# บทที่ 2

# ทฤษฎีและความรู้พื้นฐาน

## 2.1 ควอนตัมดอต

ขนาดมีผลต่อสมบัติของสารกึ่งตัวนำ โดยทั่วไปสมบัติต่างๆของสารกึ่งตัวนำเช่น สมบัติการนำไฟฟ้า สมบัติการนำความร้อน สามารถอธิบายได้โดยใช้อิเล็กตรอนเป็นหลัก อิเล็กตรอนในที่นี้จะพิจารณาเป็นอนุภาคขนาดเล็กที่มีประจุลบ แต่เมื่อสสารมีขนาดเล็กลงมาก อิเล็กตรอนซึ่งเป็นอนุภาคพื้นฐานของทุกอะตอมจะประพฤติตัวคล้ายคลื่นตามกลศาสตร์ควอนตัม ทำให้สมบัติของสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลงไปเดิม สสารทุกชนิดสามารถประพฤติตัวเป็นคลื่นได้เมื่อมีขนาดที่เหมาะสมตามหลักทวิภาพของอนุภาค-คลื่น (wave-particle duality) ของหลุยส์ เดอ บรอยล์ (Louis de Broglie) โดยยิ่งมีขนาดใหญ่เท่าใดโอกาสที่จะแสดงคุณสมบัติแบบคลื่นก็มีน้อยลง เนื่องจากความยาวคลื่นของเดอบรอยล์มีขนาดที่เล็กมาก แต่สำหรับอนุภาคขนาดเล็กมาก เช่น อิเล็กตรอน ค่าความยาวคลื่นของเดอบรอยล์จะอยู่ในระดับนาโนเมตร อิเล็กตรอนจึงแสดงพฤติกรรมคล้ายคลื่นได้โดยเฉพาะในโครงสร้างนาโน เช่น บ่อควอนตัม เส้นควอนตัม และควอนตัมดอต เป็นต้น อิเล็กตรอนในโครงสร้างขนาดเล็กจะเกิดควอนตัมคอนไฟน์เมนต์ (Quantum confinement) คือ ความมีอิสระในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะถูกจำกัด อิเล็กตรอนจะถูกบังคับให้อยู่สถานะพลังงานบางสถานะ (state) เท่านั้น ผลที่ตามมาคือระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนจะไม่ต่อเนื่อง (discrete energy level) สามารถอธิบายได้ตามหลักกลศาสตร์ควอนตัม เช่น ในกรณีของอนุภาคในกล่อง ลักษณะของความหนาแน่นของสถานะ (Density of State) หรือ DOS ของโครงสร้างต่างๆในฟังก์ชันของพลังงานแสดงดังรูป 2.1 ความแตกต่างของ DOS ในแต่ละโครงสร้างขึ้นอยู่กับระดับการถูกจำกัดของอิเล็กตรอน ในโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่ (bulk) อิเล็กตรอนมีอิสระในการเคลื่อนที่มาก DOS ปรากฏในลักษณะที่ต่อเนื่อง ในขณะที่ DOS ของโครงสร้างนาโนจะปรากฏในลักษณะที่ไม่ต่อเนื่อง เนื่องจากอิเล็กตรอนถูกจำกัดอิสระในการเคลื่อนที่ในแต่ละมิติ โดยถูกจำกัด 1 มิติในบ่อควอนตัมหรือฟิล์มควอนตัม ถูกจำกัด 2 มิติในลวดควอนตัม และถูกจำกัดทั้ง 3 มิติในควอนตัมดอต ซึ่งเป็นการถูกจำกัดโดยสมบูรณ์คล้ายกับอิเล็กตรอนในอะตอม ควอนตัมดอตในบางครั้งจึงถูกเรียกว่าอะตอมเทียม และเป็นในโครงสร้างที่ได้รับความสนใจมากในปัจจุบัน

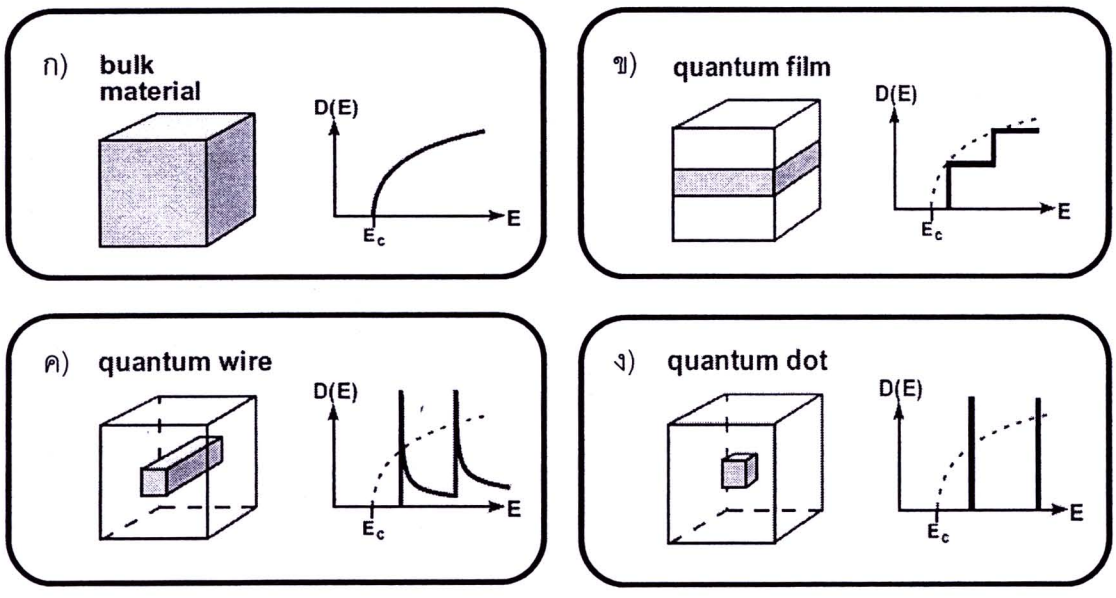
ควอนตัมดอตเป็นโครงสร้างขนาดนาโนเมตรทุกมิติประกอบขึ้นจากอะตอมของสาร มีคุณสมบัติเฉพาะตัวทั้งด้านการเปล่งแสงและการนำไฟฟ้า ตามลักษณะของ DOS และระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในโครงสร้าง DOS ของควอนตัมดอตในกรณีอย่างง่ายที่สุดโดยคิดควอนตัมดอตเป็นกล่องทรงสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก ทำให้สามารถเขียนสมการ Schrödinger และใช้เงื่อนไขขอบเขตของรูปทรงร่วมกับการแก้สมการอนุพันธ์กำลังสอง ถูกแสดงได้ในสมการ 2.1 [37]

$$D_{QD}(E) = 2\sum_{l,m,n}\delta\left\{E - \frac{\bar{h}^2\pi^2}{2m^*}\left[\left(\frac{n_x}{L_x}\right) + \left(\frac{n_y}{L_y}\right) + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)\right]\right\} \qquad 2.1$$

โดย $m^*$ คือมวลประสิทธิผลของอิเล็กตรอนใน conduction band, $L_x$, $L_y$ และ $L_z$ คือขนาดของ ควอนตัมดอตในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ, $n_x$, $n_y$ และ $n_z$ คือเลขควอนตัมหลัก (Principal quantum number) และ E คือ ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนดังสมการที่ 2.2

$$E = \frac{\bar{h}^2\pi^2}{2m^*}\left[\left(\frac{n_x}{L_x}\right) + \left(\frac{n_y}{L_y}\right) + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)\right] \qquad 2.2$$

ค่า D(E) ของควอนตัมดอตในรูปที่ 2.1 d) จะแตกต่างจากโครงสร้างอื่นในรูป 2.1 ก) – ค) คือ มีลักษณะเป็นดิแรกเดลตาฟังก์ชัน (Dirac delta function) คือไม่มีโค้งการกระจาย (dispersion curve) ที่บ่งบอกการมีอยู่ของสถานะในระดับพลังงานอื่นใกล้เคียง ลักษณะดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความไม่มีอิสระในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทั้งสามมิติ นอกจากนี้ยังมีควอนตัมดอตในรูปทรงอื่นๆเช่นรูปทรงกลม รูปพีรามิต




**รูปที่ 2.1** โครงสร้างและ DOS ของ ก) ก้อนผลึก ข) บ่อควอนตัม ค) ลวดควอนตัม และ ง) ควอนตัมดอต [38]

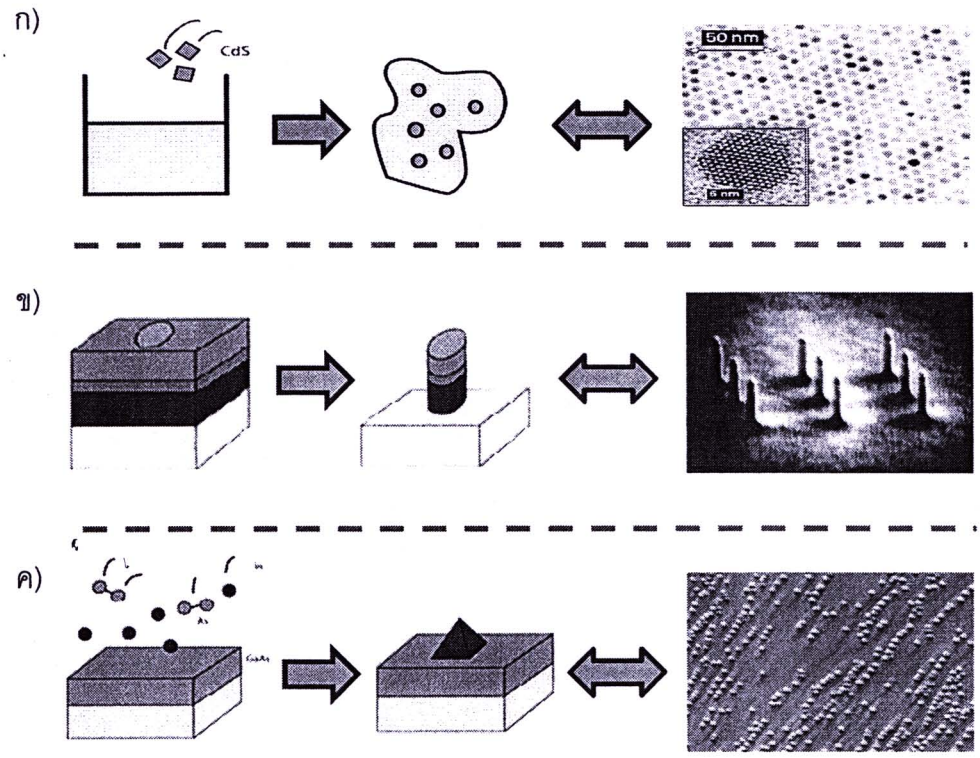
(pyramid) หรือรูปทรงเลนส์ (lens) การคำนวณจะมีความซับซ้อนมากขึ้นและมีเงื่อนไขขอบเขตที่แตกต่างกันออกไป

