

บทที่ 4

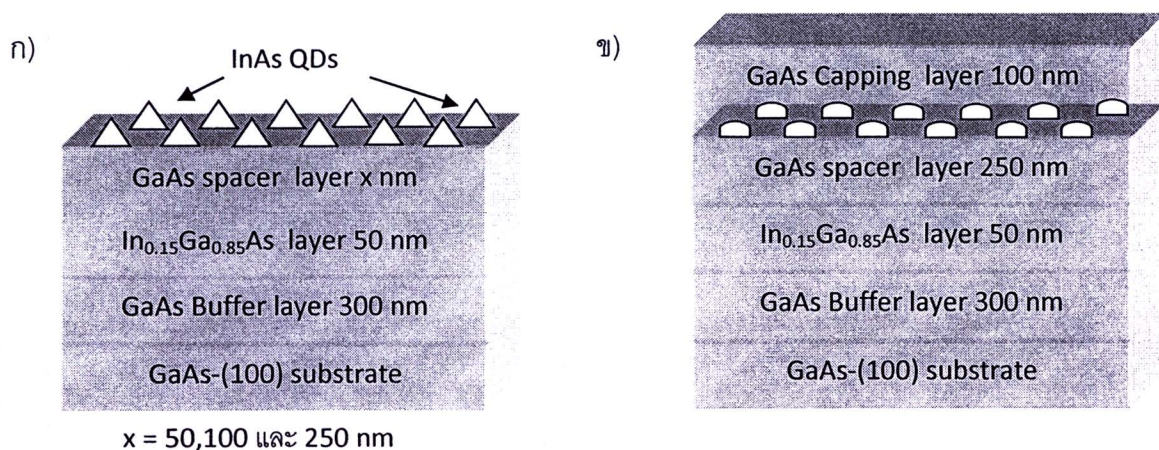
ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ควอนตัมดอตที่ปลูกบน $\text{In}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}/\text{GaAs}$ จะมีการจัดเรียงในทิศ $[110]$ และทิศ $[1-10]$ ซึ่งสอดคล้องกับแนวของ dislocation ด้านล่าง การเพิ่มชั้น GaAs spacer บนลายตารางส่งผลให้ลายตารางที่ปรากฏบนพื้นผิวเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้ควอนตัมดอตที่ปลูกบนพื้นผิวดังกล่าวมีการจัดเรียงตัวที่เปลี่ยนแปลงไปด้วย

ในบทนี้จะอธิบายผลการทดลองการปลูกควอนตัมดอตบนแม่แบบ $\text{GaAs}/\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ เมื่อความหนาของชั้น GaAs spacer เปลี่ยนแปลงไป โดยจะมุ่งเน้นผลการศึกษาสมบัติของพื้นผิวและการเปล่งแสงของชิ้นงาน

4.1 โครงสร้างของชิ้นงาน

โครงสร้างของชิ้นงานทั้งหมดที่ปลูกขึ้นถูกแสดงในภาพตัดขวางดังรูปที่ 4.1 พร้อมกับแสดงรายละเอียดต่างๆในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ภาพตัดขวางของชิ้นงานในการทดลอง ก) โครงสร้างสำหรับศึกษาสมบัติทางกายภาพของ

ผิวหน้าด้วยเทคนิค AFM ข) โครงสร้างสำหรับศึกษาสมบัติทางแสงด้วยเทคนิค PL

การปลูกชิ้นงานเริ่มต้นจากแผ่นฐาน (100) - GaAs หลังจากผ่านกระบวนการเตรียมผิวหน้า ชิ้นงานจะถูกปลูกชั้น GaAs บัฟเฟอร์หนา 300 nm ที่อุณหภูมิผิวหน้า 580°C เพื่อให้ผิวหน้าเรียบ จากนั้นจึงลดอุณหภูมิลงมาที่ 500°C เพื่อปลูก $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ ความหนา 50 nm ตามด้วยชั้น GaAs spacer หนา 50, 100 หรือ 250 nm สำหรับชิ้นงาน A, B และ C ตามลำดับ เพื่อใช้เป็นแม่แบบในการก่อ

ตัวของควอนตัมดอต จากนั้นจึงปลูกชั้น InAs ควอนตัมดอต หนา 1.8 ML ในแบบ SK ปกติ และ SK แบบ MEE ซึ่งจะแตกต่างกันในรูปแบบการเปิดปิดขัดเตอร์สาร In และ As ขณะปลูกควอนตัมดอตดังที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 3 โดยหลังจากที่ควอนตัมดอตก่อตัวขึ้น ขัดเตอร์ In จะปิดลงแล้วคงอุณหภูมิปลูกไว้เป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นสำหรับชิ้นงานที่ใช้ศึกษาสมบัติของพื้นผิว ดังโครงสร้างที่ 4.1 ก) อุณหภูมิแผ่นฐานจะถูกปรับลงมายัง 100°C ทันทีเพื่อรักษารูปร่างของควอนตัมดอต [76] ส่วนชิ้นงานที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสงดังโครงสร้างในรูปแบบที่ 4.1 ข) ควอนตัมดอตจะถูกกลบทับด้วย GaAs หนา 100 nm ก่อนแผ่นฐานจะถูกลดอุณหภูมิลงมายัง 100°C ลักษณะของชิ้นงานต่างๆที่ใช้ในการศึกษาถูกสรุปในตารางที่ 4.1 ชิ้นงานสำหรับศึกษากายภาพของผิวหน้า ได้แก่ ชิ้นงาน A-F ประกอบไปด้วยชิ้นงานที่มีชั้น GaAs Spacer หนา 50, 100, 250 nm (ชิ้นงาน A-C) และชิ้นงานที่ใช้วิธีการปลูกควอนตัมดอตแบบ MEE ซึ่งใช้ปริมาณสารในการปลูกไม่เท่ากัน (ชิ้นงาน D และ E) และชิ้นงานสำหรับวัดทางแสงโดยเทคนิค PL ได้แก่ ชิ้นงาน G

ตารางที่ 4.1 ชิ้นงานทั้งหมดที่ได้จากการทดลอง แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ชิ้นงานสำหรับศึกษากายภาพของผิวหน้าและชิ้นงานสำหรับวัดทางแสงโดยเทคนิค PL

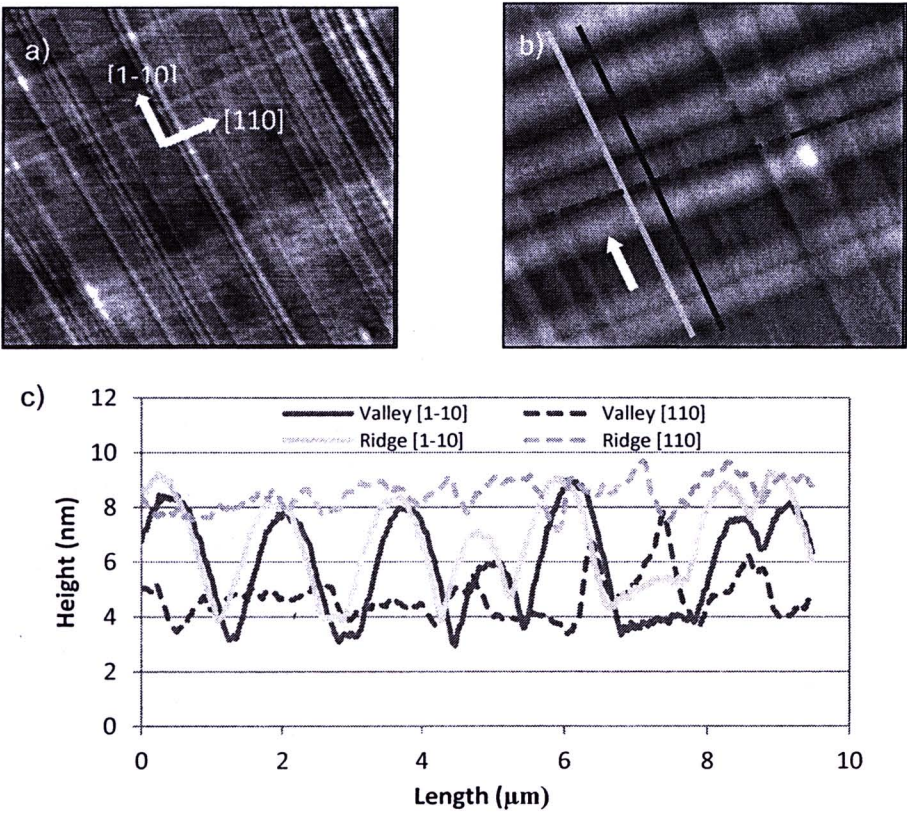
Sample	GaAs Capping Layer Thickness (nm)	InAs QD (ML)	GaAs Spacer Thickness (nm)	In _{0.15} Ga _{0.85} As layer Thickness (nm)	GaAs Buffer Layer thickness (nm)
A	-	1.8 SK	50	50	300
B	-	1.8 SK	100	50	300
C	-	1.8 SK	250	50	300
D	-	-	250	50	300
E	-	1.8 MEE	250	50	300
F	-	1.8 Overgrowth 50% MEE	250	50	300
G	100	1.8 SK	250	50	300

4.2 ผิวหน้าของชั้น GaAs spacer และการจัดเรียงควอนตัมดอตบนผิวหน้า

ผลของการเพิ่มขึ้น GaAs spacer ที่มีความหนาแตกต่างกันจะถูกศึกษาในหัวข้อนี้ โดยจะศึกษา ลักษณะกายภาพของผิวหน้าเป็นหลัก พร้อมกับแสดงการเรียงตัวของควอนตัมดอตที่เกิดขึ้น

