



247020

การฉีกเรียบตัวของควอนตัมของอินเดียมอาร์เซไนด์ในระบบประกอของคอลลอยด์บนพื้นฐานฉนวนสาร
ผลึกเล็บบนอาร์เซไนด์/อินเดียมบนผลึกเล็บบนอาร์เซไนด์/ผลึกเล็บบนอาร์เซไนด์

นายผดิดนนท์ ไผ่ทวีบริรักษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

b000251755

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



247020

การจัดเรียงตัวของควอนตัมดอตอินเดียมอาร์เซไนด์แบบประกอบตนเองบนแผ่นฐานลายตาราง
แกลเลียมอาร์เซไนด์/อินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์/แกลเลียมอาร์เซไนด์



นาย มตินนท์ ไมตรีบริรักษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



5 0 7 0 5 9 8 9 2 1

ALIGNMENT OF SELF-ASSEMBLED InAs QUANTUM DOTS GROWN
ON GaAs/InGaAs/GaAs CROSS-HATCH TEMPLATES

Mr. Matinon Maitreeboriraks

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 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การจัดเรียงตัวของควอนตัมดอตอินเดียมอาร์เซไนด์แบบ
ประกอบตนเองบนแผ่นฐานลายตารางเกลเลียมอาร์เซไนด์/
อินเดียมเกลเลียมอาร์เซไนด์/เกลเลียมอาร์เซไนด์

โดย

นายมนินท์ ไผ่ตรีบริรักษ์

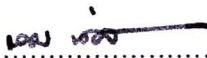
สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

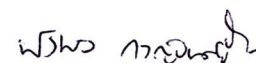
รองศาสตราจารย์ ดร. ทรงพล กาญจนชูชัย

‘ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

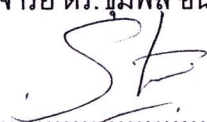

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

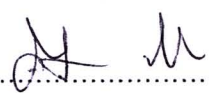
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


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


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


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ทรงพล อันตรเสน)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุกตธรรม เสนาะพิมพ์)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. สิริพัฒน์ ประโตนเทพ)

มตินนท์ ไผ่ศิริรักษ์ : การจัดเรียงตัวของควอนตัมดอตอินเดียมอาร์เซไนด์แบบประกอบตนเองบนแผ่นฐานลายตารางเกลเลียมอาร์เซไนด์/อินเดียมเกลเลียมอาร์เซไนด์/เกลเลียมอาร์เซไนด์. (ALIGNMENT OF SELF-ASSEMBLED InAs QUANTUM DOTS GROWN ON GaAs/InGaAs/GaAs CROSS-HATCH TEMPLATES) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร.ทรงพล กาญจนชูชัย, 71 หน้า.

247020

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้รายงานผลการศึกษาการจัดเรียง InAs ควอนตัมดอตบนแผ่นฐาน GaAs/In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs โดยทั่วไป InAs ควอนตัมดอตที่ประกอบตนเองบนแผ่นฐานลายตาราง In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs จะจัดเรียงตัวเป็นเส้นยาวในทิศ [110] และ [1-10] ตามลักษณะของผิวหน้าลายตารางที่เกิดขึ้น การกลบทับชั้นลายตารางด้วยชั้น GaAs spacer ที่หนา 50-250 nm กลายเป็น GaAs/In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs ส่งผลให้ผิวหน้ากลายเป็นแถบกว้างในทิศ [110] และเส้นยาวในทิศ [1-10] ความกว้างแถบในทิศ [110] แปรตามความหนาของชั้น GaAs spacer แถบที่กว้างขึ้นเป็นผลจากความสูงต่ำของพื้นผิวที่เกิดจากการเลื่อนระนาบผลึกโดย Misfit dislocation ซึ่ง Misfit dislocation ดังกล่าวเปลี่ยนแปลงไปเมื่อความหนาของชั้น GaAs ด้านบนเพิ่มขึ้น การปลูกควอนตัมดอตลงบนผิวหน้าดังกล่าวส่งผลให้ควอนตัมดอตเรียงตัวกันอย่างโดดเด่น ณ ขอบของแถบในทิศ [110] โดยจะสังเกตเห็นอย่างชัดเจนในชั้นงานที่ชั้น GaAs หนา 250 nm เมื่อเทคนิคการปลูกควอนตัมดอตเปลี่ยนจากแบบที่ชะเตอร์ของ As₄ เปิดตลอดเวลาไปเป็นแบบ Migration enhance epitaxy (MEE) ซึ่งชะเตอร์ของธาตุกลุ่ม III และ V สลับกันเปิด-ปิด ผลปรากฏว่าการจัดเรียงควอนตัมดอตเกิดการสลับทิศ จากที่เรียงตัวกันโดดเด่น ณ ขอบของเส้นแถบในทิศ [110] ไปเป็นเรียงตัวกันบนเส้นยาวในทิศ [1-10] ผลดังกล่าวเกิดจากความไม่เท่ากันของพื้นผิวในทิศ [110] และ [1-10] และความแตกต่างกันของอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของอะตอม In จากเทคนิคการปลูกทั้งสองวิธี การแปลงแสงของชั้นงานเกิดขึ้นในย่านอินฟราเรดและด้วยความเข้มที่ไม่ค่อยไปกว่าควอนตัมดอตที่ปลูกบนแผ่นฐาน GaAs ซึ่งให้เห็นว่า ควอนตัมดอตมีความสมบูรณ์เชิงผลึก อีกทั้ง dislocation ในชั้น InGaAs ไม่มีผลกระทบต่อสมบัติทางแสงของควอนตัมดอต นอกจากนี้แสงที่ได้จากควอนตัมดอตยังเป็นแสงโพลาไรซ์ซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของควอนตัมดอตบนชั้นงาน

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....มตินนท์ ไผ่ศิริรักษ์
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....ผศ.ดร.ทรงพล กาญจนชูชัย
ปีการศึกษา.....2553.....

5070598921 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : MBE / SELF-ASSEMBLED / InAs QUANTUM DOTS / CROSS-HATCH /
DISLOCATION / GaAs SPACER / ALIGNMENT

MATINON MAITREEBORIRAKS : ALIGNMENT OF SELF-ASSEMBLED InAs
QUANTUM DOTS GROWN ON GaAs/InGaAs/GaAs CROSS-HATCH
TEMPLATES. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SONGPHOL

KANJANACHUCHAI Ph.D., 71 pp.

247020

This thesis presents the results of the alignment of InAs quantum dots (QDs) on GaAs/In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs substrates. In general, self-assembled InAs quantum dot on the cross-hatch In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs substrate align in long lines along [110] and [1-10] direction, which follows the characteristics of the surface. When adding 50-250 nm GaAs spacer layer on the top, resulting in GaAs/In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs structure, the surface structure was changed. The new surface was composed of the wide stripes align along [110] direction and parallel lines along [1-10] direction. The width of the [110] stripes depends on the thickness of the GaAs spacer due to the surface undulation from the misfit dislocations which changed during the growth of the GaAs spacer layer. By using this new surface as template, the QDs were formed at the edge of the stripes, resulting in predominant QD alignment along the [110] direction. However, when the QD growth process changed from standard epitaxy where the As₄ shutter is always on to migration-enhance epitaxy (MEE) where the In and As cell shutters are alternately opened, the QD predominant alignment changed from [110] to [1-10] direction. This result was caused by the anisotropic surface between [110] and [1-10] direction, and the difference in In atoms migration. Photoluminescent (PL) measurement show that the sample emits the light in the infrared region, similar to InAs QDs grown on standard (100)-GaAs substrates, indicating that QDs have a good crystallinity and that dislocations from InGaAs layer do not adversely affect QD optical properties. The lights emitted from QDs also have the polarization property which is caused by QDs alignment.

Department : ELECTRICAL ENGINEERING

Student's Signature

ผศ.ดร. ไชยรัตน์ วัชรวิเศษ

Field of Study : ELECTRICAL ENGINEERING

Advisor's Signature

ผศ.ดร. สONGPHOL

Academic Year : 2010

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีโอกาสจะสำเร็จลุล่วงไปได้ หากขาดเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองวิจัย และขาดความช่วยเหลือเกื้อกูลจากผู้มีพระคุณทั้งหลายเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายในในห้องปฏิบัติการวิจัยสารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้เขียนขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ทรงพล กาญจนชูชัย ที่สละเวลาอันมีค่าของท่าน คอยดูแล คอยกำกับ และให้คำปรึกษาอันมีประโยชน์ยิ่งแก่ข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา ความช่วยเหลือหลัก ๆ ของผู้เขียนโดยมากได้จากท่าน จนอาจกล่าวได้ว่า วิทยานิพนธ์เล่มนี้ไม่อาจจะสำเร็จไปได้โดยไม่มีท่าน