ระดับพลังงานที่ไม่ต่อเนื่องรวมถึงการมีอยู่อย่างชัดเจนของอิเล็กตรอนในบางระดับพลังงานของควอนตัมดอต การกระตุ้นโดยศักย์ไฟฟ้าหรือแสงเพียงเล็กน้อยก็ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าหรือการเปล่งแสงขึ้น โดยแสงที่ได้เป็นแสงที่มีความเข้มสูง ควอนตัมดอตจึงมีค่าความไวไฟฟ้าและการเปล่งแสงที่ดี คุณสมบัติที่สำคัญอีกประการของควอนตัมดอตคือการปรับเปลี่ยนค่าช่องว่างแถบพลังงาน (band gap) โดยทั่วไปการนำไฟฟ้าจะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนจากวาเลนซ์แบนด์กระโดดขึ้นไปยังชั้นว่างเปล่าที่เรียกว่าแถบตัวนำ (conduction band) ซึ่งทำให้เกิดโฮล (hole) ในแถบเวเลนซ์ (valence band) และอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นในชั้นแถบการนำ ระยะห่างระหว่างคู่อิเล็กตรอนและหลุมที่เกิดขึ้นเรียกว่า "รัศมีเอกซิตอนบอร์" (exciton bohr radius) ค่านี้เป็นตัวกำหนดสมบัติการนำไฟฟ้ารวมถึงสมบัติการเปล่งแสง ซึ่งค่านี้เองก็ขึ้นอยู่กับขนาดและสัดส่วนของสารในควอนตัมดอต

จากคุณสมบัติที่กล่าวมาควอนตัมดอตจึงสามารถนำไปใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์อย่างหลากหลาย เช่น ตัวตรวจจับกระแสที่มีความไวสูง ทำแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ หรือใช้ในการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ เป็นต้น ซึ่งมีใช้งานอยู่จริงในปัจจุบัน

## 2.2 การปลูกควอนตัมดอต

การสร้างหรือปลูกควอนตัมดอตทำได้ในหลายวิธี เช่น การสังเคราะห์โดยปฏิกิริยาทางเคมี เช่น การเกิดผลึกขนาดเล็กของ CdSe บนแก้วดังรูปที่ 2.2 ก), การสร้างควอนตัมดอต จากแม่พิมพ์เทียมโดยกระบวนการลิโธกราฟีของโครงสร้างฟิล์มบางแล้วทำการกัดออก เช่น ควอนตัมดอตแนวตั้งจาก AlGaAs/InGaAs/AlGaAs double barrier heterostructure (รูปที่ 2.2 ข)) และการเกิดขึ้นเองของควอนตัมดอตในกระบวนการเกิดแบบประกอบด้วยตัวเอง (self-assembled) ในรูปที่ 2.3 ค) โดยแต่ละวิธีที่กล่าวมามีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน สำหรับการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้วิธีการเกิดขึ้นเองของควอนตัมดอตแบบประกอบตนเองแบบ Stranski-Krastanow (SK) เป็นหลัก




**รูปที่ 2.2** วิธีการปลูกคอนตัมดอตในหลายวิธี ก) การสร้างผลึกขนาดเล็ก (microcrystallities) บนแก้ว ข) การใช้แบบพิมพ์เทียม ค) การเกิดควอนตัมดอตแบบประกอบตนเอง [39, 40, 41]

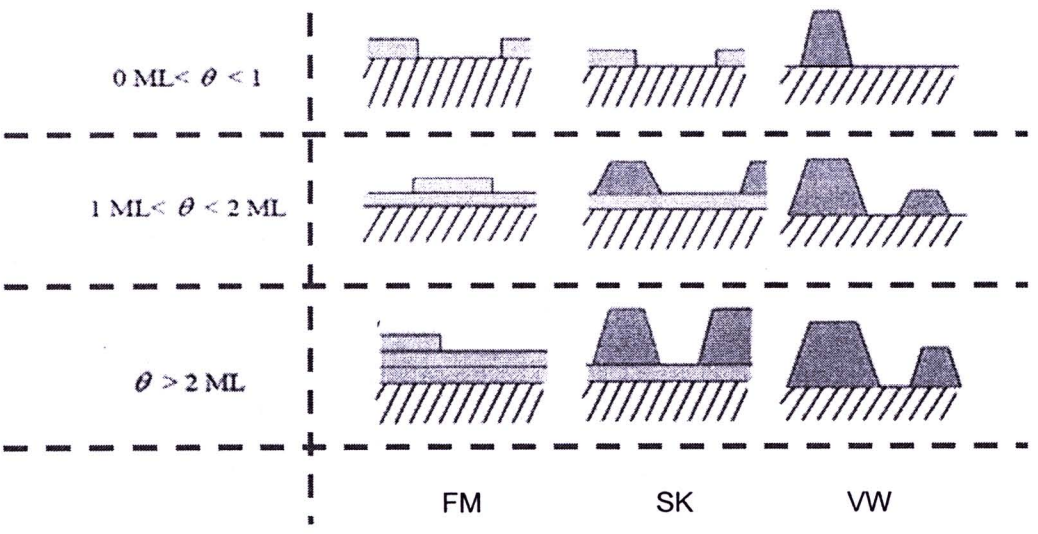
2.2.1 การปลูกควอนตัมดอต โดยวิธี Stranski-Krastanow

การปลูกชั้นของสารชนิดหนึ่งลงบนสารอีกชนิดหนึ่งโดยวิธีเอพิแทกซี (epitaxy) หรือ เฮเทอโรเอพิแทกซี (heteroepitaxy) ความแตกต่างของค่าคงที่โครงผลึก (lattice constant) เป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงดังแสดงในรูปที่ 2.3 การปลูกชั้นของสารที่มีค่าคงที่โครงผลึกต่างกัน (น้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 %) การปลูกชั้นของสารจะเป็นแบบ 2 มิติโดยตลอด กล่าวคือ ผลึกจะก่อตัวแบบชั้นต่อชั้น (layer to layer) หรือการปลูกแบบ Frank-van der Merwe (FM) บนชั้นของสารอีกชนิดหนึ่ง สำหรับสารที่มีค่าคงที่โครงผลึกต่างกัน (มากกว่า 10%) ชั้นของสารที่เกิดขึ้นจะเป็นในลักษณะ 3 มิติ หรือเกาะ (island) ตั้งแต่เริ่มแรกของการปลูก การปลูกชนิดนี้เรียกว่าการปลูกแบบ Volmer-Weber (VM) ในกรณีที่สามารถกำหนดความแตกต่างให้พอดีไม่มากหรือน้อยเกินไป (5% $<\varepsilon<$ 10%) การปลูกจะปรากฏในรูปแบบผสม คือ เริ่มแรกจะเป็นแบบ 2 มิติและพัฒนาต่อไปเป็นแบบ 3 มิติ เรียกว่า การปลูกแบบ Stranski-Krastanow (SK)

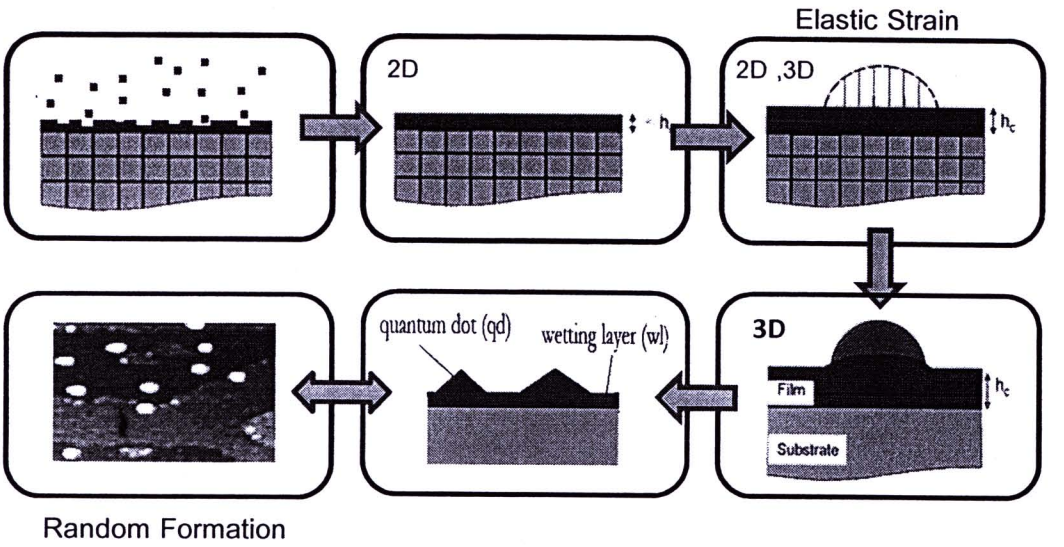
กลไกของการเกิดควอนตัมดอตในแบบ SK ดังแสดงในรูป 2.4 เริ่มต้นจากการปลูกสารชนิดหนึ่งลงบนสารอีกชนิดหนึ่ง ในที่นี้คือการปลูก InAs บน GaAs เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่ให้ความสนใจในการ