4.2.1 ผิวหน้าของชั้น GaAs spacer

เมื่อเพิ่มขึ้น GaAs spacer ลงบนผิวหน้าทำให้ลักษณะของผิวหน้ามีการเปลี่ยนแปลงไปจาก ผิวหน้าของแผ่นฐานเสมือนลายตารางเดิม ดังภาพ AFM ในรูปที่ 4.2 ผิวหน้าของชั้นงานที่มีชั้น GaAs spacer มีแนวของเนินในทิศทาง [110] ขนาดใหญ่กว่า จาก line scan ในรูปที่ 4.2 ข) ซึ่งเป็นภาพ AFM ที่ได้จากชั้นงาน D พบว่ามีความกว้างเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 1,336 nm เมื่อเปรียบเทียบกับผิวหน้าของลาย ตาราง $In_{0.15}Ga_{0.85}As$ ที่ปราศจากชั้น GaAs spacer ในรูปที่ 4.2 ก) ของ C.C. Thet [33] ซึ่งมีความกว้าง เฉลี่ย 455 nm เท่านั้น ในส่วนความลึกของแนวเนินจากยอดถึงพื้น (peak to valley) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.19 nm ในรูปที่ 4.2 ก) เป็น 4.48 nm ในรูปที่ 4.2 ข) นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นค่าความสูงที่เพิ่มขึ้นจาก ปกติในบริเวณที่แนวของเนินทั้งสองทิศทางตัดกันดังแสดงในรูปที่ 4.2 ค) ในส่วนความกว้างแนวเนินและ ความลึกจากยอดถึงพื้นในทิศทาง [1-10] มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกันแต่เปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อเทียบกับใน ทิศทาง [110] ลักษณะทางกายภาพทั่วไปของผิวหน้าทั้งสองถูกสรุปและแสดงในตารางที่ 4.2



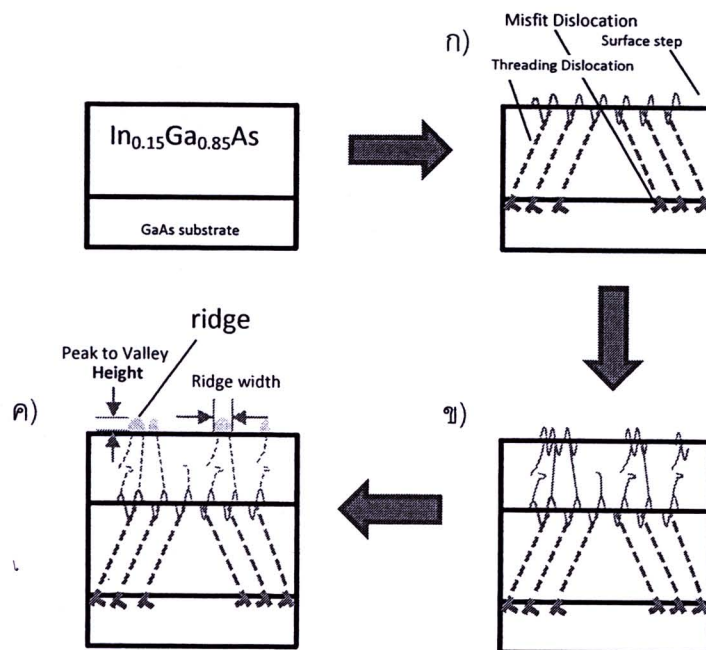
รูปที่ 4.2 ภาพ AFM ขนาด $10 \times 10 \mu m^2$ แสดงลักษณะผิวหน้าที่ยังไม่ได้ปลูกควอนตัมดอต ก) โครงสร้าง $50 \text{ nm } In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs$ [33] และ ข) ชั้นงาน D ซึ่งมีโครงสร้าง $250 \text{ nm } GaAs \text{ Spacer} / 50 \text{ nm } In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs$ และ ค) line scan ของชั้นงาน D ตามตำแหน่งในรูป b)

ตารางที่ 4.2 ความกว้างของเนินและความลึกจากยอดถึงพื้นในทิศ [110] และ [1-10] ของโครงสร้าง

$\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ และชั้นงาน D

Structure	Peak to valley Height (nm)		Ridge Width (nm)	
	[110]	[1-10]	[110]	[1-10]
50nm $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$	1.42	2.67	455	623
Sample D	1.19	4.48	1,336	713

การเปลี่ยนแปลงของผิวหน้าสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 4.3 ผิวหน้าของชั้นงานเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละขั้นตอนการปลูก ผิวหน้าลายตารางของชั้นงานที่ไม่มีชั้น GaAs spacer ในรูปที่ 4.3 ก) มีลักษณะเป็นแนวของเนิน (Ridge) เล็ก ๆ ที่เรียงตัวตลอดทั่วทั้งชั้นงานในสองทิศทาง [110] และ [1-10] ซึ่งเกิดจาก misfit dislocation ของการคลายความเครียดเพียงบางส่วนของชั้น InGaAs ในระบบ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ เมื่อเกิดจากความหนาวิกฤติ ซึ่งในที่นี้มีค่าความหนาวิกฤติประมาณ 10 nm สำหรับ In 15% ตามแบบจำลองของ Matthews and Blakeslee ต่อมาเมื่อปลูกชั้น GaAs spacer ลงบนผิวชั้นงานดังแสดงในรูปที่ 4.3 ข) แนวของ dislocation ที่มีอยู่เดิมก่อให้เกิดแนวของ dislocation ใหม่ แต่แนวของ dislocation ใหม่ไม่สามารถผ่านขึ้นไปยังผิวหน้าได้หมดโดยเฉพาะเมื่อชั้น GaAs spacer มีความหนาเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีบางส่วนหยุดอยู่ในเนื้อชั้นงานหรือเบี่ยงเบนออกไปนอกชั้นงานดังที่อธิบายในบทที่ 2 (หัวข้อ 2.3.3.2.3) ผลที่ได้จึงปรากฏเป็น surface step ขึ้นบนผิวหน้าคล้ายในกรณีของลายตารางของ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ หลังจากนั้นจึงเกิดกระบวนการของ surface step elimination ผลที่ได้จึงเกิดเป็นแนวเนินยาวตลอดทั้งชั้นงาน (รูปที่ 4.3 ค)) ในสองทิศทางเช่นกันแต่มีรูปร่างที่เปลี่ยนไป จากค่า peak to valley หรือค่าความลึกของแนวเนินจากยอดเนินถึงพื้นด้านล่างและค่า ridge width คือค่าความกว้างของแนวเนินซึ่งวัดในทิศทาง [110] และ [1-10] จะเห็นได้ว่าแนวของเนินโดยเฉพาะในทิศทาง [110] เป็นแนวเนินที่มีขนาดใหญ่กว่า ซึ่งเป็นผลจากแนวของ dislocation ใหม่ที่ชิดกันมาก [58] นอกจากนี้เมื่อพิจารณา line scan ในรูปที่ 4.2 ค) .แสดงให้เห็นถึงแนวของเนินในทิศ [1-10] มีความลึกและความเป็นลอนมากกว่าเมื่อเทียบกับทิศ [110] ลักษณะผิวดังกล่าวที่แตกต่างไปจากเดิมจะส่งผลให้การก่อตัวของควอนตัมดอตที่ได้แตกต่างไปจากเดิมเมื่อทำการปลูกควอนตัมดอต ผลของการปลูกควอนตัมดอตลงบนผิวของชั้นงานที่มีชั้น GaAs spacer จะถูกศึกษาและอธิบายพร้อม ๆ กลไกการขยายตัวของแนวเนินในหัวข้อถัดไป

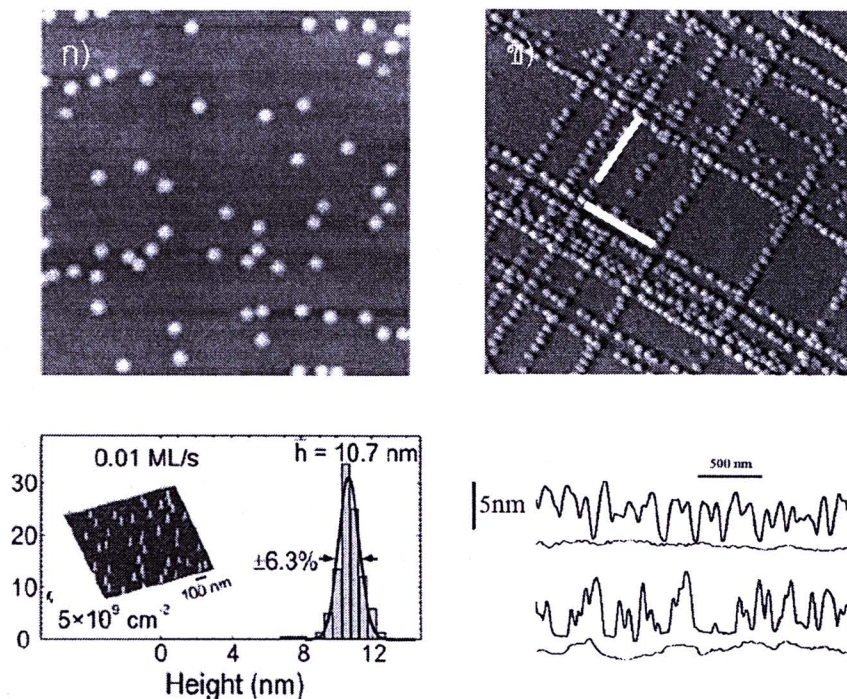


รูปที่ 4.3 ลำดับของการเปลี่ยนแปลงผิวหน้าในการสร้างแม่พิมพ์สำหรับการก่อตัวควอนตัมดอทใหม่ โดยแสดงกลไกพร้อมลักษณะการก่อตัวของผิวหน้าของชั้นงาน ก) การเกิดลายตารางขึ้นจากการเลื่อนของระนาบผลึกเนื่องจาก misfit และ threading dislocation ของชั้น $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ ข) การเพิ่มชั้น GaAs spacer ทำให้แนวของ dislocation เปลี่ยนแปลงไป โดยมีบางส่วนหยุดหรือเบี่ยงเบนไปจากทิศทางเดิม ในขณะที่มีบางส่วนผ่านขึ้นยังผิวหน้าได้ และ ค) แสดงการเกิดของแนวเนินขนาดต่างๆ ซึ่งเป็นผลจากการเลื่อนของระนาบบนผิวหน้าและการเกิด surface step elimination

