บทที่ 1

บทนำ

ความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในไม่กี่สิบปีที่ผ่านมา กล่าวได้ว่าสารกึ่งตัวนำมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง การพัฒนาที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้งของสารกึ่งตัวนำก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากโดยเฉพาะทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ในช่วงแรกๆของการพัฒนา สารกึ่งตัวนำชนิดแรกที่มีบทบาทสำคัญคือ ซิลิคอน (silicon) อุตสาหกรรมรวมถึงเทคโนโลยีในระยะแรก จึงมุ่งความสนใจไปยังคุณสมบัติต่างๆของซิลิคอน ทำให้เกิดสิ่งประดิษฐ์ต่างๆมากมาย ยกตัวอย่างเช่น ทรานซิสเตอร์ (transistor) ซึ่งเป็นหนึ่งในสิ่งประดิษฐ์พื้นฐานที่มีความสำคัญ เป็นต้น ซิลิคอนแทบจะตอบสนองความต้องการทุกอย่างที่มีได้สำหรับนักประดิษฐ์ในขณะนั้น อีกทั้งยังมีข้อดีที่สามารถ หาได้ง่ายและมีอยู่เป็นจำนวนมาก แต่ต่อมาเมื่อเทคโนโลยีโดยเฉพาะทางด้านการสื่อสารมีการพัฒนามากยิ่งขึ้น ความต้องการความเร็วในด้านการรับส่งข้อมูลจึงเพิ่มสูงตาม อุปกรณ์ไฟฟ้าเริ่มที่จะถูกแทนที่ด้วยอุปกรณ์ทางแสง ทำให้ซิลิคอนไม่อาจที่จะใช้งานได้อีกต่อไป เนื่องจากมีค่าสภาพคล่องตัว (mobility) ที่ต่ำและเป็นสารจำพวกแบนด์แกปไม่ตรง (Indirect bandgap) ทำให้การเปล่งแสงไม่ดีนัก จึงไม่เหมาะแก่การนำมาใช้ทำอุปกรณ์จำพวกแสง ซิลิคอนจึงถูกแทนที่ด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดใหม่ ซึ่งเป็นสารประกอบของธาตุหมู่ III-V อาทิเช่น GaAs ,InAs หรือ InP สารเหล่านี้เป็นสารแบนด์แกปตรง (Direct bandgap) จึงให้ประสิทธิภาพทางแสงที่ดีกว่า รวมถึงมีค่าความคล่องตัว (mobility) ที่มากขึ้นด้วย แต่ยังคงมีปัญหาในเรื่องของความยาวคลื่น เนื่องจากในระบบสื่อสารจำเป็นต้องใช้แสงที่มีความยาวคลื่นบางค่า [1] เช่น 850, 1300 และ 1550 nm เพื่อที่จะสามารถเปลี่ยนความยาวคลื่นให้ได้ตามที่ต้องการ จึงมีการปรับปรุงสารประกอบ III-V ไปเป็นสารประกอบจำพวกอัลลอยด์ เช่น $In_xGa_{1-x}A_yP_{1-y}$ ซึ่งมี lattice match กับ InP [2] หรือ GaAlAs ที่มีค่าโครงผลึกตรงกัน (lattice match) กับ GaAs [3] ใช้ในการทำ เลเซอร์ (Laser) หรือ ไดโอดเปล่งแสง (LED) เป็นต้น สารเหล่านี้มีค่าความยาวคลื่นของแสงที่เปลี่ยนไปเมื่อสัดส่วนของสารประกอบเปลี่ยนแปลง ทำให้สามารถแก้ไขปัญหาในเรื่องของความยาวคลื่นได้โดยไม่ต้องค้นหาสารชนิดใหม่

เทคโนโลยีทางด้านการปลูกก็มีส่วนสำคัญ เบื้องหลังความสำเร็จของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่เกิดขึ้นส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการพัฒนาทางด้านการปลูก เทคโนโลยีทางด้านปลูกในปัจจุบันพัฒนาก้าวหน้าไปมาก ทำให้สามารถกำหนดค่าต่างๆ เช่น ปริมาณของสาร ที่น้อยมากๆได้อย่างแม่นยำ [4-5] รวมถึงความสามารถในการศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างได้ละเอียดในระดับอะตอม [6-8] ทำให้เพิ่มขีด

ความสามารถไปอีกระดับหนึ่งคือสามารถออกแบบโครงสร้างของชิ้นงานในลักษณะต่างๆได้ คุณสมบัติของชิ้นงานจึงมีความหลากหลายมากขึ้น ถึงแม้จะใช้สารชนิดเดียวกันในการปลูกเพราะมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน การพัฒนาในปัจจุบันจึงเริ่มที่จะให้ความสนใจในเรื่องของการออกแบบโครงสร้างและขนาด ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านการปลูก สิ่งประดิษฐ์ต่างๆในปัจจุบัน นอกจากที่จะต้องใช้งานได้ดีแล้ว จำเป็นที่จะต้องมีขนาดที่เล็กลงและประหยัดพลังงานมากขึ้น นาโนเทคโนโลยีจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญ โครงสร้างของสารกึ่งตัวนำที่มีขนาดใหญ่ (bulk) ในอดีตถูกลดขนาดลงมาในระดับนาโนเมตร (nm) เกิดเป็นโครงสร้างชนิดใหม่ เช่น บ่อควอนตัม (Quantum well), ลวดควอนตัม (Quantum wire) และควอนตัมดอต (Quantum Dot)

