4.1a) และทั้ง 3 ค่าในรูป 4.1b) จะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มของเลเซอร์ แต่ค่าความเข้มแสงของค่ายอดต่างๆจะเปลี่ยนแปลงตามความเข้มของเลเซอร์

การเปล่งแสงของชิ้นงานมาจาก ยอดพลังงานในสถานะพื้นหรือ Ground State (GS), สถานะกระตุ้นที่หนึ่ง 1st Excited State (1ES), ที่สอง 2nd Excited State (2ES), และที่สาม 3rd Excited State (3ES) เป็นต้น โดยแต่ละสถานะจะสามารถรองรับพาหะนำไฟฟ้าได้เพียงจำนวนหนึ่งเท่านั้น โดยพาหะนำไฟฟ้าเลือกที่จะอยู่ระดับ GS ก่อน แต่เมื่อมีจำนวนพาหะนำไฟฟ้าที่ได้รับการกระตุ้นมากขึ้นจนระดับ GS อิ่มตัว พาหะส่วนเกินจากระดับ GS จะถ่ายเทไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้นในลำดับถัดมา คือ 1ES เป็นผลให้ความเข้มของระดับพลังงาน s มีค่าคงที่แต่ความเข้มของระดับพลังงาน 1ES เพิ่มขึ้นตามกำลังของแสงกระตุ้น ถ้ายังมีการเพิ่มจำนวนพาหะนำไฟฟ้าให้มากขึ้นอีกจนกระทั่งระดับพลังงาน 1ES อิ่มตัว พาหะนำไฟฟ้าส่วนเกินที่เหลือจะเลือกอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้นในลำดับถัดๆไป โดยระดับพลังงาน GS, 1ES และ 2ES จะถูกแทนด้วย s, p และ d ตามลำดับ

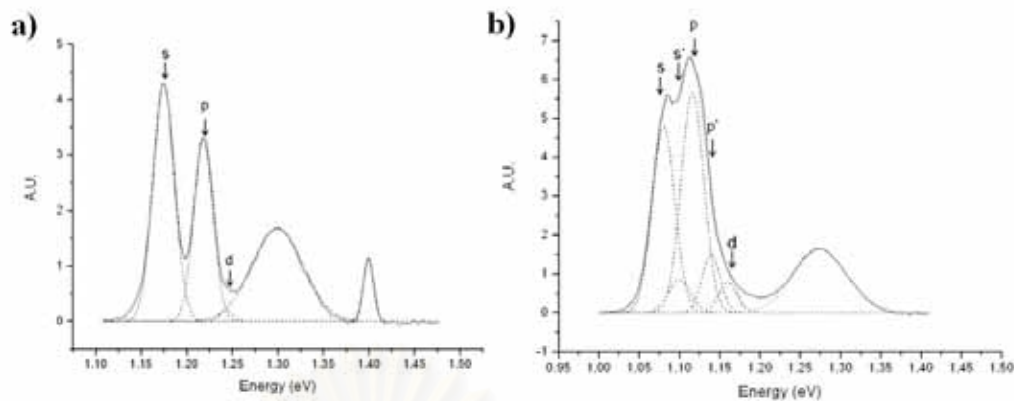


รูปที่ 4.1 ผลการวัด PL แบบปรับกำลังของแสงกระตุ้น ที่อุณหภูมิ 20 K ของชิ้นงาน a) A และ b) B

ผลการวัด PL ที่ได้ข้างต้นได้ถูกวิเคราะห์โดยการทำ Gaussian Fit ซึ่งได้ถูกพิสูจน์แล้วว่าสามารถแทนลักษณะของผล PL ที่เปล่งออกมาจาก QD ได้ดี [55] และจากการวิเคราะห์ผลการวัด PL ด้วย Gaussian Fit ให้ผลที่แม่นยำมากกว่า Lorentzian Fit ซึ่งผลจากการทำ Gaussian Fit ถูกแสดงในรูปที่ 4.2a) สำหรับชิ้นงาน A และ รูปที่ 4.2b) สำหรับชิ้นงาน B ซึ่งได้ผลดังนี้

ชิ้นงาน A มีค่ายอดพลังงานที่ 1.176, 1.220, 1.249, 1.300 และ 1.402 eV ดังแสดงในรูปที่ 4.2 a)

ชิ้นงาน B มีค่ายอดพลังงานที่ 1.081, 1.100, 1.117, 1.141, 1.160 และ 1.276 eV ดังแสดงในรูปที่ 4.2 b)

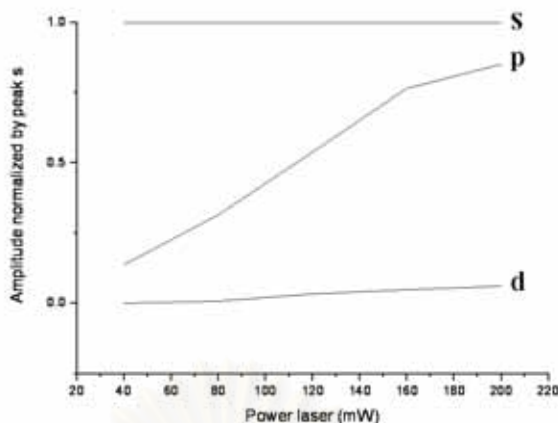


รูปที่ 4.2 ผลจากการหาค่ายอดพลังงานจาก Gaussian curve ของชิ้นงาน a) A และ b) B ซึ่งทำการทดลองวัด PL ที่อุณหภูมิ 20 K และกำลังของเลเซอร์เป็น 160 mW

การวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการวัด PL จะวิเคราะห์เฉพาะค่ายอดพลังงานเพียง 3 ยอดแรก คือ s, p และ d เท่านั้น เพราะค่ายอดที่เหลือตั้งแต่ 1.25 eV ขึ้นไปจะเป็นชั้น wetting [56]

สำหรับชิ้นงาน A จะเห็นได้ว่าความห่างของยอดพลังงานที่อยู่ติดกันของชิ้นงาน A จะมีค่าอยู่ในช่วง 30-45 meV ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.3.1 แสดงให้เห็นแล้วว่า เมื่อชิ้นงานมีผลการเปล่งแสงที่มาจากกลุ่มควอนตัมดอตเพียง 1 กลุ่ม จะทำให้ค่าความต่างของยอดพลังงานมีมากกว่า 30 meV [51] ซึ่งสอดคล้องกับค่าความต่างของค่ายอดพลังงานของชิ้นงาน A

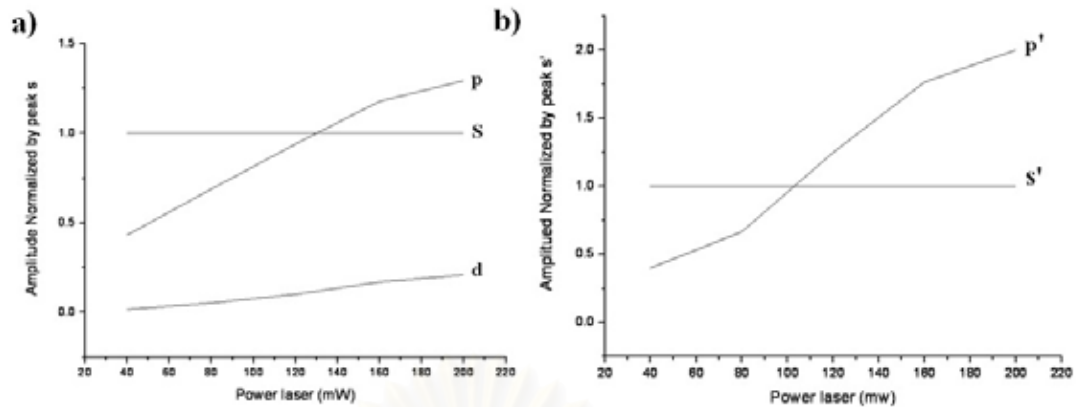
เมื่อนำผลการวัด PL ของชิ้นงาน A มาวิเคราะห์เฉพาะความเข้มของค่ายอดพลังงานแบบ normalized กับค่าพลังงาน s ดังรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า ค่าพลังงาน p จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังของแสงเลเซอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อระดับพลังงาน s อิ่มตัว พาหะที่ถูกกระตุ้นจะไปตกอยู่ในระดับ p แทน และในชิ้นงานนี้กำลังแสงเลเซอร์สูงสุด 160 mW จะทำให้ระดับ p ยังไม่อิ่มตัว การเปล่งแสงโดยระดับ d จึงมีค่าความเข้มคงที่แม้กำลังกระตุ้นของเลเซอร์เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่า การเปล่งแสงยอดพลังงาน s, p และ d มีที่มาจากโครงสร้างทางกายภาพเดียวกัน หรือผลการเปล่งแสงของชิ้นงาน A เป็นผลมาจากควอนตัมดอตเพียงกลุ่มเดียว



รูปที่ 4.3 ความเข้มของค่ายอดพลังงานของชั้นงาน A แบบ normalized ด้วยค่าพลังงาน s

สำหรับชั้นงาน B ค่าห่างระหว่างยอดพลังงานจะมีค่าต่ำกว่าชั้นงาน A ประมาณครึ่งหนึ่ง คืออยู่ในช่วง 17-24 meV จึงอาจตีความได้ว่า ความกว้างของ InGaAs QD ของชั้นงาน B มีค่าสูงกว่าของชั้นงาน A มาก เนื่องจากผลการจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพใน 1 มิติในแนวนอนระบุว่า การที่จะได้ ΔE อยู่ในช่วง 17-24 meV ได้นั้น ขนาดของ QD ในชั้นงาน B จะต้องกว้างเป็นสองเท่าของชั้นงาน A ซึ่งเป็นไปไม่ได้ เนื่องจากความกว้างที่แท้จริงของ QD ของชั้นงาน A และ B ที่วัดได้จากเทคนิค AFM มีค่าแตกต่างกันน้อยมาก แต่หากพิจารณาผลต่างระหว่างพลังงานยอดที่ 1 กับยอดที่ 3 จะพบว่ามีค่า 36 meV ในขณะที่ผลต่างระหว่างยอดที่ 2 และยอดที่ 4 มีค่า 41 meV ซึ่งเป็นไปได้ เนื่องจาก ΔE ของชั้นงาน B อยู่ในช่วงเดียวกับ ΔE ของชั้นงาน A ซึ่งมีขนาดของ QD ใกล้เคียงกัน จึงเป็นไปได้ว่าการเปล่งแสงของชั้นงาน B อาจเป็นผลมาจากควอนตัมดอต 2 กลุ่มที่มีขนาดเฉลี่ยต่างกัน โดยภาพ AFM ในรูปที่ 3.4 เป็นเหตุผลหลักในการตั้งสมมุติฐานนี้

