

การปลูกควอนตัมดอตโมเลกุลและการประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์



นาย ศิริชัย เรืองเดช

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-14-2118-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

๒๕๔๘๗๐๒๒๐

GROWTH OF QUANTUM DOT MOLECULES AND APPLICATION FOR SOLAR CELLS

Mr. Sirichai Ruangdet

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 2005

ISBN 974-14-2118-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การปลูกควอนตัมดอตโมเลกุลและการประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์

โดย

นายศิริชัย เรืองเดช

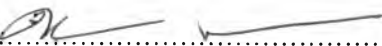
สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

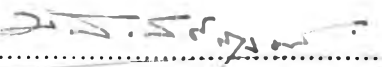
อาจารย์ที่ปรึกษา

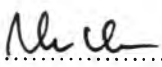
ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว

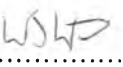
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


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


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ทรงพล กาญจนชูชัย)


..... กรรมการ
(ดร.สกุทธรม เสนาะพิมพ์)

ศิริชัย เรืองเดช : การปลูกควอนตัมดอตโมเลกุลและการประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์.
(GROWTH OF QUANTUM DOT MOLECULES AND APPLICATION FOR SOLAR
CELLS) อ. ที่ปรึกษา: ศ.ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว, 95 หน้า. ISBN 974-14-2118-4.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาผลกระทบของการแทรกควอนตัมดอต โมเลกุลเป็นชั้น
ทำงานในโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ ทั้งแบบ Schottky แบบหัวต่อเหมือน (Homo-
junction) และแบบหัวต่อต่างชนิด (Hetero-junction) ด้วยเครื่องปลูกผลึกจากลำโมเลกุล (Molecular
Beam Epitaxial, MBE) แบบสารตั้งต้นเป็นของแข็ง กระบวนการปลูกควอนตัมดอตที่ใช้เป็นแบบ
จัดเรียงตัวเองในโหมด Stranski-Krastanow (SK)

ชั้นทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำการศึกษามีทั้งชนิด ควอนตัมดอต, ควอนตัมดอต
โมเลกุล และควอนตัมดอต โมเลกุลแบบหนาแน่นสูง โครงสร้างแบบควอนตัมดอตโมเลกุลปลูกด้วย
เทคนิคการปลูกกลบและปลูกซ้ำ (thin-capping-and-regrowth processes) ในขณะที่โครงสร้าง
ควอนตัมดอตโมเลกุลแบบหนาแน่นสูงปลูกด้วยเทคนิคการปลูกกลบและปลูกซ้ำหลายๆครั้ง
(repetitive thin-capping-and-regrowth processes)

โดยทำการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้ความเข้มแสง 100 mW/cm^2 (AM1) ผลการศึกษา
พบว่า เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุลแบบหนาแน่นสูงให้ผลที่สอดคล้องกับ
ทฤษฎี Intermediate Band ซึ่งกล่าวว่า จำนวนควอนตัมดอตที่เหมาะสมต่อพื้นที่ทำให้เกิด
แถบพลังงานภายในช่องว่างพลังงาน ส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจรเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากการดูดกลืน
แสงที่ย่านความยาวคลื่นยาวได้มากขึ้น

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....ศิริชัย เรืองเดช.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2548.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

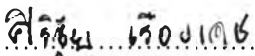
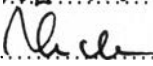
4770474021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: QUANTUM DOT MOLECULES/ MOLECULAR BEAM EPITAXY / SOLAR CELL
SIRICHAI RUANGDET: GROWTH OF QUANTUM DOT MOLECULES AND
APPLICATION FOR SOLAR CELLS. THESIS ADVISOR: PROF.DR. SOMSAK
PANYAKEOW, 95 pp. ISBN 974-14-2118 -4.

This thesis studies the effects of quantum dot molecules as active layers in several structures of solar cells. Schottky, homo-junction and hetero-junction. All samples in this work were grown by a modified solid source molecular beam epitaxial (MBE) technique. The QD fabrication process relies on self-assembled growth in the Stranski-Krastanow (SK) mode.

