



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การวิจัยพื้นฐานสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างนาโนแบบจัด
เรียงตัวเองโดยวิธีปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุล”
(2550-2553)

โดย ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว และคณะ

สิงหาคม 2553

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การวิจัยพื้นฐานสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างนาโนแบบจัด
เรียงตัวเองโดยวิธีปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุล”
(2550-2553)

คณะผู้วิจัย

- | | |
|---------------------------------|--------------------------------|
| 1. ศ. ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว | 2. รศ. ดร. มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร |
| 3. รศ. ดร. บรรยง โตประเสริฐพงศ์ | 4. รศ. ดร. ชุมพล อันตรเสน |
| 5. รศ. ดร. สมชัย รัตนธรรมพันธ์ | 6. รศ. ดร. ทรงพล กาญจนชูชัย |
| 7. อ. ดร. ชรินทร์ วิทวินธานนท์ | 8. นายศุภโชค ไทยน้อย |
| 9. นาย พรชัย ช่างม่วง | |

สังกัด

ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา
และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัยสกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยโครงการ “การวิจัยพื้นฐานของควอนตัมคอมพิวเตอร์แบบจัดเรียงตัวเองและศักยภาพในการประยุกต์ด้านนาโนอิเล็กทรอนิกส์และนาโนโฟโตนิกส์” ช่วงที่ 2 ระหว่างปี 2550-2553 ขอขอบพระคุณ การสนับสนุนจาก มูลนิธิวิจัยอาวุโส และทุนโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษกของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ที่มีส่วนสำคัญในการผลักดันให้คณะผู้วิจัยดำเนินการวิจัยอย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิผล ทั้งในส่วนที่เป็นงานวิจัยพื้นฐานเพื่อปูรากฐานด้านนาโนอิเล็กทรอนิกส์ของประเทศ และในการสร้างทรัพยากรมนุษย์ในระดับบัณฑิตศึกษาเพื่อการพัฒนาองค์ความรู้ใหม่ในระยะยาว ตลอดจนการสร้างผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการที่ยอมรับในระดับนานาชาติ พัฒนาระบบการเตรียมโครงสร้างระดับนาโนเมตรที่มีศักยภาพในการประยุกต์ และมีคุณค่าเชิงพาณิชย์เพื่อการจดสิทธิบัตร และการสร้างต้นแบบสิ่งประดิษฐ์ที่มีศักยภาพในการประยุกต์ ซึ่งจะมีประโยชน์ในงานด้านวิศวกรรมศาสตร์ต่อไป

ส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ยังได้รับการสนับสนุนด้านเงินทุนวิจัยจากสำนักงานวิจัยและพัฒนาด้านอวกาศของกองทัพอากาศสหรัฐอเมริกาและจากศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) โดยมีงบประมาณวิจัยสมทบจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเพื่อใช้ซื้อเครื่องมือวิจัยด้านการวิเคราะห์และเครื่องปลูกชิ้นผลึกด้วยลำไมเลกุลชุดที่สองด้วย

นิสิตในระดับบัณฑิตศึกษาส่วนหนึ่งได้รับทุนการศึกษาจากโครงการ “ศิษย์ก้นกุฏิ” ของศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษไฟฟ้ากำลังของคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและนิสิตจากต่างประเทศในโครงการวิจัยนี้ได้รับทุนการศึกษาจากโครงการ AUN/SEED-Net ในการศึกษาทั้งระดับปริญญาโทและเอก

ความร่วมมือด้านวิจัยจาก สถาบันวิจัยแห่งชาติฝรั่งเศส (LAAS-CNRS), Max Planck Institute, University of Tokyo, Tokyo Institute of Technology, Waseda University, National University of Singapore และ University of California at San Diego ยังมีส่วนกระตุ้นให้เกิดบรรยากาศการวิจัยในระดับแนวหน้าได้ คณะผู้วิจัยจึงขอขอบคุณ Prof. A. Martinez, Dr. Francois Lozes, Mr. Bernard Rousset, Dr. Karl Eberl, Dr. Oliver Schmidt, Prof. Yasuhiko Arakawa, Prof. Shunri Oda, Prof. Y. Horikoshi, Prof. Soo Jin Chua, Prof. Charles W. Tu ในไม่ตรีจิต และความร่วมมือในการทำวิจัยเป็นอย่างดีตลอดมา

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : RTA5080003

ชื่อโครงการ : การวิจัยพื้นฐานสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างนาโนแบบจัดเรียงตัวเองโดยวิธีปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุล

ชื่อนักวิจัย : ศ. ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว รศ. ดร. มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร
 รศ. ดร. บรรยง โตประเสริฐพงษ์ รศ. ดร. ชุมพล อันตรเสน
 รศ. ดร. สมชัย รัตนธรรมพันธ์ รศ. ดร. ทรงพล กาญจนชูชัย
 อ. ดร. ชนินทร์ วิศวินธานนท์ นายสุภโชค ไทยน้อย
 นายพรชัย ช่างม่วง
 ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ระยะเวลาโครงการ : 3 ปี (2550-2553)

การวิจัยพื้นฐานของควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเองที่ทำจากสารประกอบกึ่งตัวนำซึ่งมีศักยภาพในการประยุกต์ด้านนาโนอิเล็กทรอนิกส์และนาโนโฟโตนิกส์ ในช่วงปี 2550-2553 นี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่องจากช่วงปี 2547-2550 ที่ได้ดำเนินการที่ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยสร้างควอนตัมดอตที่มีรูปแบบต่างๆ ได้แก่ ควอนตัมดอตคู่ ควอนตัมดอตแบบ 4 ดอต ควอนตัมดอตวงแหวน ควอนตัมดอตที่เรียงเป็นแนวตรง และแนวตัดขวางกัน ตลอดจนควอนตัมวงแหวนได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้เทคนิคการปลูกผลึกแบบปลูกกลบและปลูกซ้ำ และเทคนิคการปลูกผลึกแบบหยดด้วยเครื่องปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุล

โครงสร้างควอนตัมดอตที่พัฒนาขึ้น เช่น ควอนตัมดอตคู่จะมีศักยภาพในด้านสปินทรอนิกส์ ควอนตัมดอตแบบ 4 ดอต และควอนตัมดอตวงแหวนจะมีศักยภาพในด้านควอนตัมคอมพิวเตอร์ตามหลักการควอนตัมเซลล์ออสซิลโลกราฟี ส่วนควอนตัมดอตที่เรียงตัวเป็นแนวตรงและแนวตัดขวางกันจะเป็นรูปแบบที่จำเป็นสำหรับสิ่งประดิษฐ์ด้านนาโนอิเล็กทรอนิกส์และนาโนโฟโตนิกส์ การพัฒนาเทคนิคการปลูกควอนตัมดอตโมเลกุลที่มีจำนวนดอตหนาแน่นสูงยังเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนา ควอนตัมดอตเลเซอร์ และควอนตัมดอตโซล่าเซลล์ที่มีสมรรถนะสูงด้วย

คำหลัก : นาโนอิเล็กทรอนิกส์ โครงสร้างควอนตัม การปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล

Keywords : Nanoelectronics, Quantum Structures, Molecular Beam Epitaxy

Executive Summary

“Basic Research on Self-Assembled Quantum Dots and their Potential Applications on Nanoelectronic and Nanophotonics” has been conducted since 2000 and received the financial support from Senior Researcher Fellowship of Thailand Research Fund (TRF) and Office of the Higher Education Commission (OHEC) during 2004-2007 and during 2007-2010.

Self-assembled quantum dots, which are defect-free nanostructures, are grown by both solid-source and gas-source molecular beam epitaxies (MBE). With an original development of our MBE process called thin-capping-and-regrowth technique and droplet epitaxy, different patterns of quantum dot nanostructures such as bi-quantum dots, quadra-quantum dots, quantum dot ring, aligned quantum dot and cross hatched quantum dots as well as quantum dot rings are created at different growth conditions. These nanostructures are useful for various device applications in spintronics, quantum computing, nanoelectronics and nanophotonics. High density quantum dot molecules having high dot quality are also vital for high performance quantum dot lasers and quantum dot solar cells.

In this full report, a research background prior to quantum study is introduced and followed by experimental results based on quantum dot growth by solid-source and gas-source MBE and related evaluations, such as quantum dot morphology by Atomic Force Microscopy (AFM), cross-sectional nanostructures by Transmission Electron Microscopy (TEM), basic optical properties by Photoluminescence (PL). Finally, we have demonstrated to fabricate a prototype of quantum device having high density quantum dots as an active part, i.e. quantum dot solar cells. The high performance of quantum dot solar cells showing broad spectral response confirms that this basic research is paving a way to potential development of energy efficient nanoelectronics and nanophotonics in Thailand.

In addition, reprints of international publications and manuscripts of all papers presented in all journals and conferences are attached. During 2007-2010, authors were invited to give talks, plenary lectures and keynote lectures at conferences and field-wise seminars. List of graduated students at bachelor, master and Ph.D. levels and their thesis titles are also presented. Parts of this research work are conducted through some research collaborations with foreign institutes as listed at the end of this report.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ii
บทคัดย่อ	iii
Abstract	iv
Executive Summary	v
1. บทนำ.....	1
2. เทคนิคการปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุลแบบหยด (Droplet Epitaxy)	4
3. โครงสร้างระดับนาโนเมตรแบบต่าง ๆ ที่พัฒนาจากเทคนิคการปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุลแบบหยด.....	6
4. โครงสร้างระดับนาโนเมตรที่มีศักยภาพด้านควอนตัมคอมพิวเตอร์.....	10
5. กระบวนการเตรียมโครงสร้างระดับนาโนเมตรที่มีคุณค่าเชิงพาณิชย์และอื่นจลสิทธิบัตร.....	12
6. การวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของโครงสร้างควอนตัมดอตแบบต่าง ๆ.....	14
7. การศึกษาการปลูกชั้นผลึกสารประกอบกึ่งตัวนำบนฐานผลึกเจอร์เมเนียม	17
8. การศึกษาผลตอบสนองทางสเปกตรัมของควอนตัมดอตโซล่าเซลล์	18
9. การติดตั้งเครื่องปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุลชุดใหม่ รุ่น RIBER Compact 21 TM	21
10. การซ่อมและบำรุงรักษาเครื่องปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุลชุดเก่า รุ่น RIBER 32P	22
11. ผลงานวิจัยที่ได้รับรางวัลและผลงานวิจัยที่รับเชิญในการประชุมวิชาการต่าง ๆ.....	24
12. การพัฒนากำลังคน.....	25
Outputs ที่ได้จากโครงการวิจัย.....	26
ภาคผนวก	42

1. บทนำ

โครงการวิจัยพื้นฐานสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างนาโนแบบจัดเรียงตัวเองโดยวิธีปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุลได้รับการสนับสนุนทุนเมธีวิจัยอาวุโสครั้งแรกช่วงปี 2547-2550 โครงการวิจัยเดียวกันได้รับการสนับสนุนต่อเนื่องเป็นครั้งที่สองช่วงปี 2550-2553 ในรายงานฉบับสมบูรณ์นี้จึงมีเนื้อหาที่จะเพิ่มความเดิมในการวิจัยช่วงแรก ต่อเนื่องด้วยเนื้อหาผลการวิจัยในช่วงที่สองโดยละเอียด

การพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กจิ๋วมีความสำคัญต่อสังคมสีเขียวยุคใหม่ที่เน้นการใช้พลังงานที่มีประสิทธิภาพและการใช้อุปกรณ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Energy Efficient and Environment Friendly) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีใช้งานอยู่ทั่วไปในชีวิตประจำวันทั้งปัจจุบันและอนาคต เช่น คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์ โทรทัศน์ เครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้าน อุปกรณ์เครื่องมือต่าง ๆ ในโรงพยาบาล โรงงานอุตสาหกรรม ฯลฯ แนวคิดพื้นฐานตรงไปตรงมาของการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กจิ๋ว ก็เพื่อใช้เนื้อวัสดุที่น้อยลง ในขณะที่เดียวกันมีสมรรถนะสูงขึ้น วัสดุที่ใช้ทำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญได้แก่ สารกึ่งตัวนำเพื่อใช้ทำสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็ก ๆ เช่น ทรานซิสเตอร์ ไดโอด ตลอดจนวงจรรวมที่ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์จำนวนมากที่ทำงานเป็นวงจรตรรกในหน่วยมันสมอง และหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ เมื่อวัสดุสารกึ่งตัวนำมีขนาดเล็กลงมาก ๆ จนอยู่ในระดับนาโนเมตร คุณสมบัติพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างนาโนจะเปลี่ยนไปจากเดิม เพราะอิสระในการเคลื่อนที่ของพาหะนำไฟฟ้าเช่น อิเล็กตรอนจะลดน้อยลง ทำให้เกิดปรากฏการณ์ควอนตัมขึ้น กล่าวคือ พลังงานของอิเล็กตรอนในโครงสร้างนาโนจะมีลักษณะเป็นค่ากระโดด (Discrete Energy) ไม่มีความต่อเนื่อง เหมือนพลังงานของอิเล็กตรอนในผลึกสารกึ่งตัวนำที่เป็นก้อนโต (Bulk Semiconductor) ซึ่งปกติจะมีอิสระในการเคลื่อนที่ 3 ทิศทาง สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างนาโนในงานวิจัยนี้ได้แก่ โครงสร้างควอนตัมดอต (Quantum Dots) ซึ่งจะทำให้อิสระในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเป็นศูนย์มิติ จึงทำให้พลังงานของอิเล็กตรอนถูกควอนไทน์ (Quantized Energy) อย่างสมบูรณ์แบบเช่นเดียวกับอะตอมเดี่ยว โครงสร้างควอนตัมดอตจึงเปรียบเสมือนอะตอมที่ทำเทียมขึ้น (Artificial Atoms) หากนำโครงสร้างควอนตัมดอตมาทำเป็นสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ทรานซิสเตอร์ การควบคุมการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในทรานซิสเตอร์ชนิดนี้จะมีจำนวนน้อยมาก จนสามารถกำหนดกลไกการทำงานของทรานซิสเตอร์ด้วยอิเล็กตรอนเพียงตัวเดียว (Single Electron Transistor : SET) ทำให้สิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดนี้กินกระแสไฟฟ้าน้อยมาก เมื่อการทำงานใช้อิเล็กตรอนน้อย การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเร็ว ส่งผลให้สมรรถนะการทำงานดีขึ้นโดยเฉพาะความเร็ว (High Speed Devices) สิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้โครงสร้างนาโนจึงเป็นที่ปรารถนาของงานด้านวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เพราะประหยัดพลังงาน และทำงานได้รวดเร็ว การใช้พลังงานที่น้อยลง ยังมีข้อเสียทำให้ไม่เกิดสภาพแวดล้อมเป็นพิษ เหมาะกับโลกในอนาคตที่ขาดแคลนพลังงาน และต้องการโลกที่สะอาดขึ้นในขณะเดียวกัน เราก็ต้องยอมรับเทคโนโลยีใหม่ ๆ ในสังคมข่าวสาร (Information Society) ที่ต้องการคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์สื่อสารความเร็วสูงเพื่อการเข้าถึงข้อมูลจำนวนมากอย่างรวดเร็ว เพื่อคุณภาพชีวิตที่

ดีขึ้น เช่น การติดต่อสื่อสารด้วย ภาพ เสียง และข้อมูลต่าง ๆ เพื่อลดการเดินทาง เพื่อแก้ปัญหาพื้นฐานต่าง ๆ เช่น การพยากรณ์อากาศ อุทกภัย การสาธารณสุข การพาณิชย์ ฯลฯ อิเล็กทรอนิกส์ในระดับนาโน (Nanoelectronics) จึงกลายเป็นม้าใช้ (Working Horse) ที่สำคัญสำหรับเทคโนโลยีในยุคหน้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน นอกจากจะการใช้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (Electron Transport) แล้ว ยังอาศัยแสงหรือโฟตอน (Photon) มากขึ้นด้วย เช่น การใช้แสงเลเซอร์ติดต่อสื่อสารในระบบเส้นใยแสง (Optical Fibre Communication) ซึ่งมีจุดเด่นหลายอย่าง เพราะการใช้อิเล็กตรอนซึ่งเป็นอนุภาคที่มีประจุนั้นจะเกิดการเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าได้ ทำให้เกิดการรบกวนสัญญาณได้ แต่แสงหรือโฟตอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ จึงไม่เกิดสัญญาณรบกวน ทำให้การติดต่อสื่อสารด้วยแสงมีความชัดเจน นอกจากนี้แสงยังมีความเร็วสูงสามารถทำงานที่ความถี่สูง ๆ ได้ดี จึงมีช่องสัญญาณจำนวนมหาศาล ดังนั้นการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสงที่มีขนาดเล็กจิ๋วในระดับนาโน หรือนาโนโฟโตนิกส์ (Nanophotonics) จึงเป็นเป้าหมายในการวิจัยของโครงการนี้ด้วย เช่น การพัฒนาเลเซอร์สารกึ่งตัวนำที่ใช้โครงสร้างควอนตัมดอท การพัฒนาตัวตรวจจับแสง และเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้โครงสร้างควอนตัมดอทเป็นองค์ประกอบในการดูดกลืนแสงที่มีพลังงานโฟตอนที่มีค่าจำเพาะเป็นต้น

การวิจัยในช่วงปี 2547-2550 เป็นการพัฒนาเทคนิคการปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุลแบบปลูกกลบด้วยชั้นบางและปลูกซ้ำ (Thin-capping-and-regrowth) เพื่อสร้างควอนตัมดอทโมเลกุล (Quantum Dot Molecules) ขั้นตอนเริ่มต้นได้แก่ การปลูกควอนตัมดอทด้วยเทคนิคมาตรฐานแบบ Stranki-Krastanov (S-K) แล้วจึงปลูกกลบควอนตัมดอทด้วยชั้นกลบบาง ๆ เพื่อให้ควอนตัมดอทคลายตัวและยืดออกจนเกิดหลุมตรงบริเวณกลางเมื่อมีการปลูกซ้ำ ควอนตัมดอทใหม่จะเกิดขึ้นบริเวณหลุมก่อน และเริ่มมีควอนตัมดอทอีกจำนวนหนึ่งเกิดขึ้นรอบ ๆ ควอนตัมดอทแรกด้วยรูปแบบที่ควบคุมรูปได้ถึงตามเงื่อนไขต่าง ๆ ทำให้เกิดควอนตัมดอทโมเลกุลแบบต่าง ๆ เช่น ควอนตัมดอทคู่ ควอนตัมดอทสี่ดอท จนถึงควอนตัม 10-20 ดอทในแต่ละควอนตัมดอทโมเลกุล ส่งผลให้ได้ควอนตัมดอทความหนาแน่นสูง เพื่อการประยุกต์ในโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ได้ การวิจัยในช่วงดังกล่าวยังมีการศึกษาวิธีการปลูกควอนตัมดอทแบบเรียงตัวเป็นแนวตรง โดยอาศัยการยึดโครงสร้างควอนตัมดอทให้เป็นแม่แบบในแนวผลึก $[1\bar{1}0]$ แล้วจึงปลูกควอนตัมดอทเป็นแนวตรง ซึ่งมีศักยภาพในการประยุกต์ด้วยนาโนอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้การออกแบบขั้วโลหะที่เชื่อมต่อกับควอนตัมดอทกระทำได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเทคนิคการปลูกควอนตัมดอทบนฐานผลึกที่มีโครงข่ายตัดขวาง (Cross Hatched Substrates) ทำให้เกิดควอนตัมดอทที่เรียงตัวเป็นแนวตรงที่ตัดขวางกันเป็นมุมฉากในแนวผลึก $[110]$ และ $[1\bar{1}0]$ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่จำเป็นในการออกแบบวงจรนาโนอิเล็กทรอนิกส์

