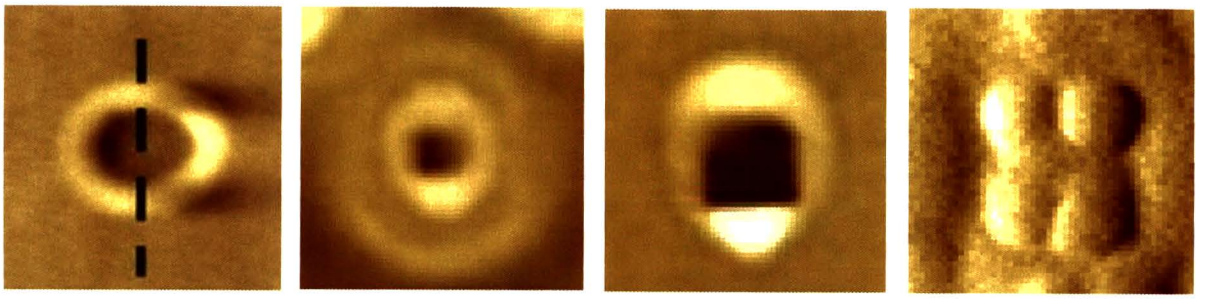
การควบคุมเงื่อนไขการปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุลแบบหยด ได้แก่ อุณหภูมิทั้งขั้นตอนการหยด (Droplet) และการก่อตัวเป็นผลึก (Crystallization) ปริมาณของหยดในระดับโมโนเลเยอร์ (Mono Layer : ML) อัตราการปลูก (Deposition Rate) ความดันของธาตุกลุ่ม V ตลอดจนชนิดของธาตุกลุ่มที่ III และ V จะทำให้เกิดสารกึ่งตัวนำโครงสร้างนาโนแบบวงแหวนรูปลักษณ์ต่าง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



(a) (b) (c) (d)

รูปที่ 3 สารกึ่งตัวนำโครงสร้างนาโนแบบวงแหวนชนิดต่าง ๆ ที่ปลูกโดยเทคนิค Droplet Epitaxy และใช้เป็นแม่แบบในการปลูกควอนตัมดอตสี่ดอต

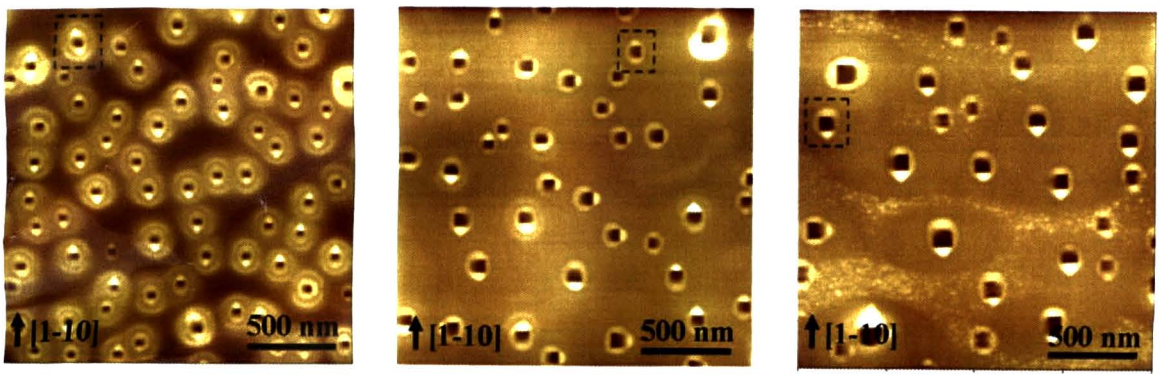
จุดเด่นของเทคนิคการปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุลแบบหยดนี้ได้แก่ การเตรียมโครงสร้างระดับนาโนที่อุณหภูมิต่ำกว่าแบบ S-K เพราะใช้อุณหภูมิในการหยดเพียง 100-250 °C และใช้อุณหภูมิในการก่อตัวของผลึกที่ 200-300 °C ในขณะที่เทคนิค S-K จะใช้อุณหภูมิสูงกว่าในช่วง 450-600 °C นอกจากนี้เทคนิคแบบหยดยังเป็นกลไกการเกิดเนื้อผลึกที่บริเวณขอบของหยด 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 ทำให้ได้โครงสร้างระดับนาโนเมตรแบบต่าง ๆ โดยเฉพาะควอนตัมวงแหวน เพราะการเริ่มต้นก่อตัวเป็นผลึกของหยดจะเกิดขึ้นบริเวณขอบก่อนเนื้อธาตุกลุ่ม III บริเวณกึ่งกลางจะเคลื่อนที่มายังบริเวณของวงแหวน ทำให้เกิดหลุมตรงกลางของโครงสร้าง หลุมนาโน (Nanoholes) อาจมีลักษณะกลม รี หรือ เหลี่ยม แล้วแต่ชนิดของธาตุกลุ่ม III-V ที่ใช้ ซึ่งอาจให้กลไกการเคลื่อนที่ของธาตุกลุ่ม III ภายในหยดแบบไม่สมมาตร (Anisotropy) ส่งผลให้รูปลักษณ์ของหลุมเป็นวงรีหรือเหลี่ยมได้