4.2.2 ควอนตัมดอทบนผิวหน้าของชั้น GaAs spacer

ก) การจัดเรียงตัวควอนตัมดอทบนผิวหน้าของ GaAs spacer

การเรียงตัวของ InAs ควอนตัมดอทบน GaAs โดยทั่วไปเป็นอย่างไรไม่มีระเบียบเนื่องจากการเกิดขึ้นแบบสุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ก) ซึ่งได้จากการปลูก 1.8 ML InAs ควอนตัมดอทบนชั้น GaAs โดยตรง ของ S. Kiravittaya [79] การเรียงตัวของควอนตัมดอทจะเป็นระเบียบมากขึ้นเมื่ออาศัยชั้นลายตาราง InGaAs/GaAs ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ข) เป็นรูปที่ได้จากการปลูก 1.8 ML InAs ควอนตัมดอทบนชั้น 50 nm $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ ของ C.C. Thet [33] สำหรับการปลูก InAs ควอนตัมดอทบนชั้น $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ ที่มีชั้น GaAs Spacer จะให้ผลที่แตกต่างออกไปดังแสดงในรูปที่ 4.4

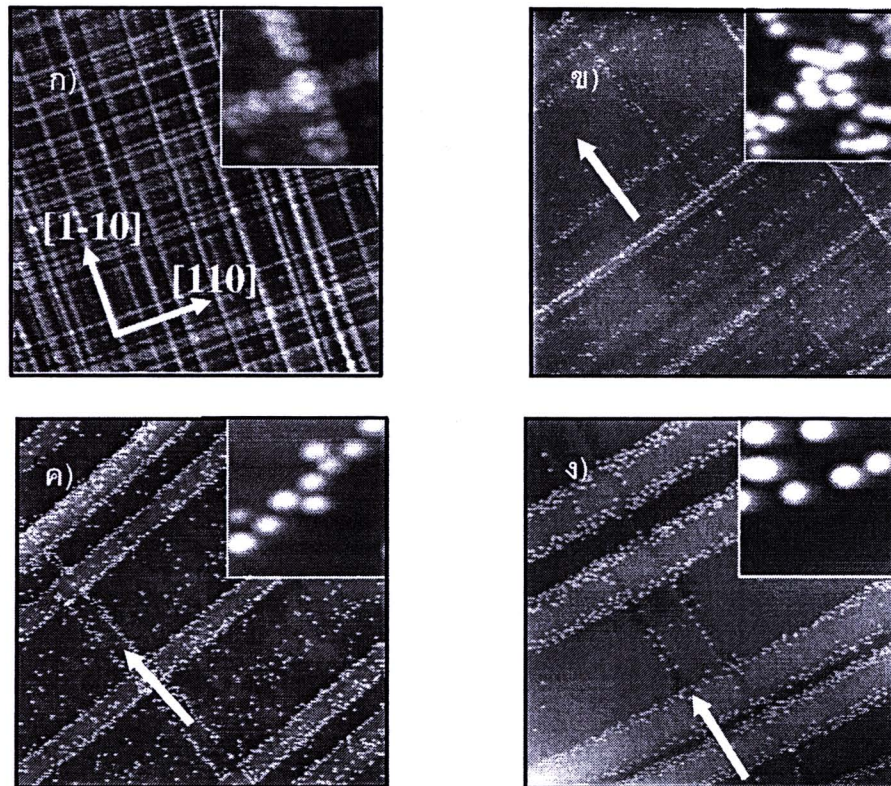


รูปที่ 4.4 ภาพ AFM ของการปลูก 1.8 ML InAs QDs บน ก) $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$

ข) GaAs (100) ซึบสเตรตพร้อมความสูง [77,79]

การเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น GaAs spacer มีผลต่อการเรียงตัวของควอนตัมดอตตามลักษณะผิวหน้าที่เปลี่ยนแปลงไป รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะการจัดเรียงตัวของควอนตัมดอตของ ก) โครงสร้าง 50 nm $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$, ข) ชั้นงาน A, ค) ชั้นงาน B และ ง) ชั้นงาน C โดยพบว่าการจัดการเรียงตัวของควอนตัมดอตปรากฏทั่วไปในสองทิศทาง คือ ทิศ [110] และทิศ [1-10] เมื่อไม่มีชั้น GaAs Spacer (รูป 4.5 ก)) แต่เมื่อชั้น GaAs spacer หนาขึ้น ความหนาแน่นของเส้นการเรียงตัวของควอนตัมดอตมีค่าน้อยลงในทั้งสองทิศทาง โดยเฉพาะในทิศ [1-10] มีค่าลดลงอย่างมาก ทำให้การจัดเรียงตัวในทิศทาง [110] มีความโดดเด่นมากกว่า ดังแสดงในรูป 4.5 (ข, ค และ ง) พร้อมกันนี้ยังปรากฏให้เห็นแนวของเนินขนาดใหญ่บริเวณผิวหน้าของชั้นงานทั้งสองทิศทาง ความกว้างของแนวเนินเหล่านี้เพิ่มมากขึ้นเมื่อความหนาของชั้น GaAs spacer โดยเฉพาะในทิศทาง [110] แนวเนินเหล่านี้คือ surface step ที่เกิดจากการเลื่อนตัวของระนาบผลึก โดยมีจุดกำเนิดจาก misfit dislocation ที่เกิดจากการคลายตัวบางส่วนของความเครียดเนื่องจากความไม่เข้ากันของโครงร่างผลึก InGaAs กับ GaAs (ประมาณ 1%) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการเกิดลายตารางในระบบ InGaAs/GaAs [54] แต่ลักษณะของ dislocation จะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ซึ่งเมื่อปลูกชั้นของ GaAs spacer ลงไปบนชั้นของเนินเหล่านี้จะทำให้พลังงานพื้นผิวลดลง surface step ที่มีอยู่ถูกทำลายลง [55] ส่งผลให้เกิดแนวของเนินที่มีความกว้างขึ้นในทิศทาง [1-10] และทิศทาง [110] บนชั้นของ GaAs spacer การก่อตัวของควอนตัมดอตจะ

เกิดขึ้นบริเวณขอบของแนวนินเหล่านี้ เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีพลังงานต่ำ จึงเป็น preferential site สำหรับการก่อตัว [78]



รูปที่ 4.5 ภาพ AFM ขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ แสดงลักษณะการก่อตัวของ InAs ควอนตัมดอตที่ปลูกด้วยวิธีแบบ SK ของ ก) ชั้นงาน $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ ข) ชั้นงาน A ค) ชั้นงาน B และ ง) ชั้นงาน C ตามลำดับโดยในแต่ละรูปทางด้านมุมขวามือมีรูปขยายขนาด $0.5 \times 0.5 \mu\text{m}^2$ ในบริเวณตำแหน่งที่สนใจและลูกศรสีขาวแสดงทิศทาง [1-10]

ข) ลักษณะทางกายภาพของควอนตัมดอตบนผิวหน้าของชั้น GaAs spacer

ค่าความสูง ขนาด และความหนาแน่นของควอนตัมดอต รวมถึงค่าความกว้างของแนวนิน ในแต่ละชั้นงาน ถูกแสดงในตารางที่ 4.3 ความสูงและขนาดของควอนตัมดอตในชั้นงานมีค่าสูงขึ้นเมื่อความหนาของชั้น GaAs spacer เพิ่มขึ้น แต่เปลี่ยนแปลงไม่มากนักในชั้นงาน A และ B ที่มีความหนา 50 และ 100 ตามลำดับ ซึ่งมีความสูงใกล้เคียงกับการปลูกควอนตัมดอตบนชั้นเสมือนลายตารางโดยตรงของ C.C. Thet [33] ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ข) ซึ่งมีค่าความสูงโดยเฉลี่ย 5 nm แต่มีขนาดใหญ่กว่าโดยเฉพาะในทิศ [110] เมื่อความหนาของชั้น GaAs เพิ่มขึ้นเป็น 250 nm ในชั้นงาน C ค่าความสูงจะเปลี่ยนแปลงสูงขึ้น (6.17 nm) และมีขนาดใหญ่ขึ้นโดยเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนในทิศ [110] ขนาดที่เปลี่ยนแปลงอย่างไม่สมมาตรในทิศ [110] และทิศ [1-10] เป็นผลจากความแตกต่างของลวดลาย

แนวเนิ่นที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าเนื่องจากความไม่เท่ากันของ dislocation ในสองทิศทาง [56] ซึ่งเปรียบเทียบกับขนาดของ InAs ควอนตัมดอตที่ปลูกบนชั้น GaAs โดยตรงของ S. Kiravittaya [79] ที่ปลูกด้วยเงื่อนไขเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ก) พบว่ามีความสูงเป็น 10.7 nm แต่มีขนาดเล็กกว่า (38 nm) ลักษณะดังกล่าวเมื่อแสดงให้เห็นถึงความหนาที่เพิ่มขึ้นทำให้ระบบโดยรวมเปลี่ยนจากการปลูก InAs/In_{0.15}Ga_{0.85}As ไปเป็น InAs/GaAs แต่ที่มีขนาดใหญ่กว่าเนื่องจากยังมีผลของ dislocation ที่ยังคงส่งผลต่อลักษณะผิวหน้าของชิ้นงาน ในส่วนความหนาแน่นของควอนตัมดอตมีความหนาแน่นต่างกันน้อยในชิ้นงาน A และ B แต่ลดลงอย่างมากในชิ้นงาน C เนื่องจากควอนตัมดอตมีการจัดเรียงตัวและเลือกก่อตัวมากยิ่งขึ้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับควอนตัมดอตที่เกิดบนชั้น GaAs โดยตรงและบนชั้นลายตาราง In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs พบว่ามีความหนาแน่นที่น้อยกว่าในทุกชิ้นงานที่มีชั้น GaAs spacer

ตารางที่ 4.3 ค่าความสูง ความหนาแน่นของควอนตัมดอต และขนาดของแนวเนิ่น ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ปลูก InAs ควอนตัมดอตแบบ SK บนชิ้นงาน A, B และ C ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลของชิ้นงานที่ปลูก InAs ควอนตัมดอตแบบเดียวกันบนผิวหน้าของ GaAs โดยตรงของ S.Kiravittaya [79] และบน In_{0.15}Ga_{0.85}/GaAs ของ C C Thet [80]