การตรวจสอบว่าการเปล่งแสง PL เป็นผลมาจากควอนตัมดอต 2 กลุ่มหรือไม่ สามารถตรวจสอบได้จากสมมุติฐานที่ว่า การเปล่งแสงของควอนตัมดอต 2 กลุ่มที่เป็นอิสระต่อกัน จะมีพฤติกรรมของแต่ละกลุ่มที่เห็นได้ชัด โดย GS ของแต่ละกลุ่มจะต้องอิมตัวก่อนที่ 1ES หรือ 2ES (หากมี) ของแต่ละกลุ่มจะถูกครอบครอง



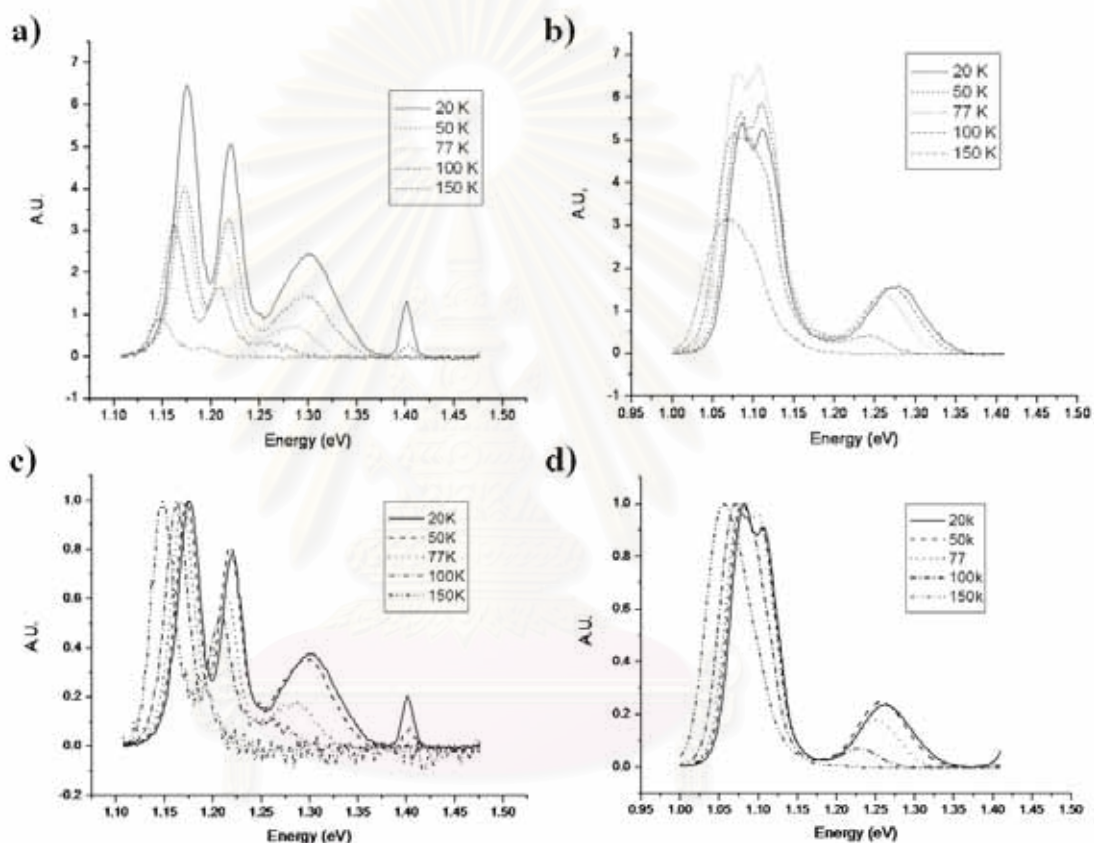
รูปที่ 4.4 ความเข้มของค่ายอดพลังงานของชั้นงาน B แบบ normalized ด้วย A) พลังงาน s และ b) พลังงาน s'

รูปที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ความเข้มของค่ายอดพลังงาน s, p, d แบบ Normalized ของชั้นงาน B ซึ่งเห็นได้ว่า ค่าความเข้มของพลังงาน s มีค่าคงที่ (จากการ normalized) ในขณะที่ค่าความเข้มของพลังงาน p และ d มีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังของแสงเลเซอร์ ดังรูปที่ 4.4a) ซึ่งเป็นลักษณะที่คล้ายกับรูปที่ 4.3 จึงสรุปได้ว่ายอด s, p, d เป็นยอดของการเปล่งแสงจาก QD กลุ่มหนึ่ง นอกจากนี้ผลในรูปที่ 4.4b) ก็มีลักษณะคล้ายกับรูปที่ 4.3 เช่นกัน จึงสามารถสรุปได้ว่า ยอด s' และ p' เป็นยอดของการเปล่งแสงจาก QD อีกกลุ่มหนึ่ง

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ในหัวข้อนี้ แสดงให้เห็นว่า ชั้นงาน A มีผลการเปล่งแสงมาจากควอนตัมดอต 1 กลุ่ม ในขณะที่ชั้นงาน B มีผลการเปล่งแสงมาจากควอนตัมดอต 2 กลุ่ม และทราบค่าพลังงาน GS หรือยอด s สำหรับชั้นงาน A และยอด s และ s' สำหรับชั้นงาน B เป็นที่แน่นอน แต่เพื่อให้โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบหนึ่งมิติที่ได้แสดงในบทที่ 3 มีความแม่นยำมากขึ้น จึงจำเป็นต้องทำการทดลอง PL แบบปรับอุณหภูมิของชั้นงานดังจะได้อธิบายในลำดับต่อไปด้วย

4.1.2 ผลการวัด PL แบบปรับอุณหภูมิของชิ้นงาน

ชิ้นงานถูกวัด PL ที่อุณหภูมิ 20, 50, 77, 100 และ 150 K โดยมีกำลังของแสงเลเซอร์คงที่ เป็น 160 mW ผลการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของชิ้นงาน A และ B ถูกแสดงในรูปที่ 4.5a) และ 4.5b) ตามลำดับ และเมื่อนำผลการวัด PL ที่ได้มาทำการ normalized กับค่ายอดพลังงานค่าแรกจะได้ผลของชิ้นงาน A และ B ในรูปที่ 4.5 c) และ 4.5 d) ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 ผลการวัด PL แบบปรับอุณหภูมิของชิ้นงาน เมื่อกำลังของแสงเลเซอร์คงที่ ที่ 160 mW โดยภาพบนแสดงข้อมูลดิบชิ้นงาน a) A และ b) B ในขณะที่ภาพล่างแสดงข้อมูลที่ถูก normalized กับยอดพลังงานแรกของชิ้นงาน c) A และ d) B

เมื่อนำผลการวัด PL แบบปรับอุณหภูมิชิ้นงานข้างต้นมาคำนวณหาค่ายอดพลังงานจากการทำ Gaussian fit เช่นเดียวกับในกรณีของการวัด PL แบบปรับกำลังของแสงกระตุ้น ทำให้เห็นได้ชัดว่าชิ้นงาน A และ B จะมีพลังงานของค่ายอดพลังงานลดลง (red shift) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังรูปที่

4.6a) และ 4.6b) ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่แถบพลังงานต้องห้ามมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มตามสมการของ Varshni [57] ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของแถบพลังงานต้องห้าม $E_g(T)$ กับอุณหภูมิ T ดังสมการ (4.1)

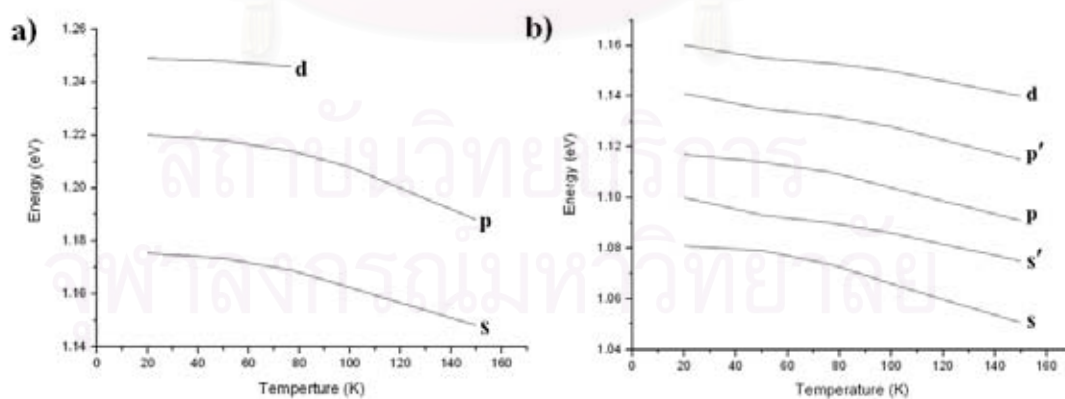
$$E_g(T) = E_g(T = 0) - \left(\frac{\alpha T^2}{T + \beta} \right) \quad (4.1)$$

เมื่อ $E_g(T = 0)$ คือ ค่าแถบพลังงานต้องห้ามที่อุณหภูมิ 0 K

α, β คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นกับวัสดุ

ตารางที่ 4.1 แสดงค่า α, β ของ InAs, InGaAs และ GaAs [58, 59]

	α (10^{-4} eV/K)	β (K)	$E_g(T = 0)$ (eV)
InAs	4.19	271	0.705
GaAs	5.41	204	1.519
In _{0.77} Ga _{0.23} As	4.47	255	0.940
In _{0.6} Ga _{0.4} As	4.97	244	1.109



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ายอดพลังงานและอุณหภูมิของชั้นงาน a) A และ b) B

ผลการวัด PL แบบเปลี่ยนอุณหภูมิชิ้นงานนี้ จะถูกใช้ในการคำนวณโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบหนึ่งมิติที่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิให้แม่นยำมากยิ่งขึ้น จากเดิมที่มีผลการวัด PL แบบเปลี่ยนกำลังแสงที่ใช้กระตุ้นเท่านั้น ซึ่งข้อมูลการวัดผล PL ทั้งสองแบบถูกนำมาใช้จำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบหนึ่งมิติ ดังต่อไปนี้