เกิดควอนตัมดอต ค่าคงที่ผลึกของ InAs และ GaAs จะแตกต่างกันประมาณ 7 % ในชั้นแรกๆของการปลูกจะเป็นการปลูกแบบ 2 มิติ สารที่ทำการปลูกคือ InAs จะถูกบังคับให้การก่อตัวเป็นไปในแนวเดียวกับ GaAs ผลที่ได้คือเกิดความเครียดขึ้นในชั้นสาร InAs ซึ่งในที่นี้คือความเครียดแบบอัด (compressive strain) เมื่อความหนาของชั้นสารเพิ่มขึ้นเรื่อยๆความเครียดก็จะเพิ่มขึ้นและสะสมในรูปแบบของพลังงานความเครียดยืดหยุ่น (elastic strain energy) จนถึงความหนาค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่า ค่าความหนาวิกฤติ (critical thickness) ค่าความเครียดจะเริ่มถึงจุดอิ่มตัวและเกิดการผ่อนคลายขึ้นเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นอีกในลักษณะของการก่อตัวของเกาะเล็ก ๆ ซึ่งคือ ควอนตัมดอตแบบประกอบตนเอง (Self-Assembled Quantum Dot)

ควอนตัมดอตแบบประกอบตนเองสามารถสร้างได้โดยการอาศัยเครื่อง MBE หรือเครื่อง Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD) พร้อมกันนี้ยังสามารถเลือกใช้ระบบของสารที่จะเกิดได้หลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็น III-V,II-VI และ IV-IV ในส่วนของคุณสมบัติของดอตทางด้านขนาด, รูปร่าง , ส่วนประกอบและความหนาแน่นสามารถกำหนดได้อย่างยืดหยุ่นโดยอาศัยเงื่อนไขการปลูก เช่น อุณหภูมิซับสเตรต,อัตราส่วนฟลักซ์ของสารหมู่ III และสารหมู่ V, ความหนาชั้นสารที่ปกคลุม (monolayer coverage) [42] รวมถึงอัตราการปลูกในการปลูก InAs ควอนตัมดอต และ InGaAs ควอนตัมดอต [43] ล้วนมีผลต่อขนาดและความหนาแน่นของควอนตัมดอตทั้งสิ้น โดยสามารถอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวได้โดยอาศัยปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนของผิวหน้าและกระบวนการแพร่ซึม (diffusion) นอกจากนี้การกลบทับ(capping) [44] รวมถึงการปลูกเกินปกติ (overgrowth) [45] ก็ส่งผลต่อคุณสมบัติของควอนตัมดอตเช่นกัน




**รูปที่** 2.3 โหมดที่เป็นไปได้ของการปลูกผลึกในการปลูกแบบเอพิแทกซี [41]




**รูปที่** 2.4 แสดงขั้นตอนการเกิดควอนตัมดอตแบบ SK ในการปลูกแบบเอพิแทกซี โดยควอนตัมดอตมีการเกิดแบบสุ่ม (random) [13]

## 2.3 การกำหนดตำแหน่งของควอนตัมดอต

ข้อจำกัดที่สำคัญของควอนตัมดอตแบบประกอบตัวเองคือ การเกิดขึ้นมาอย่างไม่เป็นระเบียบ การประยุกต์ใช้ในงานบางอย่าง เช่น Single electron transistor [46], Quantum cellular automata [47] จำเป็นต้องใช้ควอนตัมดอตที่เรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ความต้องการใช้ควอนตัมดอตให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดจึงนำไปสู่ความพยายามในการควบคุมตำแหน่งควอนตัมดอต

วิธีการจัดเรียงควบคุมตำแหน่งการเกิดของควอนตัมดอตแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ

1. การใช้แม่พิมพ์บังคับให้เรียง (Force alignment template)
2. การเรียงด้วยตนเองด้วยแม่พิมพ์วิศวกรรมความเครียด (Self-alignment strain-engineering pattern)

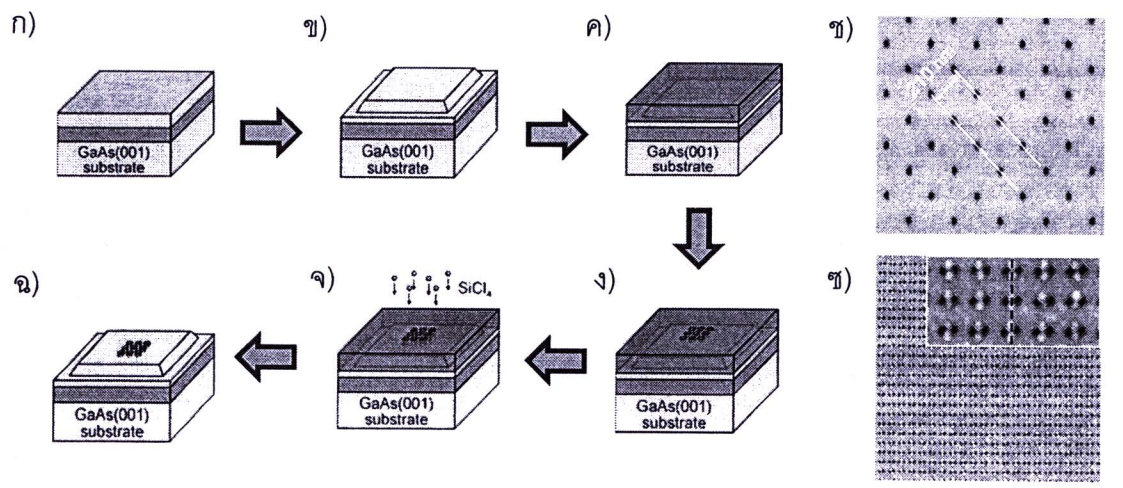
### 2.3.1 การใช้แม่พิมพ์บังคับให้เรียง (Force alignment template)

การใช้แม่พิมพ์ที่เกิดจากการบังคับให้เกิด คือการทำลวดลายให้ได้ตามที่ต้องการบนซับสเตรตก่อนจะทำการปลูกควอนตัมดอต วิธีดังกล่าวได้แก่

#### *2.3.1.1 ซับสเตรตที่มีลวดลายเบื้องต้น (Pre-patterned substrate)*

การทำซับสเตรตที่มีลวดลายก่อนเป็นกระบวนการทำลวดลาย (pattern) บนซับสเตรตก่อนที่จะทำการปลูกควอนตัมดอตเพื่อใช้ลวดลายดังกล่าวในการกำหนดตำแหน่งการเกิดของควอนตัมดอต ขั้นตอนทั่วไปสามารถอธิบายได้ดังนี้ เริ่มต้นจากการเคลือบน้ำยาโฟโตรีสิส (photoresist) ไว้ด้านบนของ

ชิ้นงาน จากนั้นจึงอาศัยการทำลิโธกราฟีด้วยลำแสงต่างๆเช่น ลำอิเล็กตรอน (electron beam) [48] หรือ ลำไอออน (ion-beam) [49] ถ่ายทอดและสร้างลวดลายขึ้นบนชิ้นงาน เมื่อผ่านกระบวนการลิโทกราฟี (lithography) คุณสมบัติของโฟโตรีสิสในตำแหน่งที่ถูกแสงและไม่ถูกแสงจะมีคุณสมบัติต่างกัน เช่นในโฟโตรีสิสชนิดลบ (negative) ตำแหน่งที่ถูกแสงจะมีการแข็งตัวขึ้นเมื่อเทียบกับตำแหน่งที่ไม่ถูกแสง ซึ่งตรงข้ามกับโฟโตรีสิสชนิดบวก (positive) จากนั้นจึงกัดออกด้วยน้ำยาเคมีบางชนิดซึ่งจะกัดโฟโตรีสิสออกในบางตำแหน่งคือตำแหน่งของสารที่ไม่แข็งตัวเท่านั้น ทำให้ได้ลวดลายที่เรียงตัวอย่างเป็นระเบียบบนชั้นแผ่นฐาน ดังแสดงในรูป 2.5 ขั้นตอนสุดท้ายจึงทำการปลูกควอนตัมดอตลงไปบนชิ้นงานอีกทีหนึ่ง ควอนตัมดอตจะเริ่มก่อตัวอย่างไม่เท่ากันบนชิ้นงาน โดยจะก่อตัวในบริเวณที่ทำลวดลายไว้ก่อนบริเวณอื่น ทำให้ได้ควอนตัมดอตเรียงตัวตามที่ต้องการ วิธีการนี้มีข้อจำกัดในเรื่องความละเอียด ความแม่นยำในกระบวนการลิโธกราฟีรวมถึงความสามารถในการถ่ายโอนแม่พิมพ์ เนื่องจากกระบวนการมีความซับซ้อนจึงอาจก่อให้เกิด defect ขึ้นระหว่างขั้นตอนการทำ