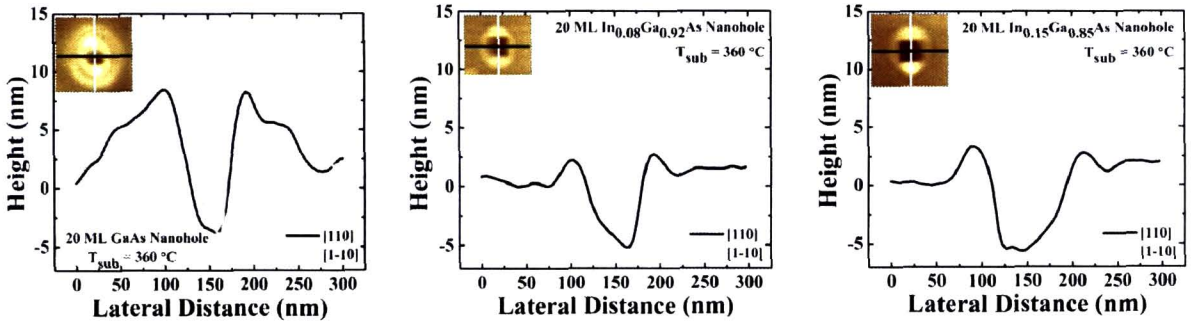
ในกรณีของหยดของ Ga ควอนตัมวงแหวนชนิด GaAs จะลักษณะเป็นวงแหวนคู่ที่มีจุดศูนย์กลางเดียวกัน (Concentric Double Rings) และจะเปลี่ยนไปเป็นวงแหวนเดี่ยวเมื่อใช้หยดที่มีส่วนผสมของ InGa เพิ่มเข้ามา เมื่อปริมาณส่วนผสมของ In มีมากขึ้นจาก 0 เป็น 8 % และ 15 % หลุมนาโนจะเริ่มมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม ตามที่แสดงในรูปที่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



(a) (b) (c)

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

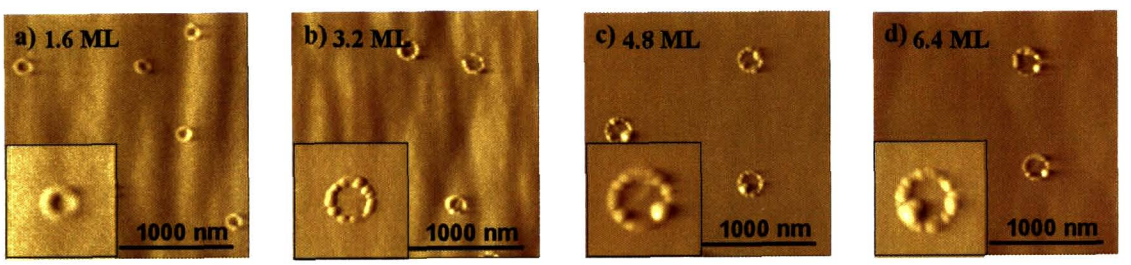
เมื่อศึกษาภาพตัดขวาง (Profiles) ของหลุมนาโนในรูปที่ 4 ทั้งในแนวผลึก [110] และ $[1\bar{1}0]$ จะพบว่ากรณีวงแหวนคู่มีรูปร่างเป็นตัว V แต่กรณีของวงแหวนเดี่ยวที่มีหลุมสี่เหลี่ยมจะเริ่มมีรูปร่างเป็นตัว U และมีความลึกของหลุมที่ชัดเจนขึ้น โดยเฉพาะในแนวผลึก $[1\bar{1}0]$ ที่มุมสี่เหลี่ยมของหลุมนาโนจะเป็นจุดที่มีแรงเครียด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