ส่วนการวิจัยในช่วงปี 2550-2553 นี้จะเป็นการศึกษาโครงสร้างควอนตัมดอทแบบต่าง ๆ ด้วยเทคนิค S-K อย่างต่อเนื่อง เช่น ควอนตัมดอทคู่แบบลูกโซ่ (Bi-quantum dot chains) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีประโยชน์ในเชิงประยุกต์เป็น Electron Waveguides and Switches งานวิจัยส่วนนี้ได้ยื่นจดสิทธิบัตรในต้นปี 2552 จุดเด่นใหม่ของการวิจัยในช่วงนี้ ได้แก่ การพัฒนาเทคนิคการปลูกโครงสร้างระดับนาโนแบบหยด

(Droplet Epitaxy) ซึ่งใช้อุณหภูมิปลูกที่ต่ำกว่าเทคนิคแบบ S-K นอกจากนี้ยังสามารถสร้างโครงสร้างควอนตัมวงแหวน (Quantum rings) และควอนตัมดอตแบบวงแหวน (Quantum dot rings) ได้ด้วย ควอนตัมวงแหวนเกิดขึ้นจากการเกิดผลึกบริเวณขอบของหยด (Droplets) เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอะตอมธาตุกลุ่มที่ 3 จากกึ่งกลางหยดเพื่อก่อตัวเป็นผลึกของธาตุกลุ่มที่ 5 ที่บริเวณขอบวงแหวนของโครงสร้างเกิดเป็นหลุมที่มีขนาดนาโน (Nanoholes) แนวคิดบุกเบิกหนึ่งได้แก่การควบคุมให้หลุมมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square like nanoholes) ซึ่งสามารถใช้งานเป็นแม่แบบสำหรับการปลูกควอนตัมดอตแบบสี่ดอต (Quad Quantum Dots; QQDs) ซึ่งมีศักยภาพในงานด้านควอนตัมเซลล์สุริยะได้อีก (Quantum Cellular Automata; QCA) และอาจใช้เป็นควอนตัมบิต (Quantum Bits) เพื่อการออกแบบเป็นวงจรตรรก และหน่วยความจำในคอมพิวเตอร์แบบใหม่ได้ กระบวนการเตรียมควอนตัมดอตสี่ดอตดังกล่าวเป็นเทคนิคใหม่ จึงได้ยื่นจดสิทธิบัตรไว้ในปลายปี 2551

งานวิจัยส่วนใหญ่ใช้สารประกอบกึ่งตัวนำชนิดอินเดียมอาเซนไนด์ (InAs) เพื่อทำโครงสร้างระดับนาโน โดยปลูกบนฐานผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) ด้วยอาศัยกลไกการปลดปล่อยแรงเครียด (Strain Relaxation) ของโครงข่ายผลึกที่มีขนาดแตกต่างกัน 7 % ในงานวิจัยช่วงปี 2550-2553 นี้ยังมีการเปลี่ยนมาใช้สารประกอบกึ่งตัวนำชนิดอินเดียมฟอสไฟด์ (InP) มาทำโครงสร้างระดับนาโนด้วย ด้วยคุณสมบัติของวัสดุที่แตกต่างไปของอินเดียมฟอสไฟด์ ทำให้สามารถปลูกโครงสร้างควอนตัมดอตวงแหวนได้ด้วย มีการศึกษารายละเอียดของการควบคุมจำนวนควอนตัมดอตต่อวงแหวนให้มีค่าตามต้องการ เช่น ควอนตัมดอตวงแหวนที่มีจำนวน 8 ดอต (Octa Quantum Dots; QQDs) ซึ่งสามารถใช้งานแบบ Extended Quantum Cellular Automata (EQCA) ทำให้ควอนตัมบิตที่ใช้ควอนตัมวงแหวนที่มีจำนวน 8 ดอตทำงานด้วยตรรกะแบบ “1” “0” และ “1/2” ได้ด้วย

งานวิจัยในช่วงปี 2550-2553 นี้ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์รุ่นที่ 3 (Third Generation Solar Cells) ที่ใช้โครงสร้างระดับนาโนเป็นองค์ประกอบหลัก ได้แก่ การใช้ควอนตัมดอตหนาแน่นสูงที่ปลูกซ้อนหลาย ๆ ชั้น (Multi-Stack High Density Quantum Dot Molecules) เป็นชั้นดูดกลืนแสงจากดวงอาทิตย์ โครงสร้างระดับนาโนเหล่านี้มีจุดเด่นหลายประการ เพราะขนาดที่เล็กจึ่วคล้ายอะตอมเสมือนจะมีระดับพลังงานแบบควอนไทน์ ทำให้ความหนาแน่นของสถานะ (Density of States) มีค่าเฉพาะที่สูงมาก การดูดกลืนแสงจึงมีประสิทธิภาพดี โดยเฉพาะแสงความยาวคลื่นยาวในสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ (Solar Spectrum) งานวิจัยเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดควอนตัมดอตโมเลกุล (Quantum Dot Molecule Solar Cells) นี้เป็นงานที่มีเอกลักษณ์ และอาจนำไปเป็นต้นแบบในงานด้านวิศวกรรมศาสตร์ได้ แต่ยังมีปัญหาในด้านเทคนิคอีกหลายอย่างที่ต้งพัฒนา เช่น การสร้างโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีหัวต่อพีเอ็นที่มีคุณภาพสำหรับการใช้งานจริง โดยเฉพาะกับแสงความเข้มสูง

ในปี 2550 คณะวิจัยได้รับการสนับสนุนจากศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ เพื่อทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางความเป็นเลิศด้านนาโนอิเล็กทรอนิกส์ (Center of Excellence on Nanoelectronics) จึงได้รับงบประมาณ

สนับสนุนเพื่อจัดซื้อเครื่องมือปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุลชุดใหม่มูลค่า 20 ล้านบาท เพื่อเชื่อมต่อกับเครื่องมือชุดเดิมมูลค่า 25 ล้านบาทที่ติดตั้งใช้งานมาตั้งแต่ปี 2536 เครื่องมือวิจัยชุดใหม่นี้ใช้งบประมาณสมทบจากแหล่งทุนวิจัย 3 แหล่งได้แก่ ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ 6 ล้านบาท สำนักงานวิจัยและพัฒนาอวกาศแห่งเอเชียของกองทัพอากาศสหรัฐอเมริกา 2.2 ล้านบาท และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 12 ล้านบาท การติดตั้งอุปกรณ์ใหม่ดังกล่าวเริ่มต้นในปี 2552 ต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน หากแล้วเสร็จจะทำให้งานวิจัยมีความคืบหน้าอย่างก้าวกระโดดได้

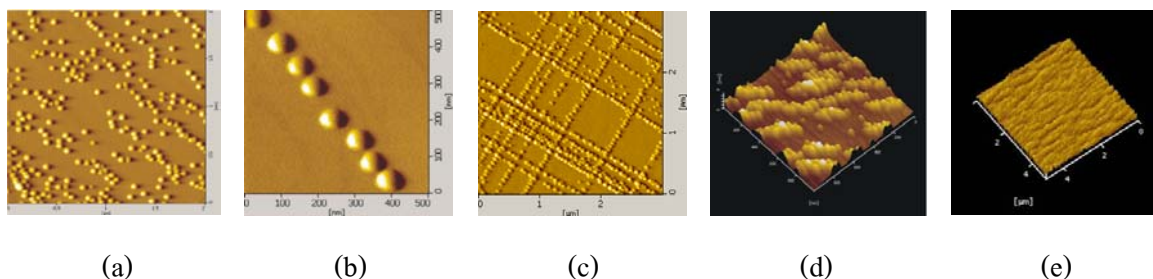
งานวิจัยในช่วง 2550-2553 นี้มีความร่วมมือกับสถาบันวิจัยในต่างประเทศหลายแห่งเช่น มหาวิทยาลัยโตเกียว (University of Tokyo) มหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนียที่ซานดิเอโก (UC San Diego) สถาบันวิจัยแมกซ์พลังค์ (Max Planck Institute) และสถาบันวิจัยแห่งชาติฝรั่งเศส (CNRS-LAAS) ที่เมืองตูลูส ทั้งในระดับนักวิจัย และนิสิตระดับปริญญาเอกที่ได้รับทุนคปก.ของสกว. และทุน AUN/SEED-Net สำหรับนิสิตชาวต่างประเทศ ผลผลิตจากโครงการวิจัยจึงมีทั้งการตีพิมพ์บทความวิจัย การจดสิทธิบัตรของผลงานวิจัย และการผลิตบัณฑิตทั้งระดับปริญญาและปริญญาเอกด้วย

ในรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์นี้จะมีรายละเอียดต่าง ๆ ของผลผลิตฯ ที่เป็นบทความวิจัยที่ตีพิมพ์และบทความที่นำเสนอในการประชุมวิชาการทั้งในและต่างประเทศแนบท้ายด้วย

2. เทคนิคการปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุลแบบหยด (Droplet Epitaxy)

ในช่วงการวิจัยปี 2547-2550 เทคนิคการปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุลเพื่อเตรียมโครงสร้างนาโนแบบจัดเรียงตัวเอง โดยใช้สารกึ่งตัวนำ InAs/GaAs เป็นแบบ S-K (Stranski-Krastanov) ซึ่งอาศัยกลไกการปลดปล่อยแรงเครียดของผลึกที่มีขนาดโครงข่ายผลึกที่แตกต่างกัน ประมาณ 7 % ทำให้สารกึ่งตัวนำ InAs ที่ปลูกบน GaAs มีรูปลักษณะเป็นควอนตัมดอต ซึ่งมีคุณภาพผลึกที่สมบูรณ์แบบ ไม่มีข้อบกพร่องในโครงสร้าง แต่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบควอนตัมดอตนี้จึงมีพลังงานแบบควอนไต์ เช่นเดียวกับอะตอม พลังงานของอิเล็กตรอนจึงกระจายตัวแบบกระโดด (Discrete Energy) และมีความหนาแน่นของสถานะ (State Density) เป็นแบบเดลต้าฟังก์ชัน (δ -Function) การเกิดควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเองเป็นกลไกธรรมชาติ ดังนั้นควอนตัมดอตจึงเกิดในตำแหน่งที่ไม่แน่นอน (Random) ซึ่งอาจมีปัญหาในด้านประยุกต์ทางนาโนอิเล็กทรอนิกส์ เพราะความเป็นระเบียบของควอนตัมดอตเป็นสิ่งจำเป็นในการส่งและรับสัญญาณจากภายนอก ในการวิจัยและพัฒนาเทคนิคการปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุลแบบปลูกกลบด้วยชั้นผลึกบาง ๆ และปลูกซ้ำ (Thin-Capping-and-Regrowth) ทำให้สามารถปลูกควอนตัมดอตที่เรียงตัวเป็นระเบียบในแนวตรง (Linearly Aligned QDs) และแนวดัดตั้งฉากกัน (Cross-Hatched QDs) ซึ่งเป็นผลงานวิจัยที่เกิดขึ้นในช่วงปี 2547-2550 นอกจากนั้นการเพิ่มจำนวนรอบการปลูกกลบและปลูกซ้ำ ทำให้เกิดควอนตัมดอตโมเลกุล (Quantum Dot Molecules) ที่เป็นกลุ่มก้อนของควอนตัมดอตที่เกิดติด ๆ กัน ในระนาบผลึกในแนวนอน (Laterally Close-Packed QDs) และควอนตัมดอตโมเลกุลที่

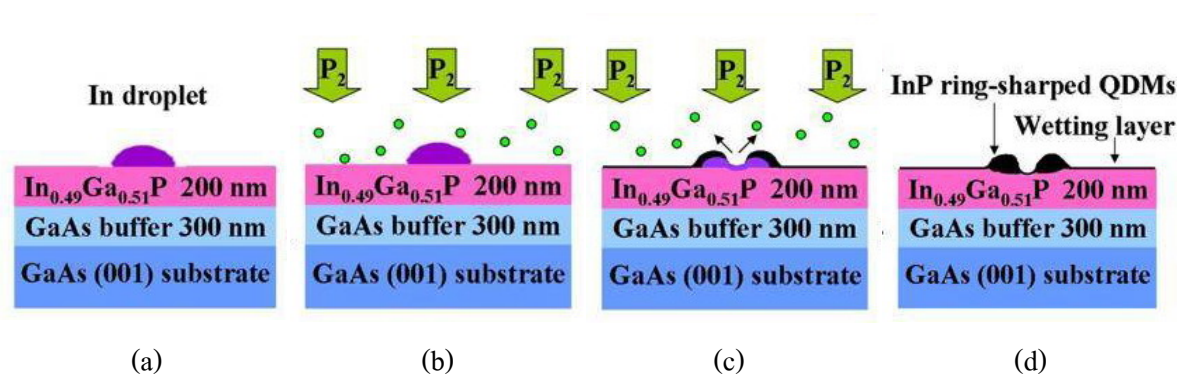
มีความหนาแน่นสูง (High Density Quantum Dot Molecules) รูปที่ 1 เป็นตัวอย่างของโครงสร้างควอนตัมดอต และควอนตัมดอตโมเลกุลแบบต่าง ๆ ที่เป็นผลงานวิจัยในช่วงปี 2547-2550



รูปที่ 1 โครงสร้างควอนตัมดอตและควอนตัมดอตโมเลกุลแบบต่าง ๆ ที่ปลูกด้วยเทคนิค S-K

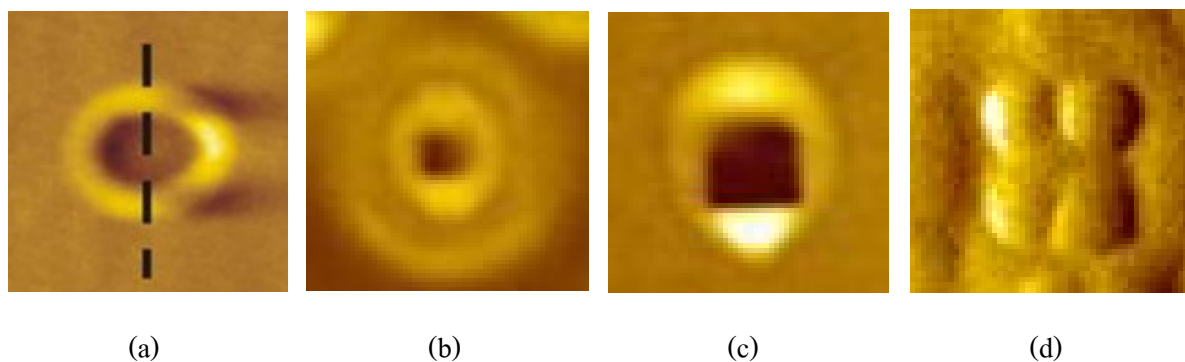
ในการวิจัยในช่วงปี 2550-2553 นี้ นอกจากการปลูกผลึกสารกึ่งตัวนำโครงสร้างระดับนาโนด้วยเทคนิค S-K แล้ว คณะวิจัยได้พัฒนาเทคนิคการปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุลแบบหยด (Droplet Epitaxy) เพื่อการเตรียมโครงสร้างนาโนแบบอื่น ๆ เช่น ควอนตัมวงแหวน ควอนตัมดอตแบบวงแหวน และหลุมนาโนแบบสี่เหลี่ยมเพื่อใช้เป็นแม่แบบสำหรับการปลูกควอนตัมดอตสี่ดอต เพื่อการประยุกต์ในด้านควอนตัมเซลล์ออโตมาตา (Quantum Cellular Automata)

การปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุลแบบหยด (Droplet Epitaxy) เริ่มต้นจากการเปิดลำโมเลกุลของธาตุกลุ่มที่ 3 (Group III Element) ได้แก่ อินเดียม (Indium : In) หรือแกลเลียม (Gallium : Ga) ลงบนฐานผลึก GaAs ที่อุณหภูมิประมาณ 250 °C จะเกิดหยดของอินเดียมที่มีขนาดนาโนเมตรกระจายตัวอยู่บนพื้นผิวผลึก จากนั้นจึงเปิดลำโมเลกุลของธาตุกลุ่มที่ 5 (Group V Element) ได้แก่ อาร์เซนิก (Arsenic : As) หรือฟอสฟอรัส (Phosphorous : P) จะเกิดผลึกสารกึ่งตัวนำ III-V ขึ้นที่ขอบของหยด ทำให้เกิดโครงสร้างวงแหวนระดับนาโนขึ้น กลไกการเกิดควอนตัมวงแหวนมีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขั้นตอนการเกิดควอนตัมวงแหวนโดยใช้เทคนิคการปลูกแบบหยด (Droplet Epitaxy)

การควบคุมเงื่อนไขการปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุลแบบหยด ได้แก่ อุณหภูมิทั้งขั้นตอนการหยด (Droplet) และการก่อตัวเป็นผลึก (Crystallization) ปริมาณของหยดในระดับโมโนเลเยอร์ (Mono Layer : ML) อัตราการปลูก (Deposition Rate) ความดันของธาตุกลุ่ม V ตลอดจนชนิดของธาตุกลุ่มที่ III และ V จะทำให้เกิดสารกึ่งตัวนำโครงสร้างนาโนแบบวงแหวนรูปลักษณะต่าง ๆ ได้ ดังตัวอย่างในรูปที่ 3 ได้แก่ ควอนตัมวงแหวนแบบเดี่ยว แบบคู่ ควอนตัมคอตวงแหวน และหลุมนาโนที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยม ที่ใช้เป็นแม่แบบในการปลูกควอนตัมดอทสี่คอต



รูปที่ 3 สารกึ่งตัวนำโครงสร้างนาโนแบบวงแหวนชนิดต่าง ๆ ที่ปลูกโดยเทคนิค Droplet Epitaxy และใช้เป็นแม่แบบในการปลูกควอนตัมดอทสี่คอต