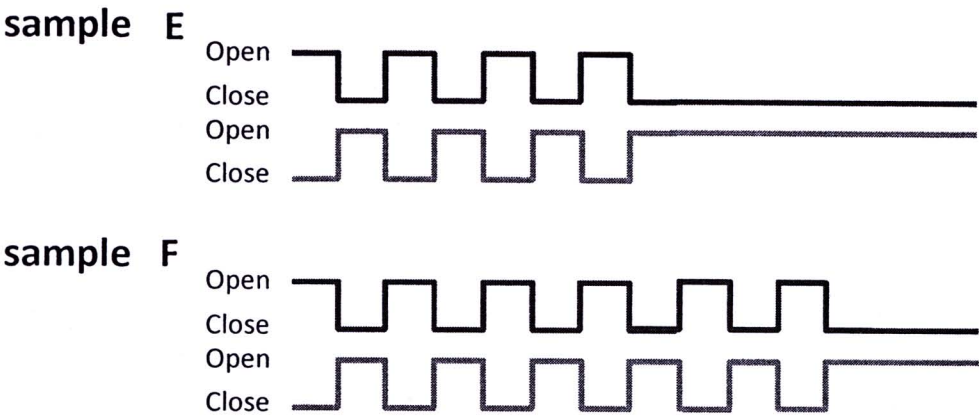
Structure	GaAs Spacer Thickness (nm)	Dot Density (cm ⁻²)	Dot Height (nm)	Dot Size (nm)		Ridge Width (nm)	
				[110]	[1-10]	[110]	[1-10]
Sample A	50	1.03x10 ⁹	4.57	118.57	103.22	467.75	190.23
Sample B	100	1.08x10 ⁹	4.75	120.57	114.33	730.87	713
Sample C	250	9.39x10 ⁸	6.36	169.70	129.07	1387.5	1256
In _{0.15} Ga _{0.85} As/GaAs	-	6.1x10 ⁹	5	75	93	-	-
InAs/GaAs	-	6x10 ⁹	10.7	38*		-	-

*average diameter

ค) การจัดเรียงควอนตัมดอตแบบ SK ในรูปแบบ MEE

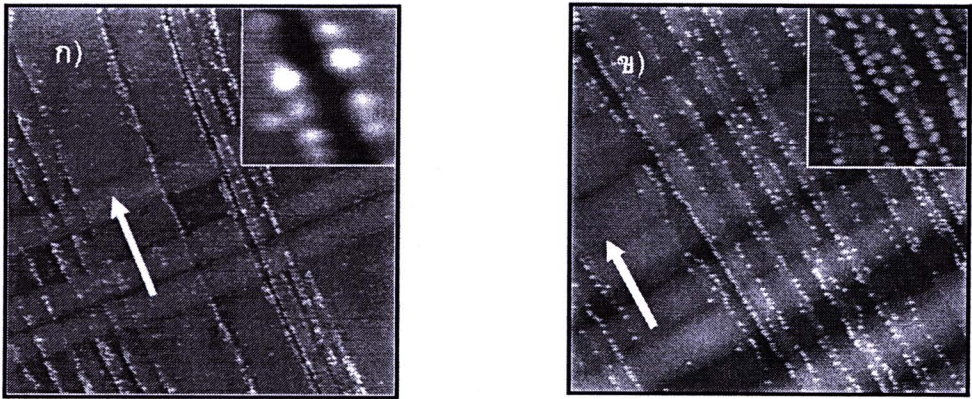
วิธีการปลูกเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของควอนตัมดอตบนพื้นผิวของชิ้นงานที่มีชั้น GaAs spacer ในการทดลองจะใช้วิธีการปลูกอยู่ 2 วิธีคือการปลูกแบบ SK ปกติ และการปลูกแบบ SK Migration Enhance Epitaxy (MEE) ความแตกต่างของวิธีการปลูกทั้งสอง คือลักษณะการเปิดชุดเตอร์ของสารในขณะปลูกควอนตัมดอต ในการปลูกควอนตัมดอตสารที่ใช้คือ In และ As สำหรับวิธีการ

ปลูกแบบปกติ ชัตเตอร์ In และ As จะเปิดตลอดเวลาขณะทำการปลูกควอนตัมดอต ในขณะที่การปลูกแบบ MEE ชัตเตอร์ของ In และ As จะเปิดปิดสลับกัน ดังได้กล่าวบทที่ 3 (รูปที่ 3.17)



รูปที่ 4.6 ลักษณะการเปิดปิดชัตเตอร์ In และ As ในชั้นงาน E และ F

ผลการทดลอง แนวของการก่อตัวและการเรียงตัวของควอนตัมดอตในการปลูกแบบ SK ปกติที่จะเกิดขึ้นอย่างเด่นชัดในทิศทาง [110] (รูปที่ 4.5 ง)) ในขณะที่การปลูกด้วยวิธีแบบ MEE การเรียงตัวของควอนตัมดอตจะโดดเด่นในทิศทาง [1-10] ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ก) และ 4.7 ข) ซึ่งเป็นภาพ AFM ที่ได้จากชั้นงาน E และ ชั้นงาน F ตามลำดับ ทั้งสองชั้นงานมีโครงสร้างพื้นฐานที่เหมือนกัน มีวิธีการปลูกควอนตัมดอตแบบเดียวกัน คือ แบบ MEE แต่แตกต่างในจำนวนวัฏจักรการเปิดและปิดชัตเตอร์สาร In และ As ซึ่งชั้นงาน E มีจำนวนวัฏจักรที่มากกว่าชั้นงาน F อยู่ 50% ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.7 ภาพ AFM ขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ ของชั้นงาน F และ G ซึ่งปลูกควอนตัมดอตแบบ MEE โดย over growth n) 0% และ ข) 50% ตามลำดับ โดยในแต่ละรูปทางด้านมุมขวามบนมีรูปขยายขนาด $0.5 \times 0.5 \mu\text{m}^2$ ในบริเวณที่สนใจ และลูกศรสีขาวแสดงถึงทิศทาง [1-10]

การเปลี่ยนแปลงทิศการเรียงตัวของควอนตัมดอตเมื่อเปลี่ยนแปลงวิธีการปลูกเป็นผลมาจากลักษณะของความแตกต่างของแนวเนินในสองทิศทาง ลักษณะของควอนตัมดอตยังคงก่อตัวบริเวณขอบของเนินที่เกิดขึ้น แต่เป็นแนวของเนินในทิศทางที่ไม่เหมือนกัน เมื่อพิจารณาถึงลักษณะทางกายภาพของแนวเนินทั้งสองทิศทางพบว่ามีความแตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.2 ค) line scan ของลักษณะพื้นผิวในสองทิศทาง พบว่าแนวของเนินในทิศทาง $[1-10]$ มีความลึกและความเป็นรอนคลื่นมากกว่าเมื่อเทียบกับแนว $[110]$ ทำให้เกิดความไม่เท่ากันขึ้นในการก่อตัวทั้งสองทิศทาง ซึ่งโดยมากอะตอมของ In ขึ้นขอบที่จะเคลื่อนที่ไปในทิศทาง $[1-10]$ มากกว่า $[81]$ นอกจากนี้ผลของระนาบผลึกที่เปลี่ยนไปเนื่องจากพื้นผิวที่เป็นรอนคลื่นยังมีส่วนสำคัญต่อการเลือกก่อตัวของควอนตัมดอตบนพื้นผิวเช่นเดียวกัน

ความแตกต่างของพื้นผิวที่เกิดขึ้นรวมกับการเคลื่อนที่ของพาหะที่ไม่เหมือนกันเนื่องการเปิด-ปิดขั้วเตอร์ที่แตกต่างกันของการปลูกทั้งสองวิธี ก่อให้เกิดการสลับทิศการเรียงตัวโดดเด่นของควอนตัมดอตขึ้น ในการปลูกควอนตัมดอตแบบปกติ In adatoms มีอิสระและความยาวแพร่ (diffusion length) สั้น เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอะตอม In บนพื้นผิวจะถูกควบคุมโดยไอของลุ่มโมเลกุลของ As_4 ตลอดเวลา จึงไม่มีพลังงานเพียงพอที่จะเอาชนะพลังงานความเครียด (strain energy) ที่เกิดจาก surface step ในทิศทาง $[1-10]$ ได้ และการก่อตัวขึ้นบริเวณขอบของเนินในทิศทาง $[110]$ แทนเนื่องจากใช้พลังงานน้อยกว่า แต่สำหรับการปลูกแบบ MEE อะตอม In จะถูกควบคุมโดยไอของลุ่มโมเลกุล As_4 ลดลง ทำให้ In adatoms มีอิสระ รวมถึงมีพลังงานในการเคลื่อนที่มากกว่า ทำให้เคลื่อนที่ได้ไกลกว่า $[81]$ การก่อตัวของควอนตัมดอตจึงเกิดขึ้นในบริเวณขอบของแนวเนินในทิศทาง $[1-10]$ เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีพลังงานที่น้อยที่สุด $[78]$

4.3 สมบัติทางแสงของชิ้นงาน

หัวข้อที่ผ่านมาได้อธิบายลักษณะทางกายภาพของควอนตัมดอตที่เกิดขึ้นบน GaAs spacer เฉพาะผิวหน้าเท่านั้น การศึกษาสมบัติโดยรวมของชิ้นงานจำเป็นต้องรวมสมบัติทางแสงเข้าไว้ด้วย คุณภาพการเปล่งแสงที่ดีบ่งบอกถึงชิ้นงานที่สามารถนำไปผลิตเป็นอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ในเชิงพาณิชย์ได้ ค่ายอดพลังงานของแสงที่เปล่งออกมาทำให้ทราบถึงองค์ประกอบทางเคมีของสารต่าง ๆ ที่มีอยู่ในชิ้นงาน