ควอนตัมดอตเป็นโครงสร้างหนึ่งที่ได้รับความสนใจมาก เนื่องจากมีคุณสมบัติคล้ายๆกับอะตอมเทียม อาทิเช่น มีระดับพลังงานเป็นขั้นๆเหมือนอะตอมเนื่องจากมีโครงสร้างที่เกิดการจำกัด (confinement) ใน 3 มิติ เป็นต้น ควอนตัมดอตจึงถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลายๆด้าน เช่น ใช้ในการทำเลเซอร์ที่มีค่า threshold current ต่ำ [9-10] การ สร้างหรือปลูกควอนตัมดอตสามารถกระทำได้ในสองรูปแบบคือแบบล่างขึ้นบน (Bottom-up) และแบบบนลงล่าง (Top-down) แบบบนลงล่าง คือการสร้างควอนตัมดอตโดยตรง เช่น หรือการใช้กระบวนการลิโธกราฟี (lithography) [11] หรือกระบวนการกัดออก (etching) [12] ข้อดีในแบบบนลงล่าง คือสามารถกำหนดการเกิดควอนตัมดอตได้อย่างแน่นอน แต่มีปัญหาในเรื่องของ สถานะผิว (surface state) หรือ กับดัก (trap) บนชิ้นงาน ทำให้คุณภาพของชิ้นงานที่ได้ไม่ดีนัก อีกวิธีหนึ่งคือแบบล่างขึ้นบนคือ การเกิดควอนตัมดอตแบบเกิดขึ้นเองโดยอาศัยความเครียดที่เกิดจากความไม่เข้ากันของโครงผลึก ซึ่งเกิดได้ในสารกึ่งตัวนำหลายระบบ เช่น InAs/GaAs [13-15], Ge/Si [16], CdSe/ZnSe [17,18], CdS/Zn(S)Se [19], PbSe/PbEuTe [20] ,(InGa)As/(AlGa)As [21], ,AlInAs/AlGaAs [27], GaN/AIN [24,25], InGaN/GaN [26], InP/InGaP [27] และ GaSb/GaAs [28] มีจุดเด่นในเรื่องของ defect ที่มีน้อยมาก แต่มีปัญหาในเรื่องของการจัดเรียงตัวของควอนตัมดอตเนื่องจากควอนตัมเกิดขึ้นเองในลักษณะสุ่มทั่วบริเวณผิวหน้า ซึ่งถ้าปราศจากปัญหาดังกล่าวจะทำให้ได้ชิ้นงานที่มีควอนตัมดอตที่มีความสมบูรณ์และมีความหลากหลายมากขึ้นในการใช้งาน

ปัญหาในเรื่องการจัดเรียงตัวของควอนตัมดอตแบบเกิดขึ้นเองจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง มีหลายๆกลุ่มวิจัยได้พยายามศึกษาและใช้วิธีต่างๆเพื่อที่จะจัดเรียงควอนตัมดอตแบบเกิดขึ้นเองให้มีระเบียบ มีรูปแบบที่แน่นอน เช่น ควอนตัมดอตแบบโซ่ [29] ,ควอนตัมดอตแบบแหวน [30] ,ควอนตัมดอตแบบลายตาราง [31,32] ฯลฯ

