1. บทนำ

โครงการวิจัยพื้นฐานสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างนาโนแบบจัดเรียงตัวเองโดยวิธีปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุลได้รับการสนับสนุนทุนเมธีวิจัยอาวุโสครั้งแรกช่วงปี 2547-2550 โครงการวิจัยเดียวกันได้รับการสนับสนุนต่อเนื่องเป็นครั้งที่สองช่วงปี 2550-2553 ในรายงานฉบับสมบูรณ์นี้จึงมีเนื้อหาที่จะเท้าความเดิมในการวิจัยช่วงแรก ต่อเนื่องด้วยเนื้อหาผลการวิจัยในช่วงที่สองโดยละเอียด

การพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กจิ๋วมีความสำคัญต่อสังคมสีเขียวยุคใหม่ที่เน้นการใช้พลังงานที่มีประสิทธิภาพและการใช้อุปกรณ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Energy Efficient and Enviroment Friendly) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีใช้งานอยู่ทั่วไปในชีวิตประจำวันทั้งปัจจุบันและอนาคต เช่น คอมพิวเตอร์ โทรทัศน์ โทรศัพท์ เครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้าน อุปกรณ์เครื่องมือต่าง ๆ ในโรงพยาบาล โรงงานอุตสาหกรรม ฯลฯ แนวคิดพื้นฐานตรงไปตรงมาของการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กจิ๋ว ก็เพื่อใช้เนื้อวัสดุที่น้อยลง ในขณะเดียวกันมีสมรรถนะสูงขึ้น 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 สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างนาโนในงานวิจัยนี้ ได้แก่ โครงสร้างควอนตัมดอต (Quantum Dots) ซึ่งจะทำให้อิสระในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเป็นศูนย์มิติ จึงทำให้พลังงานของอิเล็กตรอนถูกควอนไตน์ (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 ยังมีของเสียต่ำทำให้ไม่เกิดสภาพแวดล้อมเป็นพิษ เหมาะกับโลกในอนาคตที่ขาดแคลนพลังงาน และต้องการโลกที่สะอาดขึ้นในขณะเดียวกัน เราก็ต้องยอมรับเทคโนโลยีใหม่ ๆ ในสังคมข่าวสาร (Information Society) ที่ต้องการคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์สื่อสารความเร็วสูงเพื่อการเข้าถึงข้อมูลจำนวนมากอย่างรวดเร็ว เพื่อคุณภาพชีวิตที่

ดีขึ้น เช่น การติดต่อสื่อสารด้วย ภาพ เสียง และข้อมูลต่าง ๆ เพื่อลดการเดินทาง เพื่อแก้ปัญหาพื้นฐานต่าง ๆ เช่น การพยากรณ์อากาศ อุทกภัย การสาธารณะสุข การพาณิชย์ฯลฯ อิเล็กทรอนิกส์ในระดับนาโน (Nanoelectronics) จึงกลายเป็นม้าใช้ (Working Horse) ที่สำคัญสำหรับเทคโนโลยีในยุคหน้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน นอกจากจะใช้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (Electron Transport) แล้ว ยังอาศัยแสงหรือโฟตอน (Photon) มากขึ้นด้วย เช่น การใช้แสงเลเซอร์ติดต่อสื่อสารในระบบเส้นใยแสง (Optical Fibre Communication) ซึ่งมีจุดเด่นหลายอย่าง เพราะการใช้อิเล็กตรอนซึ่งเป็นอนุภาคที่มีประจุนั้นจะเกิดการเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าได้ ทำให้เกิดการรบกวนสัญญาณได้ แต่แสงหรือโฟตอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุจึงไม่เกิดสัญญาณรบกวน ทำให้การติดต่อสื่อสารด้วยแสงมีความชัดเจน นอกจากนี้แสงยังมีความเร็วสูง สามารถทำงานที่ความถี่สูง ๆ ได้ดี จึงมีช่องสัญญาณจำนวนมหาศาล ดังนั้นการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสงที่มีขนาดเล็กจิ๋วในระดับนาโน หรือนาโนโฟโตนิกส์ (Nanophotonics) จึงเป็นเป้าหมายในการวิจัยของโครงการนี้ด้วย เช่น การพัฒนาเลเซอร์สารกึ่งตัวนำที่ใช้โครงสร้างควอนตัมดอต การพัฒนาตัวตรวจรับแสง และเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้โครงสร้างควอนตัมดอตเป็นองค์ประกอบในการดูดกลืนแสงที่มีพลังงานโฟตอนที่มีค่าจำเพาะเป็นต้น