สมบัติทางแสงของชิ้นงานได้ถูกวัดโดยเทคนิค PL ภายใต้เงื่อนไขการทดลอง 3 เงื่อนไข คือ

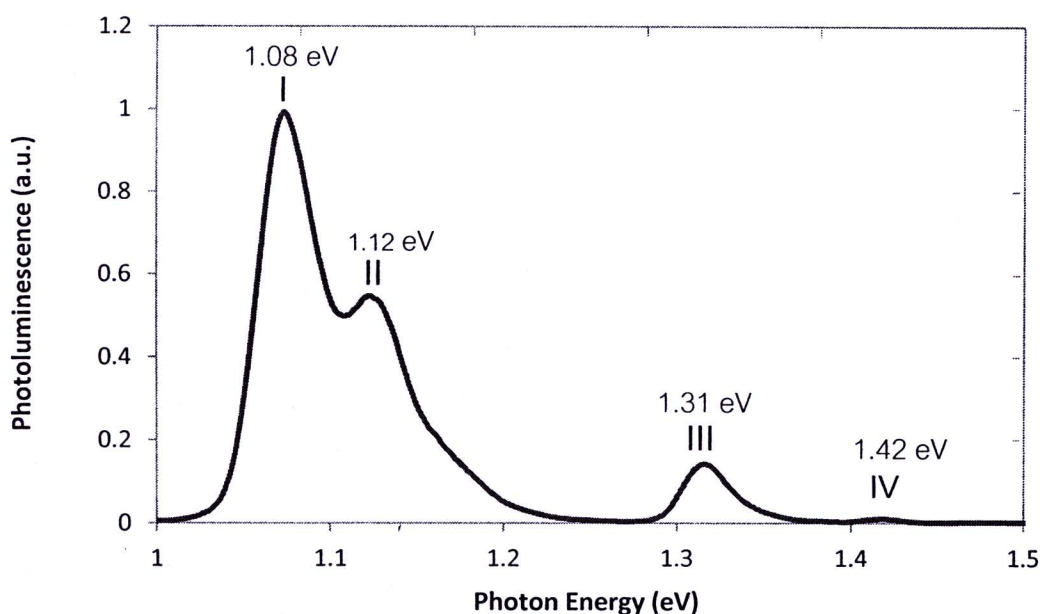
- ก) การวัดสเปกตรัมของแสงที่เปล่งออกมาในสภาวะที่อุณหภูมิของชิ้นงานมีค่าคงที่แต่ความเข้มของแสงเลเซอร์กระตุ้นเปลี่ยนแปลงไป

- ข) การวัดสเปกตรัมของแสงที่เปล่งออกมาในสภาวะที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปแต่ความเข้มของแสงเลเซอร์กระตุ้นมีค่าคงที่
- ค) การวัดค่าความเข้มแสงเมื่อผ่าน Polarizer ที่มุมต่างๆ ในสภาวะที่อุณหภูมิและกำลังแสงเลเซอร์กระตุ้นคงที่

หัวข้อนี้จะอธิบายลักษณะทั่วไปของการเปล่งแสงของชั้นงาน G ตามด้วยผลการทดลองทั้งสามข้างต้น ตามลำดับดังนี้

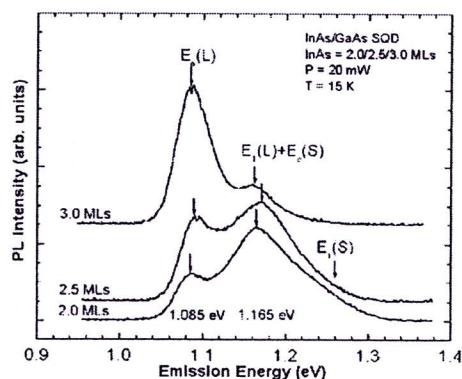
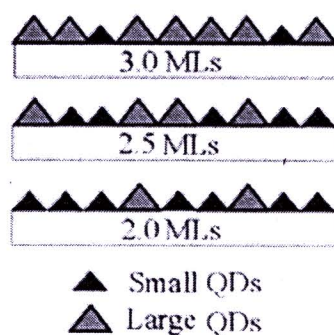
4.3.1 ลักษณะโดยทั่วไปของการเปล่งแสงของชั้นงาน

ลักษณะการเปล่งแสงโดยทั่วไปของชั้นงาน G ประกอบด้วยยอดพลังงาน (peak) หลัก 4 ยอดอยู่ในช่วง 1.0-1.5 eV ซึ่งสามารถจำแนกออกเป็นสองกลุ่มคือ กลุ่มพลังงานต่ำ (I และ II) และกลุ่มพลังงานสูง (III และ IV) ดังรูปที่ 4.8 กลุ่มพลังงานต่ำคือ ยอดพลังงานที่ I และ II (1.076 eV และ 1.12 eV ตามลำดับ) เกิดจากการเปล่งแสงของควอนตัมดอต โดยเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ InAs ควอนตัมดอตบน GaAs ของ Kiravittaya [79] และ Rudeeson [82] พบว่าสำหรับ 1.8 ML InAs ควอนตัมดอตที่ปลูกด้วยอัตราการปลูก 0.01 ML/s ค่ายอดพลังงานปรากฏในค่า 1.05 eV ซึ่งใกล้เคียงกับยอดพลังงานที่ I มากกว่าค่ายอดพลังงานที่วัดได้จากการปลูกควอนตัมดอตแบบเดียวกันบนชั้น $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ ที่ไม่มีชั้น GaAs Spacer ซึ่งจะปรากฏในค่ายอดพลังงานที่ 1.19 eV [33]

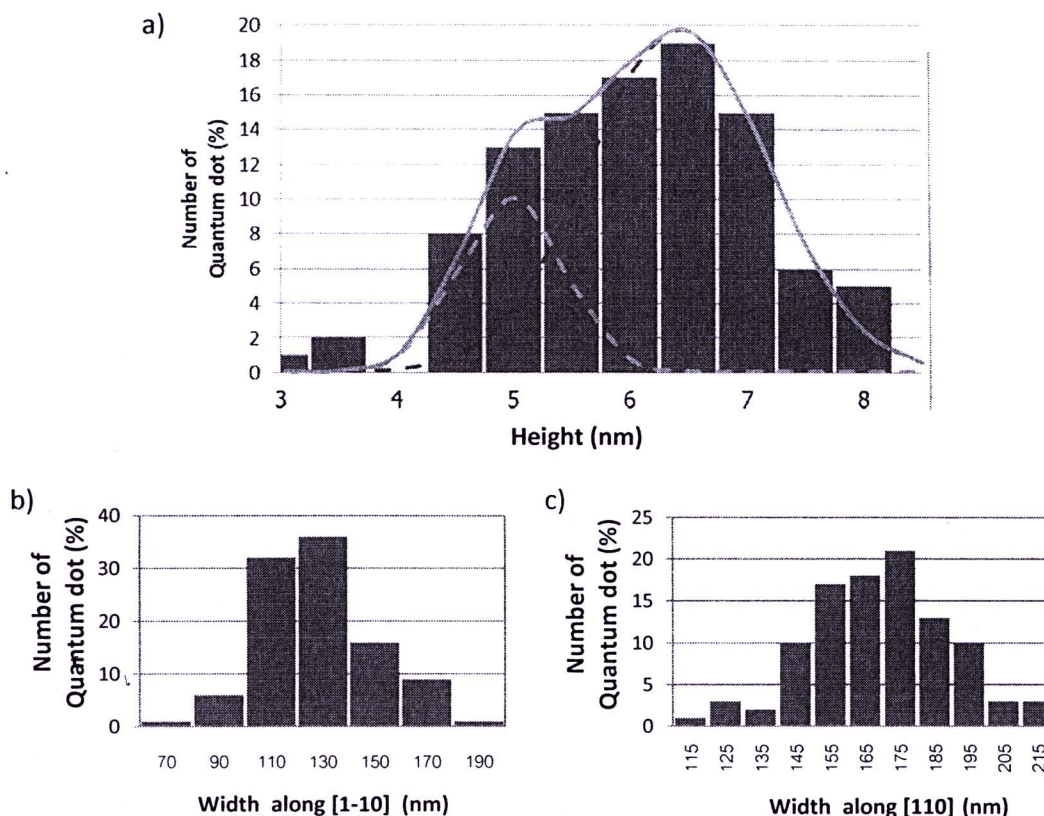


รูปที่ 4.8 สเปกตรัมการเปล่งแสงโดยทั่วไปของชั้นงาน G โดยระบุตำแหน่งของยอดพลังงานหลักที่เกิดขึ้น 4 ค่า ด้วย สัญลักษณ์ I , II , III และ IV ตามลำดับ