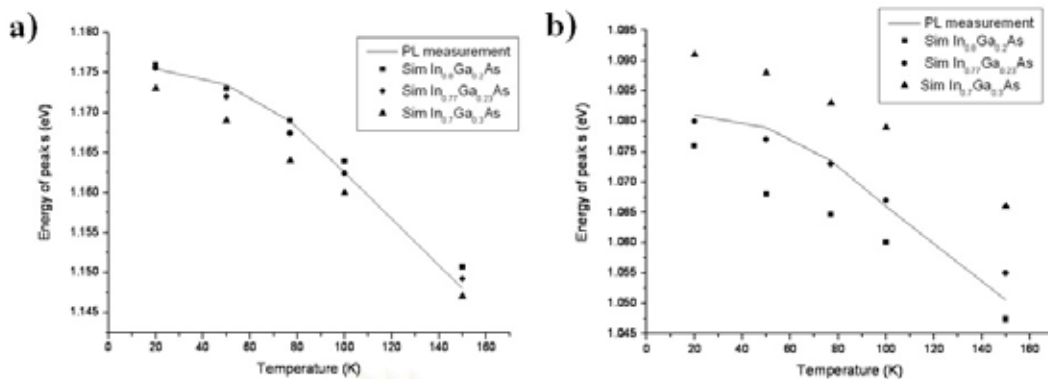
4.2 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบหนึ่งมิติ

4.2.1 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแนวตั้งของ A และ B

การจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบหนึ่งมิติของ InGaAs QDM จะเริ่มจากการกำหนดความสูงของควอนตัมดอตที่เหมาะสมเป็นอันดับแรก โดยใช้ข้อมูลของค่าพลังงาน GS (s ในชิ้นงาน A, s และ s' ในชิ้นงาน B) เป็นค่าตั้งต้น เนื่องจากการทำการทดลองแบบเปลี่ยนอุณหภูมิทั้งหมด 5 ค่า คือ 20, 50, 77, 100, และ 150 K เพื่อลดความผิดพลาดผลการคำนวณ จึงเริ่มคำนวณหาความสูงของ QD ที่เหมาะสมที่อุณหภูมิ 77 K ก่อน เพราะโครงสร้างแบบเก่าก็ได้รับการคำนวณที่อุณหภูมิ 77 K ด้วย หลังจากนั้นจึงคำนวณที่อุณหภูมิต่างๆที่เหลือ ซึ่งจะพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนตามอุณหภูมิต่างๆ ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานสถานะพื้นกับอุณหภูมิ

Temperature (K)	In _{0.77} Ga _{0.23} As		In _{0.6} Ga _{0.4} As		GaAs
	E _g (eV)	ΔE _c (eV)	E _g (eV)	ΔE _c (eV)	E _g (eV)
20	0.939	0.324	1.108	0.251	1.519
50	0.932	0.323	1.105	0.251	1.518
77	0.936	0.323	1.100	0.250	1.514
100	0.928	0.321	1.095	0.249	1.501
150	0.915	0.319	1.082	0.247	1.485

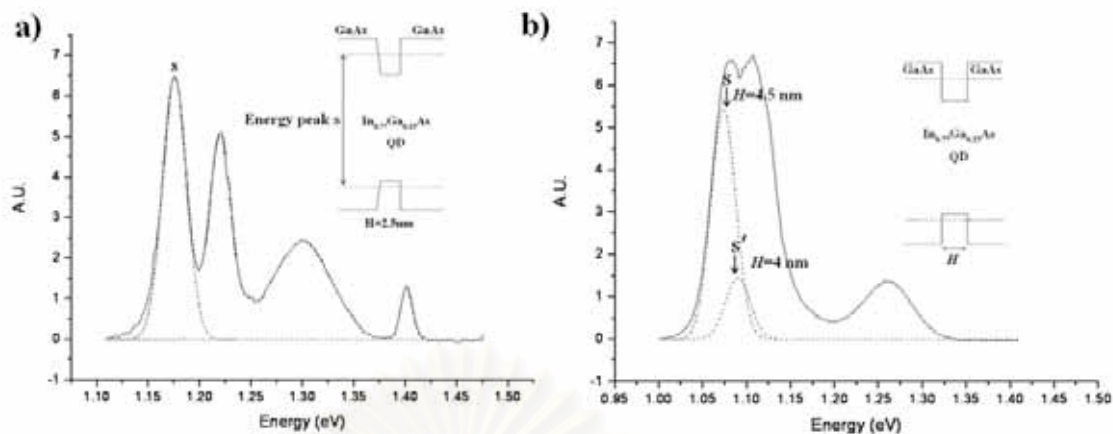


รูปที่ 4.7 ผลการคำนวณหาค่าพลังงานจากการเปลี่ยนส่วนประกอบทางเคมีของ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ QD เทียบกับค่ายอดพลังงาน s ที่วัดได้จากเทคนิค PL ของชิ้นงาน a) A และ b) B

เมื่อนำพารามิเตอร์ต่างๆของ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ และ GaAs ดังตารางที่ 4.2 มาคำนวณหาพลังงานที่ได้จากการจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพในแนวตั้ง โดยการเปลี่ยนค่าส่วนประกอบทางเคมี (x) ของ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ QD เป็น 0.7, 0.77 และ 0.8 เพื่อเปรียบเทียบกับค่ายอดพลังงาน s ที่ได้จากการวัดทางแสงด้วยเทคนิค PL ของทั้งชิ้นงาน A และ B พบว่า $\text{In}_{0.77}\text{Ga}_{0.23}\text{As}$ ให้ผลได้แม่นยำใกล้เคียงกับผลการวัด PL มากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ดังนั้น จึงกำหนดให้ส่วนประกอบทางเคมีของ QD เป็น $\text{In}_{0.77}\text{Ga}_{0.23}\text{As}$ จากนั้นจึงทำการคำนวณเพื่อหาความสูงของ $\text{In}_{0.77}\text{Ga}_{0.23}\text{As}$ QD ซึ่งได้ผลดังนี้

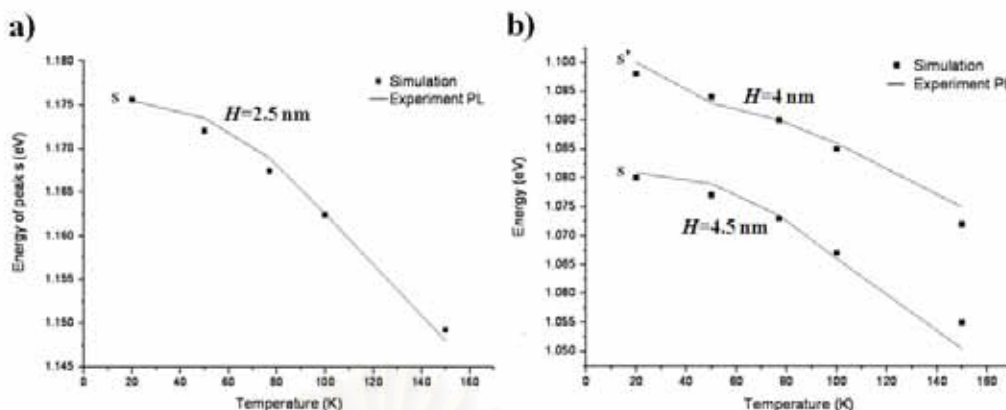
ชิ้นงาน A มี QD เป็น $\text{In}_{0.77}\text{Ga}_{0.23}\text{As}$ และมีความสูงเป็น 2.5 nm ซึ่งสอดคล้องกับค่าพลังงาน s ดังรูปที่ 4.8a) และชิ้นงาน B มี QD เป็น $\text{In}_{0.77}\text{Ga}_{0.23}\text{As}$ เช่นกัน และมีความสูงของควอนตัมดอทใหญ่และเล็กเป็น 4.5 nm และ 4 nm ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าพลังงาน s และ s' ดังรูปที่ 4.8b)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.8 ผลการวัด PL (เส้นทึบ) Gaussian Fit ของยอดพลังงานแรก (เส้นประ) และโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบหนึ่งมิติในแนวตั้ง (รูปแทรก) ของ a) ชั้นงาน A จากการกำหนดให้ $H=2.5$ nm และ b) ชั้นงาน B จากการกำหนดให้ $H=4.5$ (สำหรับ s) และ 4 nm (สำหรับ s')

เมื่อนำพารามิเตอร์ที่ได้รับการ optimize แล้วข้างต้นมาจำลองหาโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ในแนวตั้งเพื่อให้ได้มาซึ่ง E_0 และ H_0 แล้วเปรียบเทียบกับผลการเปล่งแสงของ GS (E_0-H_0) ที่ได้จากการวัด PL ที่อุณหภูมิต่างๆ ของชั้นงาน A และ B ในรูปที่ 4.9a) และ 4.9b) ตามลำดับโดยใช้พารามิเตอร์หลักของวัสดุที่แสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าแนวโน้มการลดลงของค่าพลังงานที่ได้จากการคำนวณ (■ ในรูป) จะใกล้เคียงกับการวัด PL (— ในรูป) มาก โดยมีความผิดพลาดสูงสุดสำหรับชั้นงาน A และ B จะมีค่า 1.5 และ 5 meV ตามลำดับ ทั้งที่พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณเป็นพารามิเตอร์ของ bulk



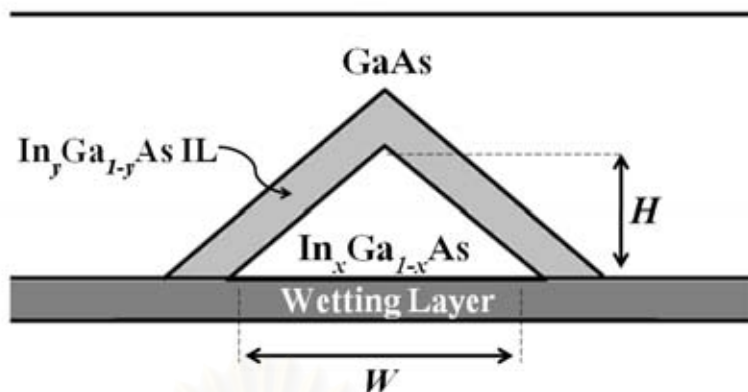
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความผลการคำนวณค่าพลังงาน GS จากโครงสร้างอเล็กทรอนิกส์ ประสิทธิภาพในแนวตั้ง (■) เทียบกับผล PL (—) ที่อุณหภูมิต่างๆ ของชั้นงาน a) A และ b) B

4.2.2 โครงสร้างอเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแนวนอนของ A และ B

เมื่อได้ความสูงที่เหมาะสมจากข้างต้นมาแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการคำนวณหาความกว้างของควอนตัมดอตที่เหมาะสม จากการวิเคราะห์ผลต่างของค่าขอดพลังงาน ΔE ระหว่างขอด s-p, p-d และ s'-p' เป็นหลัก ซึ่งค่าความต่างของค่าขอดพลังงานของการวัดผล PL จะมีค่าเท่ากับค่าความต่างของพลังงานไอเกินของอเล็กทรอนมิใช่โฮล [53]