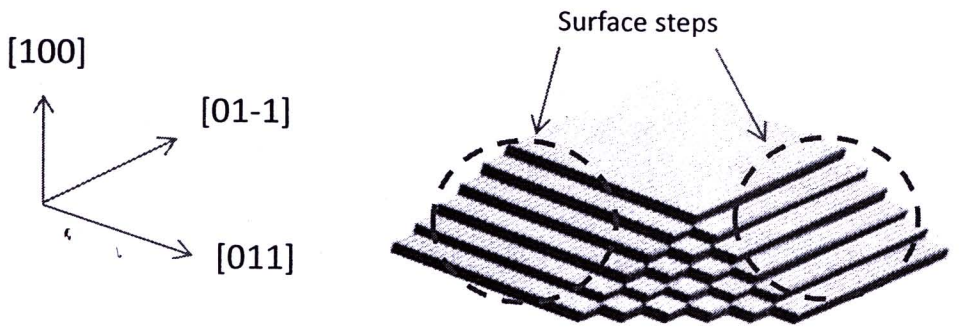



**รูปที่** 2.5 ตัวอย่างขั้นตอนการทำ pre-pattern substrate ด้วยลำอิเล็กตรอนเพื่อทำแม่พิมพ์สำหรับเรียงควอนตัมดอต โดยเริ่มต้นจากรูป ก) ปลูก AlGaAs ลงบน GaAs (001) ซับสเตรต ข)ใช้ลิโทกราฟีและการกัดออกเพื่อให้ได้ผิวเรียบและโครงสร้างที่ต้องการ ค) เคลือบผิวด้วยสาร PMMA ซึ่งเป็นโฟโตรีสิสชนิดนึง ง) ทำลวดลายบนผิวหน้าด้วยลิโทกราฟีแบบลำอิเล็กตรอน จ) กัดออกด้วยสารกัด( etchant) $SiCl_4$ ฉ) โครงสร้างที่สมบูรณ์พร้อมลวดลายสำหรับปลูกควอนตัมดอต ช) ภาพ AFM ลวดลายที่ได้จากการเตรียมในขั้นตอน ก-ฉ และ ซ) ภาพแสดงการเรียงตัวของควอนตัมดอตที่เกิดขึ้นบนแม่พิมพ์ [48]

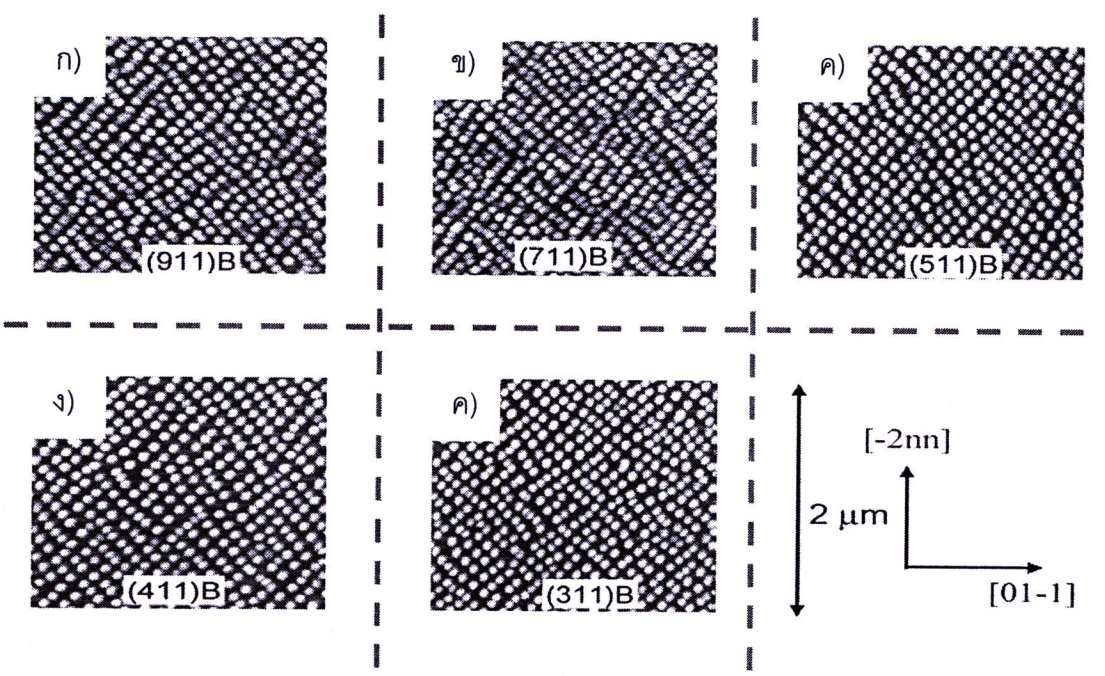
*2.3.1.2 ซับสเตรตดัชนีสูง (High index substrate)*

สำหรับอีกวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการจัดเรียงควอนตัมดอตคือการใช้ซับเสตรตดัชนีสูง (High index substrate) (n11) เช่น ซับสเตรต GaAs (311) B, GaAs (411) B, GaAs (511) B เป็นต้น ซับสเตรต

เหล่านี้เป็นซับสเตรต ชนิดพิเศษซึ่งมีทิศทางการตัดแผ่นผลึก (wafer) ที่แตกต่างจากแบบทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งจากรายงานของ Wang และคณะ [50] พบว่าควอนตัมดอตที่เกิดจากการปลูกบนแผ่นซับสเตรตเหล่านี้มีการเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น โดยแตกต่างกันตามทิศทางการตัดซับสเตรต ดังแสดงรูปที่ 2.7 ถึงแม้วิธีนี้จะให้ควอนตัมดอตที่มีคุณภาพดีรวมถึงผลการเรียงตัวเป็นที่น่าพอใจ แต่เป็นวิธีที่ไม่เป็นที่นิยมมากนักเนื่องจากปัญหาในเรื่องราคาของชิ้นแผ่นฐานพิเศษที่ค่อนข้างสูง




**รูปที่** 2.6 ภาพตัวอย่างลักษณะของชิ้นงานที่เกิดจากการ miscut ทำให้เกิด surface step ขึ้น [50]




**รูปที่** 2.7 ภาพ AFM ของควอนตัมดอตซึ่งปลูกบน GaAs (n11) ได้แก่ ก) GaAs (911) B, ข) GaAs (711) B, ค) GaAs (511) B, ง) GaAs (411) B และ จ) GaAs (311) B [50]

2.3.2 การจัดเรียงตนเองด้วยลวดลายวิศวกรรมความเครียด (Self-alignment strain engineering pattern)

การเรียงตัวของควอนตัมดอตที่กล่าวมาทั้งหมดในข้างต้นเป็นวิธีที่อาศัยขั้นตอนเพิ่มเติมจากภายนอก การเรียงตัวของควอนตัมดอตสามารถทำได้ภายในขั้นตอนการปลูกเช่นกัน วิธีการปลูกชนิดนี้จะอาศัยความเครียดเป็นเครื่องมือสำคัญในการเรียง เนื่องจากความเครียดเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดควอนตัมดอต การกำหนดและออกแบบความเครียดที่เหมาะสมจึงเป็นไปได้ที่จะจัดเรียงควอนตัมดอตให้เป็นไปในรูปแบบที่ต้องการ ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่มาของคำว่าวิศวกรรมความเครียด(strain engineering) ซึ่งคือการออกแบบและจัดการกำหนดความเครียดอย่างเหมาะสมเพื่อให้ควอนตัมดอตเกิดขึ้นในบริเวณต้องการ

วิศว์กรรมความเครียดสามารถทำได้โดยอาศัยความเครียดที่เกิดขึ้นบนผิวหน้า เช่นเดียวกับการเกิดควอนตัมดอต โดยอาศัยความไม่เข้ากันของโครงผลึกในระบบ III- V หรือ II- VI รวมถึงการกลบทับโครงสร้างบางอย่าง เช่น ควอนตัมดอต หรือ โฮล ทำให้เกิดความเครียดสะสมอยู่เฉพาะในบางบริเวณเท่านั้นโดยกระบวนการทั้งหมดกระทำรวมอยู่ในขั้นตอนการปลูก จากหลักการที่ว่าควอนตัมดอตเลือกก่อตัวในบริเวณที่มีความเครียดสะสมอยู่ก่อนบริเวณอื่น จึงสามารถนำหลักการดังกล่าวมาใช้ในการกำหนดการก่อตัวของควอนตัมดอตได้ การเรียงตัวเองของควอนตัมดอตที่เกิดจากแม่พิมพ์วิศวกรรมความเครียด ได้แก่ ควอนตัมดอตแบบสายโซ่ยาวโดยการใช้ความเครียดที่เกิดจากซุปเปอร์แลตทิส (superlattice), ควอนตัมดอตแบบลายตาราง (cross-hatch) ซึ่งเกิดจาก misfit dislocation ในโครงสร้าง InGaAs/GaAs หรือ InGaP/GaP เป็นต้น โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้โครงสร้าง InGaAs/GaAs เป็นแม่พิมพ์วิศวกรรมความเครียด (strain engineered template) ชนิดหนึ่งเป็นหลักในการศึกษา

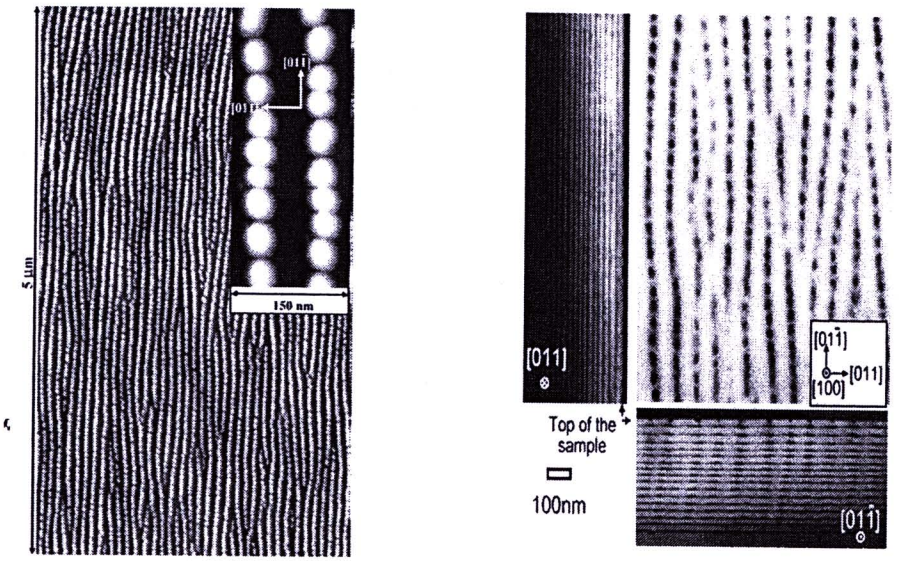
*2.3.2.1 แม่พิมพ์ซุปเปอร์แลตทิซ (Superlattice templates)*