ในส่วนยอดพลังงานที่ II ซึ่งอยู่ใกล้เคียงกับค่ายอดพลังงานที่ I จากการทดลองโดยการเปลี่ยนแปลงกำลังแสงเลเซอร์กระตุ้นซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป ทำให้ทราบว่าเกิดจากกลุ่มควอนตัมดอทอีกขนาดหนึ่งซึ่งแตกต่างจากควอนตัมดอทของยอดพลังงานที่ I โดยยิ่งควอนตัมดอทมีขนาดเล็กลงส่งผลให้ช่องว่างแถบพลังงานของพาหะในควอนตัมดอทมีค่ามากขึ้น ดังได้กล่าวถึงในบทที่ 2 เกี่ยวกับขนาดและผลของช่องว่างแถบพลังงานที่เปลี่ยนไปในโครงสร้างขนาดเล็ก สังเกตได้จากกราฟการกระจายตัวความสูงและความกว้างของควอนตัมดอทของชิ้นงานขณะที่ยังไม่ได้กลบทับหรือชิ้นงาน C รูปที่ 4.9 ก), ข) และ ค) จะเห็นได้ว่ามีความสูงและขนาดที่แตกต่างกัน แต่เมื่อเปล่งแสงรวมกันแล้วปรากฏให้เห็นเป็นยอดพลังงานที่โดดเด่นบางค่าขึ้นอยู่กับปริมาณและความหนาแน่นของควอนตัมดอทที่เปล่งแสงในช่วงนั้น ยอดพลังงานที่ I และ II จึงเป็นลักษณะของการเปล่งแสงแบบ Bimodal ที่พบได้ในการทดลองเกี่ยวกับ InAs ควอนตัมดอท บน GaAs ซึ่งใช้ InAs coverage ที่ไม่เท่ากันของ S.J. LEE [83] ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งเป็นผลการเปล่งแสงของควอนตัมดอทคนละขนาด 2 กลุ่ม เมื่อพิจารณาความสูงพบว่าควอนตัมดอทกลุ่มแรก (เส้นประด้านซ้ายในรูปที่ 4.9 ก) เป็นควอนตัมดอทที่มีความสูงเฉลี่ยที่ 5 nm และกลุ่มที่ 2 เป็นควอนตัมดอทที่มีความสูงเฉลี่ย 6.5 nm ความสูงของควอนตัมดอทที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ควอนตัมดอทเปล่งแสงในความยาวคลื่นที่มากขึ้น [84] ควอนตัมดอทในกลุ่มที่ 1 จึงเป็นควอนตัมดอทที่เปล่งแสงในยอดพลังงานที่ II และการเปล่งแสงในยอดพลังงานที่ I จึงเป็นของควอนตัมดอทในกลุ่มที่ 2 ตามลำดับ ดังนั้นความเข้มของการเปล่งแสงในยอดพลังงานที่ I จึงมีค่ามากกว่าในยอดพลังงานที่ 2 เนื่องจากปริมาณควอนตัมดอทในกลุ่มแรกมีน้อยกว่าในกลุ่มที่ 2 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง เมื่อพิจารณาความกว้างเฉลี่ยของควอนตัมดอทในทิศ [110] และ [1-10] ดังรูปที่ 4.10 ข) และ 4.10 ค) ตามลำดับ พบว่ามีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในช่วง 145-195 nm ในทิศ [110] และในช่วง 110-130 nm ในทิศ [1-10] รูปร่างควอนตัมดอทจึงยาวออกในทิศ [110] มากกว่าในทิศ [1-10] ความกว้างที่ไม่เท่ากันของควอนตัมดอทมีผลต่อการเปล่งแสงเช่นกันโดยเฉพาะในเรื่องสถานะกระตุ้นแต่มีผลน้อยกว่าต่อสถานะพื้นเมื่อเทียบกับความสูง [84]



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลของการเปล่งแสงในการทดลองของ S.J. LEE [83]



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการกระจายตัว ก) ความสูงของควอนตัมดอตและความกว้างในทิศทาง ข) [1-10] และ ค) [110] ของชั้นงาน C

นอกจากนี้ยอดพลังงานที่ II ยังประกอบไปด้วยแสงจากสถานะกระตุ้นของยอดพลังงานที่ I ซึ่งมีแสดงให้เห็นเช่นกันในรายงานของ S.J. LEE โดยจะกล่าวถึงต่อไปในหัวข้อผลของกำลังเลเซอร์กระตุ้นต่อการเปล่งแสง

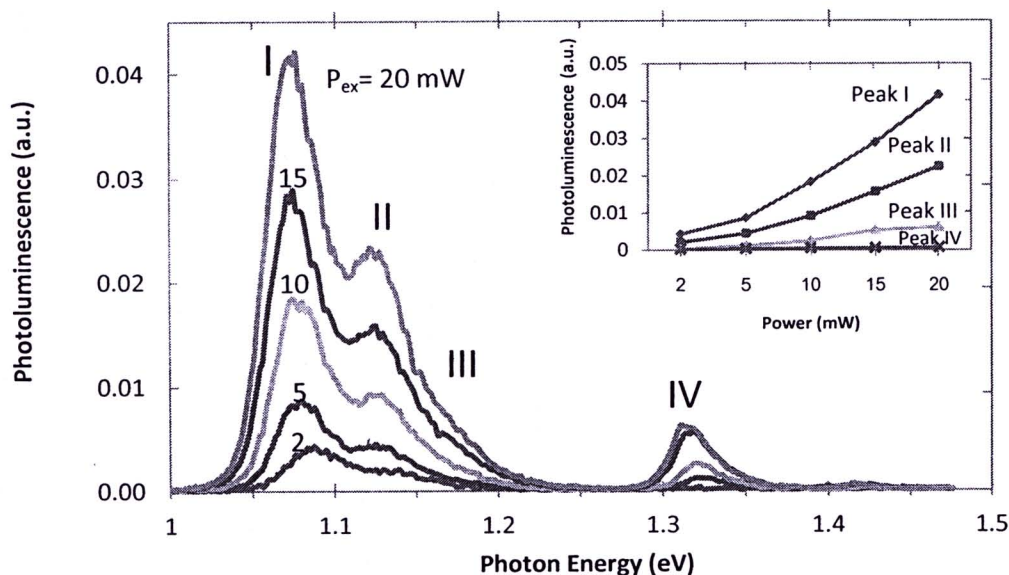
ในส่วนของค่าพลังงานด้านสูงอีกสองค่า คือ 1.31 eV และ 1.41 eV ของยอดพลังงานที่ III และ ยอดพลังงานที่ IV ตามลำดับ ยอดพลังงานที่ III เป็นค่ายอดพลังงานที่เกิดจากชั้น $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ ภายในโครงสร้าง ซึ่งมีรายงานแสดงให้เห็นถึงยอดพลังงานดังกล่าวในการทดลองเกี่ยวกับทางแสงของโครงสร้าง InAs ควอนตัมดอตบนชั้น 50 -100 nm $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ ของ Chit Swe, N.T [85] ซึ่งพบยอดพลังงานดังกล่าวในช่วง 1.29-1.32 eV

ส่วนยอดพลังงานที่ IV เป็นยอดพลังงานที่เกิดจากการเปล่งแสงของชั้น Wetting layer ของ InGaAs ซึ่งเกิดขึ้นขณะปลูกควอนตัมดอต โดยค่ายอดดังกล่าวมีรายงานแสดงให้เห็นอย่างอย่างแพร่หลายในเรื่องการปลูก InAs ควอนตัมดอตที่ความหนาต่ำกว่าค่าความหนาวิกฤติ (1.7 ML) [86] บนพื้นผิวเรียบของ GaAs เช่น ปรากฏในการปลูก InAs ควอนตัมดอตที่ความหนา 1.15-1.35 ML ของ Heitz [87] และการปลูก InAs ควอนตัมดอตหนา 1.2-1.35 ML ของ Duarte [88]

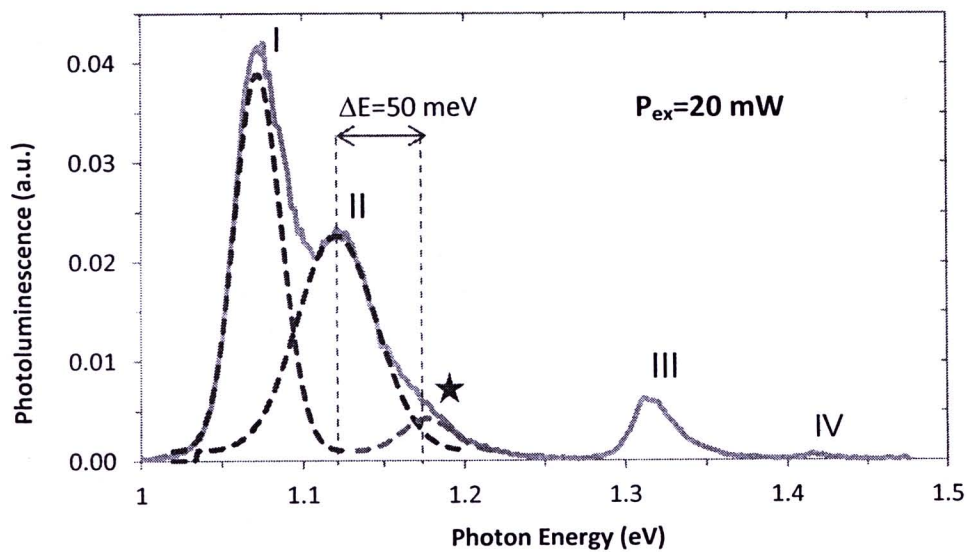
4.3.2 ผลของกำลังเลเซอร์กระตุ้นต่อการเปล่งแสง

การเปลี่ยนแปลงพลังงานของแสงเลเซอร์กระตุ้นช่วยให้สามารถวิเคราะห์และจำแนกชนิดของยอดพลังงานที่เกิดขึ้นได้ว่าเกิดจากสถานะพื้น (ground state) หรือเกิดจากสถานะกระตุ้น (excited state) ในการทดลองได้ทำการเปลี่ยนแปลงกำลังแสงเลเซอร์ 5 ค่า คือ 2, 5, 10, 15 และ 20 mW ผลของการทดลองดังปรากฏในรูปที่ 4.11 ลักษณะของการเปล่งแสงของชิ้นงานจะเป็นไปในทิศทางเดียวกันคือมี 4 ยอดพลังงานและมีความเข้มที่สูงขึ้นตามค่ากำลังแสงเลเซอร์สูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงกำลังแสงเลเซอร์มีผลโดยตรงกับความเข้มการเปล่งแสงของชิ้นงาน ซึ่งเป็นผลจาก state-filling effect [82] ที่ทำให้เกิดการเพิ่มจำนวนของพาหะที่มีพลังงานสูงมากพอในแต่ละระดับชั้นพลังงานเนื่องจากได้พลังงานกระตุ้นจากแสงเลเซอร์ ความแตกต่างจะเริ่มมีความชัดเจนในกรณีกำลังเลเซอร์กระตุ้นต่ำที่ 2 mW และกำลังเลเซอร์กระตุ้นสูงที่ 20 mW