(a) (b) (c)

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

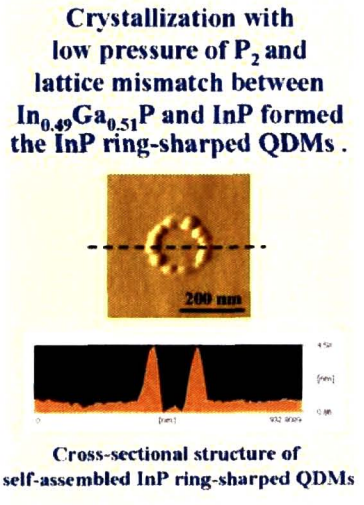
เทคนิคการปลูกโครงสร้างระดับนาโนเมตรด้วยวิธี Droplet Epitaxy นั้น เมื่อใช้กับกรณีของ InP ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีค่าแถบพลังงานโตกว่า InAs และ InGaAs จะมีความแตกต่างกันในรูปร่างของวงแหวนที่ได้ กล่าวคือ วงแหวนจะมีลักษณะรูปร่างเป็นวงกลม (Circular Shape) มีความเป็นสมมาตรทั้ง 2 แกนผลึก [110] และ [1 $\bar{1}$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



(a) (b) (c) (d)

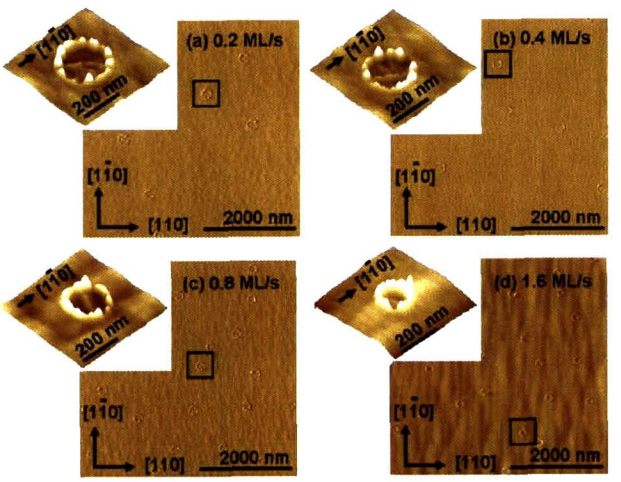
รูปที่ 6 โครงสร้างระดับนาโนเมตรที่เตรียมจากสาร InP ที่มีลักษณะรูปร่างเป็นควอนตัมวงแหวน และควอนตัมดอตวงแหวน ตามปริมาณสารที่เพิ่มขึ้นจาก 1.6 ML เป็น 3.2 , 4.8 และ 6.4 ML ตามลำดับ

ควอนตัมดอตวงแหวนเป็นโครงสร้างระดับนาโนเมตรที่น่าสนใจในเชิงประยุกต์ เพราะนอกจากจะมีศักยภาพในด้านแม่เหล็ก และการใช้งานด้านกระแสคงกระพัน (Persistant Current) เพื่อเป็นหน่วยความจำแล้ว การเกิดควอนตัมดอตบนวงแหวนนั้นอาศัยความแตกต่างของโครงข่ายผลึกระหว่าง InGaP (สัดส่วนของ In : Ga มีค่า 41 : 59) และ InP ทำได้ควอนตัมดอตที่มีขนาดเท่า ๆ กันในแนวผลึกหนึ่ง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 โครงสร้างควอนตัมดอตวงแหวนที่เกิดจากความแตกต่างของโครงข่ายผลึกระหว่าง InGaP และ InP โดยมีดอตที่มีขนาดเท่า ๆ กันในแนวผลึกหนึ่ง ๆ

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



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