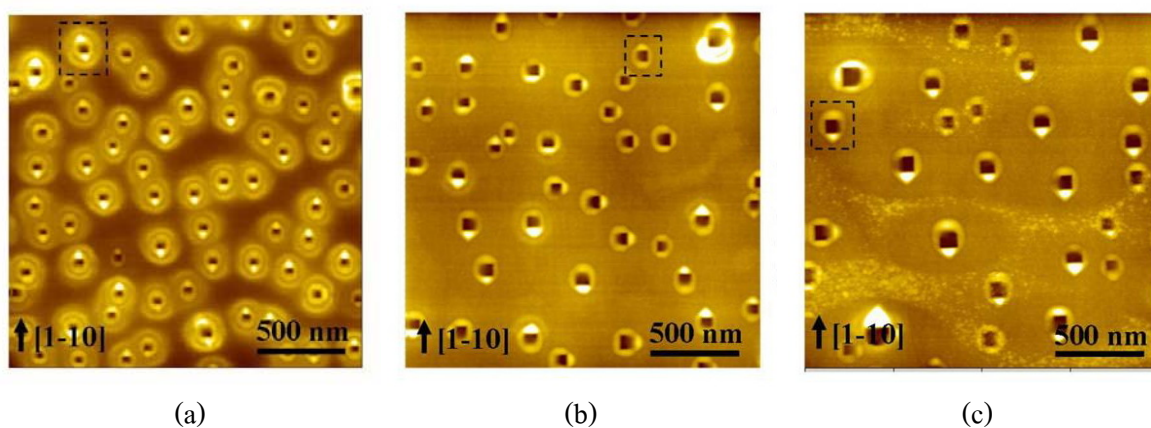
จุดเด่นของเทคนิคการปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุลแบบหยดนี้ ได้แก่ การเตรียมโครงสร้างระดับนาโนที่อุณหภูมิต่ำกว่าแบบ S-K เพราะใช้อุณหภูมิในการหยดเพียง 100-250 °C และใช้อุณหภูมิในการก่อตัวของผลึกที่ 200-300 °C ในขณะที่เทคนิค S-K จะใช้อุณหภูมิสูงกว่าในช่วง 450-600 °C นอกจากนี้เทคนิคแบบหยดยังเป็นกลไกการเกิดเนื้อผลึกที่บริเวณขอบของหยด ทำให้ได้โครงสร้างวงแหวนแบบต่าง ๆ ได้ การเคลื่อนที่ของเนื้อสารจากกึ่งกลางหยดไปสู่ขอบวงแหวนยังทำให้เกิดหลุมนาโน (Nanoholes) ที่มีรูปลักษณะแบบกลมและเหลี่ยมได้ด้วย ดังมีรายละเอียดในตอนต่อไป

3. โครงสร้างระดับนาโนเมตรแบบต่าง ๆ ที่พัฒนาจากเทคนิคการปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุลแบบหยด

โครงสร้างระดับนาโนเมตรที่ได้จากเทคนิคการปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุลแบบหยด ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนหลัก ๆ 2 ขั้นตอน คือ ขั้นแรกเป็นการเปิดแหล่งกำเนิดลำโมเลกุลของธาตุกลุ่ม III (Ga หรือ In) เพื่อสร้างหยดที่มีลักษณะเป็นครึ่งทรงกลม (Hemisphere) หรือจานกลม (Disk) ตามปริมาณของสารซึ่งอยู่ในหน่วยของโมโนเลเยอร์ ความหนาแน่นของหยดจะอยู่ในหน่วยของ 10^8 cm^{-2} ขั้นที่สองเป็นการปิด

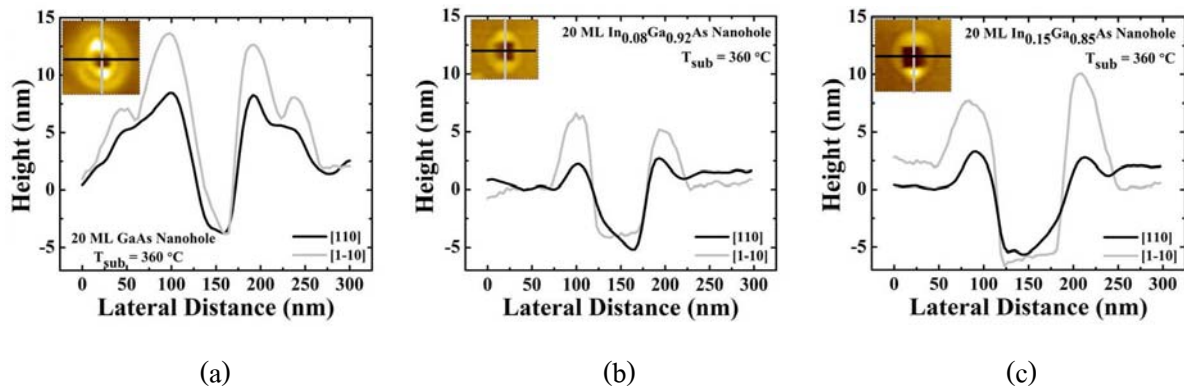
แหล่งกำเนิดลำโมเลกุลของธาตุกลุ่ม III และเปิดแหล่งกำเนิดลำโมเลกุลของธาตุกลุ่ม V (As หรือ P) เพื่อให้เกิดการก่อตัวของผลึก ทำให้ได้โครงสร้างระดับนาโนเมตรแบบต่างๆ โดยเฉพาะควอนตัมวงแหวน เพราะการเริ่มต้นก่อตัวเป็นผลึกของหยดจะเกิดขึ้นบริเวณขอบก่อนเนื้อธาตุกลุ่ม III บริเวณกึ่งกลางจะเคลื่อนที่มายังบริเวณของวงแหวน ทำให้เกิดหลุมตรงกลางของโครงสร้าง หลุมนาโน (Nanoholes) อาจมีลักษณะกลม รี หรือ เหลี่ยม แล้วแต่ชนิดของธาตุกลุ่ม III-V ที่ใช้ ซึ่งอาจให้กลไกการเคลื่อนที่ของธาตุกลุ่ม III ภายในหยดแบบไม่สมมาตร (Anisotropy) ส่งผลให้รูปลักษณ์ของหลุมเป็นวงรีหรือเหลี่ยมได้

ในกรณีของหยดของ Ga ควอนตัมวงแหวนชนิด GaAs จะลักษณะเป็นวงแหวนคู่ที่มีจุดศูนย์กลางเดียวกัน (Concentric Double Rings) และจะเปลี่ยนไปเป็นวงแหวนเดี่ยวเมื่อใช้หยดที่มีส่วนผสมของ InGa เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณส่วนผสมของ In มีมากขึ้นจาก 0 เป็น 8 % และ 15 % หลุมนาโนจะเริ่มมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม ตามที่แสดงในรูปที่ 4



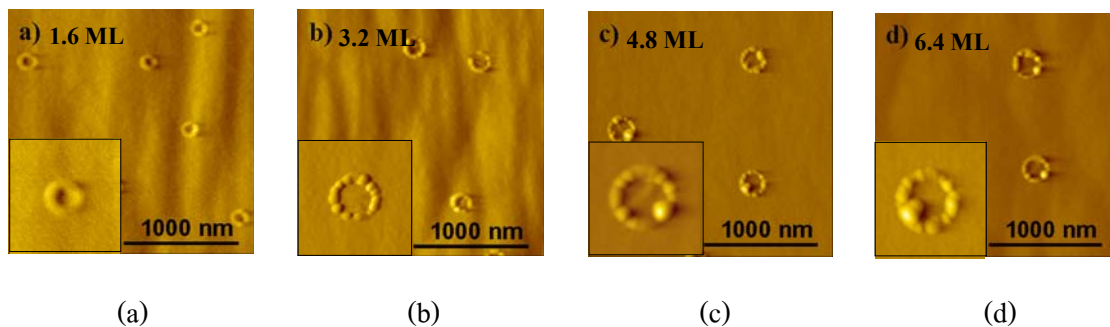
รูปที่ 4 โครงสร้างระดับนาโนแบบวงแหวนจะเปลี่ยนจากวงแหวนคู่เป็นวงแหวนเดี่ยว และเปลี่ยนจากหลุมกลมเป็นหลุมสี่เหลี่ยม เมื่อส่วนผสมของหยดมีปริมาณธาตุ In เพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 8 % และ 15 %

เมื่อศึกษาภาพตัดขวาง (Profiles) ของหลุมนาโนในรูปที่ 4 ทั้งในแนวผลึก $[110]$ และ $[1\bar{1}0]$ จะพบว่าควอนตัมวงแหวนคู่มีรูปร่างเป็นตัว V แต่กรณีของวงแหวนเดี่ยวที่มีหลุมสี่เหลี่ยมจะเริ่มมีรูปร่างเป็นตัว U และมีความลึกของหลุมที่ชัดเจนขึ้น โดยเฉพาะในแนวผลึก $[1\bar{1}0]$ ที่มุมสี่เหลี่ยมของหลุมนาโนจะเป็นจุดที่มีความเครียด (Strain) สูงสุด และจากผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปของหลุมนาโนเมื่อส่วนผสมของ In มีค่าสูงขึ้นจนกลายเป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมเนื่องจาก ความเครียดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างมีลักษณะเป็นแบบไม่สมมาตร (Anisotropic Strain) ส่งผลให้ขอบของวงแหวนมีความสูงไม่เท่ากันดังแสดงในรูปที่ 5



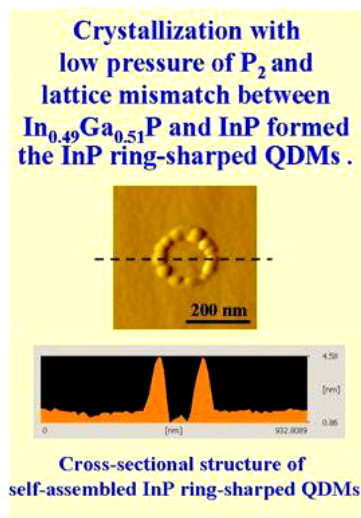
รูปที่ 5 ภาพตัดขวางของหลุมนาโนในแนวผลึก $[110]$ และ $[1\bar{1}0]$ เมื่อส่วนผสมของ In มีค่าเพิ่มจาก 0 % เป็น 8 % และ 15 % ตามลำดับ

เทคนิคการปลูกโครงสร้างระดับนาโนเมตรด้วยวิธี Droplet Epitaxy นั้น เมื่อใช้กับกรณีของ InP ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีค่าแถบพลังงานต่ำกว่า InAs และ InGaAs จะมีความแตกต่างกันในรูปร่างของวงแหวนที่ได้ กล่าวคือ วงแหวนจะมีลักษณะรูปร่างเป็นวงกลม (Circular Shape) มีความเป็นสมมาตรทั้ง 2 แกนผลึก $[110]$ และ $[1\bar{1}0]$ ในการเตรียมโครงสร้างวงแหวนของ InP ด้วยอัตราการปลูกที่เท่ากัน คือ 1.6 ML/sec เมื่อปริมาณของสารมีค่าน้อย (1.6 ML) ควอนตัมวงแหวนจะเกิดขึ้น ต่อเมื่อมีการเพิ่มปริมาณสารเป็น 3.2; 4.8 และ 6.4 ML วงแหวนจะมีขนาดโตขึ้น และมีความคมชัดเกิดขึ้นบริเวณวงแหวน ทำให้เกิดโครงสร้างควอนตัมดอตวงแหวน (QD-Rings) ซึ่งมีจำนวนดอตเพิ่มขึ้นในแต่ละวงแหวนเพิ่มขึ้นตามปริมาณสาร ดังแสดงในรูปที่ 6



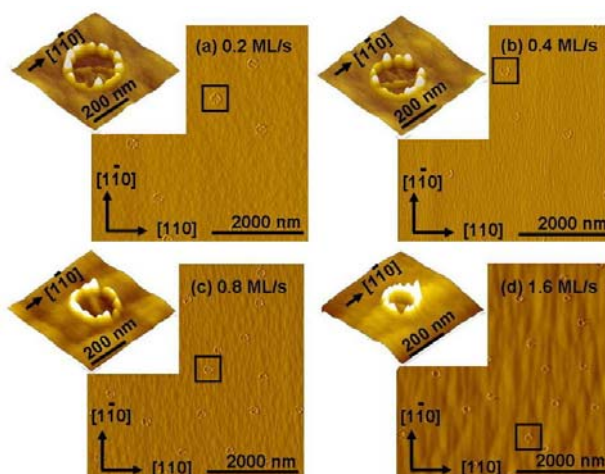
รูปที่ 6 โครงสร้างระดับนาโนเมตรที่เตรียมจากสาร InP ที่มีลักษณะรูปร่างเป็นควอนตัมวงแหวน และควอนตัมดอตวงแหวน ตามปริมาณสารที่เพิ่มขึ้นจาก 1.6 ML เป็น 3.2 , 4.8 และ 6.4 ML ตามลำดับ

ควอนตัมดอทวงแหวนเป็นโครงสร้างระดับนาโนเมตรที่น่าสนใจในเชิงประยุกต์ เพราะนอกจากจะมีศักยภาพในด้านแม่เหล็ก และการใช้งานด้านกระแสคงกระพัน (Persistent Current) เพื่อเป็นหน่วยความจำแล้ว การเกิดควอนตัมดอทวงแหวนนั้นอาศัยความแตกต่างของโครงข่ายผลึกระหว่าง InGaP (สัดส่วนของ In : Ga มีค่า 41 : 59) และ InP ทำได้ควอนตัมดอทที่มีขนาดเท่า ๆ กันในแนวผลึกหนึ่ง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 7



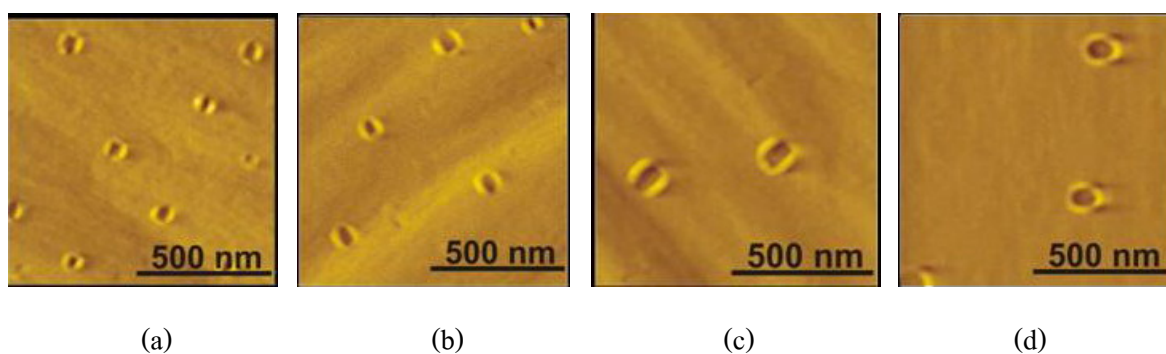
รูปที่ 7 โครงสร้างควอนตัมดอทวงแหวนที่เกิดจากความแตกต่างของโครงข่ายผลึกระหว่าง InGaP และ InP โดยมีดอทที่มีขนาดเท่า ๆ กันในแนวผลึกหนึ่ง ๆ

โครงสร้างควอนตัมดอทวงแหวนที่มีการกำหนดให้มีปริมาณสาร In คงที่ที่ 3.2 ML แต่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการเพิ่มปริมาณสาร In จาก 0.2 ML/sec เป็น 0.4, 0.8 และ 1.6 ML/sec จะสามารถลดขนาดของวงแหวนในขณะที่ดอทวงแหวนมีขนาดโตขึ้นดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 โครงสร้างควอนตัมดอทวงแหวนชนิด InP ที่ใช้อัตราการเพิ่มปริมาณสาร In จาก 0.2 ML/sec เป็น 0.4, 0.8 และ 1.6 ML/sec ตามลำดับ

ในส่วนของการสร้างควอนตัมวงแหวนที่ใช้ InGaAs ที่มีส่วนผสมของ In : Ga = 50 : 50 ที่ปลูกด้วยเทคนิค Droplet Epitaxy จะไม่เกิดควอนตัมดอทบนวงแหวน หากใช้อุณหภูมิในการปลูกที่ต่ำ ๆ 120 °C ควอนตัมวงแหวนจะมีขนาดเล็กแต่มีความหนาแน่นต่อพื้นที่สูง เนื่องจากขนาดของหยด In มีขนาดเล็ก เมื่ออุณหภูมิปลูกเพิ่มสูงขึ้นเป็น 150, 180 และ 210 °C ขนาดของควอนตัมวงแหวนจะใหญ่ขึ้นแต่มีจำนวนความหนาแน่นน้อยลง และมีข้อสังเกตที่ขอบวงแหวนมีความสม่ำเสมอลดลง ทำให้มีหลุมนาโนเป็นวงรีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 9

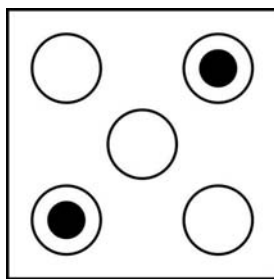


รูปที่ 9 โครงสร้างควอนตัมวงแหวนที่ทำจาก InGaAs (In : Ga = 50 : 50) ที่เตรียมด้วยอุณหภูมิที่ 120, 150, 180 และ 210 °C ตามลำดับ

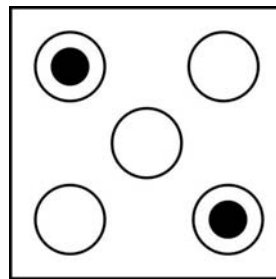
4. โครงสร้างระดับนาโนเมตรที่มีศักยภาพด้านควอนตัมคอมพิวเตอร์

โครงสร้างควอนตัมดอท 4 ดอทที่วางตำแหน่งเป็นรูป 4 เหลี่ยม จะสามารถแทนค่า “1” และ “0” ในระบบดิจิทัล เมื่ออิเล็กตรอน 2 ตัวถูกฉีดเข้าสู่โครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 10 (a-1, a-2) แนวคิดดังกล่าวเรียกว่า Quantum Cellular Automata (QCA) และเมื่อโครงสร้างควอนตัมดอท 4 ดอท จำนวนหนึ่งถูกนำมาเรียงต่อเป็นเส้นตรง ข้อมูล “1” หรือ “0” จะถูกส่งผ่านจากด้านหนึ่งไปสู่อีกด้านหนึ่งได้ โดยที่ไม่ใช้กระแสไฟฟ้า เพราะประจุไฟฟ้าหรืออิเล็กตรอนปรับค่าให้เป็น “1” หรือ “0” โดยแรงผลักของคูลอมบ์ (Coulomb Force) ข้อมูลดังกล่าวถูกส่งด้วยความเร็วสูง ตามโครงสร้าง QCA Wire ตามรูปที่ 10 (b)