เมื่อค่ากำลังเพิ่มถึง 20 mW เริ่มปรากฏให้เห็นยอดพลังงานที่เพิ่มขึ้นซึ่งอยู่ระหว่าง II และ III (รูปที่ 4.12) แต่ในกรณีกำลังเลเซอร์กระตุ้นต่ำที่ 2 mW ปรากฏให้เห็นชัดเจนเฉพาะ I และ II เท่านั้น ในส่วนยอดพลังงานที่ III และ IV คาดว่ายังคงมีอยู่แต่ไม่สามารถตรวจจับได้เนื่องจากมีความเข้มน้อยมากจนไม่สามารถแยกความแตกต่างออกจากสัญญาณรบกวน (noise) ของการวัดได้ เมื่อเปรียบเทียบกับกันจึงยืนยันถึงยอดพลังงานพื้นที่สี่ของชิ้นงานได้ ยอดพลังงานที่เพิ่มขึ้นระหว่างยอดพลังงานที่ II และ III เป็นค่ายอดจากสถานะกระตุ้นของกลุ่มควอนตัมดอตในยอดพลังงานที่ II ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ไปยังระดับชั้นพลังงานถัดไปของอิเล็กตรอนเนื่องจากมีพลังงานสูงมากพอจากแสงเลเซอร์กระตุ้น



รูปที่ 4.11 สเปกตรัมการเปล่งแสงของชิ้นงาน G เมื่อเปลี่ยนแปลงกำลังเลเซอร์ที่ใช้ในการกระตุ้นที่กำลังแสงเลเซอร์กระตุ้นที่อุณหภูมิ 20 K



รูปที่ 4.12 สเปกตรัมการเปล่งแสงของชิ้นงาน G การเปล่งแสงเมื่อเปลี่ยนแปลงกำลังเลเซอร์ที่ใช้ในการกระตุ้นที่กำลังเลเซอร์กระตุ้น 20 mW พร้อมเส้นกราฟภายในแสดงยอดพลังงาน Gaussian ทั้ง 3 ค่ายอด

4.3.3 ผลของอุณหภูมิต่อการเปล่งแสง

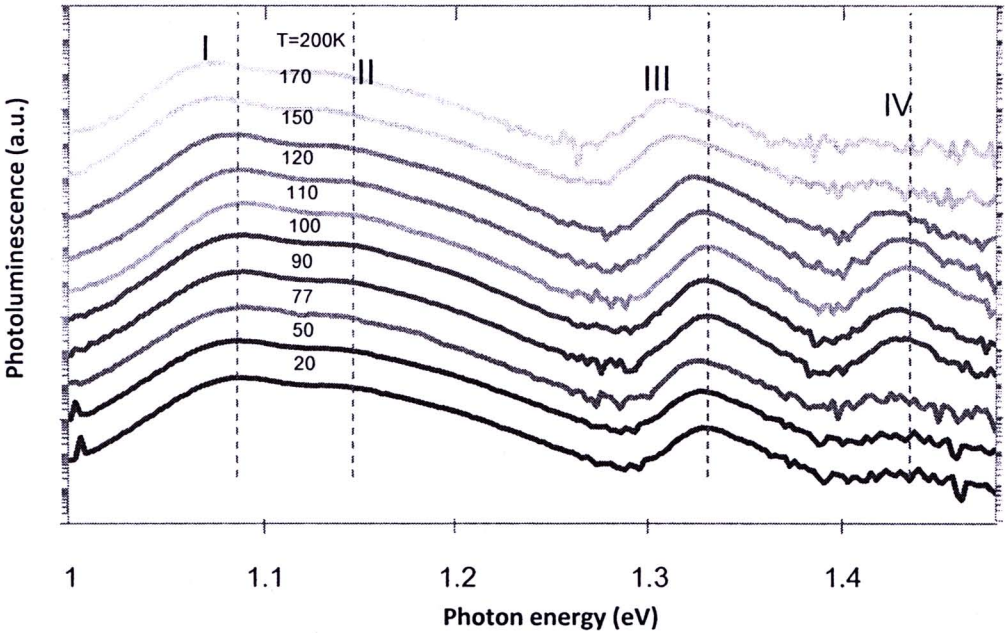
การเปล่งแสงของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิแสดงในรูปที่ 4.13 เมื่อพิจารณาความเข้มแสงดังแสดงในรูปที่ 4.14 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงในแต่ละยอดพลังงานกับอุณหภูมิ จากการทดลองพบว่าในช่วงแรกเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วง 20-90 K ความเข้มของการเปล่งแสงในแต่ละยอดพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเพิ่มสูงสุดที่ 90 K จากนั้นจึงลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 100-200K ความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้นในช่วงแรกเป็นผลจากการเพิ่มของจำนวนอิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานมากขึ้นจนถึงระดับพลังงานนั้นๆ อันเป็นผลจากการกระตุ้นด้วยความร้อน Thermal excitation [88] จากนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 100 K จนถึง 200 K ความเข้มแสงที่ลดลงเนื่องจากการหลุดออกไปของพาหะหรืออิเล็กตรอนจากควอนตัมดอต เนื่องจากการกระตุ้นด้วยความร้อนที่มีสูง โดยการเปลี่ยนแปลงจะเห็นได้ชัดเจนในยอดพลังงานที่ I และยอดพลังงานที่ II

ตำแหน่งของยอดพลังงานเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 4.15 ในช่วงอุณหภูมิ 20-90 K ปรากฏการเลื่อนตำแหน่งของยอดพลังงานไปยังพลังงานสูงขึ้น (blue shift) จากนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอีกจนถึง 200 K ปรากฏการเลื่อนของยอดพลังงานไปยังพลังงานต่ำหรือ "red shift" การเลื่อนของยอดพลังงานในแต่ละช่วงสามารถอธิบายได้ดังนี้ ในช่วงแรกอุณหภูมิ 20-90 K ตำแหน่งของยอดพลังงานที่เพิ่มขึ้นเป็นผลจาก band filling effect เนื่องจากมีพาหะได้รับพลังงานสูงขึ้นจากพลังงานความร้อน [89] ซึ่งสอดคล้องกับค่าความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้นในช่วงนี้ ผลของ Band filling effect ทำให้เกิดการเลื่อนของยอดพลังงานไปยังพลังงานที่สูงขึ้นซึ่งพบได้ในทั้งควอนตัมดอตและลวด

ควอนตัม [90,91] ในช่วงถัดไปเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนถึง 200 K ยอดพลังงานที่เลื่อนไปยังค่าพลังงานที่ต่ำลงเป็นผลมาจากการขยายตัวด้วยความร้อน (Thermal expansion) จากการสั่นของโครงผลึกที่ทำให้ระยะห่างระหว่างอะตอมในโครงผลึกมากขึ้น ส่งผลให้พลังงานพันธะ (energy bond) ที่ยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนลดลง และผลจากการกระเจิงระหว่างอิเล็กตรอนกับโฟนอน (Electron-phonon scattering) ทำให้เกิดการดูดกลืนพลังงานของโฟนอนโดยอิเล็กตรอน [92] ส่งผลให้ช่องว่างแถบพลังงานมีค่าลดลง การประมาณการเปลี่ยนแปลงค่าช่องว่างแถบพลังงานโดยทั่วไปสามารถทำได้โดยอาศัยสมการของ Varshni [93,94] พิจารณายอดพลังงานที่เกิดจาก In ควอนตัมดอต คือ ยอดพลังงานที่ I และยอดพลังงานที่ II สมการการเปลี่ยนแปลงช่องว่างแถบพลังงานของ InAs (E_g) เท่ากับ

$$E_g = E_0 - \alpha T^2 / (T + \beta) \tag{4.1}$$

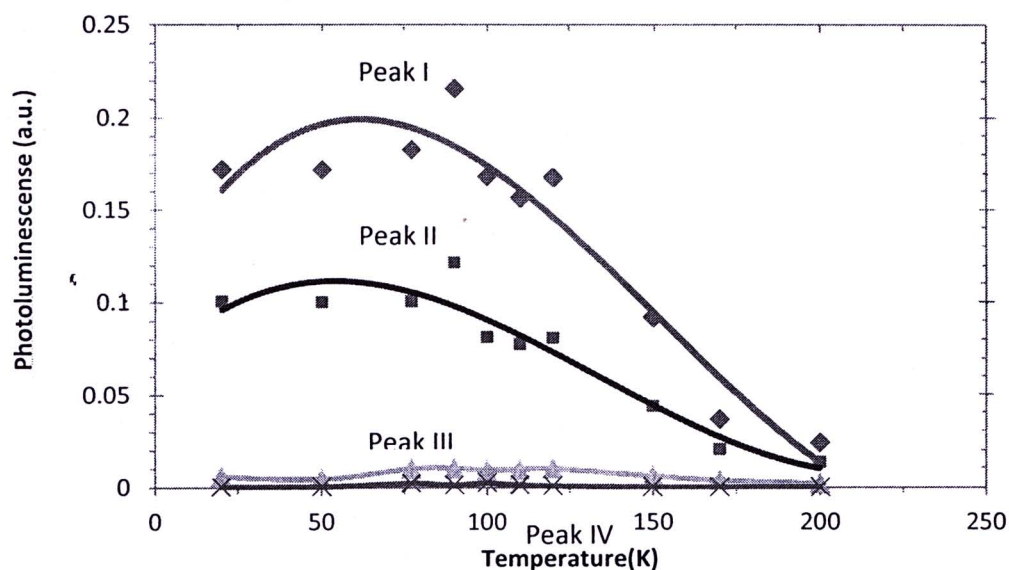
เมื่อ E_0 คือ พลังงานที่ 0 K ของ InAs ควอนตัมดอต ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.345 eV, α, β เป็นค่าคงตัวที่ใช้ในการปรับให้พอดี (fitting parameter) ซึ่งขึ้นตามสมบัติของวัสดุ [91] ในที่นี้มีค่า 2.76×10^{-4} และ 83 K ตามลำดับ