ผู้เขียนขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบอนุมัติหัวข้อวิทยานิพนธ์และสอบสำเร็จการศึกษา ประกอบไปด้วย ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว, รองศาสตราจารย์ ดร. ชุมพล อันตรเสน, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สกฤตธรรม เสนาะพิมพ์ และดร. สิริพัฒน์ ประโทนเทพ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ในห้องปฏิบัติการวิจัยสารกึ่งตัวนำทุกท่านที่คอยช่วยเหลือทางเทคนิคและทางด้านเครื่องมือในการทดลองต่างๆในห้องปฏิบัติการ

ผู้เขียนขอขอบคุณรุ่นพี่ปริญญาเอกทุกคนที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในเหตุการณ์ต่าง ๆ ตลอดมา รวมถึงต้องขอขอบคุณรุ่นน้องทั้งปริญญาโทและปริญญาตรีที่ให้กำลังใจ ความสุข และความสนุกสนานตลอดมา ผู้เขียนขอเก็บเรื่องราวต่าง ๆ ที่ได้ใช้ชีวิตร่วมกันไว้เป็นความทรงจำที่ดีตลอดไป

ผู้เขียนขอขอบพระคุณพี่ห้องธุรการที่คอยอำนวยความสะดวกและให้คำปรึกษาในการดำเนินเรื่องการศึกษาต่าง ๆ ตั้งแต่เข้าศึกษาจนจบการศึกษา

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณบิดาและมารดา รวมถึงทุกคนในครอบครัวที่ได้ให้การสนับสนุนผู้เขียนในทุก ๆ เรื่องอย่างดีมากมาโดยตลอด

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้พื้นฐาน.....	5
2.1 ควอนตัมดอต.....	7
2.2 การปลูกควอนตัมดอต.....	8
2.2.1 การปลูกควอนตัมดอตโดยวิธี Stanski-Krastranow.....	8
2.3 การกำหนดตำแหน่งของควอนตัมดอต.....	10
2.3.1 การใช้แม่พิมพ์บังคับให้เรียง (Force alignment template).....	10
2.3.1.1 ซับสเตรตที่มีลวดลายล่วงหน้า (Pre-patterned substrate).....	10
2.3.1.2 ซับสเตรตดัชนีสูง (High index substrate).....	11
2.3.2 การจัดเรียงตนเองด้วยลวดลายวิศวกรรมความเครียด (Self-alignment strain engineering pattern).....	13
2.3.2.1 แม่พิมพ์ซูเปอร์แลตทิซ (Superlattice templates).....	13
2.3.2.2 ลวดลายตาราง (Cross-hatch patterns): InGaAs/GaAs.....	14
2.3.2.2.1 ลักษณะโดยทั่วไป.....	14
2.3.2.2.2 กลไกการเกิดลายตาราง.....	15
2.3.2.2.3 การปรับปรุงลายตารางของโครงสร้าง In _{0.15} Ga _{0.85} As/GaAs โดยการใช้ GaAs spacer layer.....	19

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	41
4.1 โครงสร้างของชิ้นงาน.....	41
4.2 ผิวหน้าของชั้น GaAs spacer และการจัดเรียงควอนตัมดอตบนผิวหน้า.....	42
4.2.1 ผิวหน้าของชั้น GaAs spacer.....	43
4.2.2 ควอนตัมดอตบนผิวหน้าของชั้น GaAs spacer.....	45
ก) การจัดเรียงตัวควอนตัมดอตบนผิวหน้าของ GaAs spacer.....	45
ข) ลักษณะทางกายภาพของควอนตัมดอตบนผิวหน้าของชั้น GaAs spacer.....	47
ค) การจัดเรียงควอนตัมดอตแบบ SK ในรูปแบบ MEE.....	48
4.3 สมบัติทางแสงของชิ้นงาน.....	50
4.3.1 ลักษณะโดยทั่วไปของการเปล่งแสงของชิ้นงาน.....	51
4.3.2 ผลของกำลังแสงเลเซอร์กระตุ้นต่อการเปล่งแสง.....	54
4.3.3 ผลของอุณหภูมิต่อการเปล่งแสง.....	55
4.3.4 ผลของโพลาไรเซชัน (Polarization).....	58
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	60
รายการอ้างอิง.....	62
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	71