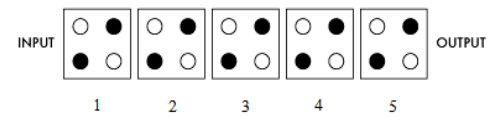
เมื่อโครงสร้างควอนตัมดอท 4 ดอทจำนวนหนึ่งถูกนำมาออกแบบเป็นรูปแบบต่าง ๆ จะทำให้สามารถทำงานเป็น QCA Logic gates / QCA Inverter / QCA Memory ดังแสดงในรูป 10 (c), (d) และ (e) ตามลำดับ โครงสร้างที่มีรูปแบบต่าง ๆ เหล่านี้จึงสามารถใช้เป็นองค์ประกอบของการคำนวณในคอมพิวเตอร์แบบใหม่ที่ทำงานด้วยความเร็วสูงและไม่กินกระแสไฟฟ้า



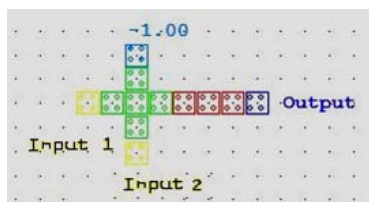
(a-1)



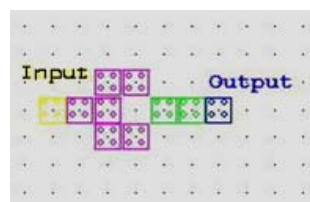
(a-2)



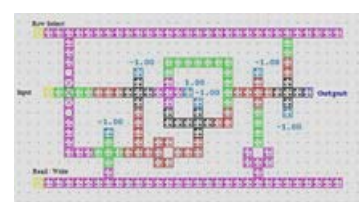
(b)



(c)



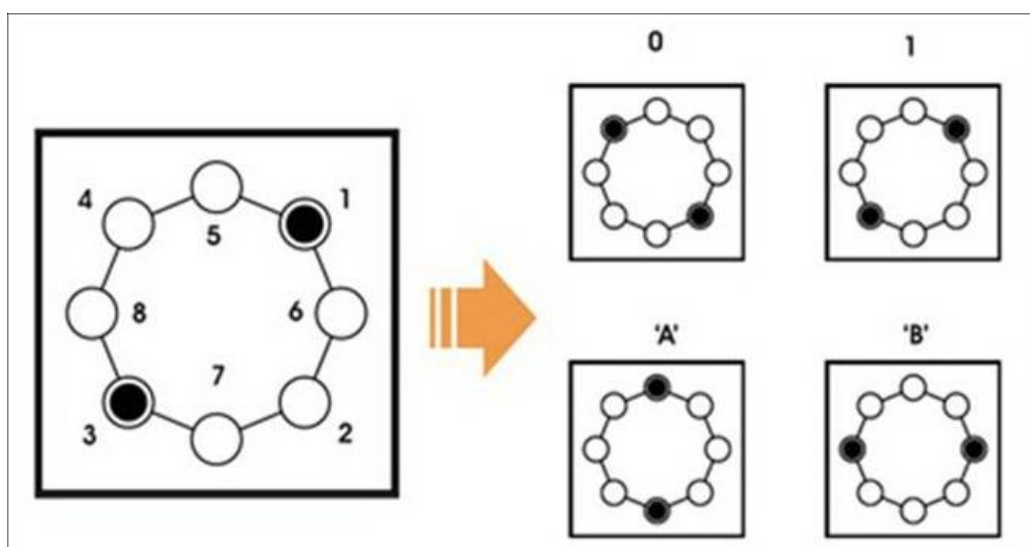
(d)



(e)

รูปที่ 10 โครงสร้างคอนดัคต 4 คอตที่มีศักยภาพในการทำงานแบบ Quantum Cellular Automata (QCA) ในรูปแบบต่าง ๆ ที่สามารถใช้งานเป็นคอมพิวเตอร์แบบใหม่

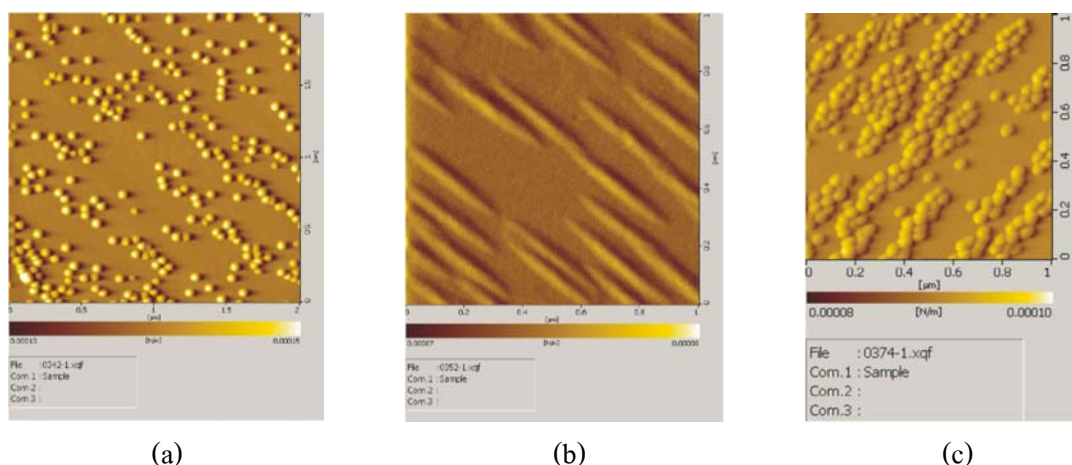
แนวคิดเดียวกันนี้สามารถนำไปใช้กับโครงสร้างคอนดัคตวงแหวนที่มีจำนวนคอต 8 คอต ซึ่งทำให้สามารถแทนตรรกะ “1”, “0” และ “1/2” ได้ ดังแสดงในรูปที่ 11 ซึ่งจะทำให้การคำนวณทางคอมพิวเตอร์ทำได้สลับซับซ้อนมากขึ้น จึงเป็นแนวคิดแบบ Extended Quantum Cellular Automata (EQCA)



รูปที่ 11 โครงสร้างคอนดัคตวงแหวนที่มีคอต 8 คอต เพื่อใช้งานแบบ Extended Quantum Cellular Automata (EQCA)

5. กระบวนการเตรียมโครงสร้างระดับนาโนเมตรที่มีคุณค่าเชิงพาณิชย์และยื่นจดสิทธิบัตร

โครงสร้างควอนตัมดอตแบบต่าง ๆ ทั้งที่เตรียมด้วยเทคนิค S-K และ Droplet Epitaxy ล้วนแล้วแต่มีศักยภาพในด้านประยุกต์ทาง Nanoelectronics และ Nanophotonics ทั้งสิ้น ในการศึกษาวิจัยโครงสร้างระดับนาโนเมตรด้วยลำโมเลกุลที่ผ่านมาในช่วงปี 2547-2550 และปี 2550-2553 คณะวิจัยได้พัฒนาเทคนิคการปลูกโครงสร้างเหล่านั้นด้วยขั้นตอนที่มีเอกลักษณ์ เช่น กระบวนการปลูกควอนตัมดอตและกลบด้วยชั้นบาง ๆ เพื่อสลายให้ควอนตัมดอตแยกออกเป็นแม่แบบที่ยาวขึ้นในทิศทางผลึก [1-10] ก่อนที่จะปลูกควอนตัมดอตซ้ำ เพื่อให้เป็นควอนตัมดอตโมเลกุลดังแสดงในรูปที่ 12 ขั้นตอนการปลูกดังกล่าวเรียกว่า Thin-Capping-and-Regrowth Process

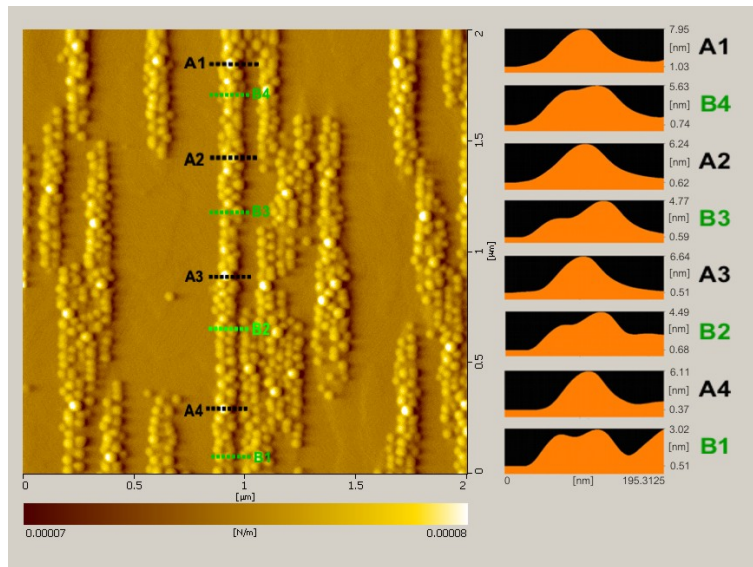


รูปที่ 12 ขั้นตอนการปลูกควอนตัมดอตโมเลกุลด้วยวิธี Thin-Capping-and-Regrowth Process

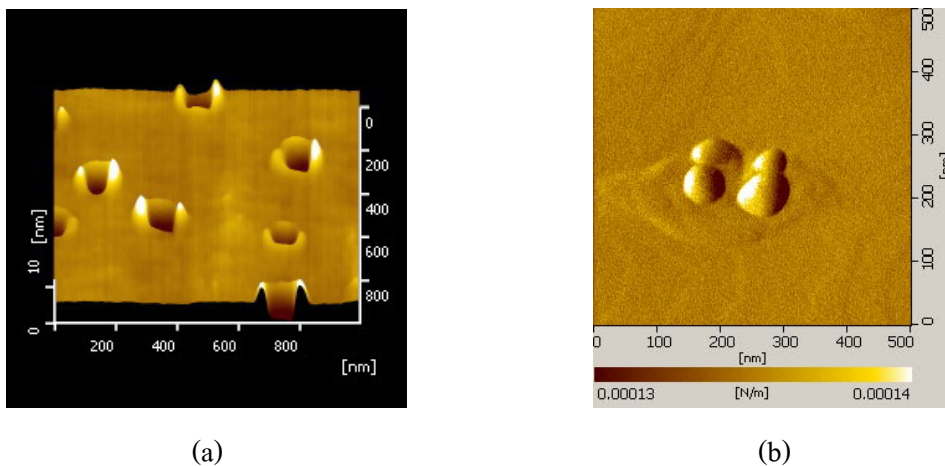
จากแนวคิดดังกล่าวข้างต้นได้นำไปสู่การคิดค้นกระบวนการปลูกโครงสร้างโซ่ควอนตัมดอตคู่ (Bi-Quantum Dot Chains) ดังแสดงในรูปที่ 13 โดยใช้เทคนิค Thin-Capping-and-Regrowth หลาย ๆ รอบ โซ่ควอนตัมดอตคู่นี้จะมีความยาวในระดับไมครอน ทำให้การประยุกต์ใช้งานในทางปฏิบัติง่ายขึ้น จึงมีประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ โซ่ควอนตัมดอตคู่นี้มีศักยภาพใช้เป็น Electron Waveguides และ Switches ได้ เนื้อหาของผลวิจัยดังกล่าวจึงถูกนำไปยื่นจดสิทธิบัตรไว้ในต้นปี 2552

แนวคิดดังกล่าวยังถูกนำมาใช้ในการเตรียมควอนตัมดอตโมเลกุลความหนาแน่นสูง (High Density Quantum Dot Molecules : HD-QDMs) เพื่อใช้ใน โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบใหม่ด้วย

ผลงานวิจัยด้วยเทคนิค Droplet Epitaxy ที่นำมาผสมผสานกับเทคนิค S-K โดยการเตรียมควอนตัมวงแหวนที่มีหลุมนาโนแบบสี่เหลี่ยมเพื่อเป็นแม่แบบในการปลูกควอนตัมดอต 4 ดอต ดังแสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 13 โซ่ควอนตัมคอตคู่ที่เตรียมด้วยเทคนิค Multi-Cycles Thin-Capping-and-Regrowth Process ที่ได้ขึ้นจลลธิธิธิธิ



รูปที่ 14 กลุ่มนาโนที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมซึ่งเตรียมด้วยเทคนิค Droplet Epitaxy และใช้เป็นแม่แบบสำหรับการปลูกควอนตัมคอต 4 คอต ด้วยเทคนิค S-K

ในการประยุกต์ด้าน Quantum Cellular Automata (QCA) ต้องอาศัยโครงสร้างควอนตัมคอต 4 คอตที่ต่อเนื่องเป็นแนวตรงดังแสดงในรูปที่ 15 หรือแนวตั้งฉากเพื่อการทำงานเป็น Logic Gates และหน่วยความจำทางคอมพิวเตอร์ ดังนั้นขั้นตอนการเตรียมโครงสร้างดังกล่าวจึงมีคุณค่าในเชิงพาณิชย์ และได้ขึ้นจลลธิธิธิธิในปลายปี 2551



รูปที่ 15 โครงสร้างควอนตัมคอต 4 คอตที่เรียงตัวกันเป็นแนวยาว

การยื่นจดสิทธิบัตรทั้งสองนั้นได้กระทำผ่านสำนักงานทรัพย์สินทางปัญญาแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยแจ้งให้ทั้งสำนักงานคณะกรรมการสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (ศูนย์นาโนเทค) รับทราบในรายละเอียดด้วย

เนื้อหาของสิทธิบัตรทั้งสองเน้นกระบวนการและขั้นตอนการเตรียมโครงสร้างโซ่ควอนตัมคอตคู่และควอนตัมคอต 4 คอต มากกว่าสิทธิบัตรของสิ่งประดิษฐ์ ซึ่งจะเป็นเป้าหมายถัดไปของงานวิจัยในทางวิศวกรรมศาสตร์ที่ยังต้องพัฒนาต่อ

ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์จึงเน้นการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่ที่ใช้โครงสร้างควอนตัมคอตโมเลกุลความหนาแน่นสูงแบบหลายชั้น ซึ่งยังมีปัญหาที่ต้องพัฒนาต่ออีกเช่นกัน ดังมีรายละเอียดในตอนที่ 8 ของรายงานฉบับนี้

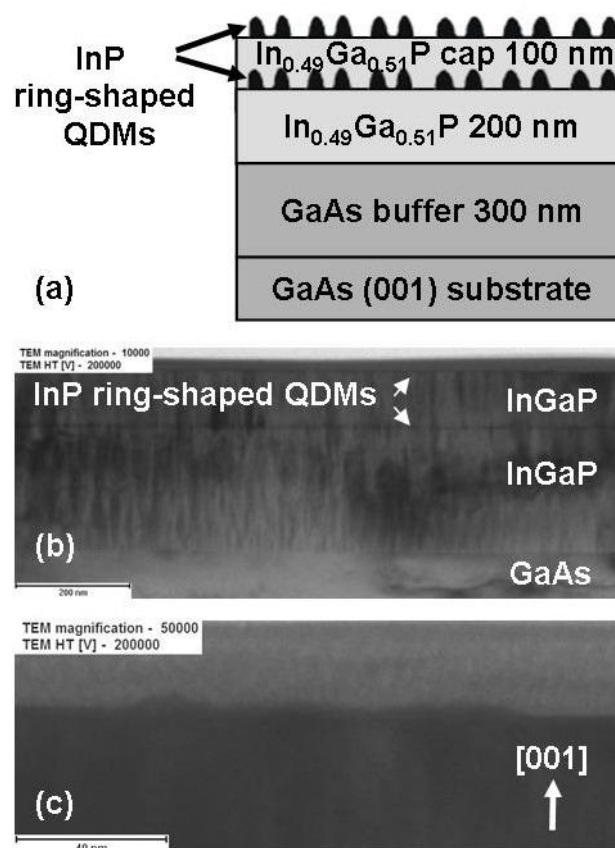
6. การวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของโครงสร้างควอนตัมคอตแบบต่าง ๆ

โครงสร้างควอนตัมคอตแบบต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากงานวิจัยจะผ่านขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง Atomic Force Microscopy (AFM) เพื่อดูรายละเอียดทั้งรูปร่าง ขนาด และภาพตัดขวางของพื้นผิวในระดับนาโนเมตร ดังรูปผลการทดลองที่แสดงผ่านมาในตอนต้น

การวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของโครงสร้างควอนตัมคอตนั้นจำเป็นต้องทดสอบแบบทำลายด้วยโดยใช้เครื่อง Tunneling Electron Microscopy (TEM) ตัวอย่างจะถูกนำไปจัดจนมีความบางมากเพื่อนำไปดูโครงสร้างในเชิงภาพตัดขวาง เพื่อศึกษารายละเอียดของโครงสร้างที่อยู่ได้ผิว ทำให้สามารถดูความหนา ความลึก ขนาด และปริมาณของควอนตัมคอตที่ฝังอยู่ภายในได้ ในขณะเดียวกัน ยังสามารถตรวจสอบจุดบกพร่อง (Defects) ต่าง ๆ ตลอดจน Dislocations ที่มักเกิดขึ้นในโครงข่ายผลึกเมื่อมีแรงเครียด

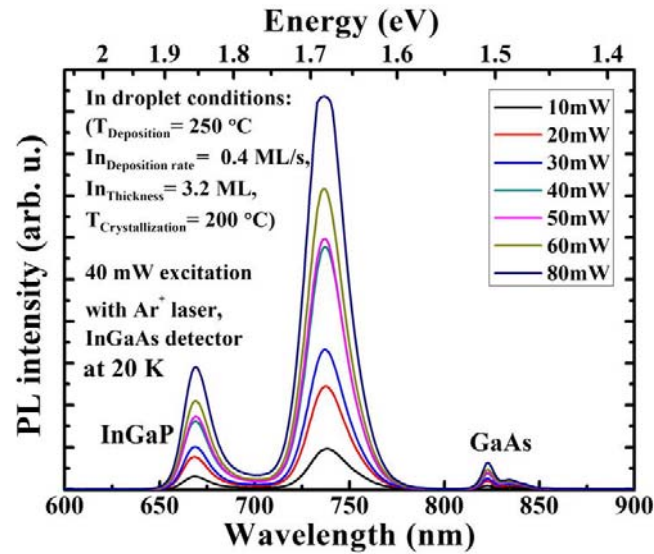
เนื่องจากโครงสร้างควอนตัมดอตต่าง ๆ จะนำไปใช้งานในด้านนาโนอิเล็กทรอนิกส์ และนาโนโฟโตนิกส์ ดังนั้นการวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานทางไฟฟ้า และทางแสงจึงมีความสำคัญและสามารถนำมาประเมินคุณภาพของโครงสร้างเหล่านั้นได้ ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงมีการตรวจวัดการเปล่งแสงจากโครงสร้างควอนตัมดอต เมื่อมีการกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์ การทดลองนี้เรียกว่า โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence; PL) ซึ่งอาจวัดที่อุณหภูมิห้องโดยใช้ฮีเลียมเหลว จนถึงอุณหภูมิห้องซึ่งเป็นอุณหภูมิใช้งานจริงของสิ่งประดิษฐ์หลาย ๆ ชนิด