การวิจัยในช่วงปี 2547-2550 เป็นการพัฒนาเทคนิคการปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุลแบบปลูกกลบด้วยชั้นบางและปลูกซ้ำ (Thin-capping-and-regrowth) เพื่อสร้างควอนตัมดอตโมเลกุล (Quantum Dot Molecules) ขั้นตอนเริ่มต้นได้แก่ การปลูกควอนตัมดอตด้วยเทคนิคมาตรฐานแบบ Stranki-Krastanov (S-K) แล้วจึงปลูกกลบควอนตัมดอตด้วยชั้นกลบบาง ๆ เพื่อให้ควอนตัมดอตสลายตัวและยืดออกจนเกิดหลุมตรงบริเวณกลางเมื่อมีการปลูกซ้ำ ควอนตัมดอตใหม่จะเกิดขึ้นบริเวณหลุมก่อน และเริ่มมีควอนตัมดอตอีกจำนวนหนึ่งเกิดขึ้นรอบ ๆ ควอนตัมดอตแรกด้วยรูปแบบที่ควบคุมรูปถึงได้ตามเงื่อนไขต่าง ๆ ทำให้เกิดควอนตัมดอตโมเลกุลแบบต่าง ๆ เช่น ควอนตัมดอตคู่ ควอนตัมดอตสี่ดอต จนถึงควอนตัม 10-20 ดอต ในแต่ละควอนตัมดอตโมเลกุล ส่งผลให้ได้ควอนตัมดอตความหนาแน่นสูง เพื่อการประยุกต์ในโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ได้ การวิจัยในช่วงดังกล่าวยังมีการศึกษาวิธีการปลูกควอนตัมดอตแบบเรียงตัวเป็นแนวตรงโดยอาศัยการยืดโครงสร้างควอนตัมดอตให้เป็นแม่แบบในแนวผลึก $[1\bar{1}0]$ แล้วจึงปลูกควอนตัมดอตเป็นแนวตรง ซึ่งมีศักยภาพในการประยุกต์ด้วยนาโนอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้การออกแบบขั้วโลหะที่เชื่อมต่อกับควอนตัมดอตกระทำได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเทคนิคการปลูกควอนตัมดอตบนฐานผลึกที่มีโครงข่ายตัดขวาง (Cross Hatched Substrates) ทำให้เกิดควอนตัมดอตที่เรียงตัวเป็นแนวตรงที่ตัดขวางกันเป็นมุมฉากในแนวผลึก [110] และ $[1\bar{1}0]$ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่จำเป็นในการออกแบบวงจรนาโนอิเล็กทรอนิกส์

ส่วนการวิจัยในช่วงปี 2550-2553 นี้จะเป็นการศึกษาโครงสร้างควอนตัมดอตแบบต่าง ๆ ด้วยเทคนิค S-K อย่างต่อเนื่อง เช่น ควอนตัมดอตคู่แบบลูกโซ่ (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) ซึ่งมีศักยภาพในงานด้านควอนตัมเซลลูล่าออโต้มาต้า (Quantum Cellular Automata; QCA) และอาจใช้เป็นควอนตัมบิท (Quantum Bits) เพื่อการออกแบบเป็นวงจรตรรก และหน่วยความจำในคอมพิวเตอร์แบบใหม่ได้ กระบวนการเตรียมควอนตัมดอตสี่ดอตดังกล่าวเป็นเทคนิคใหม่ จึงได้ยื่นจดสิทธิบัตรไว้ในปลายปี 2551

งานวิจัยส่วนใหญ่ใช้สารประกอบกึ่งตัวนำชนิดอินเดียมอาเซนายด์ (InAs) เพื่อทำโครงสร้างระดับนาโน โดยปลูกบนฐานผลึกแกลเลี่ยมอาร์เซนายด์ (GaAs) ด้วยอาศัยกลไกการปลดปล่อยแรงเครียด (Strain Relaxation) ของโครงข่ายผลึกที่มีขนาดแตกต่างกัน 7 % ในงานวิจัยช่วงปี 2550-2553 นี้ยังมีการปลี่ยนมาใช้สารประกอบกึ่งตัวนำชนิดอินเดียมฟอสฟายด์ (InP) มาทำโครงสร้างระดับนาโนด้วย ด้วยคุณสมบัติของวัสดุที่แตกต่างไปของอินเดียมฟอสฟายด์ ทำให้สามารถปลูกโครงสร้างควอนตัมดอตวงแหวนได้ด้วย มีการศึกษารายละเอียดของการควบคุมจำนวนควอนตัมดอตต่อวงแหวนให้มีค่าตามต้องการ เช่น ควอนตัมดอตวงแหวนที่มีจำนวน 8 ดอต (Octa Quantum Dots; DQDs) ซึ่งสามารถใช้งานแบบ Extended Quantum Cellular Automata (EQCA) ทำให้ควอนตัมบิทที่ใช้ควอนตัมวงแหวนที่มีจำนวน 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 เพราะขนาดที่เล็กจิ๋วคล้ายอะตอมเสมือนจะมีระดับพลังงานแบบควอนไตน์ ทำให้ความหนาแน่นของสถานะ (Density of States) มีค่าเฉพาะที่สูงมาก การดูดกลืนแสงจึงมีประสิทธิภาพดี โดยเฉพาะแสงความยาวคลื่นยาวในสเปคตรัมของแสงอาทิตย์ (Solar Spectrum) งานวิจัยเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดควอนตัมดอตโมเลกุล (Quantum Dot Molecule Solar Cells) นี้เป็นงานที่มีเอกลักษณ์ และอาจนำไปเป็นต้นแบบในงานด้านวิศวกรรมศาสตร์ได้ แต่ยังมีปัญหาในด้านเทคนิคอีกหลายอย่างที่ต้องพัฒนา เช่น การสร้างโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีหัวต่อพีเอ็นที่มีคุณภาพสำหรับการใช้งานจริง โดยเฉพาะกับแสงความเข้มสูง

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