สำหรับในกลุ่มวิจัยห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (SDRL) ได้ทำการศึกษาการจัดเรียงตัวของควอนตัมดอตเช่นกันโดยอาศัยชั้นลายตารางซึ่งเกิดจากการปลูกชั้นของ $In_xGa_{1-x}As$ ลงบนแผ่นฐาน GaAs ชั้นลายตารางดังกล่าวทำให้เกิดการจัดเรียงของควอนตัมดอตแบบเส้นในทิศ [110] และทิศ [1-10] โดยในกลุ่มวิจัย SDRL ได้พยายามศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้เกิดชั้นลายตารางที่ดีที่สุดในการจัดเรียงควอนตัมดอต เริ่มต้นจากการศึกษาถึงผลของความหนาและค่าสัดส่วนของ In ในชั้นลายตารางที่มีต่อรูปแบบการเกิดลวดลายตารางด้านบน โดยจากการทดลองโดย C.C. Thet [33] พบว่ายิ่งค่าความหนาและค่าสัดส่วน In เพิ่มมากขึ้น ยิ่งทำให้เกิดการผ่อนคลายของพลังงานความเครียดในระบบ ในระบบที่มีการผ่อนคลายความเครียดน้อย ลวดลายตารางที่เกิดขึ้นจะเกิดเป็นเนินขนาดเล็กที่เรียงตัวเป็นเส้นยาวในทิศ [110] และทิศ [1-10] เนินแต่ละเนินมีระยะห่างกันอย่างชัดเจนและมีจำนวนของเส้นเนินน้อย ในระบบที่มีการผ่อนคลายความเครียดสูง เนินที่เกิดขึ้นจะมีความสูงและจำนวนที่มากขึ้น พร้อมกันนี้ยังสังเกตเห็นการซ้อนทับกัน ทำให้เกิดแนวของเนินขนาดใหญ่ขึ้นทั้งสองทิศทาง ต่อมาเมื่อทำการปลูกควอนตัมดอตลงไปยังแนวของเนินลายตารางที่เกิดขึ้นจะเกิดการก่อตัวของควอนตัมแบบเส้นบนแนวของแนวเนินดังกล่าว แต่จากการศึกษาเพิ่มเติมโดย T. Limwongse [34] พบว่า ในความเป็นจริงควอนตัมดอตจะเริ่มก่อตัวบนบริเวณ threading dislocation ก่อนบริเวณอื่น จากนั้นจึงเกิดขึ้นบริเวณจุดตัดกันของแนวเนิน ตามด้วยเกิดบนแนวเนินในทิศ [1-10] และทิศ [110] ตามลำดับก่อนที่จะเกิดในบริเวณพื้นเรียบนอกแนวเนิน เมื่อทราบถึงพฤติกรรมการก่อตัวของควอนตัมดอตและผลของการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของลวดลายตารางจึงทำให้สามารถกำหนดแม่แบบในการจัดเรียงตัวควอนตัมที่เหมาะสมได้ตามที่ต้องการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงชั้นของแผ่นฐานเสมือนลายตารางด้วยชั้น GaAs spacer โดยอาศัยแผ่นฐานเสมือนลายตารางประกอบด้วยชั้นของ $In_{0.15}Ga_{0.85}As$ บนแผ่นฐานGaAs ระนาบ (100) ((100) – GaAs) โดยอาศัยเงื่อนไขการปรับเปลี่ยนการปลูกของชั้นลายตารางตามที่ได้กล่าวถึงของ Cho Cho Thet และนายธีรวัฒน์ ลิ่มวงศ์ แผ่นฐานลายตารางจะต่างจากแผ่นฐานทั่วไปคือภายในแผ่นฐานลายตารางจะมีความผิดปกติทางตำแหน่งของอะตอม ส่งผลต่อเนื่องไปยังผิวหน้าด้วยมุม 60° จากแนวระนาบ ความผิดปกติของโครงผลึกมีสองรูปแบบ คือ threading dislocations และ misfit dislocation [35,36] ก่อให้เกิดเนิน (ridge) เรียงเป็นแนวยาวในทิศ [110] และทิศ [1-10] บนผิวหน้าของชิ้นงาน ลักษณะที่เกิดขึ้นเกิดจากการผ่อนคลาย (relax) ความเครียดบางส่วนที่สะสมจากความไม่เข้ากันของโครงผลึก InGaAs กับ GaAs การปรับปรุงโครงสร้างดังกล่าวโดยการเพิ่มชั้นของ GaAs ที่มีความหนาลงไป จะทำให้เกิดโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายๆบ่อควอนตัมขึ้น ส่งผลให้แนวของ

dislocation ที่มีอยู่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม และในขั้นสุดท้ายจึงทำการปลูกควอนตัมลงไปบนชั้น GaAs ที่หนานี้เพื่อศึกษาการจัดเรียงตัวของควอนตัมดอตและผลทางแสง

ประโยชน์ที่ได้จากการศึกษาปรับปรุงแผ่นฐานเสมือนลายตารางนี้ คือความเป็นไปได้ที่จะควบคุมและเปลี่ยนแปลงทิศการเกิดขึ้นของควอนตัมดอตในรูปแบบใหม่ เช่นการเรียงตัวของควอนตัมดอตแบบเส้นในทิศเดียว เนื่องจากแนวของ dislocation ที่เปลี่ยนแปลงด้วยผลของชั้น GaAs ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีความเป็นไปได้ที่จะปรับปรุงคุณภาพทางแสงของชิ้นงานในโครงสร้างของแผ่นฐานลายตารางเสมือนเดิมเนื่องจากการลดลงของผลจาก dislocation

เนื้อหาในบทต่อไปของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบไปด้วย บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับควอ์นตัมดอต ชั้นลายตาราง และชั้น GaAs spacer บทที่ 3 การปลูกโครงสร้างและการวัดลักษณะสมบัติ ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในการปลูกโครงสร้างด้วยเทคนิคเอพิแทกซีลำโมเลกุล หรือ MBE รวมทั้งระบบวัดลักษณะสมบัติและระบบตรวจวัดขณะปลูกโครงสร้างทั้งแบบติดตั้งภายในและภายนอกเครื่องปลูกผลึก บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ ซึ่งจะกล่าวถึงวิวัฒนาการการเกิดควอนตัมดอตบนลายตารางและความสำคัญของข้อมูลดังกล่าว และบทที่ 5 สรุปผลการทดลอง