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	ชิ้นงานทั้งหมดที่ได้จากการทดลอง แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ชิ้นงานสำหรับศึกษากายภาพของผิวหน้าและชิ้นงานสำหรับวัดทางแสงโดยเทคนิค PL.....	42
4.2	ความกว้างของเนินและความลึกจากยอดถึงพื้นในทิศ [110] และ [1-10] ของโครงสร้าง $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ และชิ้นงาน D.....	44
4.3	ค่าความสูง ความหนาแน่นของควอนตัมดอต และขนาดของแวนเนน ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ปลูก InAs ควอนตัมดอตแบบ SK บนชิ้นงาน A, B และ C ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลของชิ้นงานที่ปลูก InAs ควอนตัมดอตแบบเดียวกันบนผิวหน้าของ GaAs โดยตรงของ S.Kiravittaya [79] และบน $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}/\text{GaAs}$ ของ C C Thet [80].....	48

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างและ DOS ของ ก) ก้อนผลึก ข) บ่อควอนตัม ค) ลวดควอนตัม และ ง) ควอนตัมดอต [38].....	6
2.2	วิธีการปลูกควอนตัมดอตในหลายวิธี ก) การสร้างผลึกขนาดเล็ก (microcrystallites) บนแก้ว ข) การใช้แบบพิมพ์เทียม ค) การเกิดควอนตัมดอตแบบประกอบตนเอง [39,40, 41].....	8
2.3	โหนดที่เป็นไปได้ของการปลูกผลึกในการปลูกแบบเอพิแทกซี [41].....	9
2.4	แสดงขั้นตอนการเกิดควอนตัมดอตแบบ SK ในการปลูกแบบเอพิแทกซี โดยควอนตัมดอตมีการเกิดแบบสุ่ม (random) [13].....	10
2.5	ตัวอย่างขั้นตอนการทำ pre-pattern substrate ด้วยลำอิเล็กตรอนเพื่อทำแม่พิมพ์สำหรับเรียงควอนตัมดอต โดยเริ่มต้นจากรูป ก) ปลูก AlGaAs ลงบน GaAs (001) ขั้วสเตรต ข) ใช้ลิโทกราฟีและการกัดออกเพื่อให้ได้ผิวเรียบและโครงสร้างที่ต้องการ ค) เคลือบผิวด้วยสาร PMMA ซึ่งเป็นโฟโตรีซิสชนิดหนึ่ง ง) ทำลวดลายบนผิวหน้าด้วยลิโทกราฟีแบบลำอิเล็กตรอน จ) กัดออกด้วยสารกัด (etchant) SiCl_4 ฉ) โครงสร้างที่สมบูรณ์พร้อมลวดลายสำหรับปลูกควอนตัมดอต ข) ภาพ AFM ลวดลายที่ได้จากการเตรียมในขั้นตอน ก-ฉ และ ข) ภาพแสดงการเรียงตัวของควอนตัมดอตที่เกิดขึ้นบนแม่พิมพ์ [48].....	11
2.6	ภาพตัวอย่างลักษณะของชิ้นงานที่เกิดจากการ miscut ทำให้เกิด surface step ขึ้น [50].....	12
2.7	ภาพ AFM ของควอนตัมดอตซึ่งปลูกบน GaAs (n11) ได้แก่ ก) GaAs (911) B, ข) GaAs (711) B, ค) GaAs (511) B, ง) GaAs (411) B และ จ) GaAs (311) B [50].....	12
2.8	ภาพ AFM ของชิ้นงาน ก) 17 ชั้นของ $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ ในการเกิดควอนตัมดอตแบบไชยาว รวมถึง ข) ภาพตัดขวาง TEM ของชิ้นงานในแต่ละด้าน [51].....	14
2.9	แผนภาพแสดงการเกิดความเครียดแบบอัดเมื่อปลูกชั้น InGaAs บนชั้น GaAs...	15
2.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาวิกฤติ (h_{c60}) กับค่าสัดส่วน $\text{In}(x)$ ใน $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ ตามสมการที่ 2.6.....	17