The active layers of solar cells investigated consist of self-assembled quantum dots, quantum dot molecules and high-density quantum dot molecules. While quantum dot molecules (QDMs) were grown by using thin-capping-and-regrowth processes, the high-density quantum dot molecules were grown by repetitive thin-capping-and-regrowth processes.

All solar cells were investigated under a 100 mW/cm^2 (AM1) condition. We found that the results of solar cell with high-density quantum dot molecules are in accordance with the intermediate band theory which states that a large number of quantum dots per unit area gives rise to an intermediate energy band inside the band gap, resulting in increased short-circuit current due to enhance absorption at long wavelengths.

Department.....ELECTRICAL ENGINEERING....Student's signature.....
Field of study...ELECTRICAL ENGINEERING....Advisor's signature.....
Academic year2005.....Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งจาก ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว ซึ่งเป็นผู้ให้คำแนะนำรวมทั้งข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างมากตลอดระยะเวลาที่ทำการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูง

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน อันประกอบไปด้วย รศ.ดร. มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร, รศ.ดร. ทรงพล กาญจนชูชัย และ ดร. สกฤทธรม เสนาะพิมพ์

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณสุภโชค ไทยน้อย คุณบัณฑิตา รัฐวิเศษ คุณพรชัย ช่างม่วง ที่ให้คำแนะนำอันมีค่าในเรื่องการเรียน การทำวิจัย และการเขียนวิทยานิพนธ์แก่ผู้ทำวิจัย

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่และนิสิตปริญญาเอก โท ตรี ทุกท่านในห้องปฏิบัติการวิจัย สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ได้ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆ ด้วยความเต็มใจและขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่เอื้อเพื่อวัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลรอบข้างทุกท่านที่ให้ความห่วงใยและเป็นกำลังใจในการทำวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและแนวคิด.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 ทฤษฎี.....	3
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์เซลล์แสงอาทิตย์.....	3
2.1.1 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์.....	3
2.1.2 องค์ประกอบที่เป็นตัวกำหนดลักษณะสมบัติของการเคลื่อนที่ของพาหะนำไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์.....	4
2.1.3 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์.....	4
2.1.4 ลักษณะสมบัติและพารามิเตอร์ที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์.....	6
2.2 การปลูกผลึกด้วยวิธี Molecular Beam Epitaxy.....	7
2.2.1 กลไกการเกิดผลึกของการปลูกผลึกด้วยวิธี MBE.....	9
2.2.2 โครงสร้างแบบควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเอง.....	13
2.3 พื้นฐานของโครงสร้าง Low-Dimension.....	14
2.4 การวัดรูปแบบ RHEED (reflection high-energy electron diffraction).....	21
2.4.1 การเทียบวัดค่าอุณหภูมิของแผ่นฐานในระหว่างการปลูกผลึกด้วย RHEED.....	21
2.4.2 การเทียบวัดความเร็วการปลูกผลึกด้วย RHEED.....	22
2.4.3 การสังเกตรูปแบบ RHEED ในการปลูกควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเอง.....	23

บทที่	หน้า
3	การทดลอง.....24
	3.1 การปลูกผลึกด้วยเครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy, MBE).....24
	3.1.1 การเตรียมแผ่นผลึกฐานสำหรับการปลูกผลึก.....24
	3.1.2 เงื่อนไขการปลูกผลึก.....25
	3.1.3 การปลูกผลึก.....27
	3.1.4 ขั้นตอนในการปลูกชั้นควอนตัมดอต.....29
	3.1.5 ขั้นตอนในการปลูกชั้นควอนตัมดอต โมเลกุล.....32
	3.1.6 ขั้นตอนในการปลูกชั้นควอนตัมดอต โมเลกุลแบบที่มีความหนาแน่นสูง.....33
	3.1.7 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นแบบต่างๆ.....35
	3.2 ขั้นตอนการทำขั้วสัมผัสของเซลล์แสงอาทิตย์.....40
	3.3 การวัดตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของควอนตัมดอต.....44
	3.4 การวัดตรวจสอบคุณลักษณะทางแสงของควอนตัมดอต.....45
	3.5 การวัดตรวจสอบคุณลักษณะสมบัติทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์.....46
	3.6 การวัดสเปกตรัมการตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.....48
	3.7 การวัดตรวจสอบคุณลักษณะสมบัติทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่มีความเข้มสูง.....49
	3.8 การวัดค่าสภาพคล่อง.....50
4	ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....51
	4.1 ผลการปลูกควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเอง (Self-assembled quantum dots).....51
	4.2 ผลการปลูกควอนตัมดอตโมเลกุล (Quantum dot molecules).....52
	4.3 ผลการปลูกควอนตัมดอตโมเลกุลแบบที่มีความหนาแน่นสูง (High density quantum dot molecules).....53
	4.4 ผลการประดิษฐ์ Schottky quantum dot molecule solar cells.....54
	4.4.1 แบบ Single-stacked.....54
	4.4.2 แบบ Multi-stacked.....55
	4.5 ผลการประดิษฐ์ Schottky high density quantum dot molecule solar cells.....57
	4.5.1 แบบ Single-stacked.....57
	4.5.2 แบบ Multi-stacked.....59