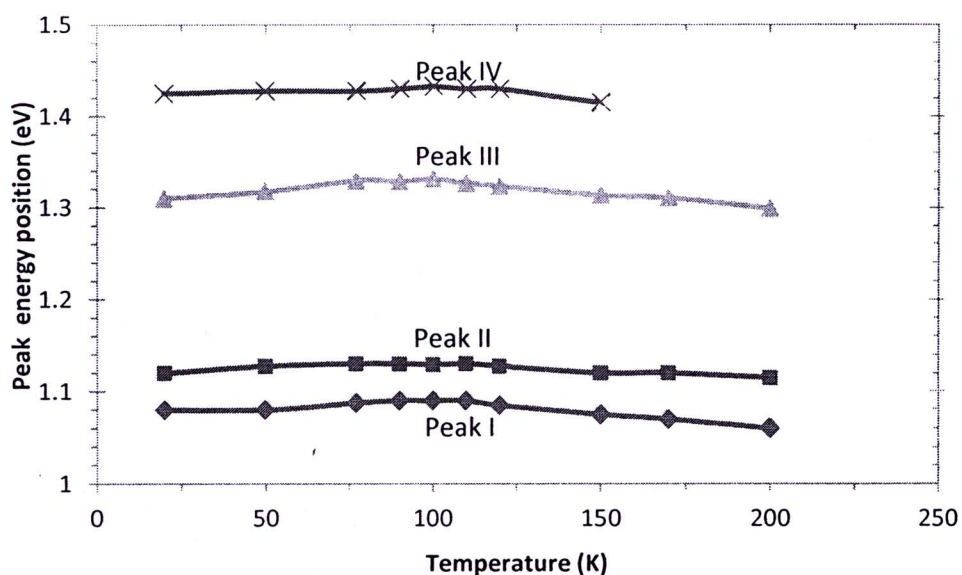
รูปที่ 4.13 สเปกตรัมของแสงที่เปล่งออกจากชิ้นงาน G ที่อุณหภูมิต่างๆ
(กราฟถูก offset เพื่อความกระจ่าง)

ค่า E_0 ที่ใช้ในสมการ 4.1 เป็นของ InAs บริสุทธิ์แต่ในกรณีของ InAs ควอนตัมดอตไม่สามารถใช้ค่า E_0 ดังกล่าวได้ เนื่องจาก In-Ga intermixing [95] ซึ่งส่งผลให้ InAs ควอนตัมดอตมีการเจือปนด้วย Ga อะตอมบางส่วนจากการ diffusion จึงอาศัยสมการ (4.1) แต่ทำการปรับค่า E_0 แล้ววัดเทียบกับค่า E_g

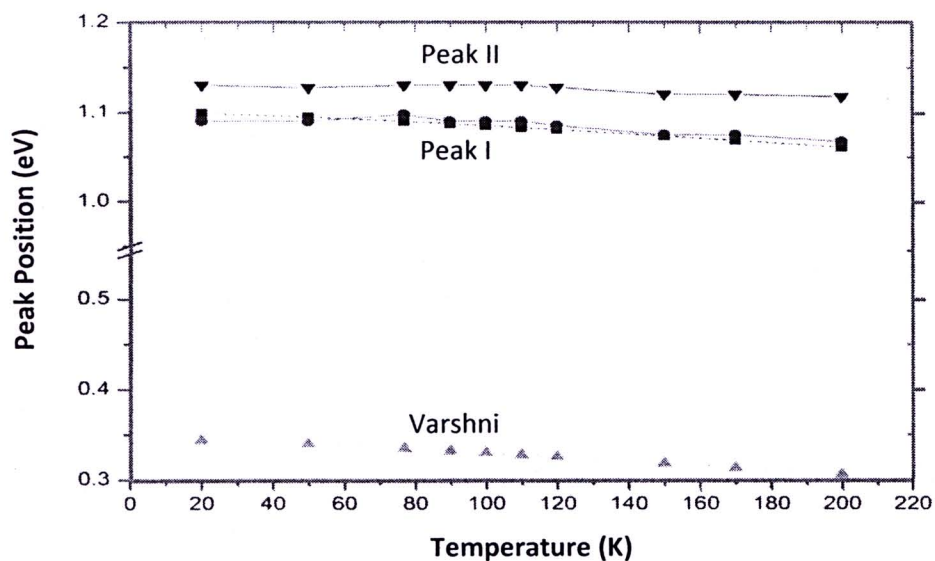
จากการทดลอง ค่า E_0 ที่ได้คือ 1.1 eV ซึ่งมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับการทดลองสำหรับยอดพลังงานที่ I สำหรับยอดพลังงานที่ II การปรับค่าดังกล่าวไม่มีแนวโน้มเปลี่ยนไปตามสมการของ Varshni ถึงแม้จะปรับค่า E_0 เพื่อปรับค่าแล้วก็ตาม ผลดังกล่าวคาดว่าจะเป็ผลจาก excited state ของ ยอดพลังงานที่ I ซึ่งรวมอยู่ในยอดพลังงานที่ II ความสัมพันธ์ของค่ายอดพลังงานที่เปลี่ยนไปของยอดพลังงานที่ I และ II จากการทดลองเทียบกับสมการของ Varshni แสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.14 ค่าความเข้มแสงที่เปล่งออกจากค่ายอดพลังงานต่าง ๆ ของชั้นงาน G เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ



รูปที่ 4.15 ตำแหน่งของค่ายอดพลังงานของชั้นงาน G ที่เปลี่ยนไปเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ



รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบค่ายอดพลังงานที่เปลี่ยนไปของยอดพลังงานที่ I และ II กับค่าที่ได้จากสมการ Varshni พร้อมกับเส้นประที่ได้จากการปรับค่า E_0 ในสมการ Varshni

4.3.4 ผลของโพลาไรเซชัน

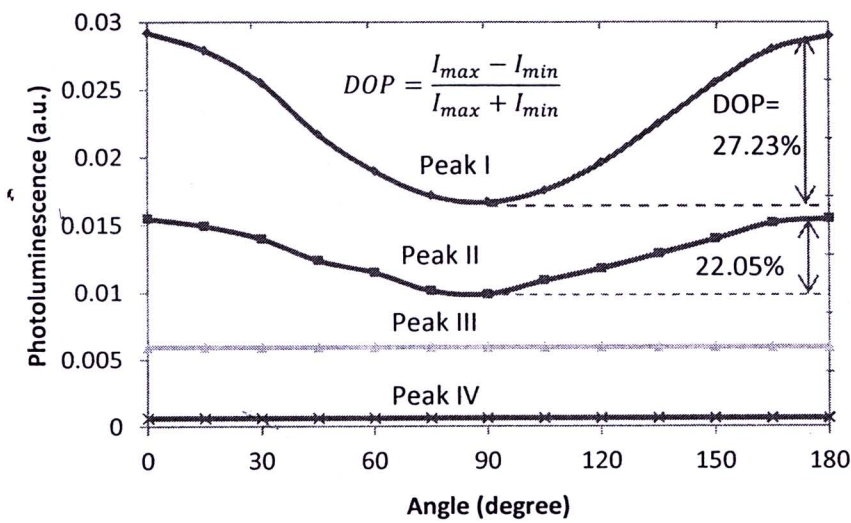
ในการศึกษาสมบัติโพลาไรเซชันของแสงที่เปล่งออกจากชิ้นงานได้ใช้แผ่นโพลาไรซ์วางอยู่ข้างหน้าแสงของชิ้นงานก่อนที่จะผ่านโมโนโครมิเตอร์ โดยก่อนที่จะทำการวัดต้องทำการปรับมุมที่ทำให้ค่าความเข้มของแสงมากที่สุด จากนั้นจึงตั้งค่ามุมดังกล่าวให้เป็นมุมอ้างอิง (0 องศา) หลังจากนั้นจึงทำการปรับมุมของแผ่นโพลาไรเซอร์ไปยังค่าต่าง ๆ ตามต้องการ การวัดกระทำที่อุณหภูมิ 20 K ด้วยกำลังเลเซอร์กระตุ้น 40 mW

ผลการทดลองในรูปที่ 4.17 แสดงว่า ยอดพลังงานที่ I และ II เท่านั้นที่มีสมบัติโพลาไรเซชัน บ่งบอกถึงแสงมาจากแหล่งกำเนิดที่มีทิศทางการเรียงตัวที่แน่นอน ซึ่งในที่นี้คือควอนตัมดอต ดังปรากฏในรูป AFM ของผิวหน้า (รูปที่ 4.5 ง)) ค่าความเข้มของทั้งสองยอดพลังงานมีการเปลี่ยนแปลงจากค่ามากที่สุด (0°) แล้วจึงลดลงตามค่ามุมที่เพิ่มขึ้น จนลดลงมากที่สุดเมื่อปรับมุมได้ 90° จากนั้นจึงค่อยๆ เพิ่มขึ้นอีกจนมีค่าใกล้เคียงกับค่ามากที่สุดที่มุม 180° จากค่าความเข้มที่แตกต่างกันตามค่ามุมโพลาไรซ์ที่เปลี่ยนไป สามารถใช้ในการหาค่า Degree of Polarization (DOP) ได้ดังความสัมพันธ์

$$DOP = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (4.2)$$

ซึ่งมีค่าเท่ากับ 27.23% และ 22.05% สำหรับยอดพลังงานที่ I และ II ตามลำดับ

แสงโพลาไรซ์จากยอดพลังงานที่ I และยอดพลังงานที่ II เกิดจากความไม่เท่ากันของค่ายกกำลังสองของขนาดเวกเตอร์คลื่น (wave vector) ในทิศทาง [110] และ [1-10] ($k_{[110]}^2, k_{[1-10]}^2$) ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของควอนตัมดอตที่เรียงตัวในสองทิศทาง โดยยังมีความแตกต่างมากถ้าควอนตัมดอตเรียงตัวโดดเด่นในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง [96] ค่า DOP เป็นตัววัดตัวหนึ่งบ่งบอกถึงความแตกต่างดังกล่าว ค่า DOP ของทั้งสองยอดพลังงานมีค่าใกล้เคียงกันแสดงถึงการเรียงตัวที่ไม่แตกต่างกันมากนักของกลุ่มควอนตัมดอตทั้งสอง ผลดังกล่าวจึงสอดคล้องกับลักษณะการเรียงตัวควอนตัมดอตของชิ้นงาน



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มกับมุมโพลาไรซ์ของยอดพลังงานทั้งสี่ที่ปรากฏในรูปที่ 4.8