การเรียงตัวควอนตัมดอตแบบแนวเดียวเป็นโซ่ยาวถูกทำขึ้นโดยกลุ่มของ Wang [51] เป็นการเรียงตัวโดยใช้วิศวกรรมความเครียดรูปแบบหนึ่ง กระทำโดยการปลูกควอนตัมดอต In(Ga)As แล้วกลบด้วยชั้น GaAs บางๆ ทำเช่นนี้สลับกันหลายๆครั้งเป็นวัฐจักร ซึ่งเรียกว่า ซุปเปอร์แลตทิส ควอนตัมดอตในชั้นล่างๆจะเหนี่ยวนำให้เกิดตำแหน่งของควอนตัมดอตในชั้นถัดไปจนถึงจำนวนวัฏจักรการปลูกที่เหมาะสม การก่อตัวควอนตัมดอตในการปลูกครั้งต่อไปจะเริ่มเรียงตัวเป็นแนวโซ่ยาวในทิศทางเดียวอย่างชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 2.8 การเรียงตัวแบบโซ่ยาวมีปัจจัยที่ต้องควบคุมหลายประการ เช่น ปริมาณ InGaAs ในการปลูกควอนตัมดอต, ผลของ growth interrupt time และความหนาของชั้น GaAs ที่คั่น

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 22 มิ.ย. 2555
เลขทะเบียน 247020
เลขเรียกหนังสือ

การปลูกด้วยวิธีนี้จึงมีความซับซ้อนและกระทำได้ยากเพื่อให้เกิดควอนตัมดอตแบบสายโซ่ยาวที่เรียงตัวอย่างสวยงาม




ก) ข)

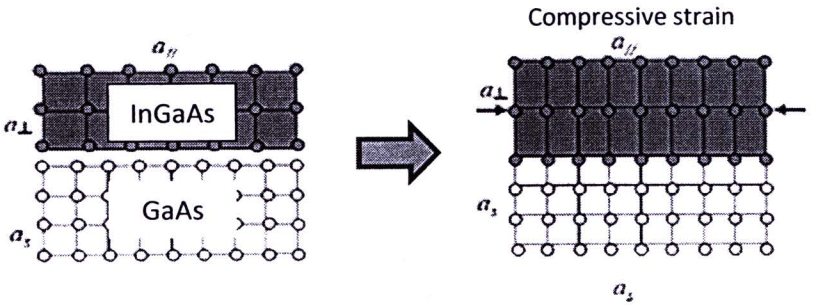
**รูปที่** 2.8 ภาพ AFM ของชิ้นงาน ก) 17 ชั้นของ $In_{0.5}Ga_{0.5}$ As ในการเกิดควอนตัมดอตแบบโซ่ยาว รวมถึง ข) ภาพตัดขวาง TEM ของชิ้นงานในแต่ละด้าน [51]

*2.3.2.2 ลวดลายตาราง (Cross-hatch patterns): InGaAs/GaAs*

ลวดลายตารางที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าเป็นลวดลายที่เกิดขึ้นเองในระบบการปลูกแบบเฮเทอโรเอพิแทกซี ซึ่งพบได้ในหลายระบบ เช่น InGaAs/GaAs [31,52], GaAsP/GaAs [53], GaAs/Si [53] และ SiGe/Si[53], เป็นต้น ลวดลายที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าเป็นผลจากรูปแบบการผ่อนคลายความเครียดที่สะสมอยู่เนื่องจากค่าคงตัวผลึกที่ไม่เท่ากัน ซึ่งสามารถนำลวดลายตารางที่เกิดขึ้นมาใช้ในการจัดเรียงตัวควอนตัมดอต ระบบที่ให้ความสนใจในที่นี้คือระบบ InGaAs/GaAs

*2.3.2.2.1 ลักษณะโดยทั่วไป*

ในระบบการปลูก InGaAs/GaAs ใช้ GaAs เป็นชั้นฐานและชั้น InGaAs เป็นตัวก่อความเครียด (stressor) ชั้นฐาน GaAs นิยมใช้กันมากขึ้นแทนซิลิคอนเนื่องจากมีสมบัติบางประการที่เหนือกว่า เช่น การเปล่งแสงและค่าความคล่องตัวทางไฟฟ้า [52] ส่วนชั้น InGaAs เป็นอัลลอยด์ที่เกิดจากการผสมสาร 3 ชนิด คือ In, Ga และ As คุณสมบัติโดยทั่วไปจะคาบเกี่ยวระหว่าง InAs และ GaAs กล่าวคือขึ้นอยู่กับสัดส่วนของสาร In และ Ga ที่มาประกอบ ประโยชน์ที่สำคัญของการปลูก InGaAs บน GaAs คือความง่ายในการปลูกและคุณสมบัติที่ปรับเปลี่ยนได้




**รูปที่** 2.9 แผนภาพแสดงการเกิดความเครียดแบบอัดเมื่อปลูกชั้น InGaAs บนชั้น GaAs

การปลูก InGaAs บน GaAs มีความสะดวก ไม่ต้องคำนึงถึงปัจจัยในการปลูก เช่น ความเป็นขั้ว (polar on non-polar) หรือความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal expansion coefficient) การปลูกให้ได้ผลดีจึงทำได้ง่ายขึ้น ในเรื่องของคุณสมบัติ คุณสมบัติที่สำคัญและปรับเปลี่ยนได้ของ InGaAs คือ ค่าคงตัวผลึกและค่าช่องว่างแถบพลังงาน

ค่าคงตัวผลึกเป็นค่าที่สำคัญต่อการเกิดลวดลายตาราง ค่าดังกล่าวใน InGaAs ขึ้นอยู่กับค่าสัดส่วนสาร In และ Ga และมีค่าอยู่ระหว่างค่าของ InAs และ GaAs (ประมาณ 6.0583 Åและ 5.6533 Å สำหรับ InAs และ GaAs ที่ 300 K ตามลำดับ) ตามสมการ [52]

$$a = 6.058 - 0.405(1 - x) \quad (\text{Å}) \qquad 2.3$$

เมื่อ x คือ ค่าสัดส่วนของ In ใน $In_xGa_{1-x}As$ ค่าแบนด์แกปสามารถปรับเปลี่ยนได้เช่นกัน และเป็นไปดังสมการ [52]

$$E_g = 0.36 + 0.505(1 - x) + 0.555(1 - x)^2 \quad (\text{eV}) \qquad 2.4$$

ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.354 eV และ 1.424 eV ตามค่าช่องว่างแถบพลังงานของ InAs และ GaAs ตามลำดับ จากสมบัติดังกล่าวส่งผลให้สามารถออกแบบได้ทั้งช่วงการเปล่งแสงและค่าความเครียด ชั้น InGaAs จึงเป็นชั้นที่มีความยืดหยุ่นมากในการกำหนดความเครียดและช่องว่างแถบพลังงาน

*2.3.2.2.2 กลไกการเกิดลายตาราง*

การปลูก InGaAs บนชั้น GaAs ทำให้เกิดความเครียดขึ้นเนื่องจากค่าคงตัวผลึกที่ไม่เท่ากัน ในที่นี้ค่าคงตัวผลึกคือ 5.714 Å ตามสัดส่วน In ที่ใช้คือ $In_{0.15}Ga_{0.85}As$ ค่าความแตกต่างค่าคงตัวผลึกที่เกิดขึ้นมีค่าประมาณ 1.07 % ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$\varepsilon = \frac{a_f - a_s}{a_s} \qquad 2.5$$

$a_f, a_s$ คือค่าคงตัวของชั้นฟิล์มและซับสเตรต ตามลำดับ ค่าความแตกต่างค่าคงตัวผลึกอาจเรียกอีกอย่างว่าความเครียดจากความไม่เข้ากัน (misfit strain) ($\varepsilon$) การปลูกของชั้นผลึกในตอนแรกที่ความหนาไม่มากนักเป็นแบบ 2 มิติแต่มีความเครียดสะสมอยู่ ความเครียดที่เกิดขึ้นเป็นความเครียดแบบอัด เนื่องจาก $In_{0.15}Ga_{0.85}As$ มีค่าคงตัวผลึกที่ใหญ่กว่าชั้น GaAs ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจะถูกสะสมมากขึ้นตามค่าความหนาที่เพิ่มขึ้นจนถึงค่าๆหนึ่ง คือ ค่าความหนาวิกฤติ ($h_{c60}$) สามารถคำนวณได้โดยอาศัยสมการจากแบบจำลองของ Matthews – blakeslee [52] คือ

$$H_{c60} = \frac{D(1-\nu cos^2\theta)(\ln\left(\frac{h_{c60}}{b}\right)+1)}{Yf} \quad (2.6)$$