รูปที่ 16 เป็นตัวอย่างของภาพที่วัดด้วยเครื่อง TEM ของโครงสร้างควอนตัมดอตวงแหวนที่ทำจาก InP ฝังอยู่ในชั้น InGaP ภาพตัดขวางที่ได้เป็นข้อมูลที่ยืนยันกระบวนการเตรียมโครงสร้างฯ และผลของคุณภาพผลึกที่ได้



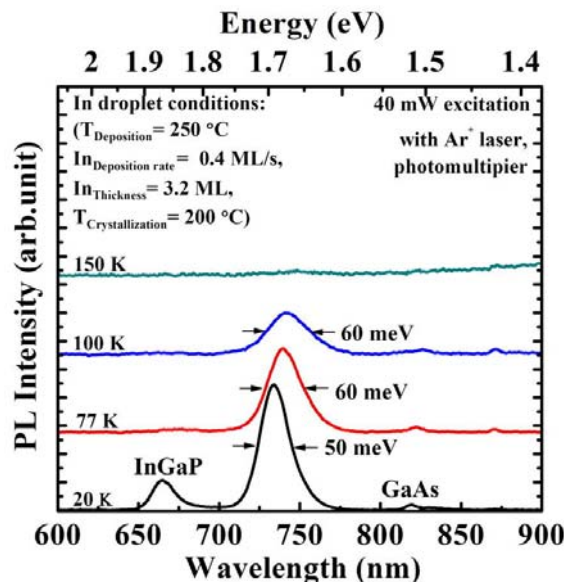
รูปที่ 16 ภาพ TEM ของโครงสร้างควอนตัมดอตวงแหวน

โครงสร้างดังกล่าวยังถูกนำไปตรวจสอบความสามารถในการเปล่งแสง โดยใช้เลเซอร์อาร์กอนซึ่งมีค่าความยาวคลื่นสั้น (สีเขียว) เป็นตัวกระตุ้น รูปที่ 17 เป็นผล PL ที่วัดได้จากโครงสร้างควอนตัมดอตวงแหวนที่ทำจาก InP ฝังอยู่ใน InGaP และปลูกบนฐานผลึก GaAs การทดลองนี้ทำที่อุณหภูมิห้อง 20 K และมีการเปลี่ยนค่าความเข้มแสงเลเซอร์ด้วย (10-80 mW)



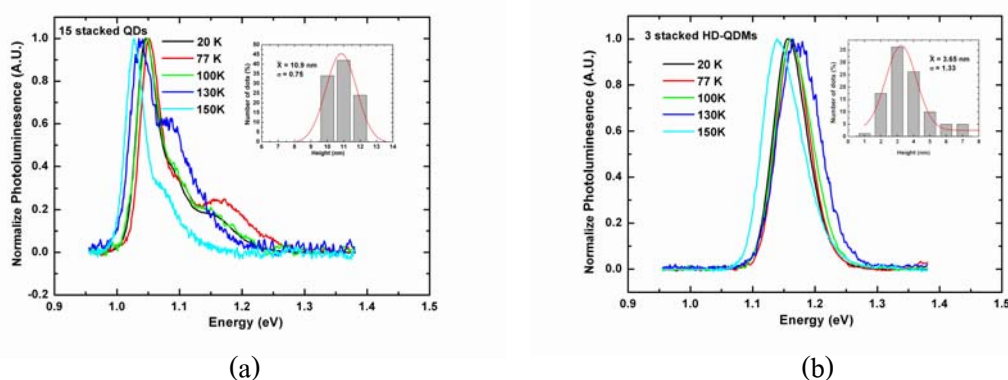
รูปที่ 17 ผลของ PL Spectra ที่วัดได้จากโครงสร้างคอนดัคตอวแหวน
เมื่อเปลี่ยนความเข้มแสงเลเซอร์

เมื่อมีการเปลี่ยนอุณหภูมิการวัดจาก 20 K ให้สูงขึ้นถึงอุณหภูมิ 150 K โดยใช้ความเข้มแสงเลเซอร์คงที่ที่ 40 mW ผล PL spectra จะมีค่าลดลงจนวัดหาไม่ได้ที่อุณหภูมิ 150 K แสดงให้เห็นว่า โครงสร้างคอนดัคตอวแหวนที่ทำจาก InP ด้วยเทคนิค Droplet Epitaxy และ S-K ยังมีคุณภาพไม่ดีนัก ต้องมีการปรับปรุงต่อไป ผลการทดลองดังกล่าวมีแสดงดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 ผลของ PL Spectra ที่วัดได้จากโครงสร้างคอนดัคตอวแหวน
เมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิการวัดจาก 20 K เป็น 150 K

การวิเคราะห์ผล PL spectra ยังมีการดำเนินการกับโครงสร้างควอนตัมดอทที่ทำจาก InAs ด้วย ดังตัวอย่างผลการวัด PL จากโครงสร้างควอนตัมดอทหลายชั้น (Multi-Stack QDs) และโครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุลความหนาแน่นสูงที่ซ้อนกันหลายชั้น (Multi-Stacki HD-QDMs) ดังแสดงในรูป 19 และ 20 ตามลำดับ ผลการวัด PL นี้ทำขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 20-150 K เพื่อวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการกระจายตัวของพลังงานในตอนที่ปลดปล่อยจากโครงสร้างควอนตัมดอท



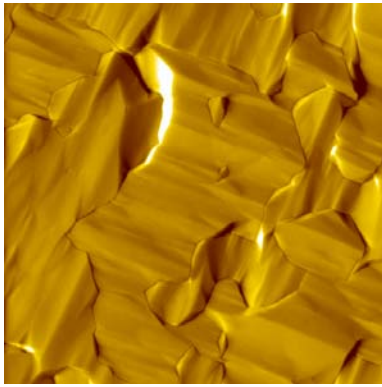
รูปที่ 19 (a) ผลของ PL Spectra ที่วัดได้จากโครงสร้างควอนตัมดอท 15 ชั้น
(b) ผลของ PL Spectra ที่วัดได้จากโครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุลที่ซ้อนกัน 3 ชั้น

7. การศึกษาการปลูกชั้นผลึกสารประกอบกึ่งตัวนำบนฐานผลึกเจอร์เมเนียม

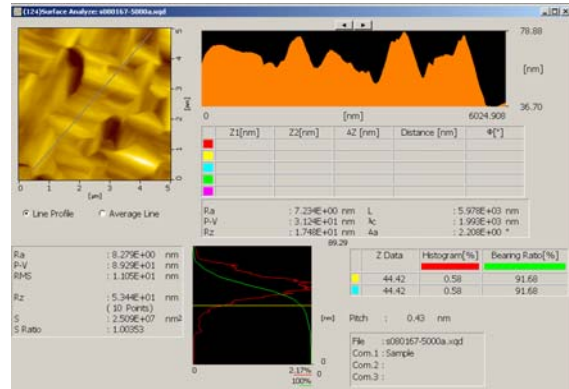
ในงานวิจัยส่วนใหญ่เป็นการปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุลบนฐานผลึก GaAs ซึ่งเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำชนิด III-V และมีราคาแพงเมื่อเทียบกับฐานผลึกซิลิคอน (Si) ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม เนื่องจากชั้นผลึกที่ปลูกในงานวิจัยเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำชนิด III-V ดังนั้นการใช้ฐานผลึก GaAs จึงมีความเหมาะสมทางเทคนิคมากที่สุด และไม่สามารถปลูกชั้นผลึกสารประกอบกึ่งตัวนำบนฐานผลึก Si เพราะโครงข่ายผลึกมีขนาดไม่เท่ากัน

ในงานวิจัยส่วนหนึ่งจึงเลือกใช้ฐานผลึกเจอร์เมเนียม (Ge) ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำแบบธาตุกลุ่ม IV เช่นเดียวกับ Si แต่โครงข่ายผลึกของ Ge มีขนาดใกล้เคียงกับของ GaAs ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการปลูกชั้นผลึกสารประกอบกึ่งตัวนำ GaAs บนฐานผลึก Ge และฐานผลึก Ge มีราคาถูกกว่า GaAs

ผลการปลูกชั้นผลึก GaAs ด้วยลำโมเลกุลบนฐานผลึก Ge มีแสดงในรูป 20 และ 21 ตามลำดับ เมื่อตรวจสอบโครงสร้างผิวผลึกที่ได้จะพบว่าไม่เรียบ แต่จะมีลักษณะเป็น Anti-Phase Domain (APD) เนื่องจากผลึก Ge เป็นธาตุกลุ่มที่ IV ในขณะที่ Ga และ As เป็นธาตุกลุ่มที่ III และ V ดังนั้นการเกิดผลึก GaAs จึงอาจเริ่มต้นจากอะตอมกลุ่ม III หรือ V ได้ทั้งสองกรณี ทำให้เกิดเป็น Domain ขึ้นบนผิวของฐานผลึก Ge รอยต่อระหว่าง Domain จึงอาจทำหน้าที่คล้ายจุดบกพร่องของโครงข่ายผลึกได้ ในงานวิจัยครั้งนี้จึงได้มีการเปรียบเทียบผลการปลูกชั้นผลึก GaAs บน Ge โดยตรงกับการมีชั้นผลึก AlAs เป็นตัวคั่นกลาง

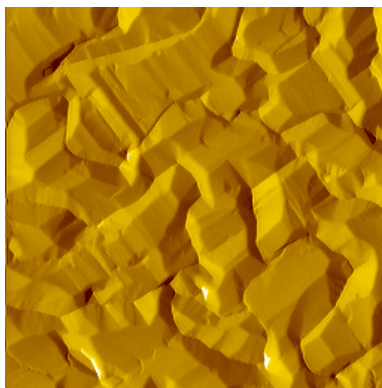


(a)

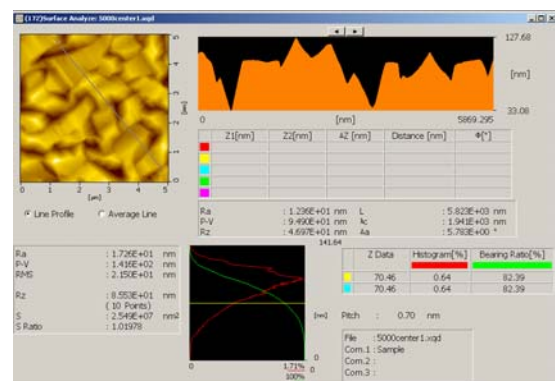


(b)

รูปที่ 20 ชั้นผลึก GaAs ที่ปลูกบนฐานผลึก Ge โดยตรง



(a)



(b)

รูปที่ 21 ชั้นผลึก GaAs ที่ปลูกบนฐานผลึก Ge โดยมีชั้น AIAs คั่นกลาง

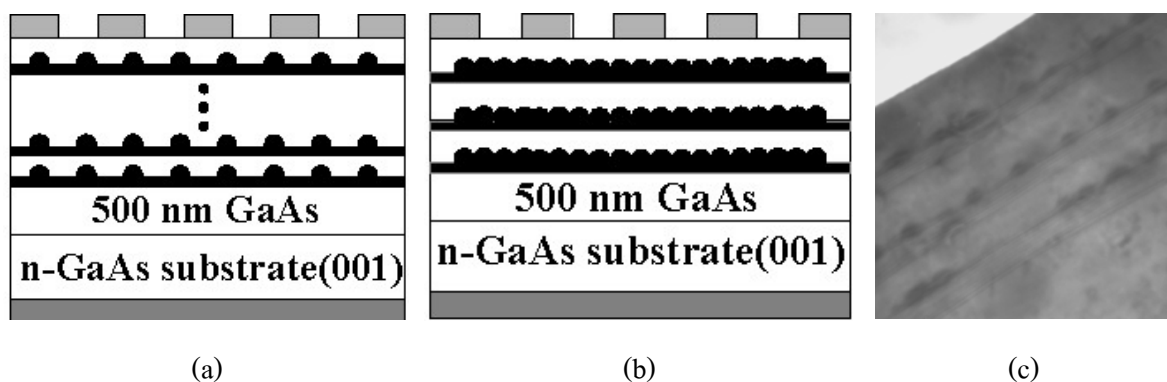
ได้มีการตรวจสอบโครงสร้าง GaAs ที่ได้โดยการวัดผลการเปล่งแสงจากชั้นผลึกโดยวิธี Photoluminescence ซึ่งจะมีการนำผลมาวิเคราะห์ต่อไป

8. การศึกษาผลตอบแทนทางสเปกตรัมของควอนตัมดอทโซล่าเซลล์

งานวิจัยของโครงการวิจัยนี้ที่มีผลต่อการใช้งานจริงทางวิศวกรรมศาสตร์ ได้แก่ การนำโครงสร้างควอนตัมดอทมาใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงในโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ งานวิจัยส่วนนี้ได้ดำเนินการต่อเนื่องมาตั้งแต่ช่วงแรกจนถึงปัจจุบัน และได้รับการสนับสนุนด้านเงินทุนวิจัยส่วนหนึ่งจาก Asian Office of Aerospace Research and Development (AOARD) ซึ่งเป็นหน่วยงานหนึ่งของกองทัพอากาศของสหรัฐอเมริกา

เพื่อให้การศึกษามีความชัดเจนในเชิงแนวคิด (Conceptual) การทำความเข้าใจในเชิงพื้นฐานด้านฟิสิกส์จึงจำเป็น ตลอดจนโครงสร้างควอนตัมดอทที่ใช้งานจริงก็ต้องสามารถมีคุณสมบัติตามต้องการตามหลักทางวิศวกรรมศาสตร์ด้วย อาศัยการพัฒนาเทคนิคการปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุลดังได้กล่าวรายละเอียดมาแล้วในตอนแรก ๆ ทำให้คณะวิจัยสามารถเตรียมโครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุลความหนาแน่นสูง (HD-QDMs) ด้วยวิธี Multi-Cycle-Thin-Capping-and Regrowth Process และได้นำเทคนิคดังกล่าวมาปลูกชั้นผลึกหลายชั้นของ HD-QDMs เพื่อเป็น โครงสร้างส่วนหนึ่งของเซลล์แสงอาทิตย์

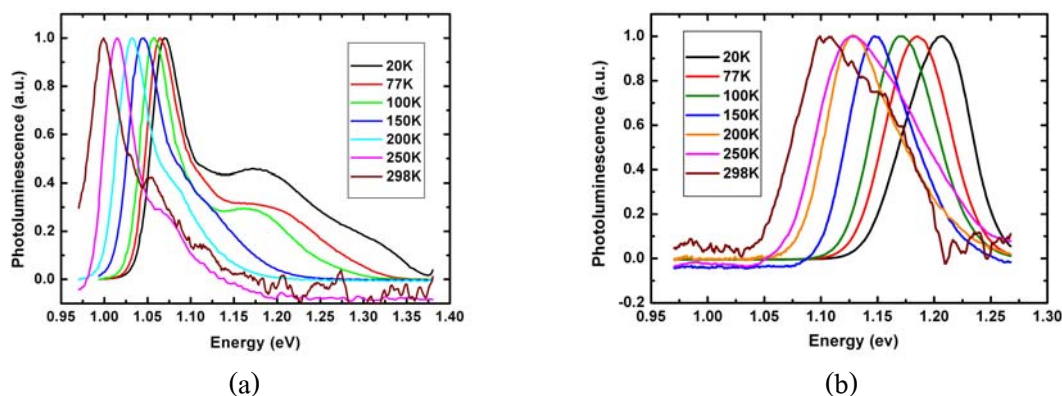
ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Schottky ที่มี HD-QDMs ซึ่งมี 3 ชั้น และเปรียบเทียบผลกับโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Schottky ที่มี QDs ซึ่งมี 15 ชั้น เพราะจำนวนควอนตัมดอททั้งสองตัวอย่างมีเท่า ๆ กันโดยประมาณ นอกจากนี้ขั้นตอนการปลูกชั้นผลึก HD-QDMs แต่ละชั้นจะใช้เทคนิค Thin-Capping-and-Regrowth Process จำนวน 5 รอบ ดังนั้นการปลูกชั้นผลึก HD-QDMs 3 ชั้น จึงใช้รอบการปลูกทั้งสิ้น $3 \times 5 = 15$ รอบ จึงใช้เวลาในการเตรียมโครงสร้างดังกล่าวใกล้เคียงกับการปลูกโครงสร้าง QDs 15 ชั้น โครงสร้างของตัวอย่างทั้งสองมีแสดงในรูป 22 (a) และ (b) ตามลำดับ โดยมีภาพของโครงสร้างที่ถ่ายจาก TEM ดังแสดงในรูปที่ 22 (c)



รูปที่ 22 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Schottky ที่มีชั้นผลึกควอนตัมดอท 15 ชั้น และชั้นผลึกควอนตัมดอทโมเลกุล 3 ชั้น เป็น Active Layers โดยมีรายละเอียดโครงสร้างที่ถ่ายภาพจาก TEM เพื่อยืนยันผล

การใช้โครงสร้างควอนตัมดอทหลาย ๆ ชั้นก็เพื่อเพิ่มจำนวนควอนตัมดอทให้มีค่าสูง เพื่อการดูดกลืนแสงที่มีประสิทธิภาพ แต่การใช้โครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุลจะมีจำนวนชั้นน้อยกว่า 1/5 เพราะควอนตัมดอทโมเลกุลมีความหนาแน่นในแนวนอนมากกว่า จึงสามารถใช้จำนวนชั้นผลึกน้อยกว่า ดังนั้นโครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุลจึงอยู่ต้นได้ผิวมากกว่า จึงสามารถดูดกลืนแสงได้ดีและมีประสิทธิภาพมากกว่า

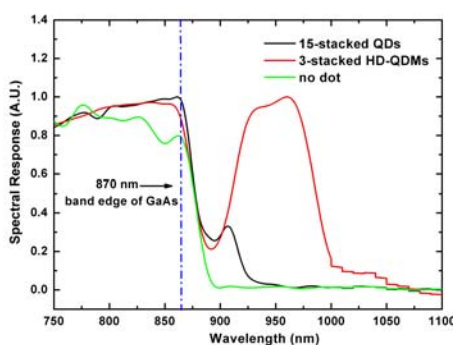
ตัวอย่างทั้งสองถูกนำไปวัด PL เพื่อวิเคราะห์คุณภาพทางแสงที่อุณหภูมิ 20 °-300 °K ผลการวัดที่อุณหภูมิต่ำ (20 °K) จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับระดับพลังงานคว้นไจน์ของควอนตัมดอต และควอนตัมดอตโมเลกุล ในขณะที่ผลการวัดที่อุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิห้อง (300 °K) จะเป็นการยืนยันถึงคุณภาพของโครงสร้างควอนตัมดอตทั้งสองแบบว่าสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิห้องปกติ ดังแสดงในรูปที่ 23