บทที่	หน้า
4.6 ผลการประดิษฐ์ Homostructure high density quantum dot molecule solar cells.....	61
4.6.1 แบบ Single-stacked.....	61
4.6.2 แบบ Multi-stacked.....	62
4.7 ผลการประดิษฐ์ Heterostructure high density quantum dot molecule solar cells.....	65
4.7.1 แบบ Heterostructure (without QDs).....	65
4.7.2 แบบ Single-stacked.....	67
4.7.3 แบบ Multi-stacked.....	68
4.8 ผลการทดสอบที่ความเข้มแสงสูง.....	69
5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	72
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	72
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	73
5.2.1 เงื่อนไขของควอนตัมดอทที่ให้ Intermediate band ที่ดี.....	73
5.2.2 สิ่งที่มีผลกับการปลูกควอนตัมดอท.....	73
5.2.3 ปัญหาของความต้านทานอนุกรมที่มีผลกับประสิทธิภาพของเซลล์ แสงอาทิตย์โดยเฉพาะกับแสงที่ความเข้มสูง.....	74
รายการอ้างอิง.....	75
ภาคผนวก.....	76
ผลงานวิจัยที่มีการเผยแพร่.....	77
สำเนาบทความวิจัยที่มีการเผยแพร่.....	78
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	95

สารบัญตาราง

ญ

ตาราง	หน้า
2.1 แสดงอุณหภูมิจุดระเหิดของสารประกอบหมู่ 3 กับหมู่ 5 ชนิดต่างๆ.....	10
2.2 แสดงตัวแปรทางกายภาพของสารประกอบกึ่งตัวนำหมู่ 3-5 ชนิด 2 ธาตุ.....	13
4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่แสงความเข้มสูงค่าต่างๆ.....	71
5.1 สรุปลค่าพารามิเตอร์ต่างๆของ Sample แบบต่างๆ.....	72