$$D = \frac{G_{GaAs}G_{InGaAs}b}{\pi(G_{GaAs}+G_{InGaAs})(1-\nu)} \quad (2.7)$$

$$G = C_{44} - \frac{1}{3}(2C_{44} + C_{12} - C_{11}) \quad (2.8)$$

$$b = \frac{\sqrt{2}}{2}a_{InGaAs} \quad (2.9)$$

$$\nu = \frac{C_{12}}{C_{21}+C_{11}} \quad (2.10)$$

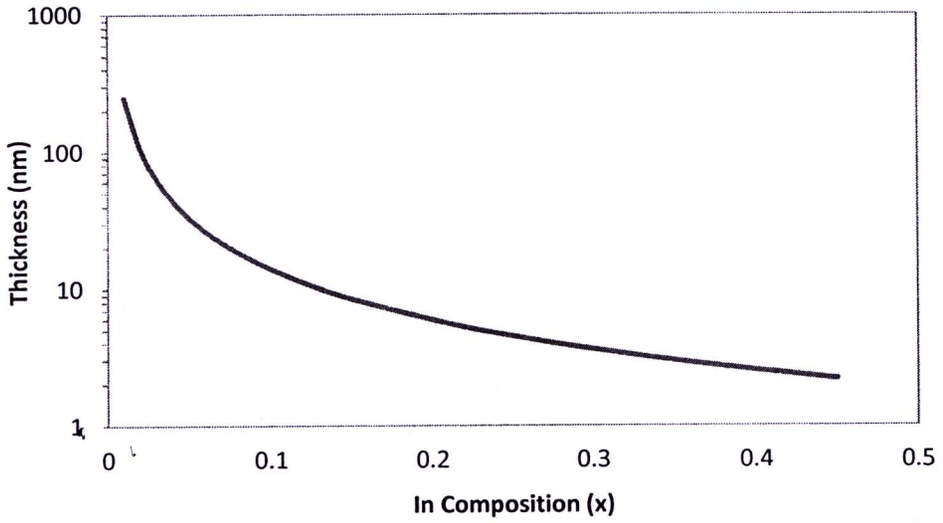
$$Y = C_{11} + C_{12} - 2\frac{C_{12}^2}{C_{11}} \quad (2.11)$$

$$f = \frac{a_{InGaAs}-a_{GaAs}}{a_{InGaAs}} \quad (2.12)$$

เมื่อ $\theta$ = 60°, $\nu$ คือ Poisson ratio, $G$ คือค่า Anisotropic factor, $C$ คือค่า Elastic constant และ $Y$ คือค่า Young's modulus

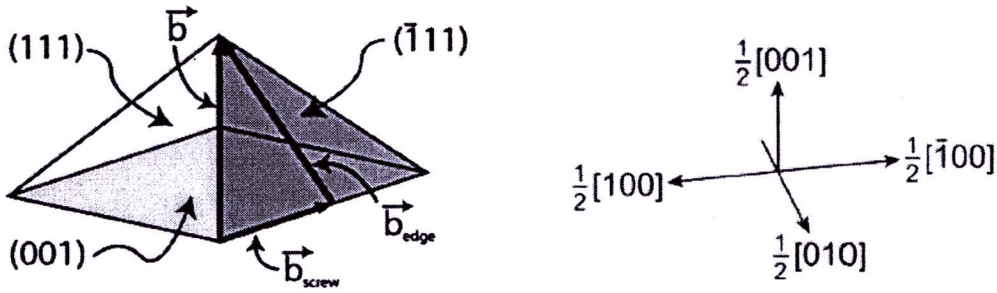
จากสมการที่ 2.6 โดยสมมติให้ค่าคงที่ยืดหยุ่น (elastic constant)(C) มีค่าคงที่โดยเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นตามค่าสัดส่วน In ใน $In_{1-x}Ga_xAs$ ทำให้สามารถสร้างเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาวิกฤติกับค่าสัดส่วนของ In(x) ใน$In_{1-x}Ga_xAs$ ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ค่าความหนาวิกฤติที่คำนวณได้สำหรับ $In_{0.15}Ga_{0.85}As$ จากสมการที่ 2.6 มีค่าประมาณ 10 nm ค่าความเครียดที่สะสมอยู่ในรูปของพลังงานความเครียดยืดหยุ่น (elastic strain energy) จะถึงจุดอิ่มตัวและเริ่มผ่อนคลายบางส่วนที่ความหนานี้ ก่อให้เกิดแนวของ dislocation ขึ้นซึ่งเป็นชนิดที่เราสนใจเพราะก่อให้เกิดลายตารางบนผิวหน้าและควบคุมได้ การเพิ่มความหนาของชั้นที่เกินกว่าค่าความหนาวิกฤติ

มากเกินไป ระบบจะเกิดการคลายตัวอย่างสมบูรณ์ทำให้เกิด dislocation ใหม่ เป็นชนิดที่เกิดจากการเพิ่มทวีคูณ (multiplication dislocation) ซึ่งเป็น dislocation ที่ควบคุมได้ยาก




**รูปที่** 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาวิกฤติ ($h_{c60}$)กับค่าสัดส่วน In(x) ใน $In_{1-x}Ga_xAs$ ตามสมการที่ 2.6

แนวของ dislocation ที่เกิดขึ้นในตอนแรกคือ misfit dislocation จะเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของชั้นสารทั้งสอง misfit dislocation ในเริ่มแรกจะปรากฏในทิศทาง ± [110] และทิศทาง ± [-110] [53,54] ซึ่งเมื่อ dislocation ทั้งสองเคลื่อนที่ตัดกันอาจทำให้เกิดแนว dislocation ใหม่ขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของการรวมกันว่าจะเป็นการเพิ่มหรือลดพลังงานยืดหยุ่น (elastic energy) เมื่อความหนาของชั้น InGaAs เพิ่มขึ้นอีก misfit dislocation จะมีจำนวนและความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ 60° type misfit dislocation และ pure edge dislocation ทั้งสองชนิดแตกต่างกันตามลักษณะของการเคลื่อนที่และผลของการเลื่อนระนาบ กล่าวคือ 60° type dislocation จะเคลื่อนตัวในระนาบ {111} และส่งผลการเลื่อนระนาบในทิศทาง <110> ในขณะที่ edge dislocation จะเคลื่อนตัวในระนาบ {100} และส่งผลการเลื่อนของระนาบในทิศทาง <111> dislocation ทั้งสองชนิดจะเกิดขึ้นมากน้อยแตกต่างกันขึ้นอยู่กับ misfit strain ที่เกิดขึ้นในระบบ โดย 60° type misfit dislocation จะพบได้ในระบบที่มีค่า misfit strain ต่ำ ( ≤ 2% ) [54,55] ในขณะที่ pure edge dislocation จะเกิดขึ้นชัดเจนในระบบการปลูกที่มีค่า misfit strain สูง ( ≥ 3% ) [55] misfit dislocation เหล่านี้บางส่วนเท่านั้นที่จะพัฒนาต่อไปเป็น Threading dislocation [53] ซึ่งเคลื่อนที่ต่อไปในเนื้อของวัสดุ



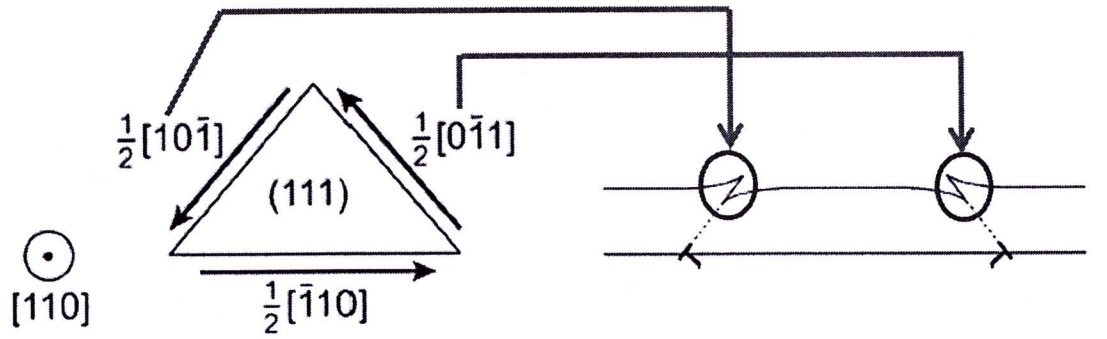

**รูปที่** 2.11แสดงระนาบการเคลื่อนที่ทั้งหมดของ 60 ° type dislocation บนระนาบ {111} พร้อมแกนระบุทิศทาง โดย $\vec{b}$ แสดงถึงเวกเตอร์หนึ่งของ dislocation ชนิดนี้ ซึ่ง $\vec{b} = \frac{1}{2}$[0-11] อยู่ในระนาบ (111) [57]

Misfit Dislocation ในระบบที่สนใจคือชนิด 60° type misfit dislocation ซึ่ง dislocation ชนิดนี้เองที่ก่อให้เกิดลายตารางขึ้นบนผิวหน้า สามารถจำแนก dislocation ออกได้เป็น 2 ชนิด คือ $\alpha$-type และ $\beta$-type ซึ่งแตกต่างกันตามชนิดของแกนอะตอมที่เป็นจุดเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ในโครงผลึกแบบ zinc blende โดย $\alpha$-type และ $\beta$-type มีอะตอมของ Ga และ As เป็นแกนอะตอมตามลำดับ [52]