รูปที่ 23 ผลการวัด PL ของโครงสร้าง QDs 15 ชั้น และโครงสร้าง QDMs 3 ชั้นที่อุณหภูมิ 20°-300 °K

ในกรณีของ QDs ที่อุณหภูมิต่ำจะสามารถสังเกตเห็น PL peaks ที่เกิดจากระดับพลังงานคว้นไจน์ที่เป็น Ground State และ Excited States PL peaks ของ QDs จะแคบมีค่า FWHM (Full Width at Half Maximum) ในระดับ 40 meV ส่วน PL peaks ของ HD-QDMs จะกว้างกว่าและมี FWHM 80 meV และไม่สามารถสังเกตเห็นรายละเอียดของพลังงานคว้นไจน์ได้ เพราะขนาดของควอนตัมดอตใน QDMs มีค่าไม่เท่ากัน

เมื่อนำเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Schottky ที่มีโครงสร้าง QDs 15 ชั้น และ HD-QDMs 3 ชั้น มาวัดหา Spectral Responses กับแสงอาทิตย์เทียม พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองมีสมรรถนะเชิงสเปกตรัมที่สูงขึ้น โดยสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นยาวที่สูงกับ 870 nm ได้ดี เมื่อเทียบกับโครงสร้าง Schottky ที่ไม่มี QDs ดังแสดงในรูปที่ 24



รูปที่ 24 Spectral Responses ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Schottky ที่มี QDs และ HD-QDMs เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มี QDs

9. การติดตั้งเครื่องปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุลชุดใหม่ รุ่น RIBER Compact 21 TM

ในช่วงการวิจัย 2550-2553 นี้ คณะวิจัยได้รับเลือกจากศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติให้เป็นศูนย์เชี่ยวชาญด้านนาโนอิเล็กทรอนิกส์ และได้รับเงินทุนวิจัยสนับสนุนต่อเนื่องเป็นเวลา 5 ปี ในเงินทุนวิจัยของศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาตินี้มีส่วนหนึ่งที่ใช้เป็นค่าครุภัณฑ์ 6 ล้านบาท คณะวิจัยจึงได้ขอการสนับสนุนเงินวิจัยเพื่อซื้อครุภัณฑ์เพิ่มเติมจาก AOARD อีก 2.2 ล้านบาท และเงินสมทบจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยอีก 12 ล้านบาท รวมเป็นเงินครุภัณฑ์ทั้งสิ้น 20.2 ล้านบาท เพื่อการจัดซื้อเครื่องปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุลชุดใหม่ รุ่น RIBER Compact 21 TM เพื่อต่อเชื่อมกับเครื่องปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุลชุดเก่ารุ่น RIBER 32P ซึ่งได้ใช้งานมาเกือบ 15 ปี

เครื่องปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุลชนิดใหม่ได้ถูกส่งมาถึงประเทศไทยในวันที่ 25 ธันวาคม 2551 และติดตั้งในระหว่างวันที่ 16-21 มกราคม 2552 จากนั้นจึงมีการทดสอบสภาพสูงสุญญากาศของเครื่องมือชุดนี้ ซึ่งให้ค่า 10^{-11} Torr นับว่ามีคุณภาพดีตามต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 25



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

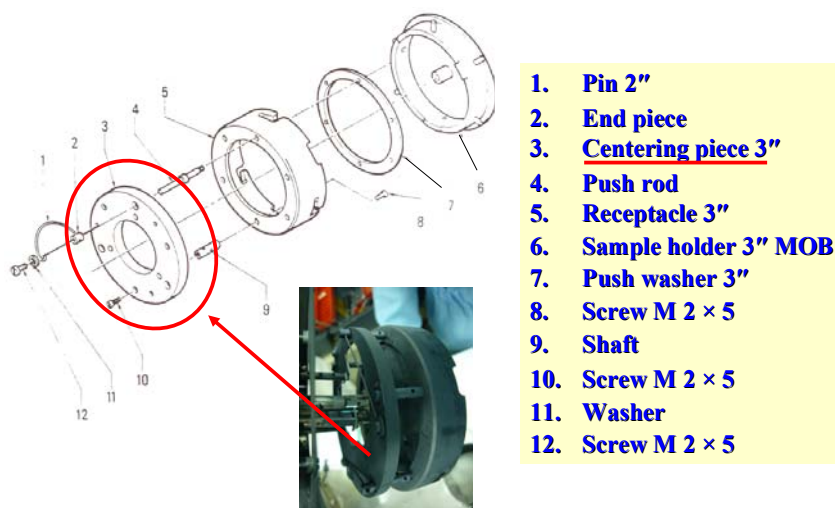
รูปที่ 25 การติดตั้งเครื่อง MBE-RIBER Compact 21 TM เพื่อเชื่อมติดกับเครื่อง MBE-RIBER 32 P

เครื่อง MBE-RIBER Compact 21 TM ชุดใหม่นี้มีจุดเด่นที่การติดตั้งฐานผลึกจะอยู่ในแนวนอน และมีแหล่งกำเนิดลำโมเลกุลจากด้านล่าง ทำให้ชั้นผลึกที่ปลูกได้มีความสม่ำเสมอว่าที่ปลูกจากเครื่อง MBE-RIBER 32P ซึ่งมีการติดตั้งฐานผลึกในลักษณะเอียง และมีแหล่งกำเนิดลำโมเลกุลที่ติดตั้งเอียงทำมุมเช่นเดียวกัน ทำให้ได้ปริมาณสารได้น้อยกว่า ปัจจุบันเครื่อง MBE ชุดใหม่ซึ่งต้องติดตั้งอุปกรณ์เสริมเช่น RHEED และ Quadapole ก่อนใช้งาน

10. การซ่อมและบำรุงรักษาเครื่องปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุลชุดเก่า รุ่น RIBER 32P

ในขณะที่มีการติดตั้งเครื่อง MBE ชุดใหม่ การปลูกชั้นผลึกด้วยเครื่อง MBE ชุดเก่าก็ยังสามารถดำเนินการคู่ขนานไปได้ แต่เนื่องจากการใช้งานที่หนักและต่อเนื่อง ในปี 2552 ที่ผ่านมานี้ ได้เกิดอุบัติเหตุ 2 ครั้งระหว่างการบำรุงรักษา ครั้งแรกเกิดขึ้นจากการที่ชุด Manipulator ได้ล้มลงจากแท่นรอง เนื่องจากน้ำหนักที่มาก ทำให้ชุดยึดตัวอย่างที่ทำจากแท่นทาลัม (Ta) แตก จึงได้ส่งชิ้นงานดังกล่าวไปเป็นต้นแบบเพื่อกลึงชิ้นงานใหม่ที่ประเทศเยอรมัน และส่งกลับมาติดตั้งใหม่เพื่อใช้งานในตอนต้นปี 2552 ในกลางปี 2552 เกิดอุบัติเหตุครั้งสอง เนื่องจากการสะดุดของระบบการหมุนฐานยึดตัวอย่างของ Manipulator ทำให้แกนยึดบิดเบี้ยว และมีปลายเกลียวหัก ทำให้ Heater พังเสียหายเพราะขณะเกิดอุบัติเหตุ Heater กำลังมีอุณหภูมิสูงถึง 500 °C รายละเอียดของอุบัติเหตุทั้ง 2 ครั้ง มีบันทึกเป็นรูปภาพไว้ในรูปที่ 26 และ 27 ตามลำดับ

SUBSTRATE HOLDER

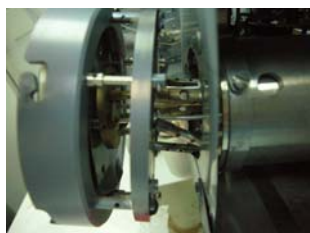


(a)



(b)

รูปที่ 26 อุบัติเหตุครั้งแรกที่เกิดขึ้นเนื่องจากชุดยึดตัวอย่างแตกหัก



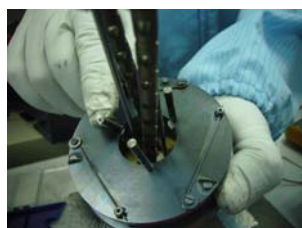
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

รูปที่ 27 อุบัติเหตุครั้งที่สองที่เกิดขึ้น เนื่องจากระบบการหมุนตัวอย่างเกิดการสะดุด เพราะชิ้นส่วนบางชิ้นของ Manipulator เกิดการแตกหักระหว่างการปลุกชั้นผลึกที่อุณหภูมิสูง

การซ่อมและบำรุงรักษาเครื่อง MBE ชุดเก่าได้ดำเนินการอย่างต่อเนื่องในช่วงปี 2552 และ 2553 โดยการติดตั้งสั่งซื้อชิ้นส่วนจากบริษัท MBE Komponent ประเทศเยอรมัน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นชิ้นส่วนที่ไม่มีจำหน่ายทั่วไป ต้องสั่งทำเป็นพิเศษ จึงใช้เวลาหลายเดือน ชิ้นส่วนดังกล่าวส่วนใหญ่เป็นวัสดุที่ทำจาก Tantalum ซึ่งแข็งและทนความร้อนได้สูง การติดตั้งชุด Manipulator ที่ซ่อมใหม่นี้มีปัญหาทางเทคนิคมากมาย และต้องระมัดระวังสารอาเซนิก (สารหนู) ที่เป็นพิษด้วย การดำเนินการซ่อมมีบันทึกดังภาพในรูปที่ 28



(a)



(b)



(c)



(d)



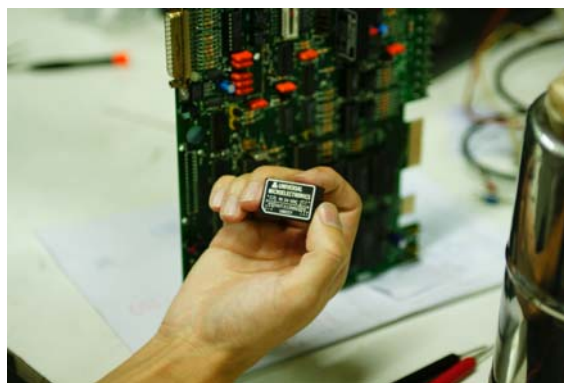
(e)

รูปที่ 28 การซ่อมบำรุงชุด Manipulator ด้วยชิ้นส่วนใหม่ หลังการเกิดอุบัติเหตุครั้งที่สอง

ปัญหาทางเทคนิคที่ต้องแก้ไขอีกเรื่องหนึ่งได้แก่ ชุดควบคุมการทำงานของเครื่อง MBE ชุดเก่า ซึ่งเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ได้เกิดพังเสียหาย และเป็นวงจร IC ที่ผลิตเมื่อ 15 ปีที่แล้ว การหาอะไหล่เปลี่ยนจึงมีปัญหาต้องถอดของเก่าที่ยังใช้งานได้มาเปลี่ยนแทน ปัจจุบันยังมีปัญหาการทำงานที่ไม่ราบรื่น เนื่องจากปัญหาความชื้นที่ทำให้การทำงานสะดุด การซ่อมวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของ Watch Dog มีบันทึกภาพดังรูปที่ 29



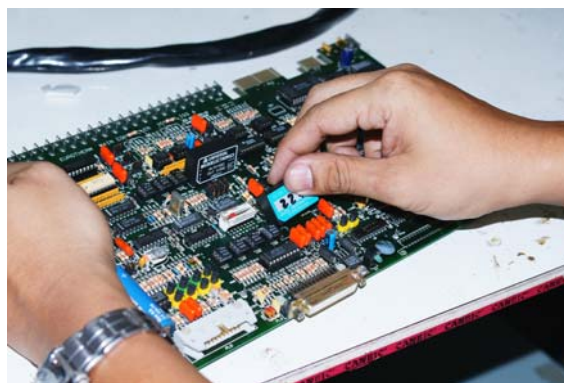
(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 29 การซ่อมวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ควบคุมการทำงานของเครื่อง MBE ชุดเก่า

11. ผลงานวิจัยที่ได้รับรางวัล และผลงานวิจัยที่รับเชิญในการประชุมวิชาการต่าง ๆ

ในช่วงการทำวิจัยระหว่างปี 2550-2553 ได้มีผลงานที่ได้รับเชิญไปนำเสนอในที่ประชุมวิชาการและสัมมนาต่าง ๆ ได้แก่

- Key Planary Lecture ของการประชุมสัมมนาที่จัดโดยมูลนิธิ Asahi Glass ปี 2550
- Invited Talk ที่การประชุมนักวิจัยใหม่พบเมธีวิจัยอาวุโส สกว. ปี 2550

- Invited Talk ในการประชุมเชิงปฏิบัติการด้าน Quantum Devices ที่ U. of Stuttgart ประเทศเยอรมัน ในปี 2550
- Invited Talk ในการประชุม Nanotechnology Thailand Symposium (NTS 2008) ในปี 2551
- Invited Talk ที่สถาบันวิจัยแห่งชาติฝรั่งเศส LAAS-CNRS ที่เมือง Toulouse ประเทศฝรั่งเศส ในปี 2551
- Invited Talk ในการประชุมวิชาการนานาชาติ The 18th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-18) ที่เมือง Kolkata ประเทศอินเดียในปี 2552
- Invited Talk ในการประชุม NAC 2009 ของสวทช. ในปี 2552
- Key Plenary Lecture ของการประชุม PMP-III ในปี 2552
- Invited Talk ในการประชุม ONR Energy Forum จัดโดย Office of Naval Research ที่เมือง Kyoto ประเทศญี่ปุ่นในปี 2552
- Invited Talk ในการประชุม ITS (Intelligent Transport System) Symposium ในปี 2552
- Invited Talk ในการประชุมนักวิจัยใหม่พบเมธีวิจัยอาวุโส สกว. ปี 2552
- Keynote Speaker ในการประชุมวิชาการ EECON-32 ประจำปี 2552
- Invited Talk ในการประชุมสัมมนาด้าน Southeast Asian International Advances in Micro / Nano-Technology (SAIAM-2010) จัดโดย ISE คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ Montien Hotel ประจำปี 2553

และมีผลงานวิจัยที่ได้รับรางวัลทั้งที่เป็น Best Paper Award : 3 เรื่อง / Best Poster Award : 2 เรื่อง / Best Presentation Award : 1 เรื่อง จากการประชุมวิชาการทั้งในและต่างประเทศในปี 2550 และ 2552

นอกจากนี้ยังมีผลงานวิจัยที่ยื่นจดสิทธิบัตร 2 เรื่องในปลายปี 2551 และต้นปี 2552 ในปี 2552 นี้มีสิทธิบัตรที่ได้รับการรับรอง 1 เรื่อง เกี่ยวกับงานสิ่งประดิษฐ์ด้านโฮโลแกรมซ้อนเพื่อใช้งานด้านบาร์โค้ดแบบเคลื่อนได้ (Dynamic Holographic Bar Codes)

12. การพัฒนากำลังคน

ควบคู่กับการทำวิจัยของโครงการนี้ ยังมีการพัฒนากำลังคนในด้านนาโนอิเล็กทรอนิกส์ในระดับปริญญาโท-เอก ด้วยการสนับสนุนเงินทุนการศึกษาของนิสิตจากโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษกของ สกว. จากทุน AUN/SEED-Net และจากทุนศิษย์ก้นกุฏิ นิสิตที่รับทุนดังกล่าวมีทั้งนิสิตชาวไทย และนิสิตจากต่างประเทศที่มาจากประเทศเพื่อนบ้าน

ในปี 2550 มีบัณฑิตที่จบระดับปริญญาโท 3 คน และระดับปริญญาเอก 2 คน

ในปี 2551 มีบัณฑิตที่จบระดับปริญญาโท 1 คน และระดับปริญญาเอก 1 คน

ในปี 2553 มีบัณฑิตที่จบระดับปริญญาเอก 1 คน

ในปัจจุบันทีมวิจัยมีนิสิตปริญญาเอก 4 คน นิสิตปริญญาโท 8 คน และนิสิตปริญญาตรี 6 คน ที่กำลังทำวิทยานิพนธ์ และ Senior Projects ในหัวข้อต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการใช้โครงสร้างระดับนาโนเมตร เพื่อใช้งานด้านนาโนอิเล็กทรอนิกส์ และนาโนโฟโตนิกส์

ผลผลิตด้านกำลังคนจากห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ผ่านมา ได้ออกไปมีส่วนพัฒนางานด้านวิจัยและพัฒนาของเทคโนโลยีขั้นสูง ทั้งในหน่วยงานวิจัยแห่งชาติ ทั้งในและต่างประเทศ (เยอรมัน / ฝรั่งเศส / ญี่ปุ่น) และบริษัทเอกชนที่เป็นอุตสาหกรรมการผลิตด้านสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ด้านโฟโตนิกส์ และด้านฮาร์ดดิสของประเทศ

Outputs ที่ได้จากโครงการวิจัย

1. ผลงานที่ตีพิมพ์

1.1 บทความวิชาการที่ตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ (เอกสารแนบในภาคผนวก)

- 1.1.1 “Self-Assembled InAs Lateral Quantum Dot Molecules Growth on (001) GaAs by Thin-Capping-and-Regrowth MBE Technique”, Suwaree Suraprapapich, Supachok Thainoi, Songphol Kanjanachuchai, and Somsak Panyakeow, Journal of Solid State Phenomena, Vols. 121-123, pp. 395-399, 2007.
- 1.1.2 “Aligned Quantum Dot Molecules with 4 Satellite Dots by Self Assembly”, Naparat Siripitakchai, Cho Cho Thet, Somsak Panyakeow, and Songphol Kanjanachuchai, Journal of Microelectronic Engineering, Vol. 85, pp. 1218-1221, January, 2008.
- 1.1.3 “Nanometer-Scale $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ Ring-Like Structure Grown by Droplet Epitaxy”, Naraporn Pankaow, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathamphan, Journal of Advanced Materials Research, Vol. 31, pp. 123-125, 2008.
- 1.1.4 “In-Mole-Fraction and Thickness of Ultra-thin InGaAs Insertion Layers Effects on the Structural and Optical Properties of InAs Quantum Dots”, Poonyaseri Boonpeng, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathamphan, Journal of Advanced Materials Research, Vol. 31, pp. 132-134, 2008.
- 1.1.5 “The Formation of InP Ring-Shape Nanostructures on $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$ Grown by Droplet Epitaxy”, Wipakorn Jevasuwan, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathamphan, Journal of Advanced Materials Research, Vol. 31, pp. 158-160, 2008.