รูปที่	หน้า
2.1	แสดงระดับพลังงานลดต่ำลงจนเกิดแรงดันเปิดวงจร.....3
2.2	แสดงโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ (a) Planar junction (b) ภาพ top view แสดงขั้วต่อโลหะแบบนิ้วมือ.....5
2.3	แสดง I-V curve.....6
2.4	แผนภาพภายใน growth chamber ของเครื่องปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล.....7
2.5	ลักษณะทางเรขาคณิตของระบบ RHEED.....8
2.6	รูปแบบการก่อตัวของผลึกในโหมด (ก) Frank-van der Merwe (ข) Volmer-Weber และ (ค) Stranski-Krastanow.....9
2.7	แสดงปฏิกิริยาของการเกิดผลึก GaAs ในกรณี Ga-As ₂ -(100) GaAs.....11
2.8	แสดงปฏิกิริยาของการเกิดผลึก GaAs ในกรณี Ga-As ₄ -(100) GaAs.....12
2.9	แสดงโครงสร้างแบบ Zincblende.....12
2.10	แสดงการเกิดของ โครงสร้างควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเอง เนื่องมาจาก การผ่อนคลาย(Relaxation) พลังงานความเครียดจากโครงผลึก.....14
2.11	เปรียบเทียบขนาดของ Bulk , ท่อนำคลื่น (Waveguide) , ควอนตัมดอต (Quantum dot) และ อะตอม.....16
2.12	โครงสร้างและความหนาแน่นสถานะ (D.O.S) ของ (ก) bulk , (ข) ควอนตัมเวลล์ , (ค) ควอนตัมไวร์ และ (ง) ควอนตัมดอต โดย L อยู่ในระดับ μm ในขณะที่ L_x , L_y , L_z อยู่ในระดับ nm.....17
2.13	วิวัฒนาการของค่ากระแสเทอร์สโตนที่ใช้สำหรับขับแสงเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ.....19
2.14	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดค่าคงที่โครงผลึก และ ค่าความกว้าง แถบพลังงานของระบบสารประกอบกึ่งตัวนำ III - As ที่อุณหภูมิห้อง.....20
2.15	แสดงรูปแบบ RHEED เมื่อเริ่มมีการระเหยออกของออกไซด์บนผิวชิ้นงาน.....21
2.16	แผนภาพแสดงลักษณะการเกิด RHEED intensity oscillation.....22
2.17	รูปแบบของ RHEED (ก) Streaky pattern (ข) Spotty pattern @ > 1.7 ML (ค) Spotty pattern @ = 1.8 ML.....23
3.1	แสดงการขึ้นลงอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานในขั้นตอนการ ทำความสะอาดผิวแผ่นผลึกฐาน.....25
3.2	แสดงการเพิ่มอุณหภูมิและการเปิด-ปิดของสารที่เป็นองค์ประกอบในการปลูกผลึก.....26
3.3	แสดงการเพิ่มอุณหภูมิและการเปิดชุดเตอร์ของบล็อกที่มีแผ่นผลึกฐานติดอยู่ด้าน

รูปที่	หน้า
บนกับซัดเตอร์อาร์เซนิก.....	27
3.4 แสดงแผนภาพ RHEED เมื่อเริ่มการกำจัดออกไซด์ของแกเลียมอาร์เซไนด์.....	28
3.5 แสดงแผนภาพ RHEED ที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบที่สอดคล้องกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป.....	29
3.6 แสดงแผนภาพ RHEED ตอนกำจัดออกไซด์.....	30
3.7 แสดงแผนภาพ RHEED หลังจากทำการปลูกชั้นบัฟเฟอร์จนเรียบ.....	30
3.8 แสดงการลดอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานเพื่อทำการปลูกควอนตัมดอต	31
3.9 แสดงแผนภาพ RHEED ตอนเริ่มเกิดควอนตัมดอตที่ค่าความหนา 1.7 ML	31
3.10 แสดงแผนภาพ RHEED ตอนที่เกิดควอนตัมดอตที่ค่าความหนา 1.8 ML.....	32
3.11 แสดงการลดอุณหภูมิลงเพื่อทำการปลูกควอนตัมดอตโมเลกุล.....	33
3.12 แสดงการขึ้นตอนในการปลูกชั้นควอนตัมดอตโมเลกุลแบบที่มีความหนาแน่นสูง.....	34
3.13 Single-stacked quantum dot molecule solar cells.....	35
3.14 5-stacked quantum dot molecule solar cells.....	36
3.15 Single-stacked high density quantum dot molecule solar cells.....	36
3.16 5-stacked high density quantum dot molecule solar cells.....	37
3.17 Single-stacked high density quantum dot molecule solar cells (Homostructure).....	37
3.18 5-stacked high density quantum dot molecule solar cells (Homostructure).....	38
3.19 Single-stacked high density quantum dot molecule solar cells (Heterostructure).....	39
3.20 5-stacked high density quantum dot molecule solar cells (Heterostructure).....	40
3.21 เครื่อง Evaporation ที่ใช้สำหรับทำขั้วโลหะชนิดต่างๆ.....	41
3.22 เครื่องผลิตน้ำ DI สำหรับใช้ล้างทำความสะอาดชิ้นงาน.....	41
3.23 การติดตั้งชิ้นงานและอุปกรณ์การวัดค่าความหนาของชั้นโลหะ.....	42
3.24 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้และวัตถุดิบในการทำขั้วโลหะ ดังนี้ (ก) แผ่นหน้ากากสำหรับทำลวดลาย (ข) วัตถุดิบในการทำขั้วโลหะแบบต่างๆ	42
3.25 แสดงลวดลายเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น.....	43
3.26 เครื่องวัด Atomic Force Microscopy :AFM.....	44
3.27 อุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการวัด AFM (ก) ตัวจับทียิป (Holder) (ข) ตัวทียิป (Tip)	44
3.28 แสดงระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์	45
3.29 การวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยสารกึ่งตัวนำ.....	46