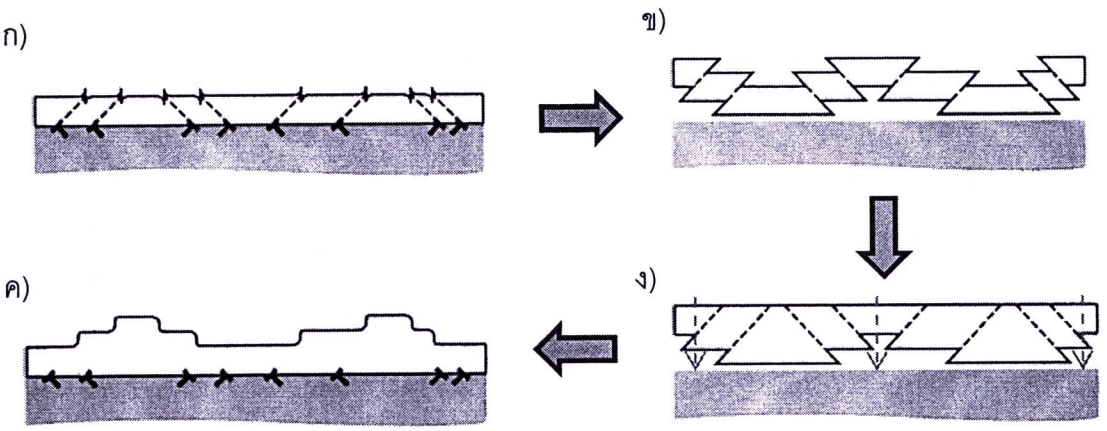
การเคลื่อนที่ของ 60° type dislocation จะปรากฏในทิศทาง <110> บนระนาบ {111} เป็นหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ระนาบรวมถึงลักษณะการเคลื่อนของ dislocation ทำให้เกิดลักษณะผิวหน้าใน 2 รูปแบบ คือ up-step และ down-step ยกตัวอย่างเช่น การเลื่อนของ 60° type dislocation ที่มี burger vector ($\vec{b}$) เท่ากับ $\frac{1}{2}$ [10-1] ซึ่งเลื่อนขึ้นในระนาบ (1-11) ทำให้เกิดผิวหน้าแบบ down-step ในขณะที่การเลื่อนในระนาบ (-111) ของ dislocation $\vec{b} = \frac{1}{2}$ [0-11] ทำให้เกิดผิวหน้าแบบ down-step เป็นต้น เมื่อ dislocation ทั้ง 2 รูปแบบเคลื่อนที่ตัดกันจึงเกิด surface step ขึ้นบนผิวหน้าดังแสดงในรูปที่ 2.12 ส่วน edge dislocation ไม่ก่อให้เกิดผิวหน้าเช่นนี้เนื่องจากมีระนาบการเคลื่อนที่คือ {100} surface step ที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าเมื่อทำการปลูกเพิ่มเข้าไปอีกจะเกิดการ surface step elimination ซึ่งมีขั้นตอนดังแสดงในรูป 2.13 คือ สารที่ทำการปลูกเพิ่มเข้าไปจะเลือกก่อตัวบริเวณขอบของ surface step ก่อนบริเวณอื่นอันเป็นผลจากการเคลื่อนที่ของมวลในแนวขวางและ step-flow growth [56] ในรูปที่ 2.13 ข) และ ค) หลังจากนั้นเมื่อชั้นของฟิล์มมีความหนามากพอ ชั้นของฟิล์มก็จะตกลงมาเกาะติดกับชั้นของซับสเตรต ผลที่ได้คือเกิดผิวหน้าในลักษณะลูกคลื่นซึ่งมีความโค้งมนและเรียบมากขึ้น (รูปที่ 2.13 ง)) จนสังเกตเห็นเป็นลายตารางขึ้นในที่สุด

ลายตารางที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าปรากฏให้เห็นยอดเนินในสองทิศทางคือในทิศทาง [1-10] และ [110] ลายตารางสามารถนำมาใช้เป็นแม่พิมพ์ในการเรียงตัวของควอนตัมดอตได้โดยตรง โดยเมื่อทำการปลูกควอนตัมลงบนผิวหน้าลายตาราง ควอนตัมดอตจะเลือกก่อตัวบริเวณแนวยอดเนินของลาย

ตารางก่อนบริเวณอื่น ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของควอนตัมดอตขึ้นในสองทิศทางตามแนวของลายตารางนั่นเอง




**รูปที่** 2.12 ลักษณะเวกเตอร์การเคลื่อนที่ของ dislocation ที่ทำให้เกิด up step และ down step โดยเมื่อโปรเจค เวกเตอร์ในทิศทาง [110] โดย $\vec{b} = \frac{1}{2}$[10-1] ทำให้เกิดการเลื่อนในระนาบ (1-11) เกิด down-step และ $\vec{b} = \frac{1}{2}$[0-11] ทำให้เกิดการเลื่อนในระนาบ (-111) เกิด up-step [57]

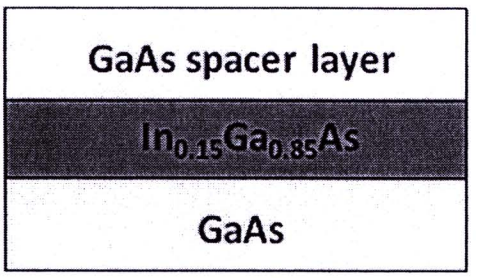



**รูปที่** 2.13 ขั้นตอนการเกิด surface step elimination โดยเรียงจาก ก) ขณะเริ่มเกิด surface step ขึ้นจาก dislocation ข) ลักษณะของชั้นฟิล์มเมื่อเกิดการเลื่อนของผลึกจาก dislocation ค) ลักษณะการก่อตัวของชั้นฟิล์มจากการเลือกเกิดบริเวณขอบของ step ก่อนบริเวณอื่น จนเกิดการหล่นลงมาของชั้นผลึกเมื่อมีความหนามากพอ ง) ผิวหนารูปแบบของลายตารางที่สมบูรณ์โดยพื้นผิวมีความโค้งและเรียบ [56]

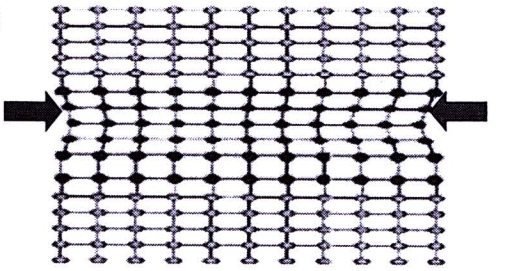
*2.3.3.2.3 การปรับปรุงลายตารางของโครงสร้าง $In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs$ โดยการใช้ GaAs Spacer layer*

การจัดเรียงควอนตัมดอตโดยใช้ลวดลายตารางบนโครงสร้าง InGaAs/GaAs ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของควอนตัมดอตขึ้นจริง แต่มีปัญหาในเรื่องของคุณภาพของชิ้นงาน เช่น ด้านการเปล่งแสง

ก)



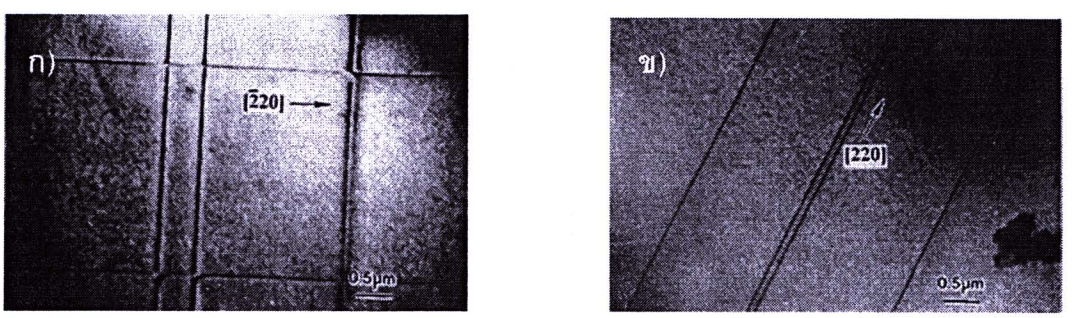

ข)



**รูปที่** 2.14 แสดง ก) ลักษณะของโครงสร้าง GaAs/$In_{0.15}Ga_{0.85}As$/GaAs ซึ่งมีลักษณะคล้ายบ่อควอนตัมแคบๆ ข) แสดงลักษณะการถูกบีบบังคับจาก GaAs ทั้งสองด้านของชั้น InGaAs เนื่องจากความไม่เข้ากันของโครงผลึก

หรือการนำไฟฟ้า เป็นต้น เนื่องจากลายตารางที่เกิดขึ้นเป็นผลจาก dislocation โดยตรง จึงเป็นการยากที่จะหลีกเลี่ยงผลกระทบจากดังกล่าว ในหัวข้อนี้จึงนำเสนออีกวิธีหนึ่งที่สามารถใช้เพื่อลดผลกระทบของ dislocation ในโครงสร้างลายตาราง InGaAs/GaAs

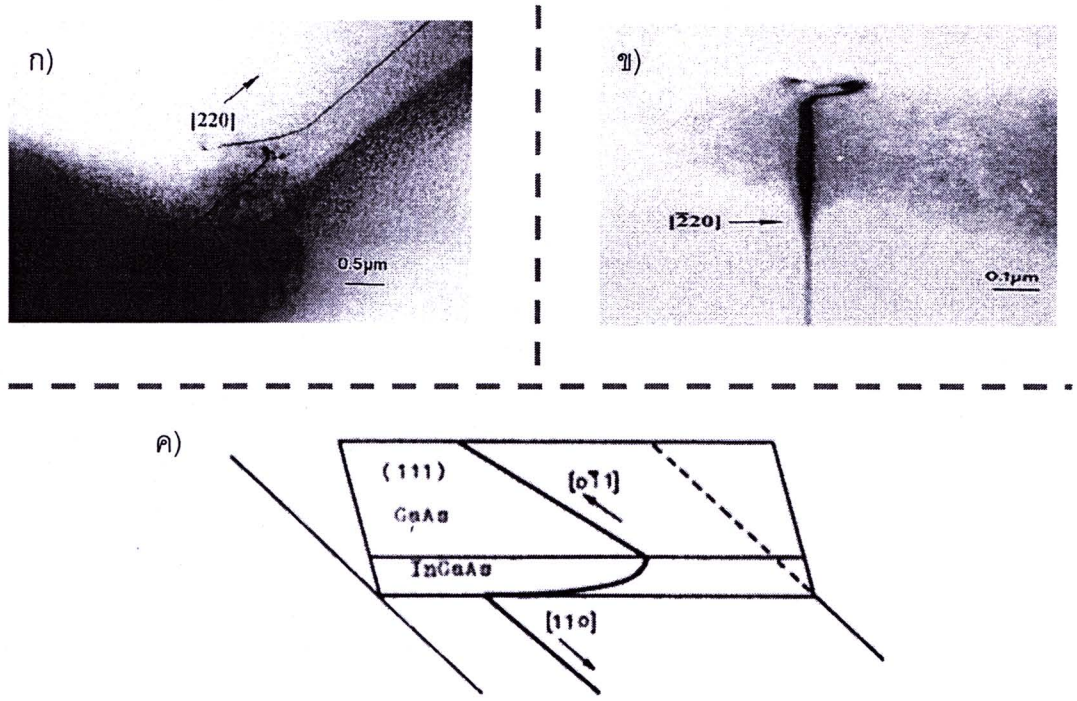
การกลบทับด้วยชั้นของ GaAs หรือการเพิ่มชั้น GaAs spacer บนชั้นของโครงสร้าง InGaAs/GaAs เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ลดผลของ dislocation ที่เกิดขึ้น การกลบทับด้วย GaAs ที่มีความหนาอย่างเหมาะสมทำให้เกิดโครงสร้างที่มีการบีบเค้นทั้งสองด้านในลักษณะคล้ายๆบ่อ (well) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ถึงแม้การปลูกชั้น InGaAs ที่มีความหนาพอเหมาะจะทำให้เกิดการผ่อนคลายความเครียดบางส่วนและก่อให้เกิด dislocation ขึ้นก็ตาม แต่แนวของ threading dislocation จะถูกบังคับให้วิ่งออกจากแนวเดิมหรือหยุดนิ่งในชั้นความเครียดขณะทำการกลบทับ โดยมีเพียงบางส่วนเท่านั้นที่ผ่านขึ้นไปยังด้านบน ดังแสดงในรูปที่ เป็นภาพ TEM ของกลุ่ม Z.G.Wang [58] ของโครงสร้าง $In_{0.3}Ga_{0.7}As$/GaAs ที่มีการกลบทับด้วย GaAs หนา 10 และ 100 nm จะเห็นได้ว่าแนวของ dislocation ลดลงในหนึ่งแนวเมื่อมีการกลบทับด้วย GaAs ที่หนา