- 1.1.6 “Effective One-Dimensional Electronic Structure of InGaAs Quantum Dot Molecules”, Nitidet Thudsalingkarnsakul, Teeravat Limwongse, Naparat Siripitakchai, Somsak Panyakeow, and Songphol Kanjanachuchai, *Journal of Microelectronics Engineering*, Vol. 85, pp. 1225-1228, 2008.
- 1.1.7 “The Effects of Relaxed InGaAs Virtual Substrates on the Formation of Self-Assembled InAs Quantum Dots”, Cho Cho Thet, S. Sanorpim, Somsak Panyakeow, and Songphol Kanjanachuchai, *Journal of Semiconductor Science and Technology*, Vol. 23, 2008.
- 1.1.8 “Improved Quantum Confinement of Self-Assembled High-Density InAs Quantum Dot Molecules in AlGaAs/GaAs Quantum Well Structures by Molecular Beam Epitaxy”, Nan Thidar Chit Swe, Ongarj Tangmattajittakul, Suwaree Suraprapapich, Pornchai Changmoang, Supachok Thainoi, Chanin Wissawinthanon, Songphol Kanjanachuchai, Somchai Ratanathammaphan, and Somsak Panyakeow, *Journal of Vacuum Science and Technology B*, Vol. 26, No. 3, pp. 1100-1104, May, 2008.
- 1.1.9 “Low-Temperature Micro-PL Measurements of InAs Binary Quantum Dots on GaAs Substrate”, Nan Thidar Chit Swe, Suwaree Suraprapapich, Chanin Wissawinthanon, Somsak Panyakeow, Charles W. Tu, and Yasuhiko Arakawa, Non-members, *ECTI Transactions on Electrical Eng., Electronics, and Communications*, pp. 50-56, Vol. 6, No. 2, August, 2008.
- 1.1.10 “Optimization of Stacking High-Density Quantum Dot Molecules for Photovoltaic Effect”, Kittituch Laouthaiwattana, Ongarj Tangmattajittakul, Suwaree Suraprapapich, Supachok Thainoi, Pornchai Changmuang, Songphol Kanjanachuchai, Somchai Ratanathammaphan, and Somsak Panyakeow, *Journal of Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 93, pp. 746-749, 2009.
- 1.1.11 “The Effects of Rapid Thermal Annealing on Doubled Quantum Dots Grown by Molecular Beam Epitaxy”, Suwaree Suraprapapich, Y.M. Shen, Y. Fainman, Y. Horikoshi, Somsak Panyakeow, and Charles W. Tu, *Journal of Crystal Growth*, Vol. 311, pp. 1791-1794, 2009.
- 1.1.12 “Formation of $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ Ring-and-Hole Structure by Droplet Molecular Beam Epitaxy”, Naraporn Pankaow, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathammaphan, *Journal of Crystal Growth*, Vol. 311, pp. 1832-1835, 2009.

- 1.1.13 “Fabrication of $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ Nanoholes on GaAs by Droplet Molecular Beam Epitaxy”, Poonyasiri Boonpeng, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathamphan, *Journal of Crystal Growth*, Vol. 311, pp. 1843-1846, 2009.
- 1.1.14 “Self-Assembled InAs Quantum Dots on Cross-Hatch InGaAs Templates: Excess Growth, Growth Rate, Capping and Preferential Alignment”, Songphol Kanjanachuchai, Matinon Maitreeboriraks, Cho Cho Thet, Teeravat Limwongse, and Somsak Panyakeow, *Journal of Microelectronic Engineering*, Vol. 86, pp. 844-849, 2009.
- 1.1.15 “Quadra-Quantum Dots Grown on Quantum Rings Having Square-Shaped Holes: Basic Nanostructure for Quantum Dot Cellular Automata Application”, Poonyasiri Boonpeng, Wipakorn Jevasuwan, Suwaree Suraprapapich, Somchai Ratanathamphan, and Somsak Panyakeow, *Journal of Microelectronic Engineering*, Vol. 86, pp. 853-856, 2009.
- 1.1.16 “Evolution of InAs Quantum Dots Grown on Cross-Hatch Substrates”, Teeravat Limwongse, Somsak Panyakeow, and Songphol Kanjanachuchai, *Journal of Physica Status Solidi C*, Vol. 6, No. 4, pp. 806-809, 2009.
- 1.1.17 “Extended Optical Properties Beyond Band-Edge of GaAs by InAs Quantum Dots and Quantum Dot Molecules”, Ongarj Tangmettjittakul, Supachok Thainoi, Pornchai Changmoang, Songphol Kanjanachuchai, Somchai Ratanathamphan, and Somsak Panyakeow, *Journal of Microelectronic Engineering*, Vol. 87, pp. 1304-1307, 2010.
- 1.1.18 “Temperature-Dependent Photoluminescent Characteristics of Lateral InGaAs Quantum Dot Molecules”, Songphol Kanjanachuchai, Nitidet Thudsalingkarnsakul, Naparat Siripitakchai, Pornchai Changmoang, Supachok Thainoi, and Somsak Panyakeow, *Journal of Microelectronics Engineering*, Vol. 87, pp. 1352-1356, 2010.
- 1.1.19 “Influence of Crystallization Temperature on InP Ring-Shaped Quantum-Dot Molecules Grown by Droplet Epitaxy”, Wipakorn Jevasuwan, Poonyasiri Boonpeng, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathamphan, *Journal of Microelectronic Engineering*, Vol. 87, pp. 1416-1419, 2010.

- 1.1.20 “Growth and Characterization of InP Ringlike Quantum-Dot Molecules Grown by Solid-Source Molecular Beam Epitaxy”, Wipakorn Jevasuwan, Poonyasiri Boonpeng, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathammaphan, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 10, pp. 1-4, 2010.
- 1.1.21 “Fabrication of Self-Assembled InGaAs Squarelike Nanoholes on GaAs(001) by Droplet Epitaxy”, Poonyasiri Boonpeng, Wipakorn Jevasuwan, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathammaphan, *Journal of Applied Physics*, Vol. 49, pp. 1-3, 2010.
- 1.1.22 “A Si-Doped GaAs/AlGaAs Solar Cell on (311) A GaAs Substrate”, Ongarj Tangmattajittakul, Supachok Thainoi, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathammaphan, *Compound Semiconductor Photonics Materials, Devices and Integration*, pp. 149-151, 2010.
- 1.1.23 “InGaAs Ring-Shaped Nanostructures Grown by Droplet Epitaxy”, Naraporn Pankaow, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathammaphan, *Compound Semiconductor Photonics Materials, Devices and Integration*, pp. 152-154, 2010.
- 1.1.24 “Effect of Substrate Temperature on $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ (001) Nanohole Templates Grown by Droplet Molecular Beam Epitaxy”, Poonyasiri Boonpeng, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathammaphan, *Compound Semiconductor Photonics Materials, Devices and Integration*, pp. 158-160, 2010.
- 1.1.25 “Dependency of In Thickness on the Properties of Self-assembled InP Ring-Shaped Nanostructures Grown by Droplet Molecular Beam Epitaxy”, Wipakorn Jevasuwan, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathammaphan, *Compound Semiconductor Photonics Materials, Devices and Integration*, pp. 161-163, 2010.
- 1.1.26 “Effect of Thickness of GaP Ultra-Thin Insertion Layer on the Structural and Optical Properties of InP Quantum Dots”, Soe Soe Han, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathammaphan, *Compound Semiconductor Photonics Materials, Devices and Integration*, pp. 176-178, 2010.

1.2 บทความวิชาการที่ตีพิมพ์ในประเทศ (เอกสารแนบในภาคผนวก)

- 1.2.1 “Quantum Nanostructures by Droplet Epitaxy”, (Invited Paper), Somsak Panyakeow, Transaction on Bio and Nano Engineering of the Chulalongkorn Engineering Journal, pp. 51-56, Vol. 13, 2009.

1.3 บทความที่นำเสนอในการประชุมวิชาการนานาชาติ (เอกสารแนบในภาคผนวก)

- 1.3.1 “Quantum Dot Molecules in Quantum Wells for Photovoltaic Applications”, Supachok Thainoi, Pornchai Changmuang, Suwaree Suraprapapich, Ongarj Tangmattajittakul, Songphol Kanjanachuchai, Somchai Ratanathamphan, and Somsak Panyakeow, 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC 2007), Milan, Italy, pp. 239-241, 3-7 September, 2007.
- 1.3.2 “Dot Homogeneity of Self-Assembled High Density InAs Quantum Dot Molecules in AlGaAs Quantum Well Structures by Molecular Beam Epitaxy”, Ongarj Tangmattajittakul, Suwaree Suraprapapich, Pornchai Changmoang, Supachok Thainoi, Songphol Kanjanachuchai, Somchai Ratanathamphan, and Somsak Panyakeow, 25th North American Conf. on Molecular Beam Epitaxy (NAMBE 2007), Albuquerque, New Mexico, U.S.A., 23-26 September, 2007.
- 1.3.3 “Aligned Quantum Dot Molecules with 4 Satellite Dots by Self-Assembly Approach”, Napat Siripitakchai, Cho Cho Thet, Pornchai Changmoang, Supachok Thainoi, Songphol Kanjanachuchai, and Somsak Panyakeow, 33rd International Conference on Micro- and Nano-Engineering 2007, Copenhagen, Denmark, pp. 145-146, 23-26 September, 2007.
- 1.3.4 “Effect of Si-doping in In droplets on InP ring-like nanostructures on $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$ grown by droplet molecular beam epitaxy”, Wipakorn Jevasuwan, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathamphan, 33rd International Conference on Micro- and Nano-Engineering 2007, Copenhagen, Denmark, pp. 619-620, 23-26 September, 2007.
- 1.3.5 “Electronic Structure of Embedded InAs Quantum Dot Molecules”, Nitidet Thudsalingkarnsakul, Teeravat Limwongse, Napat Siripitakchai, Somsak Panyakeow, and Songphol Kanjanachuchai, 33rd International Conference on Micro- and Nano-Engineering 2007, Copenhagen, Denmark, pp. 643-644, 23-26 September, 2007.

- 1.3.6 “Optimization of Stacking High-Density Quantum Dot Molecules for Photovoltaic Effect”, Kittituch Laouthaiwattana, Ongarj Tangmattajittakul, Suwaree Suraprapapich, Supachok Thainoi, Pornchai Changmuang, Songphol Kanjanachuchai, Somchai Ratanathammaphan, and Somsak Panyakeow, The 17th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-17), Fukuoka, Japan, pp. 927-928, 3-7 December, 2007.
- 1.3.7 “InAs Bi-Quantum Dot Molecules and their Photoluminescence Characteristics”, Nan Thidar Chit Swe, Suwaree Suraprapapich, Chanin Wissawinthanon, Somsak Panyakeow, and Charles W. Tu, 29th International Conference on the Physics of Semiconductors, (ICPS 2008), Rio de Janeiro, RJ, Brazil, pp. 426-427, 27 July - 1 August, 2008.
- 1.3.8 “Thermal Annealing Effects on Doubled Quantum Dots Grown by Molecular Beam Epitaxy”, Suwaree Suraprapapich, Y.M. Shen, Y. Fainman, Y. Horikoshi, Somsak Panyakeow and Charles W. Tu, 15th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, (MBE 2008), The University of British Columbia, Vancouver, Canada, pp. 9, 3-8 August, 2008.
- 1.3.9 “Multi-Stacked High Density InAs Quantum Dot Molecules Having Uniform Dots and Dot Alignment Grown by Multi-Cycled MBE Process”, Suwaree Suraprapapich, Ongarj Tangmattajittakul, Supachok Thainoi, Songphol Kanjanachuchai, Somchai Ratanathammaphan, and Somsak Panyakeow, 15th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, (MBE 2008), The University of British Columbia, Vancouver, Canada, pp. 108, 3-8 August, 2008.
- 1.3.10 “Formation of $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ Ring-and-Hole Structure by Droplet Molecular Beam Epitaxy”, Naraporn Pankaow, Somsak Panyakeow and Somchai Ratanathammaphan, 15th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, (MBE 2008), The University of British Columbia, Vancouver, Canada, pp. 220, 3-8 August, 2008.
- 1.3.11 “Fabrication of $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ Nanoholes on GaAs by Droplet Molecular Beam Epitaxy”, Poonyaseri Boonpeng, Somsak Panyakeow and Somchai Ratanathammaphan, 15th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, (MBE 2008), The University of British Columbia, Vancouver, Canada, pp. 221, 3-8 August, 2008.

- 1.3.12 “One-Dimensional Alignment of Self-Assembled InAs Quantum Dots on Strain-Engineered Templates”, Matinon Maitreeboriraks, Somsak Panyakeow, and Songphol Kanjanachuchai, The 34th International Conference on Micro & Nano Engineering, pp. 235, 15-19 September, 2008.
- 1.3.13 “Effects of Overgrowth and Capping of InAs Quantum Dots Grown on Cross-Hatch Surfaces”, Songphol Kanjanachuchai, Teeravat Limwongse, Cho Cho Thet, and Somsak Panyakeow, The 34th International Conference on Micro & Nano Engineering, pp. 236, 15-19 September, 2008.
- 1.3.14 “Quadra-Quantum Dots Grown on Quantum Rings Having Square-Shaped Holes: Basic Nanostructure for Quantum Dot Cellular Automata Application”, Poonyaseri Boonpeng, Suwaree Suraprapapich, Somchai Ratanathamphan, and Somsak Panyakeow, The 34th International Conference on Micro & Nano Engineering, pp. 456, 15-19 September, 2008.
- 1.3.15 “Optical Polarization Characteristics of Self-Assembled Laterally-Aligned Quantum Dots”, Chonlakorn Chiewpanich, Nan Thidar Chit Swe, Suwaree Suraprapapich, Somsak Panyakeow, and Chanin Wissawinthanon, The 34th International Conference on Micro & Nano Engineering, pp. 504, 15-19 September, 2008.
- 1.3.16 “Development of Semiconductor Quantum Nanostructures at Chulalongkorn University”, (Invited Talk), Somsak Panyakeow, The 18th International Photovoltaic Science and Engineering Conference & Exhibition, (PVSEC 18), Science City Convention Center, Kolkata, India, 19-23 January, 2009.
- 1.3.17 “A Si-Doped GaAs/AlGaAs Solar Cell on (311) A GaAs Substrate”, Ongarj Tangmattajittakul, Supachok Thainoi, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathamphan, International Conference on Materials for Advanced Technologies, (ICMAT 2009), Singapore, pp. 17, 28 June-3 July, 2009.
- 1.3.18 “InGaAs Ring-Shaped Nanostructures Grown by Droplet Epitaxy”, Naraporn Pankaow, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathamphan, International Conference on Materials for Advanced Technologies, (ICMAT 2009), Singapore, pp. 18-19, 28 June-3 July, 2009.

- 1.3.19 “Effect of Substrate Temperature on $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ (001) Nanohole Templates Grown by Droplet Molecular Beam Epitaxy”, Poonyaseri Boonpeng, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathamphan, International Conference on Materials for Advanced Technologies, (ICMAT 2009) Singapore, pp.22, 28 June-3 July, 2009.
- 1.3.20 “Dependency of In Thickness on the Properties of Self-assembled InP Ring-Shaped Nanostructures Grown by Droplet Molecular Beam Epitaxy”, Wipakorn Jevasuwan, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathamphan, International Conference on Materials for Advanced Technologies, (ICMAT 2009), Singapore, pp. 23-24, 28 June-3 July, 2009. (Best Poster Award)
- 1.3.21 “Effect of Thickness of GaP Ultra-Thin Insertion Layer on the Structural and Optical Properties of InP Quantum Dots”, Soe Soe Han, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathamphan, International Conference on Materials for Advanced Technologies, (ICMAT 2009), Singapore, pp. 35, 28 June-3 July, 2009.
- 1.3.22 “Fabrication of $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ (001) Nanohole Templates Grown by Droplet Molecular Beam Epitaxy”, Poonyasiri Boonpeng, Wipakorn Jevasuwan, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathamphan, International Conference on Nanoscience and Technology, ChinaNANO 2009, Beijing, China, pp. 447, 1-3 September, 2009.
- 1.3.23 “Growth and Characterization of InP Ringlike Quantum-dot Molecules Grown by Solid-source Molecular-beam Epitaxy”, Wipakorn Jevasuwan, Poonyasiri Boonpeng, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathamphan, International Conference on Nanoscience and Technology, ChinaNANO 2009, Beijing, China, pp. 447, 1-3 September, 2009.
- 1.3.24 “Temperature-Dependent Optical Properties of Self-Assembled InGaAs Quantum Dot Molecules”, Songphol Kanjanachuchai, Nitidet Thudsalingkarnsakul, Naparat Siripitakchai, Pornchai Changmoang, Supachok Thainoi, and Somsak Panyakeow, The 35th International Conference on Micro & Nano Engineering, Ghent, Belgium, pp. 71, 28 September-1 October, 2009.

- 1.3.25 “Influence of Crystallization Temperature on InP Ring-Shaped Quantum-Dot, Molecules Grown by Droplet Epitaxy”, Wipakorn Jevasuwan, Poonyasiri Boonpeng, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathamphan, The 35th International Conference on Micro & Nano Engineering, Ghent, Belgium, pp. 72, 28 September-1 October, 2009.
- 1.3.26 “Extended Optical Properties Beyond Band-Edge of GaAs by InAs Quantum Dots and Quantum Dot Molecules”, Somsak Panyakeow, Ongarj Tangmattajittakul, Supachok Thainoi, Pornchai Changmoang, Songphol Kanjanachuchai, and Somchai Ratanathamphan, The 35th International Conference on Micro & Nano Engineering, Ghent, Belgium, pp. 77, 28 September-1 October, 2009.
- 1.3.27 “InP Ring-shaped Quantum-dot Molecules Formed by Droplet Epitaxy Grown by Solid-source Molecular Beam Epitaxy”, Wipakorn Jevasuwan, Poonyasiri Boonpeng, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathamphan, ASIA NANOTECH CAMP 2009, Taiwan, 28 September-12 October, 2009. (Best Poster Award)
- 1.3.28 “Fabrication of $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ Nanohole Templates on GaAs (001) for Quantum Dot Molecules”, Poonyasiri Boonpeng, Wipakorn Jevasuwan, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathamphan, The 2009 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2009), Sendai Kokusai Hotel, Japan, pp. 555-556, 7-9 October, 2009.
- 1.3.29 “InP Ring-Shaped Quantum-Dot Molecules Grown by Droplet Molecular Beam Epitaxy”, Wipakorn Jevasuwan, Poonyasiri Boonpeng, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathamphan, The 2009 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2009), Sendai Kokusai Hotel, Japan, pp. 830-831, 7-9 October, 2009.
- 1.3.30 “Formation of Quantum-Dot Molecules on Deformed Nanohole Templates”, Poonyasiri Boonpeng, Wipakorn Jevasuwan, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathamphan, The Collaborative Conference on Interacting Nanostructures (CCIN-2009), San Diego, California, USA., pp. 23, 9-13 November, 2009.