รูปที่		หน้า
2.11	ระนาบการเคลื่อนที่ทั้งหมดของ 60° type dislocation บนระนาบ {111} พร้อม แกนระบุทิศทาง โดย $\vec{b}$ แสดงถึงเวกเตอร์หนึ่งของ dislocation ชนิดนี้ ซึ่ง $\vec{b} = \frac{1}{2}$ [0-11] อยู่ในระนาบ (111) [57].....	18
2.12	ลักษณะเวกเตอร์การเคลื่อนที่ของ dislocation ที่ทำให้เกิด up step และ down step โดยเมื่อโปรเจค เวกเตอร์ในทิศทาง [110] โดย $\vec{b} = \frac{1}{2}$ [10-1] ทำให้เกิดการ เลื่อนในระนาบ (1-11) เกิด down-step และ $\vec{b} = \frac{1}{2}$ [0-11] ทำให้เกิดการเลื่อน ในระนาบ (-111) เกิด up-step [57].....	19
2.13	ขั้นตอนการเกิด surface step elimination โดยเรียงจาก ก) ขณะเริ่มเกิด surface step ขึ้น จาก dislocation ข) ลักษณะของชั้นฟิล์มเมื่อเกิดการเลื่อน ของผลึกจาก dislocation ค) ลักษณะการก่อตัวของชั้นฟิล์มจากการเลือกเกิด บริเวณขอบของ step ก่อนบริเวณอื่น จนเกิดการหล่นลงมาของชั้นผลึกเมื่อมี ความหนาพอ ง) ผิวหน้ารูปแบบของลายตารางที่สมบูรณ์โดยพื้นผิวมีความ โค้งและเรียบ [56].....	19
2.14	ก) ลักษณะของโครงสร้าง GaAs/ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ /GaAs ซึ่งมีลักษณะคล้ายบ่อ ควอนตัมแคบๆ ข) แสดงลักษณะการถูกบีบบังคับจาก GaAs ทั้งสองด้านของ ชั้น InGaAs เนื่องจากความไม่เข้ากันของโครงผลึก.....	20
2.15	ภาพ bright-field พร้อมกับลูกศรชี้ทิศทางตามระนาบของชั้นงานที่ถูก ตัดขวาง โดยภาพประกอบด้วย GaAs/ $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ /GaAs ที่มีชั้นกลบทับ GaAs ที่มีความหนา ก) 10 nm และ ข) 100 nm [58].....	20
2.16	ภาพ TEM แสดง ก) การแตกออกของ dislocation ในทิศทาง [-110] ข) ลักษณะของเส้นซิกแซกที่เกิดขึ้นขณะกลบด้วยชั้น GaAs ที่มีความหนา 100 nm ค) ลักษณะการจัดเรียงของเส้นซิกแซก [58].....	21
2.17	ลักษณะของผิวหน้าเมื่อทำการปลูก InAs QDs บนชั้นความเครียด เมื่อมีจำนวน ของชั้น SL ก) 10 nm ข) 15 nm และ ค) 30 nm [60].....	22
3.1	ก) ภาพตัดขวางแสดงส่วนประกอบภายในห้องปลูกผลึก และ ข) หลักการ ทำงานโดยคร่าวๆของเครื่อง MBE [59].....	23
3.2	ก) ภาพถ่าย และ ข) โครงสร้างระบบปลูกผลึกของเครื่องปลูกลำโมเลกุล RIBER รุ่น 32P.....	24
3.3	ก) ภาพเครื่องปั๊มโมเลกุลเทอร์โบ และ ข) หลักการทำงานเบื้องต้น [62].....	25