**รูปที่** 2.15 ภาพ bright-field พร้อมกับลูกศรบ่งชี้ทิศทางตามระนาบของชิ้นงานที่ถูกตัดขวาง โดยภาพประกอบด้วย GaAs/$In_{0.3}Ga_{0.7}As$/GaAs ที่มีชั้นกลบทับ GaAs ที่มีความหนา ก) 10 nm และ ข) 100 nm [58]

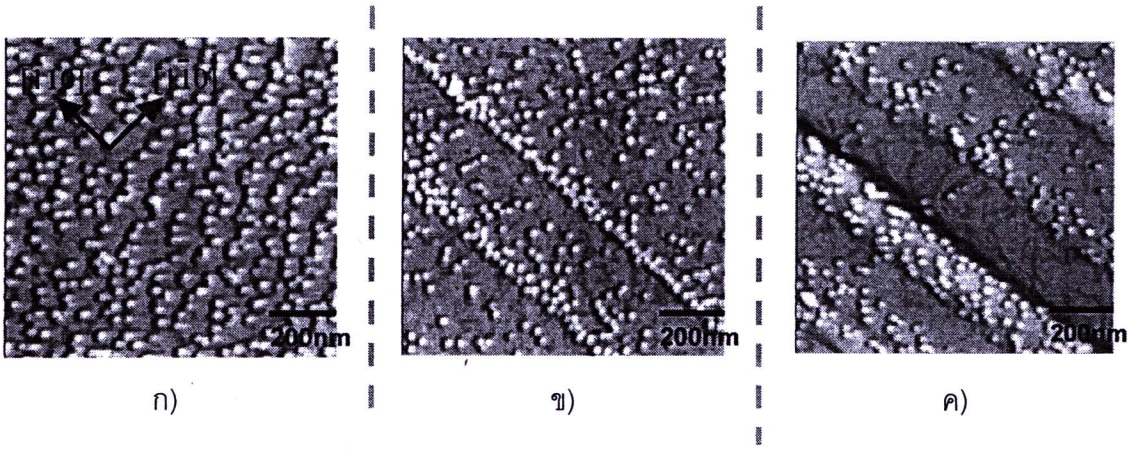
กลไกการลดลงของแนว dislocation สามารถอธิบายจากการศึกษาภาพตัดขวาง Tunneling Electron Microscope (TEM) ของโครงสร้างซึ่งแสดงให้เห็นถึงการแตกออก (breaking up) ของแนว dislocation เมื่อมีความหนาของ GaAs spacer เพิ่มมากขึ้น แนวของ dislocation เดิมจะถูกทำให้แตกออกเกิดปลาย 2 ข้าง ปลายข้างหนึ่งในลักษณะเส้นซิกแซ็ก (zigzag) และปลายข้างหนึ่งในลักษณะเส้นโค้งที่มีการเคลื่อนที่ออกไปจากแนวเดิม แสดงในรูปที่ 2.16 ก) ส่วนที่เคลื่อนที่ของแนว dislocation เมื่อเคลื่อนที่ต่อไปจะถูกตรึงให้หยุดนิ่งอีกครั้งในบางตำแหน่งของชิ้นงานโดยเฉพาะในทิศทาง [110] ซึ่งปรากฏให้เห็นในลักษณะของเส้นซิกแซ็กเช่นกันแต่ไม่ปรากฏส่วนที่เคลื่อนที่ต่อไปดังรูปที่ 2.16 ข) ลักษณะการเคลื่อนที่ของเส้นซิกแซ็กเป็นไปตามรูปที่ 2.16 ค) แบ่งเป็นการเคลื่อนที่ 2 ช่วง คือในเนื้อสาร InGaAs และ GaAs spacer การเคลื่อนที่ของเส้น dislocation ยังคงอยู่ในระนาบ (111) แต่เปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่จากลักษณะ curve dislocation ในทิศ [-110] ในชั้นสาร InGaAs ไปเป็น threading dislocation ในทิศ [01-1] ณ บริเวณรอยต่อชั้นสารทั้งสอง ผ่านเข้าไปยังชั้น GaAs spacer

จากผลของแนว dislocation ที่ลดลงในระบบทำให้คุณภาพของชิ้นงานมีค่าสูงขึ้น ซึ่งมีรายงานแสดงให้เห็นจริงว่า การกลบทับด้วย GaAs ที่เหมาะสม ช่วยปรับปรุงคุณภาพผลึก (crystalline quality) ของระบบ ซึ่งแสดงออกในรูปคุณภาพแสงที่ดีขึ้นใน InGaAs/GaAs single quantum well เมื่อกลบทับด้วย GaAs ที่มีความหนาเหมาะสม [59]




**รูปที่** 2.16 ภาพ TEM แสดง ก) การแตกออกของ dislocation ในทิศทาง [-110] ข) ลักษณะของเส้นซิกแซ็กที่เกิดขึ้นขณะกลบทับด้วยชั้น GaAs ที่มีความหนา 100 nm ค) ลักษณะการจัดเรียงของเส้นซิกแซ็ก [58]

นอกจากนี้ความสามารถในการลดแนวของ dislocation ลงในหนึ่งทิศทางของชั้น GaAs Spacer ยังมีความเป็นไปได้ที่ทำแม่พิมพ์สำหรับการเรียงควอนตัมดอตในแนวเดียว ตัวอย่างเช่นในกลุ่มของ Kwang Moo Kim [60] ที่มีการปลูกชั้น GaAs spacer บนโครงสร้าง (InAs/GaAs Superlattice (SL)) /GaAs ซึ่งเป็นโครงสร้างเครียดรูปแบบหนึ่ง ดังปรากฏในรูปที่ 2.17 เมื่อจำนวน cycle ของ ชั้น SL มีค่าน้อย (10 cycles) (รูปที่ 2.17 ก)) ซึ่งหมายถึง ค่าความหนาของชั้นความเครียดยังไม่เลยค่าความหนาวิกฤติ แนวของ dislocation จึงยังไม่ปรากฏให้เห็น การก่อตัวของควอนตัมดอตจึงเป็นแบบสุ่มไม่เป็นระเบียบ แต่เมื่อจำนวนของชั้น SL เพิ่มมากขึ้น (15 cycles ) ดังเช่นในรูปที่ 2.17 ข) ค่าความหนาจะมีค่าเกินค่าความหนาวิกฤติ แนวของ dislocation เริ่มปรากฏให้เห็นเพียงบางส่วนเนื่องจากการผ่อนคลายเพียงบางส่วนของโครงสร้าง ควอนตัมดอตจะมีความเป็นระเบียบมากขึ้นเนื่องจากมีแนวของ dislocation เป็นแม่พิมพ์ในการก่อตัว ซึ่งบริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่มีพลังงานต่ำและเหมาะแก่การก่อตัวของควอนตัมดอต โดยแนวของควอนตัมดอตจะเรียงตัวในทิศทาง [110] มากกว่าในทิศทาง [1-10] เนื่องจากความหนาแน่นแนวของเนินในแนว [110] มากกว่า [1-10] และสำหรับกรณีของความหนามากกว่าค่าความหนาวิกฤติประมาณ 3 เท่า (30 cycles) แนวของเนินที่มีความหนาจะปรากฏให้เห็นบริเวณผิวหน้าและควอนตัมดอตจะก่อตัวบริเวณแนวเนิน เหล่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ค) ซึ่งหากพิจารณาในรูปที่ 2.17 ข) และ รูปที่ 2.17 ค) แนวการเรียงตัวของควอนตัมดอตจะเรียงตัวอย่างชัดเจนในแนว [110] และ [1-10] เท่านั้น จากผลการทดลองจึงเห็นได้ว่า ถ้าความหนาของชั้น GaAs spacer ที่เหมาะสมรวมกับชั้นความเครียดที่มีความหนาพอเหมาะมีโอกาสทำให้เกิดควอนตัมดอตที่มีการเรียงตัวแบบเส้นในแนวเดียว รูปแบบการจัดเรียงตัวใหม่ดังกล่าวจะถูกศึกษาเช่นกันในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้




ก) ข) ค)

**รูปที่** 2.17 ลักษณะของผิวหน้าเมื่อทำการปลูก InAs QDs บนชั้นความเครียด เมื่อมีจำนวนของชั้น SL ก) 10 nm ข) 15 nm และ ค) 30 nm [60]