- 1.3.31 “Influence of Ultra-thin GaP Insertion Layer on the Structural of InP Quantum Dots Grown by Solid-source Molecular Beam Epitaxy”, Soe Soe Han, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathamphan, The First International Conference on Science and Engineering (ICSE 2009), Sedona Hotel, Yangon, Myanmar, pp. 12-16, 4-5 December, 2009. (Best Presentation Award)
- 1.3.32 “Improved Spectral Response of Quantum Dot Solar Cells Using InAs Multi-stack High Density Quantum Dot Molecules” Ongarj Tangmettjittakul, Pornchai Changmoang, Supachok Thainoi, Songphol Kanjanachuchai, Somchai Ratanathamphan, and Somsak Panyakeow, MRS Spring Meeting 2010, San Francisco, USA, 4-8 April, 2010.
- 1.3.33 “Study on Spectral Responses of Schottky-Type Multi-Stack High Density Quantum Dot Molecule Photovoltaic Cells at Concentrated Light” Ongarj Tangmettjittakul, Supachok Thainoi, Pornchai Changmoang, Songphol Kanjanachuchai, Somchai Ratanathamphan, and Somsak Panyakeow, 35th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, Hawaii, USA, 20-25 June 2010.
- 1.3.34 “In_xGa_{1-x}As/GaAs Quantum Rings Grown by Droplet Epitaxy”, Naraporn Pankaow, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathamphan, The 30th International Conference on the Physics of Semiconductors, Seoul, Korea, 25-30 July, 2010.
- 1.3.35 “InP Ring-shaped Quantum-dot Molecules Grown by Droplet Molecular Beam Epitaxy”, Wipakorn Jevasuwan, Poonyasiri Boonpeng, Supachok Thainoi, Somchai Ratanathamphan, and Somsak Panyakeow, The 16th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE 2010), Berlin, Germany, 22-27 August, 2010.
- 1.3.36 “Transformation of Concentric Quantum Double Rings to Single Quantum Rings with Squarelike Nanoholes on GaAs(001) by Droplet Epitaxy”, Poonyasiri Boonpeng, Wipakorn Jevasuwan, Supachok Thainoi, Somchai Ratanathamphan, and Somsak Panyakeow, The 16th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE 2010), Berlin, Germany, 22-27 August, 2010.
- 1.3.37 “Surface morphology and photoluminescence of InGaAs quantum rings grown by droplet epitaxy with varying In_{0.5}Ga_{0.5}-droplet amount”, Naraporn Pankaow, Supachok Thainoi, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathamphan, The 16th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE 2010), Berlin,

Germany, 22-27 August, 2010.

- 1.3.38 “MBE Growth Process and PL Characterization of Multi-stack QDs and Multi-stack High Density QDMs”, Ongarj Tangmettjittakul, Supachok Thainoi, Pornchai Changmoung, Songphol Kanjanachuchai, Sonchai Ratanathamphan, and Somsak Panyakeow, The 16th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE 2010), Berlin, Germany, 22-27 August, 2010.
- 1.3.39 “Self-Assembled Quantum Dots on Anti-Phase Domains of GaAs on Ge Substrates”, WiChit Tantiweerasophon, Supachok Thainoi, Pornchai Changmoung, Songphol Kanjanachuchai, Somchai Ratanathamphan, and Somsak Panyakeow, The 16th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE 2010), Berlin, Germany, 22-27 August, 2010.
- 1.3.40 “Growth and Photoluminescence of Lateral InGaAs Quantum Dot Molecules”, Songphol Kanjanachuchai, Natapong Thongkamkoon, Naparat Siripitakchai, Supachok Thainoi, and Somsak Panyakeow, The 16th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE 2010), Berlin, Germany, 22-27 August, 2010.

1.4 บทความที่นำเสนอในการประชุมวิชาการในประเทศ (เอกสารแนบในภาคผนวก)

- 1.4.1 “Optical Polarization Property of the Photoluminescence from InAs/GaAs Linearly Aligned Quantum Dots”, Chanin Wissawinthanon, Nan Thidar Chit Swe, and Somsak Panyakeow, Thailand Research Fund’s annual meeting, The Ambassador City Hotel, Pattaya, 11-13 October, 2007.
- 1.4.2 “Excitation-Power and Temperature-Dependent Optical Properties of Binary Quantum Dots”, Nan Thidar Chit Swe, Suwaree Suraprapapich, Chanin Wissawinthanon, and Somsak Panyakeow, and Charles W. Tu, 30th Electrical Engineering Conference, (EECON-30), Felix River Kwai Resort, Kanchanaburi, Thailand, pp. 953-956, 25-26 October, 2007. (Best Paper Award)
- 1.4.3 “Temperature and Size Dependencies of GaAs and InAs Quantum Cellular Automata”, Kanjanawit Yanggratoke, and Songphol Kanjanachuchai, 30th Electrical Engineering Conference, (EECON-30), Felix River Kwai Resort, Kanchanaburi, Thailand, pp. 957-960, 25-26 October, 2007.

- 1.4.4 “Correlation Between Luminescence Properties and Geometry of InAs Quantum Dots”, Teeravat Limwongse, Nitidet Thudsalingkarnsakul, Somsak Panyakeow, and Songphol Kanjanachuchai, 30th Electrical Engineering Conference, (EECON-30), Felix River Kwai Resort, Kanchanaburi, Thailand, pp. 981-984, 25-26 October, 2007.
- 1.4.5 “Study and Fabrication of InP Nanostructures by Droplet Molecular Beam Epitaxy”, Wipakorn Jevasuwan, Poonyaseri Boonpeng, Pornchai Changmoang, Supachok Thainoi, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathammaphan, 30th Electrical Engineering Conference, (EECON-30), Felix River Kwai Resort, Kanchanaburi, Thailand, pp. 1285-1288, 25-26 October, 2007.
- 1.4.6 “Effect of Indium Composition of InGaAs insertion Layer on InAs Quantum Dots”, Poonyaseri Boonpeng, Pornchai Changmoang, Supachok Thainoi, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathammaphan, 30th Electrical Engineering Conference, (EECON-30), Felix River Kwai Resort, Kanchanaburi, Thailand, pp. 1289-1292, 25-26 October, 2007.
- 1.4.7 “InP Ring-Shape Nanostructures on $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$ Grown by Droplet Epitaxy”, Wipakorn Jevasuwan, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathammaphan, RGJ-Ph.D. Congress IX, The Royal Golden Jubilee Ph.D. Program, The Thailand Research Fund, Jomtien Palm Beach Resort Pattaya, Chonburi, pp. 237, 4-6 April, 2008.
- 1.4.8 “The Effect of In Deposition Rate on the Properties of InP Nanostructures Grown by Droplet Molecular Beam Epitaxy”, Wipakorn Jevasuwan, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathammaphan, The 31st Electrical Engineering Conference (EECON-31), Royalhills Golf Resort and Spa, Nakornnayok, pp. 1031-1034, 29-31 October, 2008.
- 1.4.9 “Effect of The Thickness of InGaAs Insertion Layer on InAs Quantum Dots”, Poonyaseri Boonpeng, Pornchai Changmoang, Supachok Thainoi, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathammaphan, The 31st Electrical Engineering Conference (EECON-31), Royalhills Golf Resort and Spa, Nakornnayok, pp. 1047-1050, 29-31 October, 2008.

- 1.4.10 “Molecular Beam Epitaxial Growth of GaAs on Ge Substrates and their Photonic Device Applications”, Wichit Tantiweerasophon, Suwaree Suraprapapich, Noppadon Nuntawong, Supachok Thainoi, and Somsak Panyakeow, The 31st Electrical Engineering Conference (EECON-31), Royalhills Golf Resort and Spa, Nakornnayok, pp. 1197-1200, 29-31 October, 2008.
- 1.4.11 “Formation of $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ Ring-and-Hole Structure by Droplet Molecular Beam Epitaxy”, Naraporn Pankaow, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathamphan, RGJ-Ph.D. Congress X, The Royal Golden Jubilee Ph.D. Program, Thailand Research Fund, Jomtien Palm Beach Resort Pattaya, Chonburi, pp. 141, 3-5 April, 2009.
- 1.4.12 “The Effect of In Thickness on the Properties of InP Ring-Shape Quantum-Dot Molecules Grown by Droplet Molecular Beam Epitaxy”, Wipakorn Jevasuwan, Supachok Thainoi, Pornchai Changmuang, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathamphan, RGJ-Ph.D. Congress X, The Royal Golden Jubilee Ph.D. Program, The Thailand Research Fund, Jomtien Palm Beach Resort Pattaya, Chonburi, pp. 233, 3-5 April, 2009.
- 1.4.13 “The Formation of Self-Assembled Semiconductor Quantum Rings by Molecular Beam Epitaxy”, P. Buranasiri, Somsak Panyakeow, 9th Annual Meeting of Thailand Research Fund, Holiday Inn Resort Regent Beach, Cha-am, Petchburi, pp. 381, 15-17 October, 2009.
- 1.4.14 “Optical Polarization Characteristics of Self-Assembled Laterally-Aligned Quantum Dots”, Chanin Wissawinthanon, Chonlakorn Chiewpanich, Nan Thidar Chit Swe, Suwaree Suraprapapich, and Somsak Panyakeow, The 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32), Tawaravadee Resort Hotel, Prachinburi, Thailand, pp. 857-861, 28-30 October, 2009.
- 1.4.15 “The Role of Thickness of GaP Ultra-thin Insertion Layer on Characterization of The Structure Property of InP Quantum Dots”, Soe Soe Han, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathamphan, The 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32), Tawaravadee Resort Hotel, Prachinburi, Thailand, pp. 863-866, 28-30 October, 2009. (Best Paper Award)

- 1.4.16 “Comparison Between Two Techniques for The Growth of Self-assembled Laterally-aligned Quantum Dots: The Superlattice Template and The InGaAs Induction Layer”, Chonlakorn Chiewpanich, Chanin Wissawinthanon, and Somsak Panyakeow, The 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32), Tawaravadee Resort Hotel, Prachinburi, Thailand, pp. 915-918, 28-30 October, 2009.
- 1.4.17 “Effect of Si Effusion Cell Temperature on Si-doped p-n (311)A GaAs Photovoltaic Cell” Ongarj Tnagmettjittakul, Supachok Thainoi, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathamphan, The 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32), Tawaravadee Resort Hotel, Prachinburi, Thailand, pp. 1171-1173, 28-30 October, 2009.
- 1.4.18 “InP Ring-shaped Quantum-dot Molecules for Extended Quantum-dot Cellular Automata”, Wipakorn Jevasuwan, Poonyasiri Boonpeng, Pornchai Changmoang, Supachok Thainoi, Noppadon Nuntawong, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathamphan, The 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32), Tawaravadee Resort Hotel, Prachinburi, Thailand, pp. 1179-1182, 28-30 October, 2009. (Best Paper Award)
- 1.4.19 “Fabrication of $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ Nanohole Templates on GaAs(001)”, Poonyasiri Boonpeng, Wipakorn Jevasuwan, Pornchai Changmoang, Supachok Thainoi, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathamphan, The 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32), Tawaravadee Resort Hotel, Prachinburi, Thailand, pp. 1239-1242, 28-30 October, 2009.
- 1.4.20 “Improved Effective One-Dimensional Electronic Structure of InGaAs Quantum Dot Molecules”, Nirat Pattanemakul, Natapong Thongkamkoon, Nitidet Thudsalingkarnsakul, Naparat Siripitakchai, Supachok Thainoi, Somsak Panyakeow, and Songphol Kanjanachuchai, ECTI-CON 2010, The Empress Hotel Convention Centre, Chiang Mai, Thailand, 19-21 May, 2010.
- 1.4.21 “Effect of Substrate Position on the Formation of ZnO Nanostructures Synthesized by Thermal Evaporation of ZnO-CNTs Mixture”, Sukum Pitayapiboonpong, Songphol Kanjanachuchai, Ditsayut Phokharatkul, Adisorn Tuantranont, and Anurat Wisitsoraat, ECTI-CON 2010, The Empress Hotel Convention Centre, Chiang Mai, Thailand, 19-21 May, 2010.

1.5 บทความที่นำเสนอในการบรรยายพิเศษ (เอกสารแนบในภาคผนวก)

- 1.5.1 “Nanoelectronics and Nanophotonics”, (Invited Talk), Somsak Panyakeow, Thailand Research Fund’s annual meeting, The Ambassador City Hotel, Pattaya, 11-13 October, 2007.
- 1.5.2 “Self-Assembled Quantum Dots and Quantum Dot Molecules: Their Basic Properties and Potential Applications”, (Invited Talk), Somsak Panyakeow, The Second International Workshop on “Positioning of Single Nanostructures” at Hotel Zollernblick, Freudenstadt-Lauterbad, Germany, 15-16 November, 2007.
- 1.5.3 “Self-Assembled Quantum Dots for Nanoelectronic and Nanophotonic Applications”, (Invited Talk), Somsak Panyakeow, Nano Thailand Symposium 2008 (NTS 2008), International Conference & Exhibition, Queen Sirikit National Convention Center, Bangkok, 6-8 November, 2008.
- 1.5.4 “Semiconductor Quantum Nanostructures for Nanoelectronic and Nanophotonic Applications”, (Invited Talk), Somsak Panyakeow, Laboratoire d’Analyse et d’Architecture des Systèmes du CNRS, Toulouse, France, 14 November, 2008.
- 1.5.5 “Semiconductor Nanostructures by Droplet Epitaxy”, (Invited Talk), Somsak Panyakeow, NSTDA Annual Conference (NAC 2009), 12-14 March, 2009.
- 1.5.6 “Basic Research on Energy Efficient Nanoelectronic & Nanophotonic Devices”, (Invited Talk), Somsak Panyakeow, ONR/ONR-Global Alternative/Renewable Energy Solutions for Island Environments Pacific Forum organized by Office of Naval Research (ONR) at Westin Miyako, Kyoto, Japan, 25-27 May, 2009.
- 1.5.7 “Development of Photonic Devices & Solar Cells and Their Potential ITS Applications”, (Invited Talk), Somsak Panyakeow, presented at International Symposium on ITS Research 2009, Bangkok, 11 July, 2009.
- 1.5.8 “Quantum Dot Devices for Quantum Computation”, Somsak Panyakeow, Advanced Workshop on Spin and Charge Properties of Low Dimensional Systems, Organized by International Centre for Theoretical Physics (ICTP), Sibiu, Romania, 29 June-4 July, 2009.
- 1.5.9 “Sustainable Nanofoundation for Green Society”, Somsak Panyakeow, Plenary talk at International Conference on Processing Materials for Properties-III (PMP-III), Chaophya Park Hotel, Bangkok, 11 August, 2009.

- 1.5.10 “Spintronics”, (Invited Talk), Somsak Panyakeow, 9th Annual Meeting of Thailand Research Fund, Holiday Inn Resort Regent Beach, Cha-am, Petchburi, 15-17 October, 2009.
- 1.5.11 “EE for Better Life” (Keynote Speaker), Somsak Panyakeow, The 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32), Tawaravadee Resort Hotel, Prachinburi, Thailand, pp. K3-1-K3-3, 28-30 October, 2009.
- 1.5.12 “Semiconductor QDs and Their Applications”, (Invited Talk), Somsak Panyakeow, Southeast Asian International Advances in Micro/Nano-Technology (SAIAM-2010), International School of Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Montien Hotel, 8-11 March, 2010.

1.6 บทความที่ได้รับรางวัล (เอกสารแนบในภาคผนวก)

- 1.6.1 “Excitation-Power and Temperature-Dependent Optical Properties of Binary Quantum Dots”, Nan Thidar Chit Swe, Suwaree Suraprapapich, Chanin Wissawinthanon, and Somsak Panyakeow, and Charles W. Tu, 30th Electrical Engineering Conference, (EECON-30), Felix River Kwai Resort, Kanchanaburi, Thailand, pp. 953-956, 25-26 October, 2007. (Best Paper Award)
- 1.6.2 “Dependency of In Thickness on the Properties of Self-assembled InP Ring-Shaped Nanostructures Grown by Droplet Molecular Beam Epitaxy”, Wipakorn Jevasuwan, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathamphan, International Conference on Materials for Advanced Technologies, (ICMAT 2009), Singapore, pp. 23-24, 28 June-3 July, 2009. (Best Poster Award)
- 1.6.3 “InP Ring-shaped Quantum-dot Molecules Formed by Droplet Epitaxy Grown by Solid-source Molecular Beam Epitaxy”, Wipakorn Jevasuwan, Poonyasiri Boonpeng, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathamphan, ASIA NANOTECH CAMP 2009, Taiwan, 28 September-12 October, 2009. (Best Poster Award)
- 1.6.4 “The Role of Thickness of GaP Ultra-thin Insertion Layer on Characterization of The Structure Property of InP Quantum Dots”, Soe Soe Han, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathamphan, The 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32), Tawaravadee Resort Hotel, Prachinburi, Thailand, pp. 863-866, 28-30 October, 2009. (Best Paper Award)

- 1.6.5 “InP Ring-shaped Quantum-dot Molecules for Extended Quantum-dot Cellular Automata”, Wipakorn Jevasuwan, Poonyasiri Boonpeng, Pornchai Changmoang, Supachok Thainoi, Noppadon Nuntawong, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathamphan, The 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32), Tawaravadee Resort Hotel, Prachinburi, Thailand, pp. 1179-1182, 28-30 October, 2009. (Best Paper Award)
- 1.6.6 “Influence of Ultra-thin GaP Insertion Layer on the Structural of InP Quantum Dots Grown by Solid-source Molecular Beam Epitaxy”, Soe Soe Han, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathamphan, The First International Conference on Science and Engineering (ICSE 2009), Sedona Hotel, Yangon, Myanmar, pp. 12-16, 4-5 December, 2009. (Best Presentation Award)

1.7 ผลงานที่ดำเนินการยื่นคำขอจดทะเบียนสิทธิบัตร (เอกสารแนบในภาคผนวก)

- 1.7.1 ชุดสี่เหลี่ยมจัตุรัสของสี่ควอนตัมดอต : องค์ประกอบพื้นฐานของควอนตัมเซลลูล่าอโตมาต้า
Square Sets of Quadra Quantum Dots : Basic Elements of Quantum Cellular Automata
- 1.7.2 โซ่ควอนตัมดอตคู่; ศักยภาพเป็นท่อนำคลื่นอิเล็กตรอนเดี่ยวและสวิตช์
Bi-Quantum Dot Chains; Potential Single Electron Waveguides and Switches

ภาคผนวก

ผลงานที่ตีพิมพ์ในประเทศและต่างประเทศ

- (1) บทความวิชาการที่ตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ จำนวน 26 เรื่อง
- (2) บทความวิชาการที่ตีพิมพ์ในประเทศ จำนวน 1 เรื่อง
- (3) บทความที่นำเสนอในการประชุมวิชาการนานาชาติ จำนวน 40 เรื่อง
- (4) บทความที่นำเสนอในการประชุมวิชาการในประเทศ จำนวน 21 เรื่อง
- (5) บทความที่นำเสนอในการบรรยายพิเศษ จำนวน 12 เรื่อง
- (6) บทความที่ได้รับรางวัล จำนวน 6 เรื่อง
- (7) ผลงานที่ดำเนินการยื่นคำขอจดทะเบียนสิทธิบัตร 2 เรื่อง