รูปที่	หน้า
3.4	ลักษณะทั่วไปของซิปสเตอร์มานิฟูลเดเตอร์ [63]..... 26
3.5	ลักษณะทั่วไปของ Effusion cell [64]..... 26
3.6	ลักษณะทั่วไปของ hot filament ionization gauge ประกอบไปด้วยแท่งโลหะ 3 ชนิด ฟิลาเมนต์, กริด และคอลเลกเตอร์ [65]..... 28
3.7	โครงสร้างของระบบ RHEED [66]..... 28
3.8	ก) โครงสร้างและการทำงานโดยย่อของ Quadruple mass spectrometer และ ข) วงจรการทำงานแท่งโลหะ 4 แท่งใน Quadruple mass spectrometer [67,68]..... 29
3.9	ก) รูปถ่ายของระบบวัด PL ข) Schematic ของระบบวัด PL [69]..... 30
3.10	ภาพถ่ายของเครื่อง SEIKO SPA 400-AFM..... 30
3.11	ภาพแสดงการทำงานอย่างง่ายของ AFM [70]..... 31
3.12	โพรไฟล์อุณหภูมิ (Temperature profile) ของกระบวนการทำ pre-heat..... 32
3.13	โพรไฟล์อุณหภูมิของขั้นตอนการทำการ De-Ox พร้อมกระบวนการเปิดปิดชุด เตอร์..... 33
3.14	ภาพ RHEED patterns ที่ได้จาก RHEED Screen ของการเปลี่ยนแปลง RHEED pattern จาก C(2x4) ไปเป็น C(4x4) ของพื้นผิว GaAs ในการหาค่า อุณหภูมิ transition โดยเรียงลำดับจากรูป ก-จ..... 34
3.15	ตำแหน่งของ zero-order diffracted RHEED (00) beam บน RHEED Screen. 35
3.16	ลำดับขั้นต่างๆของการเกิดเกาะสองมิติ (2D islands) ของการปลูกชั้นต่อชั้นของ SrTiO ₃ และความเข้มของ zero-order diffracted RHEED beam ที่ เปลี่ยนแปลงไป [72]..... 35
3.17	ลักษณะการเปิดและปิดชุดเตอร์ของ In และ As ของการปลูก InAs ควอนตัม ดอตแบบ SK แบบปกติและ SK แบบ MEE..... 38
3.18	แผนภาพเฟสสมดุล (Equilibrium phase diagram) ในรูปของฟังก์ชันระหว่าง H กับ ϵ โดยภาพประกอบด้านบนและล่างแสดงถึงลักษณะของผิวน้ำของโหมด ต่างๆทั้ง 6 โหมด สามเหลี่ยมเล็กสีขาวแทนโครงสร้างเกาะสามมิติที่มี เสถียรภาพ สามเหลี่ยมใหญ่ระบายสีข้างในแทนโครงสร้างเกาะสามมิติที่โต เต็มที่ (Ripening island) เฟสแต่ละรูปแบบถูกแบ่งด้วยเส้นขอบเขต $H_{c1}(\epsilon)$: FM-R1, FM-SK1; $H_{c2}(\epsilon)$: SK1-R2; $H_{c3}(\epsilon)$: SK2-SK1; $H_{c4}(\epsilon)$: VW-SK2,VW- R3 [74]..... 39

รูปที่	หน้า
3.19	ภาพจาก RHEED screen ขณะปลูกควอนตัมดอต InAs บนแผ่นฐานลายตาราง $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ ก) เมื่อเริ่มเกิดควอนตัมดอต ข) เกิดควอนตัมดอตแล้ว ค) Chevron pattern [34]..... 39
3.20	ความสัมพันธ์ของ Chevron pattern ต่อลักษณะทางกายภาพของควอนตัมดอต [75]..... 40
3.21	ก) การกลบหีบเพื่อทำ Nanohole ข) การกลบหีบแบบบางสำหรับปลูก โครงสร้างควอนตัมดอตความหนาแน่นสูง [76]..... 40
4.1	ภาพตัดขวางของชั้นงานในการทดลอง ก) โครงสร้างสำหรับศึกษาสมบัติทาง กายภาพของผิวหน้าด้วยเทคนิค AFM ข) โครงสร้างสำหรับศึกษาสมบัติทางแสง ด้วยเทคนิค PL 41
4.2	ภาพ AFM ขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ แสดงลักษณะผิวหน้าที่ยังไม่ได้ปลูกควอนตัมดอต ก) โครงสร้าง 50 nm $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ [33] และ ข) ชั้นงาน D ซึ่งมี โครงสร้าง 250 nm GaAs Spacer/ 50 nm $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ และ ค) line scan ของชั้นงาน D ตามตำแหน่งในรูป b)..... 43
4.3	ลำดับของการเปลี่ยนแปลงผิวหน้าในการสร้างแม่พิมพ์สำหรับการก่อตัว ควอนตัมดอตใหม่ โดยแสดงกลไกพร้อมลักษณะการก่อตัวของผิวหน้าของ ชั้นงาน ก) การเกิดลายตารางขึ้นจากการเลื่อนของระนาบผลึกเนื่องจาก misfit และ threading dislocation ของชั้น $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ ข) การเพิ่มชั้น GaAs spacer ทำให้แนวของ dislocation เปลี่ยนแปลงไป โดยมีบางส่วนหยุดหรือ เบี่ยงเบนไปจากทิศทางเดิม ในขณะที่มีบางส่วนผ่านขึ้นยังผิวหน้าได้ และ ค) แสดงการเกิดของแนวเนินขนาดต่างๆ ซึ่งเป็นผลจากการเลื่อนของระนาบบน ผิวหน้าและการเกิด surface step elimination..... 45
4.4	ภาพ AFM ของการปลูก 1.8 ML InAs QDs บน ก) $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ ข) GaAs (100) ซับสเตรตพร้อมความสูง [77,79]..... 46
4.5	ภาพ AFM ขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ แสดงลักษณะการก่อตัวของ InAs ควอนตัมดอต ที่ปลูกด้วยวิธีแบบ SK ของ ก) ชั้นงาน $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ ข) ชั้นงาน A ค) ชั้นงาน B และ ง) ชั้นงาน C ตามลำดับโดยในแต่ละรูปทางด้านมุมขวามือมีรูป ขยายขนาด $0.5 \times 0.5 \mu\text{m}^2$ ในบริเวณตำแหน่งที่สนใจและลูกศรสีขาวแสดง ทิศทาง [1-10]..... 47