รูปที่	หน้า
3.30	อุปกรณ์สำหรับติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า.....47
3.31	เครื่อง Curve tracer สำหรับวัดค่าทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....47
3.32	การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยเครื่องจำลองแสงอาทิตย์.....47
3.33	ระบบการวัดสเปกตรัมการตอบสนองต่อแสงที่ตกกระทบ.....48
3.34	ระบบการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในห้องทดลอง.....48
3.35	ระบบและส่วนประกอบของการเพิ่มค่าความเข้มแสง.....49
3.36	เครื่องวัดค่าสภาพคล่อง.....50
4.1	ควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเองที่ปลูกโดยเครื่องปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุลแบบต่างๆไป.....51
4.2	ควอนตัมดอตโมเลกุลปลูกโดยอาศัยเทคนิคการปลูกกลบบางๆและเทคนิคการปลูกควอนตัมดอตซ้ำ.....52
4.3	ควอนตัมดอตโมเลกุลแบบที่มีความหนาแน่นสูงปลูกโดยอาศัยเทคนิคการปลูกกลบบางๆและเทคนิคการปลูกควอนตัมดอตซ้ำแบบหลายรอบ.....53
4.4	แสดง Schematic diagram ของ Quantum dot molecule solar cell.....54
4.5	แสดง IV curve ของ Quantum dot molecule solar cell.....54
4.6	แสดง Schematic diagram ของ Multi stack quantum dot molecule solar cell.....55
4.7	แสดง IV curve ของ Multi stack quantum dot molecule solar cell.....55
4.8	แสดง PL spectrum ของ multi-stacked QDMs เปรียบเทียบกับแบบ Single- stacked....56
4.9	แสดงความเสมอเหมือนกันของโครงสร้างแบบ Multi-stacked QDMs กับ Single-stacked high density QDMs.....57
4.10	แสดง Schematic diagram ของ High density quantum dot molecule solar cell.....57
4.11	แสดง IV curve ของ High density quantum dot molecule solar cell.....58
4.12	แสดง (ก) แสดง band diagram ของด้อยที่อยู่ใกล้กัน (ข) แสดงควากว้างของแถบ IB เป็นฟังก์ชันกับระยะห่างระหว่างดอต.....58
4.13	Schematic diagram ของ Multi stack high density quantum dot molecule solar cell.....59
4.14	แสดง IV curve ของ Multi stack high density quantum dot molecule solar cell.....60
4.15	แสดง PL spectrum ของ multi-stacked QDMs เปรียบเทียบกับแบบ single stack.....60
4.16	แสดง Schematic diagram ของ High density quantum dot molecule solar cell.....61

รูปที่	หน้า
4.17	แสดง IV curve ของ High density quantum dot molecule solar cell.....62
4.18	Schematic diagram ของ Multi stack high density quantum dot molecule solar cell.....63
4.19	แสดง IV curve ของ Multi stack high density quantum dot molecule solar cell.....63
4.20	PL spectrum ของ Multi-stacked high density QDMs เปรียบเทียบกับแบบ Single stack.....64
4.21	แสดง Spectral Response ของ Heterostructure single-stacked high density QDMs และ Multi-stacked high density QDMs.....65
4.22	แสดง Schematic diagram ของ Heterostructure solar cell.....66
4.23	แสดง IV curve ของ Heterostructure solar cell.....66
4.24	แสดง Schematic diagram ของ High density quantum dot molecule solar cell.....67
4.25	แสดง IV curve ของ Multi stack High density quantum dot molecule solar cell.....67
4.26	Schematic diagram ของ Multi stack High density quantum dot molecule solar cell.....68
4.27	แสดง IV curve ของ Multi stack High density quantum dot molecule solar cell.....69
4.28	แสดง Solar simulator ที่มีเลนส์ไว้รวมความเข้มแสง.....70
4.29	แสดง IV curve ที่ความเข้มแสง 1 sun, 2 sun, 3 sun และ 4 sun.....70