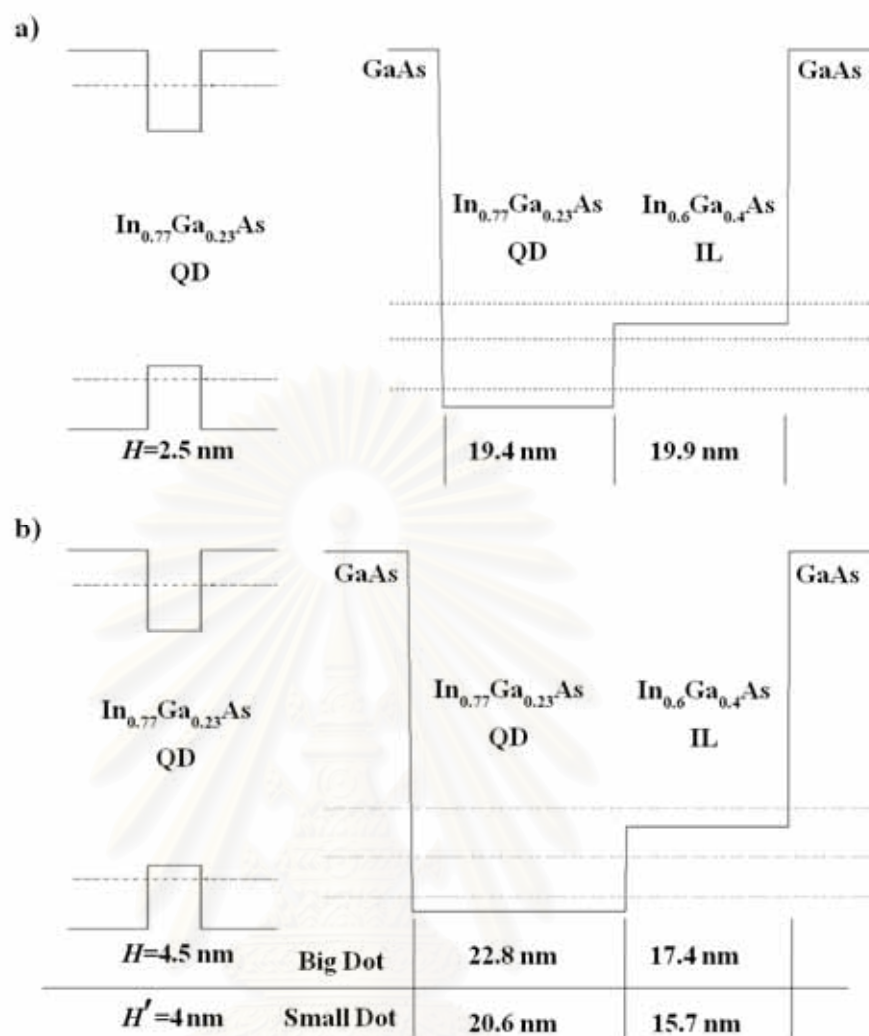
การจำลองเริ่มจากกำหนดค่าความกว้างของ $\text{In}_{0.77}\text{Ga}_{0.23}\text{As}$ QD ก่อน โดยที่ความกว้าง QD จะสัมพันธ์กับระยะห่างของระดับพลังงาน s-p และ s'-p' จากนั้นจึงทำการกำหนดส่วนประกอบทางเคมี (y) ของ $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ ที่เป็นชั้น ระหว่างกลาง (Intermediate Layer : IL) โดยที่ค่า y นี้จะสัมพันธ์กับความต่างระดับพลังงานของ p-d

เมื่อได้ค่า y ของชั้น InGaAs (IL) แล้วจึงทำการกำหนดความกว้างของชั้นนี้เป็นขั้นสุดท้าย โดยที่ความกว้างของชั้น IL จะสัมพันธ์กับค่าความต่างระดับพลังงานของ d-f ทำให้ได้โครงสร้างอเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบ 1 มิติในแนวนอนของโครงสร้าง



รูปที่ 4.10 ภาพตัดขวางของโครงสร้าง QD ที่ใช้ในการจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพใน 1 มิติ โดยอาศัยพารามิเตอร์ที่สำคัญในแนวตั้งคือ H และ x และสำหรับแนวนอนคือ W , x และ y

ภาพตัดขวางของโครงสร้าง QD ที่ใช้ในการจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพใน 1 มิติ ดังรูปที่ 4.10 มีส่วนประกอบทางเคมีของ QD เป็น $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ มีความสูงเป็น H และมีความกว้าง เป็น W โดยที่ QD จะถูกล้อมรอบด้านบนด้วยชั้น IL ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีเป็น $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ และมีชั้นที่อยู่ด้านล่างของ QD เป็นชั้น wetting โดยที่ IL ถูกล้อมรอบด้วย GaAs อีกที ซึ่งค่า x และ H ที่เหมาะสมสามารถกำหนดได้จากการจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพในแนวตั้ง และค่า W , x และ y ที่เหมาะสมสามารถกำหนดได้จากการจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพในแนวนอน



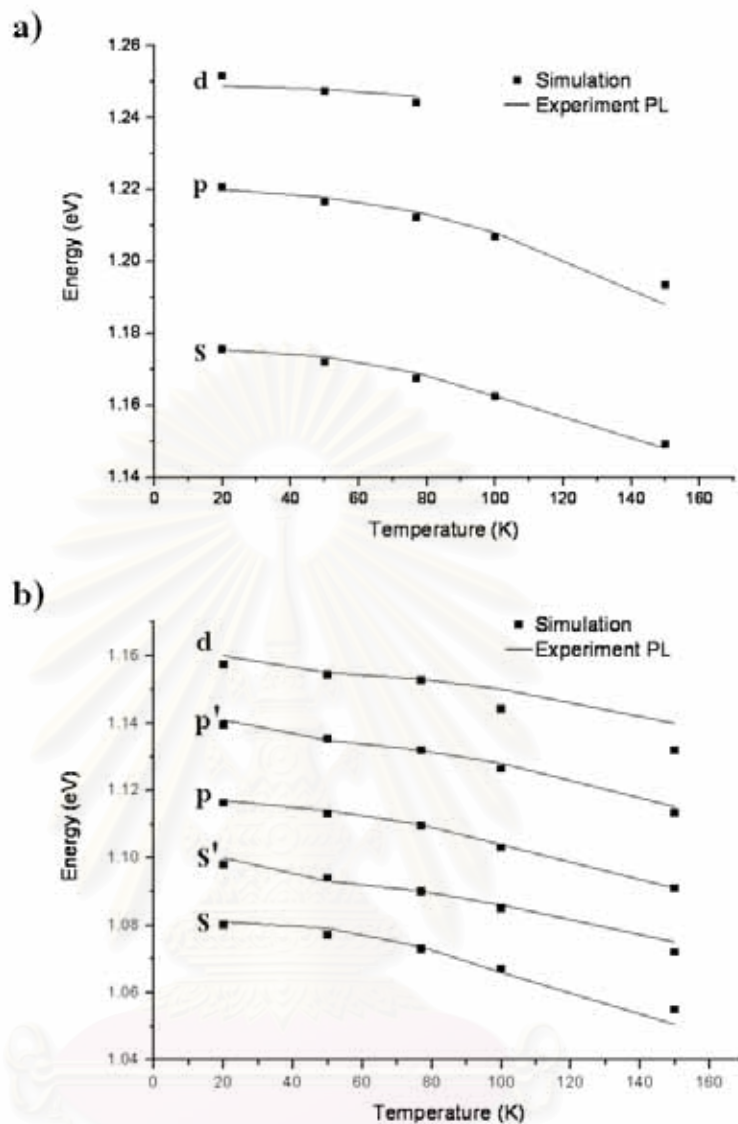
รูปที่ 4.11 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบในแนวตั้ง (ซ้าย) และแนวนอน (ขวา) ที่สอดคล้องกับผลการวัดทางแสง PL ของชิ้นงาน a) A และ b) B

จากการพิจารณาผลการทดลองในรูปที่ 4.6 และพารามิเตอร์ในการจำลองในตารางที่ 4.1 และ 4.2 ทำให้สามารถจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพในแนวนอนได้ แล้วทำการปรับเปลี่ยนความกว้างของชั้น IL และองค์ประกอบทางเคมีของชั้น IL (y) ไปเรื่อยๆจนกระทั่งได้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลการวัด PL มากที่สุด ดังต่อไปนี้

ชั้นงาน A มีความกว้างของ $\text{In}_{0.77}\text{Ga}_{0.23}\text{As}$ QD เป็น 19.4 nm และมีชั้น IL เป็น $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ กว้าง 19.9 nm ดังแสดงในรูปที่ 4.11a)

ชั้นงาน B มีควอนตัมดอต 2 กลุ่ม ได้แก่ ควอนตัมดอตขนาดเล็กและใหญ่ ซึ่งจะมีความกว้างของ $\text{In}_{0.77}\text{Ga}_{0.23}\text{As}$ QD เป็น 20.6 และ 22.8 nm ตามลำดับ และมี $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ IL กว้าง 15.7 และ 17.4 nm ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.11b)

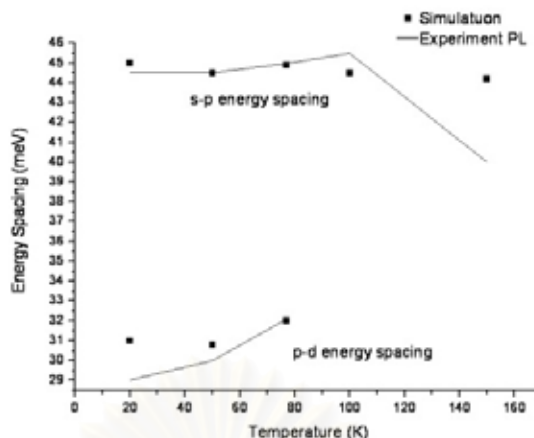
เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าขดพลังงานของชั้นงาน A (s, p, d) และ B (s, s', p, p', d) จากโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบหนึ่งมิติของ InGaAs QD กับ ผลการวัด PL ที่อุณหภูมิต่างๆ ดังรูปที่ 4.12a) และ b) ตามลำดับ จะเห็นว่าผลการคำนวณที่ได้จากชั้นงานทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกับผลการวัด PL อย่างมาก โดยที่ชั้นงาน A และ B มีค่าความผิดพลาดสูงสุด 6.3 และ 7.9 meV ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบค่าขดพลังงานที่ได้จากการคำนวณกับผลการวัด PL ของ a) ชั้นงาน A และ b) ชั้นงาน B ที่อุณหภูมิต่างๆ