รูปที่		หน้า
4.6	ลักษณะการเปิดปิดชัตเตอร์ In และ As ในชิ้นงาน E และ F.....	49
4.7	ภาพ AFM ขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ ของชิ้นงาน F และ G ซึ่งปลูกควอนตัมดอตแบบ MEE โดย over growth ก) 0% และ ข) 50% ตามลำดับ โดยในแต่ละรูปทางด้านมุมขวามือมีรูปขยายขนาด $0.5 \times 0.5 \mu\text{m}^2$ ในบริเวณที่สนใจ และลูกศรสีขาวแสดงถึงทิศทาง [1-10].....	49
4.8	สเปกตรัมการเปล่งแสงโดยทั่วไปของชิ้นงาน G โดยระบุตำแหน่งของยอดพลังงานหลักที่เกิดขึ้น 4 ค่า ด้วย สัญลักษณ์ I , II , III และ IV ตามลำดับ.....	51
4.9	กราฟแสดงผลของการเปล่งในการทดลองของ S.J.LEE [83].....	52
4.10	กราฟแสดงการกระจายตัว ก) ความสูงของควอนตัมดอตและความกว้างในทิศทาง ข) [1-10] และ ค) [110] ของชิ้นงาน C.....	53
4.11	สเปกตรัมการเปล่งแสงของชิ้นงาน G เมื่อเปลี่ยนแปลงกำลังเลเซอร์ที่ใช้ในการกระตุ้นที่กำลังแสงเลเซอร์กระตุ้นที่อุณหภูมิ 20 K.....	54
4.12	สเปกตรัมการเปล่งแสงของชิ้นงาน G การเปล่งแสงเมื่อเปลี่ยนแปลงกำลังเลเซอร์ที่ใช้ในการกระตุ้นที่กำลังแสงเลเซอร์กระตุ้น 20 mW พร้อมเส้นกราฟภายในแสดงยอดพลังงาน Gaussian ทั้ง 3 ค่ายอด.....	55
4.13	สเปกตรัมของแสงที่เปล่งออกจากชิ้นงาน G ที่อุณหภูมิต่างๆ (กราฟถูก offset เพื่อความกระจ่าง).....	56
4.14	ค่าความความเข้มแสงที่เปล่งออกจากค่ายอดพลังงานต่าง ๆ ของชิ้นงาน G เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ.....	57
4.15	ตำแหน่งของค่ายอดพลังงานของชิ้นงาน G ที่เปลี่ยนไปเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ.....	57
4.16	เปรียบเทียบค่ายอดพลังงานที่เปลี่ยนไปของยอดพลังงานที่ I และ II กับค่าที่ได้จากสมการ Varshni พร้อมกับเส้นประที่ได้จากการปรับค่า E_0 ในสมการ Varshni.....	58
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มกับมุมโพลาไรส์ของยอดพลังงานทั้งสี่ที่ปรากฏในรูปที่ 4.8.....	59