4.2.3 วิเคราะห์ค่าความผิดพลาดจากการจำลองชั้นงาน A

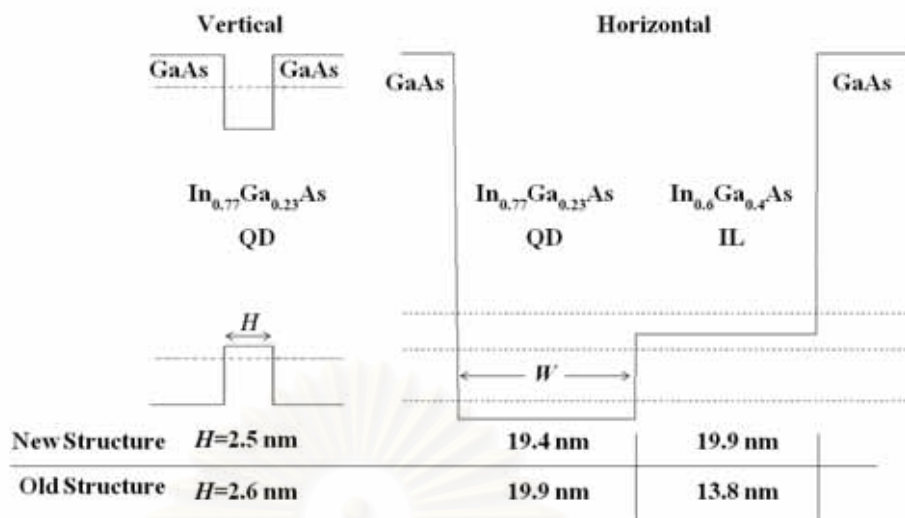
เมื่อพิจารณาความผิดพลาดของชั้นงาน A ที่ได้จากการคำนวณกับผลจากการวัด PL ดังแสดงในรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่า ค่าความต่างพลังงานของ s-p และ p-d ของการคำนวณจะมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผล PL แต่จะมีค่าความผิดพลาดสูงสุดของ s-p เป็น 4.2 meV ที่ 150 K และ p-d เป็น 2 meV ที่ 20 K ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าผลต่างพลังงาน s-p และ p-d ที่ได้จากการคำนวณกับผลการวัด PL ที่อุณหภูมิต่างๆ

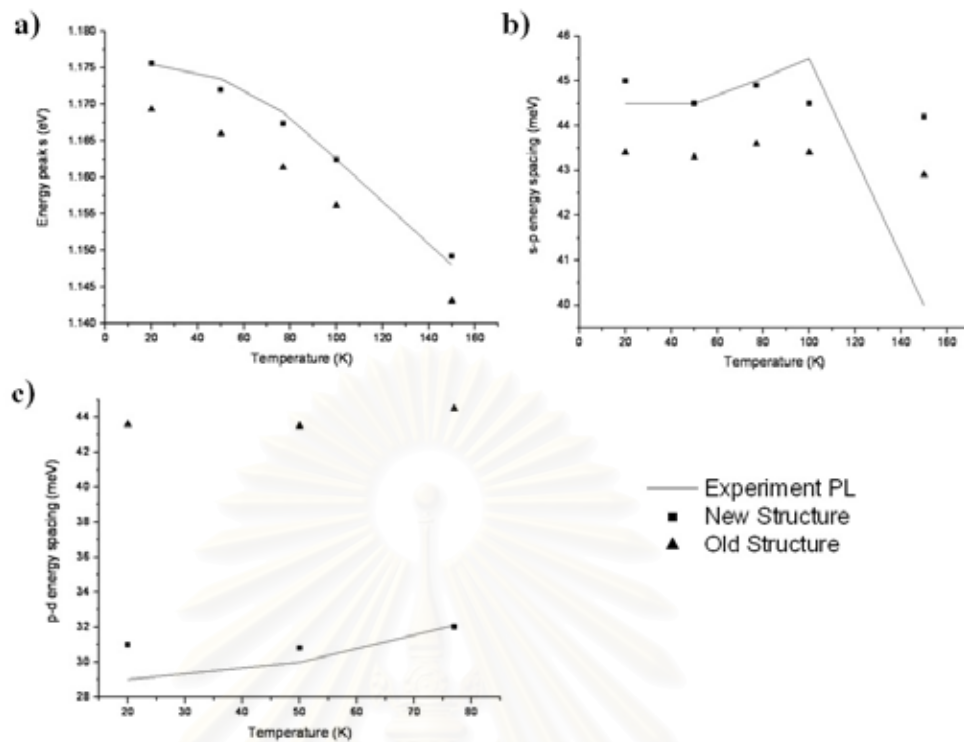
เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิผลหนึ่งมิติของชั้นงาน A แบบเก่าที่คำนวณโดยใช้ข้อมูลของของการวัดผล PL แบบปรับกำลังของแสงกระตุ้นเพียงอย่างเดียว กับโครงสร้างแบบใหม่ที่ใช้ข้อมูลผล PL แบบปรับอุณหภูมิของชั้นงานเพิ่มเข้ามา โดยองค์ประกอบทางเคมีของ QD ได้เป็น $\text{In}_{0.77}\text{Ga}_{0.23}\text{As}$ และของ IL ได้เป็น $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ แต่ความสูงของ QD ที่ถูก optimize จะเปลี่ยนจาก 2.6 nm มาเป็น 2.5 nm ในขณะที่ความกว้างของ QD ที่ถูก optimize จะเปลี่ยนจาก 19.9 nm มาเป็น 19.4 nm และความกว้างของชั้น IL ที่ถูก optimize จะเปลี่ยนจาก 13.8 nm มาเป็น 19.9 nm ดังสรุปในรูปที่ 4.14

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.14 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบหนึ่งมิติของชิ้นงาน A และสรุปพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสำหรับโครงสร้างเก่าและใหม่

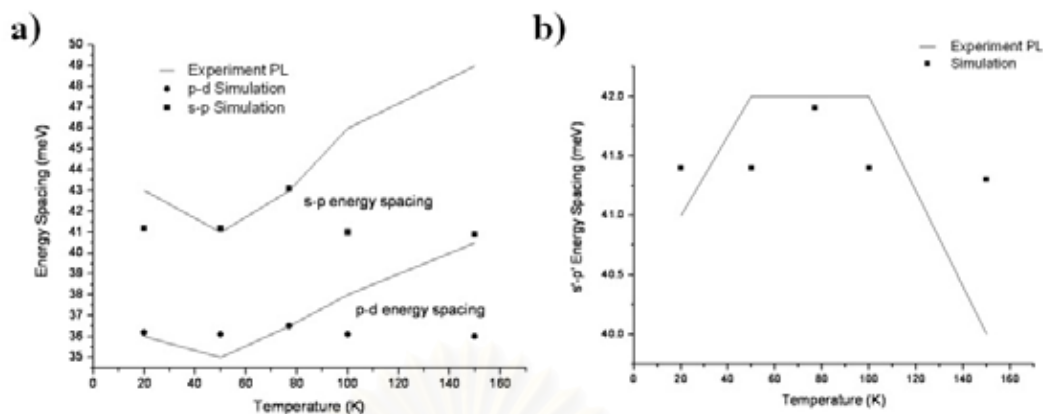
เมื่อกำหนดโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบเก่าของชิ้นงาน A ให้เปลี่ยนแปลงตามอนุกรม ดังรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบเก่านั้นจะให้ข้อมูลที่ผิดพลาดจากผลการวัด PL มากกว่าโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบใหม่ จากรูปที่ 4.15a) โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบเก่าจะให้ผลการคำนวณระดับพลังงาน GS หรือค่ายอดพลังงาน s มีค่าผิดพลาดจากผลที่วัดได้จาก PL มากกว่า 5 meV ในขณะที่โครงสร้างใหม่มีค่าความผิดพลาดสูงสุดเพียง 1.5 meV เท่านั้น จากรูปที่ 4.15b) ค่าความผิดพลาดของระดับความต่างพลังงาน s-p เฉลี่ยของโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์แบบเก่าจะมีมากกว่าแบบใหม่อยู่ 1 meV และจากรูปที่ 4.15c) ค่าความผิดพลาดของความต่างพลังงาน p-d ของโครงสร้างเก่าจะเป็น 15 meV แต่โครงสร้างใหม่นั้นมีความผิดพลาดเพียง 2 meV เท่านั้น แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบหนึ่งมิติของ InGaAs QDM ของชิ้นงาน A ได้รับการคำนวณให้แม่นยำมากขึ้น



รูปที่ 4.15 กราฟเปรียบเทียบ a) ค่าพลังงาน GS b) ค่าความต่างพลังงาน s-p c) ค่าความต่างพลังงาน p-d ของผลการคำนวณโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบเก่า แบบใหม่ กับผลการวัด PL ที่อุณหภูมิต่างๆ ของชิ้นงาน A

4.2.4 วิเคราะห์ค่าความผิดพลาดจากการจำลองชิ้นงาน B

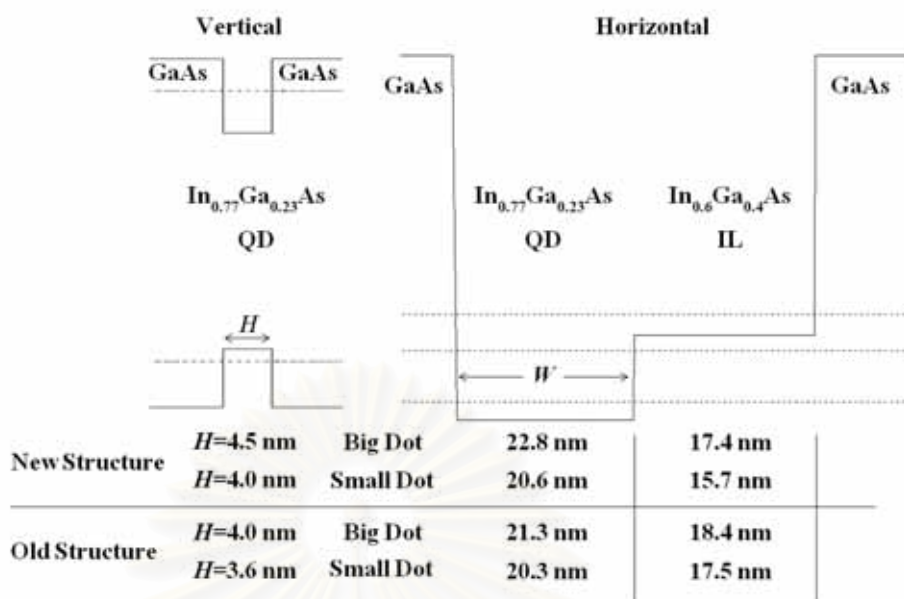
เมื่อพิจารณาความผิดพลาดค่าความต่างของค่าขดพลังงานของชิ้นงาน B ระหว่างผลที่ได้จากการคำนวณโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์แบบแนวนอนกับผลที่ได้จากการวัด PL ที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่า ค่าความต่างพลังงานของ s-p และ p-d ของการคำนวณจะมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผล PL แต่จะมีค่าความผิดพลาดสูงสุดของ s-p เป็น 8 meV ที่ 150 K และ p-d เป็น 4 meV ที่ 150 K ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากควอนตัมดอตใหญ่ ดังรูปที่ 4.16a) และค่าความผิดพลาดสูงสุดของความต่างพลังงาน s'-p' ของควอนตัมดอตเล็ก เป็น 1.3 meV ที่ 150 K ดังแสดงในรูปที่ 4.16b)



รูปที่ 4.16 แสดงผลการคำนวณค่าความต่างพลังงานของ a) ควอนตัมดอทขนาดใหญ่ และ b) ควอนตัมดอทขนาดเล็กที่อุณหภูมิต่างๆ

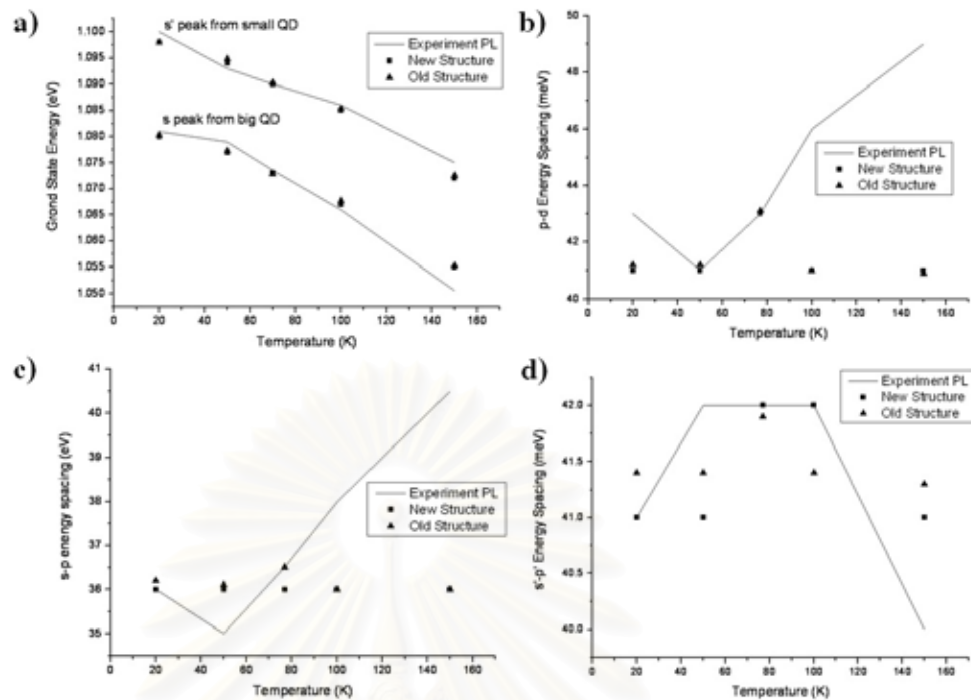
เมื่อทำการคำนวณโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบหนึ่งมิติของชั้นงาน B โดยใช้ผลการวัด PL แบบปรับกำลังแสงกระตุ้นและแบบปรับอุณหภูมิของชั้นงาน โดยมี $\text{In}_{0.77}\text{Ga}_{0.23}\text{As}$ เป็น QD และ $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ เป็นชั้น IL พบว่า เพื่อให้โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์สอดคล้องกับผลการทดลองจำเป็นต้องปรับความสูงและความกว้างของ QD ใหญ่จาก 4 nm และ 21.3 nm เป็น 4.5 nm และ 22.8 nm ตามลำดับ ความกว้างของชั้น IL ระหว่าง QD ใหญ่กับชั้น GaAs จาก 18.4 nm เป็น 17.4 nm อีกทั้งความสูงและความกว้างของ QD เล็กจาก 3.6 nm และ 20.3 nm เป็น 4 nm และ 20.6 nm ตามลำดับ ความกว้างของชั้น IL ของ QD เล็กกับชั้น GaAs ก็เปลี่ยนจาก 17.5 nm เป็น 15.7 nm ดังแสดงในรูปที่ 4.17

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.17 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบหนึ่งมิติของชั้นงาน B และสรุปพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสำหรับ โครงสร้างเก่าและใหม่

เมื่อคำนวณโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพของชั้นงาน B แบบเก่าและใหม่เทียบกับอุณหภูมิแล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลการวัด PL พบว่า พลังงาน s ที่ได้จากการจำลองโดยใช้โครงสร้างแบบเก่าและแบบใหม่มีความผิดพลาดสูงสุดเป็น 6 meV และ 5 meV ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.18a) ค่าความผิดพลาดของค่าความต่างพลังงานงาน $s-p$ จากควอนตัมดอตใหญ่ โครงสร้างเก่ามีค่าผิดพลาดเฉลี่ยมากกว่าโครงสร้างใหม่เป็น 0.2 meV ดังรูปที่ 4.18b) ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของค่าความต่างพลังงาน $p-d$ ของควอนตัมดอตใหญ่ โครงสร้างเก่ามีค่าผิดพลาดเฉลี่ยมากกว่าโครงสร้างแบบใหม่เป็น 0.1 meV ดังรูปที่ 4.18c) และค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของค่าความต่างพลังงาน $s'-p'$ ของควอนตัมดอตเล็ก โครงสร้างเก่ามีค่าผิดพลาดเฉลี่ยมากกว่าโครงสร้างใหม่เป็น 0.2 meV ดังรูปที่ 4.17d) แม้ค่าความผิดพลาดจะมีค่าที่ต่างกันไม่มาก แต่โครงสร้างใหม่ก็ได้รับการปรับปรุงให้ผลของโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์สอดคล้องกับค่าพลังงานที่ได้จากการวัดผล PL แม่นยำมากขึ้น



รูปที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบ a) ค่าพลังงาน GS b) ค่าความต่างพลังงาน s-p c) ค่าความต่างพลังงาน p-d และ d) ค่าความต่างพลังงาน s'-p' ของผลการคำนวณโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์แบบเก่า แบบใหม่ กับผลการวัด PL ที่อุณหภูมิต่างๆ ของชิ้นงาน B

4.2.5 ความสมจริงของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

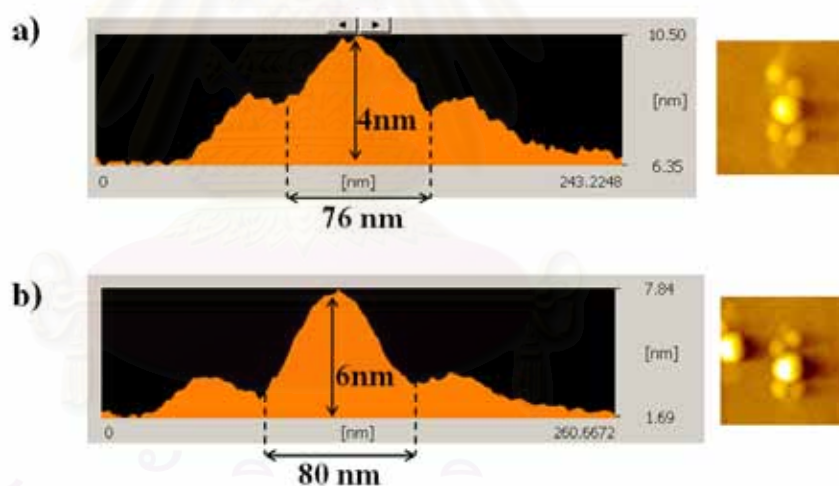
4.2.5.1 องค์ประกอบทางเคมี (x และ y)

การจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิผลหนึ่งมิติของ InGaAs QDM ทั้งหมดข้างต้นนั้นได้ใช้ $\text{In}_{0.77}\text{Ga}_{0.23}\text{As}$ เป็น QD แม้จะเป็นการจงใจปลูก InAs ในขั้นตอนการปลูก QD ก็ตาม สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เป็นผลมาจากการผสมหรือการ alloy กับ GaAs ที่อยู่ด้านล่างและรอบข้าง และรู้จักกันในนามของปรากฏการณ์ QD intermixing [60] ซึ่งได้รับการยืนยันว่าองค์ประกอบทางเคมีที่มีอัตราส่วน In:Ga เป็น 77:23 สำหรับ QD หรือ 60:40 สำหรับ IL นั้นเป็นไปได้จริงดังจะเห็นได้จากการศึกษาควอนตัมดอตเดี่ยวนั้นจะสามารถก่อตัวได้จะต้องมี In มากกว่า 60% อยู่ใน InGaAs QD [61] จากการศึกษาด้วยภาพตัดขวางด้วยเทคนิคการใช้เลเซอร์ [62] อีกทั้งสามารถยืนยันผลการตรวจด้วยเทคนิค STEM HAADF [63] อีกด้วย

4.2.5.2 ขนาด (H และ W) เมื่อเทียบกับผล AFM

เมื่อเทียบกับผล AFM สำหรับชิ้นงาน A ความสูงของ QD ที่ถูก optimize (จากการจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพเปรียบเทียบกับผลการวัด PL) ที่ได้จากการวัดผิวหน้าด้วยเทคนิค AFM คือ 2.5 nm และ 4 nm ตามลำดับ ในขณะที่ความกว้างจากการวัดที่วัดได้จาก AFM คือ 39.9 nm และ 76 nm ตามลำดับ

เมื่อเทียบกับผล AFM สำหรับชิ้นงาน B ความสูงของ QD ที่ถูก optimize (จากการจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพเปรียบเทียบกับผลการวัด PL) ที่ได้จากการวัดผิวหน้าด้วยเทคนิค AFM คือ 4.5 nm และ 6 nm ตามลำดับ ในขณะที่ความกว้างจากการวัดที่วัดได้จาก AFM คือ 40.2 nm และ 80 nm ตามลำดับ



รูปที่ 4.19 ผลการวัดความสูงโดยการทำ Line Scan และผลการวัดผิวหน้า จากเทคนิค AFM ของ a) ชิ้นงาน A และ b) ชิ้นงาน B

ซึ่งเห็นได้ว่าขนาดของ InGaAs QD ที่ได้จากการจำลอง (หลังการ optimized) จะเล็กกว่าขนาดที่วัดด้วยเทคนิค AFM ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะสาเหตุ 2 ประการ คือ พาหะใน InGaAs QD สามารถอยู่ได้บางบริเวณเท่านั้น เนื่องจากผลจากสถานะพื้นผิว (surface state) [64] และอีกสาเหตุคือ ขนาดของโครงสร้างในแนวนอนที่วัดโดย AFM จะใหญ่กว่าขนาดจริงเสมอซึ่งเป็นผลมาจากการที่ปลายเข็ม AFM มีรัศมีที่มีขนาดอยู่ในระดับเดียวกับโครงสร้างที่ทำการวัด เรียกว่า tip convolution effect [65]

4.2.5.3 ขนาด (H) เมื่อเทียบกับกระบวนการปลูกผลึก

ความสูงของ QD ที่ได้จากการจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบหนึ่งมิติของชั้นงาน A และ B มีค่าเป็น 2.5 nm และ 4.5 nm ตามลำดับ ซึ่งต่างกัน 2 nm หากพิจารณากระบวนการปลูกชั้นงาน A และ B ซึ่งแตกต่างกันเพียงอย่างเดียว คือ ความหนาของชั้น GaAs capping ซึ่งชั้นงาน A หนา 15 ML และชั้นงาน B หนา 25 ML แสดงว่าชั้นงาน B มีชั้น GaAs capping หนากว่าชั้นงาน A อยู่ 10 ML หรือ 2.8 nm ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลต่างความสูงของ QD ของชั้นงาน A และ B ที่ได้จากการจำลอง แสดงให้เห็นว่า การปลูกชั้น GaAs capping ที่หนาขึ้นอาจมีผลทำให้ QD ที่ได้มีความสูงเพิ่มขึ้น เพราะการปลูกชั้น GaAs capping ที่มากขึ้นเป็นการขุดหลุมนาโนให้ลึกยิ่งขึ้น [45] การปลูกชั้นบน template ที่เป็นหลุมนาโนที่ลึกกว่าย่อมมีความเป็นไปได้ที่จะให้ QD ที่มีขนาดใหญ่กว่า template ที่เป็นหลุมนาโนแบบตื้นๆ ดังนั้นค่า H ที่ใช้ในการจำลองของทั้งสองชั้นงานจึงมีความเป็นไปได้ทางกายภาพโดยอาจมาจากผลของการกลบทิ้งด้วยความหนาที่แตกต่างกัน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาชิ้นงานที่มีควอนตัมดอทโมเลกุลจำนวน 2 ชั้น [45] ซึ่งมีขนาดของควอนตัมดอทที่แตกต่างกันเนื่องมาจากกระบวนการปลูกที่แตกต่างกัน การปลูกชิ้นงานเริ่มจาก InAs QD 1.8 ML บนแผ่นฐาน GaAs ต่อจากนั้นทำการกลบทับด้วยชั้น GaAs capping ซึ่งชิ้นงาน A หนา 15 ML และชิ้นงาน B หนา 25 ML หลังจากนั้นจึงทำการปลูกซ้ำด้วย InAs หนา 1.2 ML เท่ากันทั้งสองชิ้นงาน จากนั้นจึงนำชิ้นงานทั้งสองมาโครงสร้างทางกายภาพของผิวหน้าด้วยเทคนิค AFM และลักษณะสมบัติทางแสงด้วยเทคนิค PL เพื่อเป็นข้อมูลดิบสำหรับการจำลองเพื่อให้ได้มาซึ่งโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบ 1 มิติ

ผลการจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์สามารถคำนวณได้จากสมการชโรดิงเงอร์และปัวซองค์แบบ 1 มิติควบคู่กัน โดยโปรแกรมที่ใช้จำลองเป็นแบบ open source ซึ่งสามารถแก้พารามิเตอร์ของวัสดุได้ ซึ่งการจำลองได้ใช้พารามิเตอร์ของ InGaAs และ ΔE_c แบบมีความเครียดและใช้สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงความกว้างของแถบพลังงานต้องห้ามตามสมการของ Varshni แบบ bulk เท่านั้น

จากการจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบหนึ่งมิติของ InGaAs QDM ของทั้งสองชิ้นงาน ซึ่งให้เห็นว่า QD ที่เปล่งแสงได้มีสูตรทางเคมีประสิทธิภาพเป็น $\text{In}_{0.77}\text{Ga}_{0.23}\text{As}$ แม้ว่าการปลูกผลึกโดยเทคนิค MBE จะเป็นการปลูกเพียง InAs เท่านั้น โดยบริเวณรอบข้างหรือชั้น IL มีสูตรทางเคมีประสิทธิภาพเป็น $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$

ผลการจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพของ InGaAs QD ของชิ้นงาน A ทำให้พบว่า QD มีความสูงและกว้างประสิทธิภาพเป็น 2.6 nm และ 39.3 nm ตามลำดับ แต่ความสูงและความกว้างที่วัดได้จาก AFM มีค่าเป็น 4 nm และ 76 nm ตามลำดับ ในขณะที่ชิ้นงาน B จะมีความสูงและความกว้างประสิทธิภาพของ QD ที่ได้จากการจำลองเป็น 4.5 nm และ 40.2 nm และจากผล AFM เป็น 6 nm และ 80 nm ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าขนาดของ QD ที่ได้จากการจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพทั้งความสูงและความกว้างต่างเล็กกว่าขนาดของ QD ที่วัดได้จาก AFM

ทั้งนี้ เป็นเพราะผลของสถานะพื้นผิวที่ทำให้ฟังก์ชันคลื่นของพาหะถูกจำกัดบริเวณให้ห่าง interface ไว้ และผลของความไม่แน่นอนของขนาดที่วัดได้จากเทคนิค AFM เนื่องจาก convolution effect

ผลการจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบหนึ่งมิติของ InGaAs QDM ชั้นต้นสามารถอธิบายการเปล่งแสงของชั้นงาน A และ B ได้อย่างแม่นยำ โดยสามารถระบุได้ว่าการเปล่งแสงจากชั้นงาน A เป็นผลจาก QD กลางเพียงอย่างเดียว ในขณะที่การเปล่งแสงของชั้นงาน B เป็นผลมาจาก QD กลางและ QD ด้านข้าง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ผลการวัด PL แบบปรับกำลังแสงกระตุ้น ทำการปรับปรุงขนาดของโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพให้แม่นยำ ด้วยข้อมูลจากการวัด PL แบบปรับอุณหภูมิชั้นงาน ซึ่งเป็นที่ประจักษ์ว่า ผลการจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพแบบหนึ่งมิติของ InGaAs QDM นั้นสามารถนำมาใช้อธิบายคุณสมบัติทางแสงของโครงสร้าง InGaAs QDM ที่มีโครงสร้างซับซ้อนได้อย่างแม่นยำในช่วงอุณหภูมิ 20-150 K โดยโครงสร้างทางกายภาพที่ใช้ในการจำลองสอดคล้องกับขนาดทางกายภาพที่วัดได้จาก AFM ในขณะที่องค์ประกอบทางเคมียังคงเป็นที่ถกเถียงกันอยู่ในปัจจุบัน แต่ค่าที่ใช้ในการจำลองทั้งหมดคือ $\text{In}_{0.77}\text{Ga}_{0.23}\text{As}$ สำหรับ QD และ $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ สำหรับ IL ต่างมีความเป็นไปได้เนื่องจากผลของ QD Intermixing

รายการอ้างอิง

- [1] H. C. LUI 2003 , Quantum dot infrared photodetector, Opto-Electronics Review 11 (2003) : 1-5.
- [2] D. Z.-Y. Ting, Y.-C. Chang 2007, Band Structure and impurity effects on optical properties of quantum well and quantum dot infrared photodetectors, Infrared physics & technology 50 (2007) : 136-141.
- [3] L. Hoglund, C. Asplund 2006, Original of photocurrent in lateral quantum dot-in-a-well infrared photodetectors, Applied Physics Letters 88, 213510 (2006).
- [4] J. Li, K. K. Choi 2006, High gain, broadband InGaAs/InGaAsP quantum well infrared photodetectors, Applied Physics Letters 89, 081128 (2006).
- [5] Hyoungdo Nam, Jin Dong Song 2005, Electronics subband structure in InGa-GaAs quantum dot in an asymmetric-well infrared photodetector structure, Journal of Korean physics Vol.47, No6 (2005).
- [6] P. Bhattacharya, X.H.Su, Characteristics of a tunneling quantum-dot infrared photodetector operating at room temperature, Applied Physics Letters 86, 191106 (2005).
- [7] J. L. Casas Espinola, M. Dybic, Carrier dynamics in InAs quantum dots embedded in InGaAs/GaAs multi quantum well structures, Journal of Physics: conference series 61 (2007) : 180-184.
- [8] Daniel K. Guthrie, Thomas K. Gaylord, Number and Density of state in quantum semiconductor Structure, IEEE transactions on education, Vol.39 No.4 (1996).

- [9] M.K. Kuo, T.R. Lin, Strain effect on optical property of pyramidal InAs/GaAs quantum dots, Physica E 26 (2005) : 199-202.
- [10] C. L. Tang, Fundamentals of Quantum Mechanics for solid state electronics and optical Cambridge University Press, 2005.
- [11] H. C. Liu, J.-Y. Duboz, Quantum Dot Infrared Photodetectors, physica E 17 (2003) : 631-633.
- [12] Dong Pan, Elias Towe, Normal-Incidence intersubband (In, Ga)As/GaAs Quantum Dot Infrared Photodetectors, Applied Physics Letters Vol.73, No.14 (1998)
- [13] L.Chu, A Zrenner, Normal-Incident Intersubband Photocurrent Spectroscopy on InAs/GaAs Quantum Dots, Applied Physics Letters Vol.75, No.23 (1999)
- [14] H.C. Liu, M. Buchanan, How Good is the Polarization selection rule for intersubband transition?, Applied Physics Letters Vol.72 No.14 (1998)
- [15] Boaz Kochman, Adrienne D, Absorption, Carrier Lifetime and Gain in InAs-GaAs Quantum-Dot Infrared Photodetectors, IEEE journal of quantum electronics Vol.39 No.3 (2003).
- [16] S.K. Kang, S.J. Lee, Device Characteristics of Self-Assembled InGa/GaAs quantum dot infrared Photodetectors, Journal of the Korean Physics Society, Vol.42, No.3 (2003):418-122.
- [17] S.H. Hwang, J.C. Shin, Investigation of Detection Wavelength in Quantum Dot Infrared Photodetector, Journal of the Korean Physical Society, Vol.45, No.1 (2004):202-205.
- [18] Shih-Yen Lin, Transport Characteristics of InAs/GaAs Quantum-dot Infrared Photodetectors, Applied Physics Letters Vol.83, No.4 (2003).

- [19] V. RyZhii, I.Khmyrova, On the Detectivity of Quantum-Dot infrared Photodetectors, Applied Physics Letters Vol.78, No.22 (2001).
- [20] M. Ali Omar, Elementary solid state physics, Addison-Wesley publishing company, 1993.
- [21] Streetman Banerjee, Solid State Electronic Device, 5th edition Prentice hall, 2000.
- [22] Arturas Zukauskas, Introduction to Solid-State Lighting, John Wiley & Sons, Inc, 2002.
- [23] Suematsu Adams, Handbook of Semiconductor Lasers and Photonic Integrated circuits, Chapman & Hall, 1994.
- [24] D. Bimberg, Quantum dot Heterostructure. John Wiley & Sons, Inc, 1998
- [25] V. Mlinar, Theoretical study of InAs/GaAs quantum dots grown on [11k] substrates in the presence of a magnetic field, Microelectronics Journal 37 (2006) : 1427–1429.
- [26] L. Landin, Optical investigation of InAs/InP quantum dots at different temperatures and under electric field, Thin Solid Films 364 (2000) : 161-164.
- [27] Vladimir A, Excitonic properties of strained wurtzite and zinc-blende GaN/Al_xGa_{1-x}N quantum dots, Journal of Applied Physics Vol.94, No.11 (2003).
- [28] Tzer-En Nee, Ya-Fen Wu, Carrier dynamics study of the temperature- and excitation-dependent photoluminescence of InAs/GaAs quantum dots, Journal of Applied Physics 99, 013506 (2006).
- [29] Weidong Sheng, Jean-Pierre Leburton, Interband transition distributions in the optical spectra of InAs/GaAs self-assembled quantum dots, Journal of Applied Physics Vol.80, No.15 (2002).
- [30] H.K. Park, Electrical Characterization of InAs/GaAs Quantum-Dot Infrared Photodiodes, Journal of the Korean Physical Society Vol.45 No.1 (2004) : 223-226.

- [31] S.Suraprapich, Quantum dot integration in heterostructure solar cells, Technical Digest of the International PVSEC-14, (2004).
- [32] S. Suraprapich, Self-assembled lateral Bi-quantum-dot molecule formation by gas-source molecular beam epitaxy, Journal of Crystal Growth (2007) : 735–739.
- [33] N. Siripitakchai, Evolution of self-assembled lateral quantum dot molecules, Journal of Crystal Growth (2007) : 812–816.
- [34] W. Ouerghui, A. Melliti, Dependence on temperature of homogeneous broadening of InGaAs/InAs/GaAs quantum dot fundamental transitions, Physica E 28 (2005) : 519–524.
- [35] Jia-Ren Leea, Chien-Rong Lu, Investigation of populated InAs/GaAs quantum dots by photoluminescence and photoreflectance, Physica E 25 (2005) : 562–568.
- [36] I-H. Tan, G.L. Snider, A Self-Consistent solution of Schrodinger-Poisson Equation Using a Nonuniform Mesh, journal of applied physics Vol.68, No.8, (1990).
- [37] Lingquan Wang *, Deli Wang, A numerical Schrodinger-Poisson solver for radially symmetric nanowire core-shell structures, Solid-State Electronics 50 (2006) : 1732–1739.
- [38] YIMING LI, An Iterative Method for Single and Vertically Stacked Semiconductor Quantum Dots Simulations, Mathematical and Computer Modelling 42 (2005) : 711-718.
- [39] Sugawara, M. 1999. Theoretical based of the optical properties of semiconductor quantum nano-structures. In M. Sugawara (ed.), Semiconductors and Semimentals:Self-assembled InGaAs/GaAs quantum dots, 60:1-116, San Diego: Academic Press.

- [40] I. Daruka and A. L. Barabasi. Dislocation-free island formation in heteroepitaxial growth: Physical Review Letters Vol19, No79 (1997).
- [41] Dobbs, H. T., and Vvedensky, D. D. 1997. Mean-field theory of quantum dot formation. Physical Review Letters 79: 897-900. A study at equilibrium. Physical Review Letters 79 (1997) : 3708-3711
- [42] ภูมิอิน Infrared detector module with preamp Metal Dewar type รุ่น G7754-01
- [43] S. Kiravittaya. Homogeneity improvement of InAs/GaAs self-assembled quantum dots grown by molecular beam epitaxy. Doctoral dissertation Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering Chulalongkorn University, 2002.
- [44] Mr. Teeravat Limwongse. Evolution Of InAs Quantum Dots Grown On Cross-Hatch Substrates. Master's thesis. Department of Electrical Engineering. Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2008.
- [45] Miss Naparat Siripitakchai. Control of The Number Of Dots In InAs Quantum Dot Molecules for Quantum Computing. Master's thesis. Department of Electrical Engineering. Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2006.
- [46] Levinshstein M. E., S. L. Rumyantsev Handbook Series on Semiconductor Parameters, vol.1 (1996).
- [47] I. Vurgaftmana. Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys. Journal of Applied Physics Vol.89, No.11 (2001).
- [48] I-H Tan, G. L. Snider. A self-consistent solution of Schrodinger-Poisson equation using a nonuniform mesh. Journal of Applied Physics Vol.68, No.8 (1990)

- [49] YIMING LI. An Iterative Method for Single and Vertically Stacked Semiconductor Quantum Dots Simulation. Mathematical and Computer Modelling 42 (2005) : 711-718.
- [50] Gustavo A. Narvaez. Dependence of the electronic structure of self-assembled (In,Ga)As/GaAs quantum dots on height and composition. Journal of Applied Physics 98, 043708 (2005).
- [51] H. Hospodkova. Photoluminescence and magnetophotoluminescence of vertically stacked InAs/GaAs quantum dot structure. Physica E 36 (2007) 106-113
- [52] Gustavo A. Dependence of the electronic structure of self-assembled (In,Ga)As/GaAs quantum dots on height and composition Journal of Applied Physics 98, 043708 (2005).
- [53] Y.D. Jang, H.LEE. The energy level spacing from InAs/GaAs quantum dots: Its relation to the emission wavelength, carrier lifetime, and zero dimensionality. Journal of Applied Physics 99, 096101 (2006).
- [54] Tzer-En Nee. Temperature and Excitation Dependence of Photoluminescence Spectra of InAs/GaAs Quantum Dot Heterostructures. IEEE transactions on nanotechnology, Vol.6, No.5 (2007).
- [55] P. N. Brounkov. Electronic structure of self-assembled InAs quantum dots in GaAs matrix. Applied Physics Letters Vol.73, No.8 (1998).
- [56] G. Sek. Wetting layer states of InAs/GaAs self-assembled quantum dot structures:Effect of intermixing and capping layer. Journal Of Applied Physics 101, 063539 (2007).
- [57] Y.P. Varshni. Temperature dependence of the energy gap in semiconductors. Physica E 34 (1967) : 149-154.

- [58] <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaAs/bandstr.html#Temperature>
- [59] Sajal Pual. Empirical expressions for the alloy composition and temperature dependence of the band gap and intrinsic carrier density in $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$. Journal of Applied Physics Vol.69 , No.2 (1991).
- [60] Simon Fafard. Quantum dot structures and devices with sharp adjustable electronic shells. Physica E 8 (2000) : 107-116.
- [61] M. A. Migliorato. Atomistic simulation of strain relaxation in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ quantum dots with nonuniform composition. Physical Review B 65 115316.
- [62] M. Müller. Atomic scale characterization of buried $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ quantum dots using pulsed laser atom probe tomography. Applied Physics Letters 92, 233115 (2008).
- [63] Gabriel Bester and Alex Zunger, Compositional and size-dependent spectroscopic shifts in charged self-assembled $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ quantum dots. Physical Review B 68, 073309 (2003).
- [64] Volker Heine. Theory of Surface States. Physical Review. 138, (1965): 1689-1696.
- [65] A. Partridge, S. L. G. Toussaint, Nanocluster formation by spin coating: Quantitative atomic force microscopy and Rutherford backscattering spectrometry analysis. J. Vac. Sci. Technol. B Vol.14, Issue 2, (1996) : 585-592 .

ผลงานตีพิมพ์

ในวารสารต่างประเทศ

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

ประชุมทางวิชาการระดับนานาชาติ

- “Effective One-dimensional Electronic Structure of InGaAs Quantum Dot Molecule”, **Nitidet Thudsalingkarnsakul**, Teeravat Limwongse, Naparat Siripitakchai, Somsak Panyakeow, and Songphol Kanjanachuchai. Proceedings of the 33rd Micro and Nano Engineering (2007), Copenhagen, Denmark.

ประชุมทางวิชาการระดับชาติ

- “Characteristics of GaAs-based Phototransistors After High-Power Operation”, **Nitidet Thudsalingkarnsakul**, Supachok Thainoi, and Songphol Kanjanachuchai. Proceeding of the 4th Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information technology(2007), Chiang-rai, Thailand

ผลงานนำเสนอ

Oral presentations

1. “Characteristics of GaAs-based Phototransistors After High-Power Operation”, **Nitidet Thudsalingkarnsakul**, Supachok Thainoi, and Songphol Kanjanachuchai. Proceeding of the 4th Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information technology(2007), Chiang-rai, Thailand

Poster presentations

1. “Effective One-dimensional Electronic Structure of InGaAs Quantum Dot Molecule”, **Nitidet Thudsalingkarnsakul**, Teeravat Limwongse, Naparat Siripitakchai, Somsak Panyakeow, and Songphol Kanjanachuchai. The 33rd Micro and Nano Engineering (2007), Copenhagen, Denmark, 23-26 September, 2007.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายนิธิเดช ธัชศฤงคารสกุล เกิดเมื่อวันที่ 5 พฤศจิกายน พุทธศักราช 2526 อาศัยอยู่
ที่บ้านเลขที่ 85/32 ถ.เพชรเกษม ต.หน้าเมือง อ.เมือง จ.ราชบุรี จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจาก
โรงเรียนเบญจมราชูทิศ ราชบุรี ปีการศึกษา 2544 และสำเร็จการศึกษาระดับมหาวิทาลัย ระดับ
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี
การศึกษา 2548



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย