

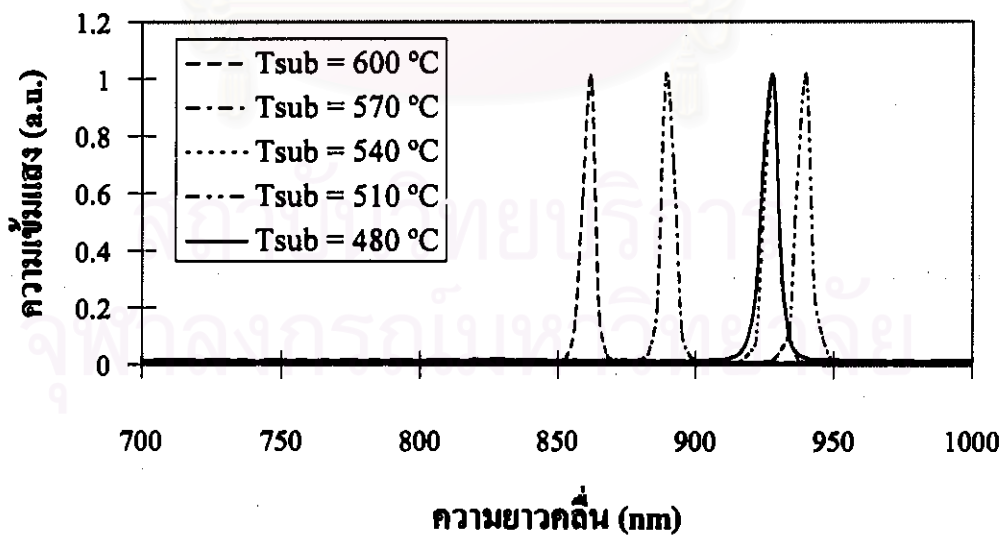
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลจากการทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3 พร้อมทำการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ โดยแบ่งการแสดงผลและการวิเคราะห์ออกเป็นหัวข้อต่างๆ ได้ ดังนี้

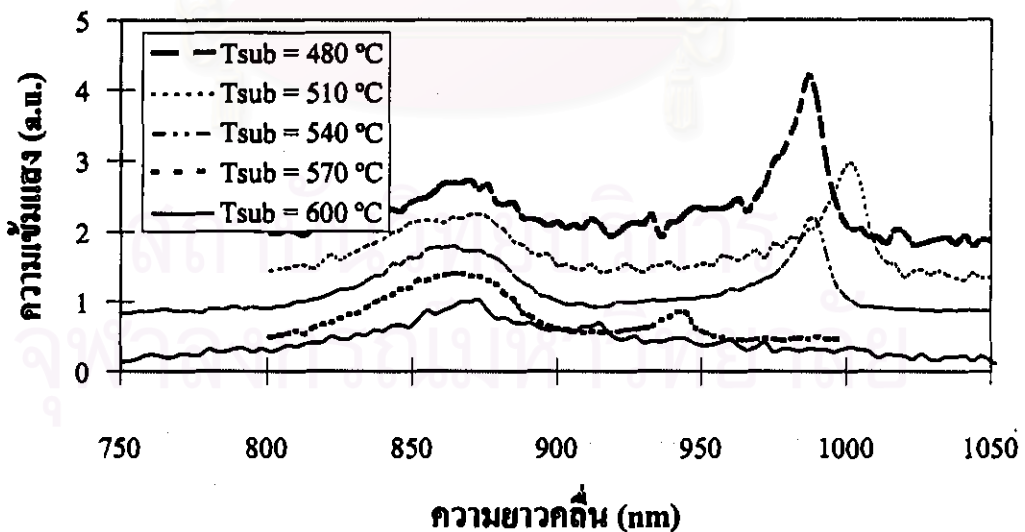
4.1 การหาเงื่อนไขของอุณหภูมิแผ่นฐาน

ผลจากการวัดชิ้นงานตัวอย่างที่ทำการแปรเปลี่ยนอุณหภูมิแผ่นฐานด้วยวิธีโฟโตลูมิเนสเซนส์แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นการวัดชิ้นงานที่อุณหภูมิประมาณ 10 K จะเห็นได้ว่ายอดแหลมของชิ้นงานที่ปลูกที่อุณหภูมิต่ำจะอยู่ในย่านความยาวคลื่นมาก หรืออีกนัยหนึ่งคือ ระดับพลังงานควอนไตซ์ในเวกต์จะมีค่าต่ำ ยอดแหลมจากโฟโตลูมิเนสเซนส์จะเลื่อนไปในย่านความยาวคลื่นสั้นเมื่ออุณหภูมิแผ่นฐานสูงขึ้น ทั้งนี้เกิดขึ้นเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิขณะที่ปลูกชั้นเวกต์สูงขึ้นจะทำให้เกิดการคายอะตอมอินเดียมจากผิวหน้าผลึกมากขึ้น อัตราส่วนของอะตอมอินเดียมต่อแกเลียมจึงลดลงจากค่าที่ได้กำหนดให้ x เป็น 0.2 และเนื่องจากระดับพลังงานของชั้นอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ขึ้นกับค่าอัตราส่วนอะตอม การเสียบอะตอมอินเดียมไปทำให้ได้ชั้นเวกต์ของอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ที่มีแถบพลังงานต้องห้ามกว้างขึ้น ทำให้ได้โครงสร้างควอนดัมเวกต์ที่มีชั้นเวกต์ดื้นขึ้น และได้ระดับพลังงานควอนไตซ์ที่สูงขึ้น



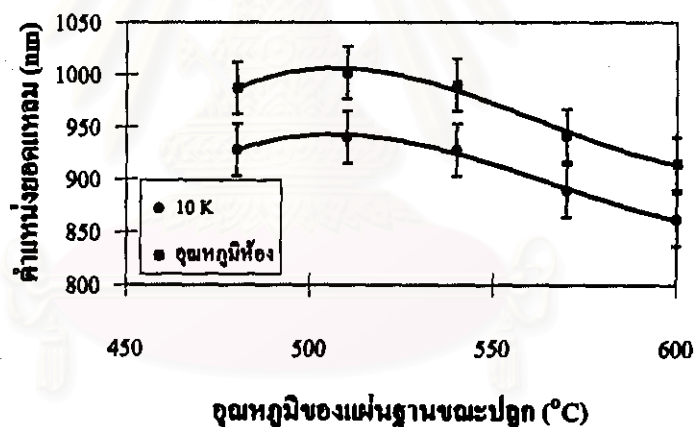
รูปที่ 4.1 ผลการวัดชิ้นงานตัวอย่างที่แปรเปลี่ยนอุณหภูมิแผ่นฐานขณะปลูกด้วยวิธีโฟโตลูมิเนสเซนส์ โดยทำการวัดที่อุณหภูมิประมาณ 10 K

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า ยอดแหลมสามยอดที่ได้จากการวัดชิ้นงานตัวอย่างที่อุณหภูมิ 540, 510 และ 480 °C จะจับกลุ่มอยู่ใกล้เคียงกันมากกว่ายอดแหลมอื่นทั้งที่อุณหภูมิที่ใช้ปลูกผลึกห่างกันขั้นละ 30 °C เท่าๆ กัน สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าขณะปลูกผลึกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 540 °C จะมีอัตราการคายอะตอมของอินเดียมต่ำ ทำให้ค่าองค์ประกอบของอินเดียมที่ได้จากโครงสร้างที่อุณหภูมิทั้งสามใกล้เคียงกัน และมีค่า x ใกล้เคียง 0.2 และจากความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของยอดแหลมที่ได้จากชิ้นงานที่ปลูกที่อุณหภูมิ 480 °C ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ในการสร้างโครงสร้างควอนตัมเวลต์จะเกิดความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของยอดแหลม หรืออีกนัยหนึ่งคือ ความคลาดเคลื่อนของระดับพลังงานควอนไตซ์ในโครงสร้างควอนตัมเวลต์ ในรูปที่ 4.1 นั้นตำแหน่งยอดแหลมของชิ้นงานที่ปลูกที่อุณหภูมิ 480 °C ควรอยู่ที่ประมาณ 950 nm แต่กลับไปปรากฏยอดแหลมอยู่ที่ 925 nm ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมีค่า 25 nm สิ่งที่สังเกตเห็นได้ในรูปที่ 4.1 อีกประการหนึ่งก็คือ จะเห็นได้ว่ายอดแหลมของชิ้นงานที่สร้างที่อุณหภูมิ 480 °C จะกว้างกว่ายอดแหลมของชิ้นงานที่สร้างที่ 510 และ 540 °C ทั้งนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิจากการปลูกต่ำอะตอมและโมเลกุลของธาตุต่างๆ จะมีระบะปลดการชนน้อย และมีพลังงานกระตุ้นที่ใช้ในการสร้างพันธะต่ำกว่า ดังนั้นการปลูกผลึกที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้มีโอกาสเกิดข้อบกพร่องได้สูง หากปลูกผลึกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 480 °C ก็จะทำให้ได้โครงสร้างที่ให้ยอดแหลมที่กว้างกว่านี้ ซึ่งหมายถึงเป็นโครงสร้างที่มีข้อบกพร่องมากกว่า โดยที่จะได้ตำแหน่งยอดแหลมที่ใกล้เคียงกัน จากผลการทดลองดังกล่าวทำให้สามารถสรุปได้ว่าการสร้างโครงสร้างควอนตัมเวลต์ของอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์/แกลเลียมอาร์เซไนด์ให้มีคุณภาพผลึกที่ดี ควรปลูกที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 °C โดยประมาณ



รูปที่ 4.2 ผลการวัดชิ้นงานตัวอย่างที่แปรเปลี่ยนอุณหภูมิแผ่นฐานขณะปลูกด้วยวิธีไฟโตลูมิเนสเซนส์ โดยทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง

รูปที่ 4.2 เป็นผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ที่อุณหภูมิห้อง สัญญาณที่ได้จากการวัดมีค่าต่ำมากเนื่องจากที่อุณหภูมิสูงผลึกจะมีประสิทธิภาพในการเปล่งแสงต่ำ อีกประการหนึ่ง ในการวัดที่อุณหภูมิ 10 K จะสังเกตเห็นว่าชั้นแกเลียมอาร์เซไนด์เปล่งแสงออกมาต่ำมากจนมองไม่เห็นยอดแหลมเมื่อเทียบกับยอดแหลมของระดับพลังงานควอนไตซ์ของเวลต์ แต่จะเปล่งแสงได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับระดับพลังงานควอนไตซ์ของเวลต์ในการวัดที่อุณหภูมิห้อง โดยจะเห็นเป็นยอดแหลมกว้างๆ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 870 nm สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการเปล่งแสงของควอนดัมเวลต์ต่ำลงมากกว่าการลดลงของประสิทธิภาพการเปล่งแสงของผลึกแกเลียมอาร์เซไนด์ สาเหตุประการหนึ่งคือ ประสิทธิภาพในการเก็บกักอิเล็กตรอน (Electron Confinement) ของโครงสร้างควอนดัมเวลต์ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยปกติอิเล็กตรอนจะอยู่ในสถานะที่มีระดับพลังงานต่ำที่สุด ระดับพลังงานที่ต่ำที่สุดในโครงสร้างควอนดัมเวลต์ก็คือระดับพลังงานควอนไตซ์ที่ 1 เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อิเล็กตรอนจะได้รับพลังงานจากโฟนอนทำให้สามารถหนีออกไปจากเวลต์ได้มากขึ้น ทำให้การรวมตัวแบบเปล่งแสงจากระดับพลังงานควอนไตซ์ลดลง ในหัวข้อการศึกษาผลของความกว้างของเวลต์ที่มีต่อระดับพลังงานควอนไตซ์จะมีผลการทดลองที่สนับสนุนปรากฏการณ์เพิ่มเติม ดังจะได้กล่าวต่อไป



รูปที่ 4.3 กราฟสรุปความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งยอดแหลมและอุณหภูมิแผ่นฐาน

ในรูปที่ 4.2 จะสังเกตเห็นได้ว่ายอดแหลมของระดับพลังงานควอนไตซ์ของชั้นงานที่สร้างที่อุณหภูมิแผ่นฐาน 600 °C มีค่าต่ำมาก ต่ำกว่ายอดแหลมของแกเลียมอาร์เซไนด์ แสดงว่าประสิทธิภาพการเก็บกักอิเล็กตรอนและประสิทธิภาพการเปล่งแสงของโครงสร้างควอนดัมเวลต์ที่สร้างที่อุณหภูมิ 600 °C มีค่าต่ำเมื่อวัดที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นสมบัติที่ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นชั้นกำเนิดแสง โดยเฉพาะเป็นชั้นกำเนิดแสงของเลเซอร์ไดโอดซึ่งต้องการโครงสร้างที่มีความสามารถในการเก็บกักอิเล็กตรอนสูงจนทำให้เกิดภาวะประชากรผกผัน (Population Inversion) ได้ง่าย ข้อสังเกตอีกประการหนึ่งที่ได้จากรูปนี้ก็คือ ตำแหน่งของยอดแหลมที่ได้จากระดับพลังงานควอนไตซ์ภายในเวลต์ที่ปลูกที่ 600 °C อยู่ใกล้เคียงกับยอดแหลมจากแกเลียมอาร์เซไนด์มาก ทั้งที่เงื่อนไข

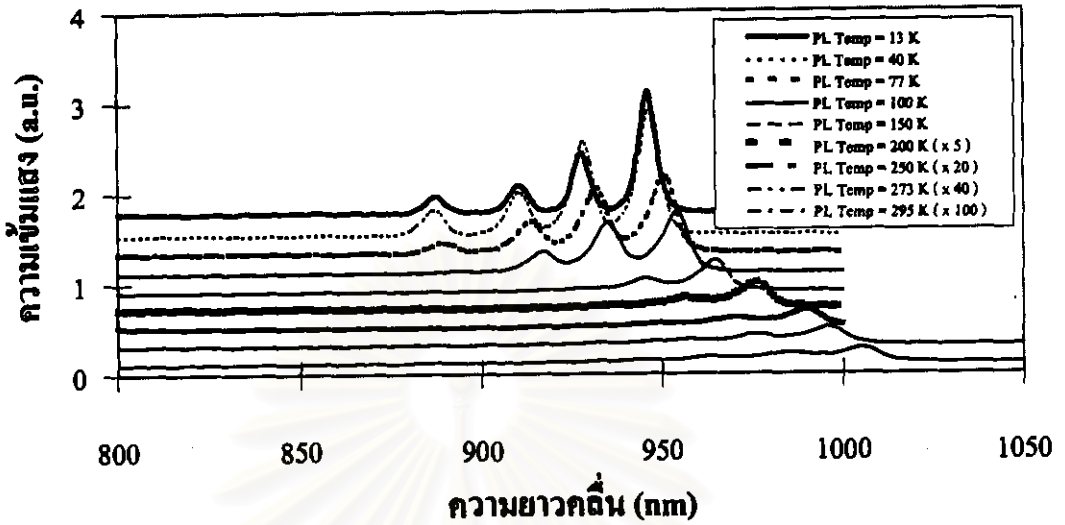
ขณะสร้างกำหนดให้ชั้นอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์มีอัตราส่วนอะตอมเป็น 0.2 สิ่งที่ได้แสดงให้เห็นถึงการสูญเสียอะตอมอินเดียมจำนวนมากโดยไม่จำเป็น จากผลการทดลองดังกล่าวทำให้สรุปได้ว่าการปลูกผลึกโครงสร้างควอนตัมเวลล์ของอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์/แกเลียมอาร์เซไนด์ ไม่ควรปลูกที่อุณหภูมิสูงเกินไป สำหรับเงื่อนไขที่กำหนดในการทดลองนี้พบว่าไม่ควรสร้างโครงสร้างนี้ที่อุณหภูมิเกิน 600 °C ผลการทดลองในหัวข้อนี้สามารถสรุปได้จากรูปที่ 4.3

กล่าวโดยสรุปก็คือ จากการทดลองในหัวข้อนี้ทำให้ได้อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการสร้างโครงสร้างควอนตัมเวลล์ของอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์/แกเลียมอาร์เซไนด์ ค่าดังกล่าวอยู่ในช่วง 500 - 600 °C อย่างไรก็ตาม โครงสร้างนี้ถูกกำหนดไว้ว่า ค่าอัตราส่วนอะตอมของธาตุอินเดียมและแกเลียมเมื่อไม่คิดอัตราคาร์บอนเป็น 0.2 และมีความกว้างของเวลล์คงที่ 75 Å หากต้องการสร้างโครงสร้างควอนตัมเวลล์ด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างออกไป เช่น เป็นโครงสร้างที่มีอัตราส่วนอะตอมเมื่อไม่คิดอัตราคาร์บอนมากกว่านี้ ก็สามารถจะสร้างโครงสร้างควอนตัมเวลล์ที่อุณหภูมิสูงกว่าช่วงนี้ได้ เป็นต้น

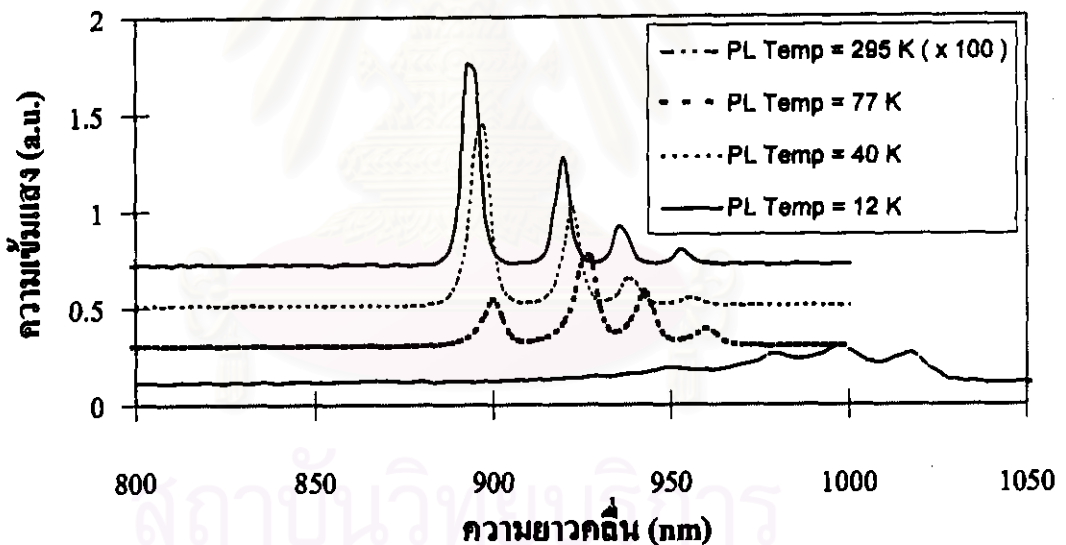
4.2 การศึกษาผลของความกว้างเวลล์ที่มีต่อระดับพลังงานควอนไตซ์

รูปที่ 4.4 (ก) เป็นผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของชิ้นงานตัวอย่างที่มีการแปรเปลี่ยนความกว้างของเวลล์ โดยให้เวลล์ที่มีความกว้างมากที่สุดอยู่นอกสุด และรูปที่ 4.4 (ข) เป็นผลการวัดชิ้นงานอีกชิ้นหนึ่งที่มีเวลล์ที่มีความกว้างมากที่สุดอยู่ภายในสุด กราฟแต่ละเส้นในรูปทั้งสองแทนผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิต่างๆ กันตั้งแต่ประมาณ 10 K ถึงอุณหภูมิห้อง ที่อุณหภูมิตั้งแต่ประมาณ 10 K ยอดแหลมทางขวามือในรูปที่ 4.4 (ก) ซึ่งเป็นยอดแหลมที่ได้จากควอนตัมเวลล์ที่มีความกว้างมากที่สุดและอยู่นอกสุดจะเป็นยอดที่มีขนาดสูงที่สุด และความสูงจะลดหลั่นกันลงไปสำหรับเวลล์ที่อยู่ถัดเข้าไปภายใน กลไกที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ในลักษณะนี้ คือ ในการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์โฟตอนจากเลเซอร์ชนิดอาร์กอนที่ใช้เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลจะถูกดูดกลืนหมดที่ชั้นแกเลียมอาร์เซไนด์ซึ่งหนา 0.15 μm คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นจะเลื่อนไหลไปยังบริเวณที่มีระดับพลังงานต่ำสุด ได้แก่ระดับพลังงานควอนไตซ์ในแต่ละเวลล์ ดังนั้น เวลล์ที่จะได้รับอิเล็กตรอนมากที่สุดจึงเป็นเวลล์ที่อยู่ภายนอกสุด เมื่อมีการรวมตัวแบบเปล่งแสงอีกครั้งหนึ่งจึงทำให้เวลล์ที่อยู่ภายนอกสุดเป็นเวลล์ที่มีสัญญาณจากการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์สูงที่สุด เวลล์ที่อยู่ถัดเข้าไปจะได้อิเล็กตรอนเนื่องจากอิเล็กตรอนจะยังไม่ลดระดับพลังงานลงมายังระดับพลังงานต่ำที่สุดในทันที แต่จะคงสถานะอยู่ที่ระดับพลังงานกระตุ้นชั่วเวลาหนึ่ง คู่อิเล็กตรอน-โฮลจึงมีเวลาพอที่จะเลื่อนไหลไปยังตำแหน่งอื่นๆ ก่อนลดระดับพลังงานลงไปยังระดับพลังงานต่ำสุดภายในเวลล์ ทำให้เวลล์อื่นๆ ได้อิเล็กตรอนและสามารถเปล่งโฟตอนออกมาได้ กลไกนี้เกิดขึ้นกับชิ้นงานที่มี

เวลต์กว้างที่สุดไว้ภายในสุดเช่นกัน ทำให้ที่อุณหภูมิประมาณ 10 K ยอดแหลมทางซ้ายมือในรูปที่ 4.4 (ข) ซึ่งเป็นยอดแหลมจากระดับพลังงานควอนไตซ์ของเวลต์ที่แคบที่สุดมีความสูงมากที่สุด



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.4 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ของ (ก) ซึ่งงานตัวอย่างที่มีการเรียงเวลต์ที่กว้างที่สุดไว้ภายนอกสุด (ข) ซึ่งงานตัวอย่างที่มีการเรียงเวลต์ที่กว้างที่สุดไว้ในสุด ทำการวัดที่อุณหภูมิตั้งแต่ประมาณ 10 K ถึงอุณหภูมิห้อง

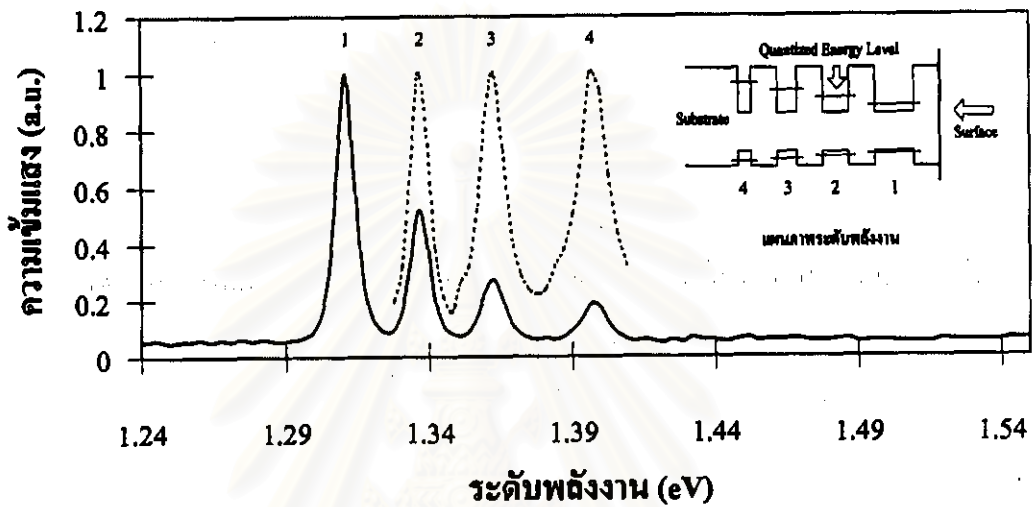
จากรูปที่ 4.4 (ก) มีข้อสังเกตที่สำคัญประการหนึ่ง คือ ในรูปที่ 4.4 (ก) ความสูงของยอดแหลมที่ได้จากเวลต์ต่างๆ ในกราฟแต่ละเส้นจะมีความสูงไล่กัน โดยเวลต์ที่มีความกว้างมากที่สุดจะมีความสูงของสัญญาณที่วัดได้มากที่สุดตลอดช่วงอุณหภูมิการวัด ขณะที่ในรูปที่ 4.4 (ข) ยอดแหลม

ที่มีความสูงสูงที่สุดจะเปลี่ยนไป โดยยอดแหลมอยู่ถัดเข้าไปจะมีความสูงเพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเนื่องจากที่อุณหภูมิการวัดที่สูงขึ้น อิเล็กตรอนจะได้รับอิทธิพลของโฟนอนทำให้สามารถหนีออกจากเวสต์ได้มากขึ้น ในชิ้นงานที่มีเวสต์ที่กว้างที่สุดอยู่นอกสุดนั้นเมื่ออิเล็กตรอนจะหนีออกจากเวสต์แรกไปได้ แต่ส่วนใหญ่ก็จะตกกลับไปเวสต์เดิมเนื่องจากเวสต์แรกมีระดับพลังงานควอนไตซ์ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับเวสต์อื่น ขณะที่ในชิ้นงานที่มีเวสต์ที่แคบที่สุดอยู่นอกสุด เมื่ออิเล็กตรอนหนีออกจากเวสต์แรกได้ก็มีโอกาสที่จะเลื่อนไหลไปยังเวสต์ถัดไปซึ่งมีระดับพลังงานควอนไตซ์ต่ำกว่าได้ง่ายกว่าการตกกลับไปสู่เวสต์เดิม ดังนั้นยิ่งเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเวสต์ที่อยู่ภายในของชิ้นงานที่มีเวสต์แคบอยู่ภายนอกก็จะเปล่งโฟตอนได้มากกว่าเวสต์อื่นๆ

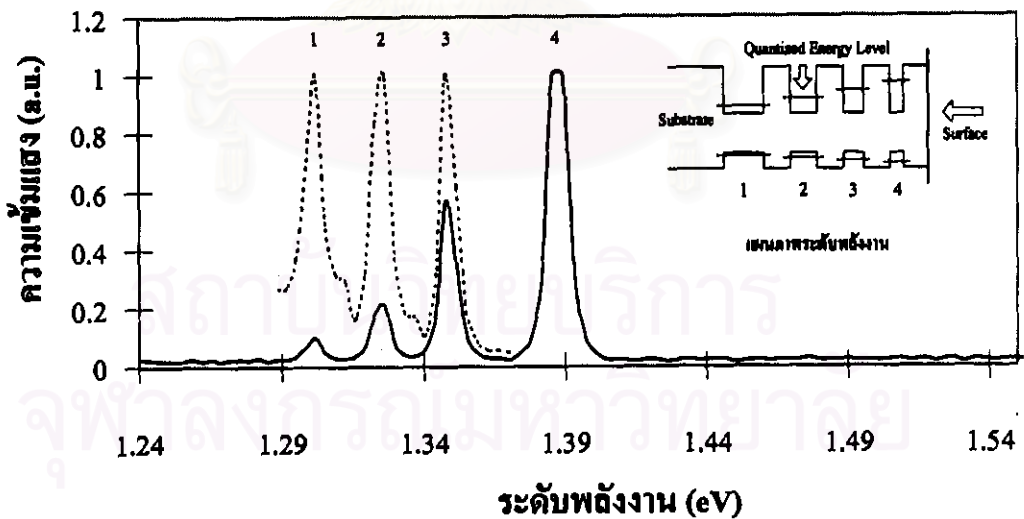
ในรูปที่ 4.5 เป็นผลการวัดเฉพาะที่อุณหภูมิประมาณ 10 K โดยวาดเส้นกราฟเทียบกับระดับพลังงานในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ เส้นประในรูปแสดงยอดแหลมอื่นๆ โดยเทียบให้มีขนาดสูงสุด 1 หน่วยเท่ากับยอดแหลมที่สูงที่สุด จะเห็นได้ว่าในรูปที่ 4.5 (ก) ชิ้นงานที่มีเวสต์กว้างอยู่ภายนอกจะมียอดแหลมของเวสต์ที่กว้างที่สุดแคบ และยอดแหลมที่ได้จากเวสต์ถัดเข้าไปจะกว้างขึ้น ขณะที่ในรูปที่ 4.5 (ข) ยอดแหลมที่ได้จากแต่ละเวสต์จะมีความกว้างใกล้เคียงกันและค่อนข้างแคบเมื่อเทียบกับยอดแหลมที่แคบที่สุดในรูปที่ 4.5 (ก) เมื่อนำกราฟที่ได้ไปปรับเทียบกับกราฟรูปแบบเกาสเซียน (Gaussian) เพื่อหาความกว้างของยอดแหลมที่ค่าความสูงครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด (Full Width of Half Maximum, FWHM) โดยอาศัยโปรแกรมออริจิน (Origin) จะได้ค่าดังตารางที่ 4.1 ผลที่ได้ในลักษณะนี้เกิดจากสภาพความเค้นที่เกิดขึ้นในโครงสร้างควอนตัมเวสต์ เวสต์ที่มีความเค้นจะให้ยอดแหลมที่แคบกว่าเวสต์ที่ไม่มีความเค้น ในชิ้นงานที่มีเวสต์ที่กว้างที่สุดอยู่นอกสุด เวสต์ที่อยู่ภายในสุดจะแคบ และมีความสภาพความเค้นน้อยที่สุด เวสต์ที่อยู่ถัดมาก็จะก่อให้เกิดความเค้นสะสมในโครงสร้างผลึกเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเวสต์นอกสุดที่กว้างที่สุด จะก่อให้เกิดความเค้นแก่โครงสร้างที่เป็นโครงสร้างควอนตัมเวสต์ สภาพความเค้นที่เกิดขึ้นที่แต่ละเวสต์จะไม่ส่งผลย้อนกลับที่แผ่นฐานเนื่องจากแผ่นฐานมีความหนามาก (ไม่ต่ำกว่า $300 \mu\text{m}$) เมื่อเทียบกับความหนาของชั้นโครงสร้างทั้งหมด (ไม่เกิน $0.5 \mu\text{m}$) ผลของความเค้นที่เกิดขึ้นจะส่งออกไปยังผิวหน้ามากกว่า ทำให้เวสต์แคบที่อยู่ด้านในของชิ้นงานที่มีเวสต์กว้างอยู่ภายนอกมีสภาพความเค้นเฉพาะที่ตัวเวสต์นั้นก่อขึ้นเองเท่านั้น เมื่อเวสต์ถัดมามีความกว้างมากขึ้นสภาพความเค้นก็เพิ่มขึ้น และมีความเค้นสูงสุดเมื่อเวสต์กว้างที่สุด ค่า FWHM ของยอดแหลมที่ได้จึงแคบลงตามลำดับ ขณะที่เวสต์อื่นๆ ในชิ้นงานที่มีเวสต์กว้างอยู่ภายในต่างก็ได้รับความเค้นที่ส่งออกมาจากเวสต์กว้างที่อยู่ภายในนั้น ความเค้นที่ตกแก่แต่ละเวสต์จึงเกิดจากความเค้นที่เวสต์ภายในนั้นสร้างขึ้นและความเค้นจากเวสต์ที่กว้างที่สุดนั้นรวมกัน ทำให้แต่ละเวสต์มีสภาพความเค้นไม่แตกต่างกันและทำให้ยอดแหลมที่ได้มีค่า FWHM ใกล้เคียงกัน

อนึ่ง หากสังเกตจากรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นการทดลองแปรเปลี่ยนอุณหภูมิแผ่นฐานขณะปลูกหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือเป็นการแปรเปลี่ยนค่าอัตราส่วนอะตอมระหว่างแกเลียมและอินเดียม ซึ่งก็เป็นการแปรเปลี่ยนสภาพความเค้นของโครงสร้างควอนตัมเวสต์แต่ละเวสต์ด้วย จะพบว่ายอดแหลม

ที่ได้จากแต่ละเวลต์กลับมีความกว้างใกล้เคียงกันและค่อนข้างแคบ โครงสร้างควอนตัมเวลต์ทั้งหมดนั้นถูกสร้างที่ความกว้าง 75 Å เท่าๆ กัน แต่แตกต่างกันที่ค่าอัตราส่วนอะตอม ทำให้สรุปได้ว่าการแปรเปลี่ยนค่าอัตราส่วนอะตอมจะไม่ส่งผลกระทบต่อความเค้นภายในโครงสร้างควอนตัมเวลต์ของอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนต์/แกลเลียมอาร์เซไนต์มากนัก ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสภาพความเค้นในโครงสร้างควอนตัมเวลต์อย่างมากคือความกว้างของโครงสร้างควอนตัมเวลต์ รูปที่ 4.6 เป็นกราฟสรุปผลจากความกว้างเวลต์ที่มีต่อตำแหน่งยอดแหลมและความกว้างของยอดแหลม



(ก)

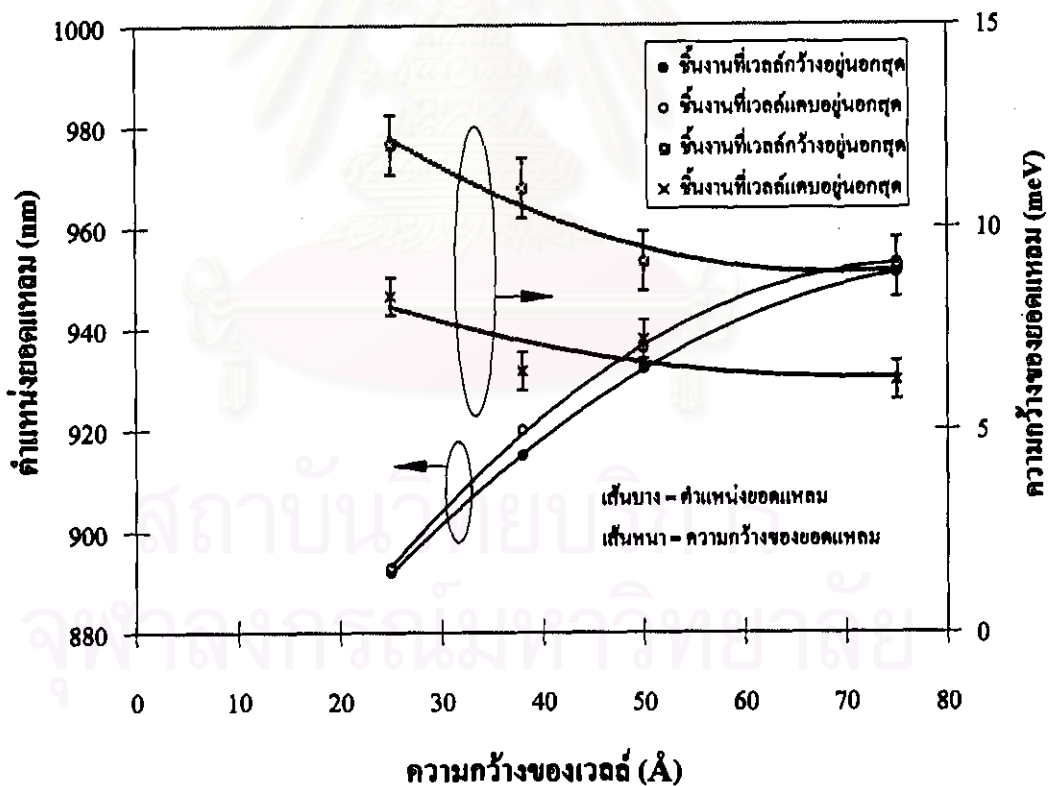


(ข)

รูปที่ 4.5 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ของ (ก) ชิ้นงานตัวอย่างที่มีการเรียงเวลต์ที่กว้างที่สุดไว้ภายนอกสุด (ข) ชิ้นงานตัวอย่างที่มีการเรียงเวลต์ที่กว้างที่สุดไว้ในสุด ทำการวัดที่อุณหภูมิประมาณ 10 K

ตารางที่ 4.1 ความกว้างของยอดแหลมในรูปที่ 4.5 หลังจากนำไปปรับเทียบกับกราฟรูปแบบเกาสเซียน (Gaussian)

ตำแหน่งยอดแหลม		ค่า FWHM ของยอดแหลม เกาสเซียน (Gaussian) (meV)
ความยาวคลื่น (nm)	ระดับพลังงาน (eV)	
รูปที่ 4.5 (ก)		
892	1.3901	12.0573
915	1.3552	10.9729
932	1.3305	9.1697
951	1.3039	9.0081
รูปที่ 4.5 (ข)		
893	1.3876	8.3153
920	1.3485	6.4454
936	1.3250	7.2307
953	1.3011	6.2152



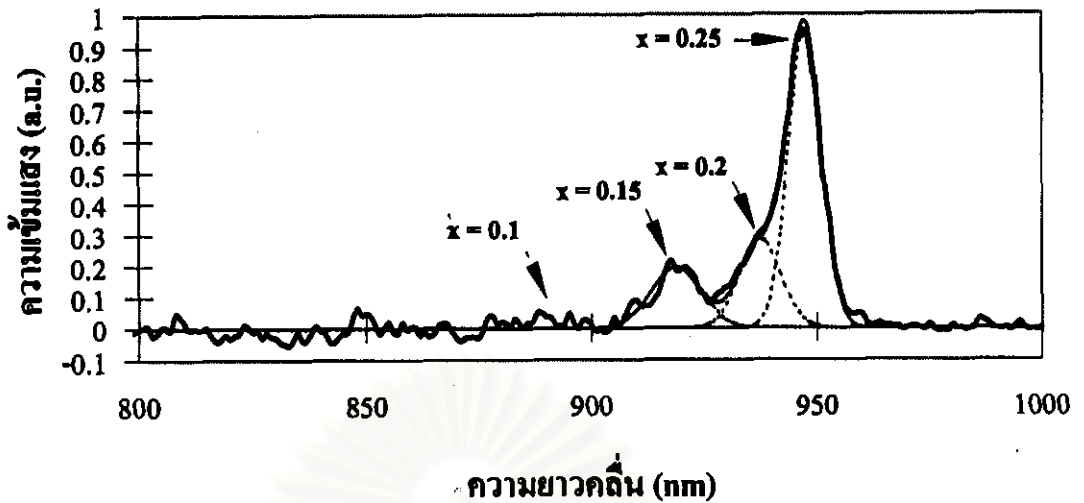
รูปที่ 4.6 กราฟรูปความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งยอดแหลมและความกว้างของเวลต์

4.3 การศึกษาผลของอัตราส่วนอะตอม (Mole Fraction, x) ของชั้นเวลด์ที่มีต่อระดับพลังงานควอนไทซ์

ผลการวัดชิ้นงานที่ทำการแปรเปลี่ยนความดันถ้าโมเดกุลของธาตุแกเลียมด้วยวิธีโฟโตลูมิเนสเซนส์เป็นไปดังรูปที่ 4.7 จะสังเกตเห็นตำแหน่งยอดแหลมอย่างน้อย 3 ยอดที่มีความสูงแตกต่างกัน ยอดแหลมที่มีความสูงมากที่สุดซึ่งได้จากเวลด์ที่อยู่ภายนอกสุดเป็นยอดแหลมที่ตำแหน่งความยาวคลื่นยาวที่สุด ดังนั้นยอดแหลมนั้นจึงเป็นยอดที่ได้จากเวลด์ที่มีค่าอัตราส่วนอะตอม $x = 0.25$ ยอดแหลมถัดมาอยู่ใกล้เคียงกับยอดแหลมแรกมากจนมีส่วนหางทับซ้อนกัน และมีความสูงต่ำกว่ายอดแหลมแรก ยอดแหลมที่สามอยู่ห่างออกมาและมีความสูงต่ำกว่ายอดแหลมที่สอง ยอดแหลมที่สี่ไม่ปรากฏชัดเจนเนื่องจากสัญญาณรบกวนสูงมากจนอาจกลบสัญญาณจากเวลด์ที่สี่นี้ จากความสูงของยอดแหลมทั้งสามทำให้สามารถระบุได้ว่ายอดแหลมใดได้จากเวลด์ใด ดังแสดงในรูปที่ 4.7 เวลด์ที่มีค่าอัตราส่วนอะตอมมากจะเป็นเวลด์ที่มีความลึกมาก และระดับพลังงานควอนไทซ์ต่ำ ทำให้ได้เวลด์ที่เปล่งแสงที่ความยาวคลื่นยาว ข้อสรุปนี้สอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อการแปรเปลี่ยนอุณหภูมิแผ่นฐานขณะปลูก

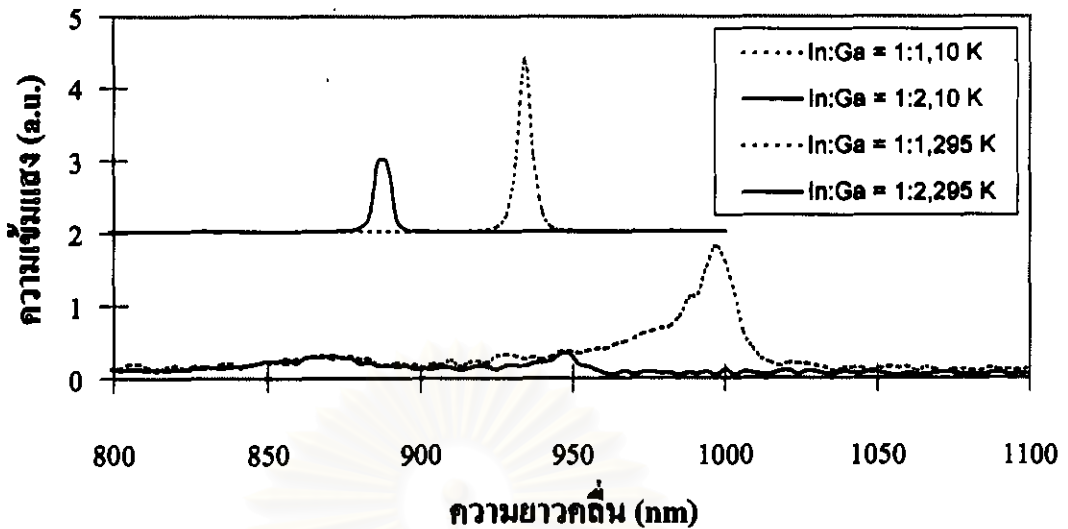
ข้อสังเกตที่สำคัญประการหนึ่งในรูปที่ 4.7 คือ จะเห็นได้ว่าตำแหน่งยอดแหลมทั้งสามที่ปรากฏในรูปจะอยู่ใกล้เคียงกันมากเมื่อเทียบกับตำแหน่งยอดแหลมในรูปที่ 4.1 ในหัวข้อการทดลองเรื่องการแปรเปลี่ยนอุณหภูมิแผ่นฐาน แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานทั้งสี่ในการทดลองเรื่องการแปรเปลี่ยนอุณหภูมิแผ่นฐานมีค่าอัตราส่วนอะตอมแตกต่างกันเป็นอย่างมาก นั่นคืออุณหภูมิการปลูกมีผลต่อค่าอัตราการคายอะตอมอินเดียมออกจากผิวหน้าอย่างมาก อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพียงไม่กี่สิบลองศาจะทำให้เกิดอัตราการคายสูงขึ้นมาก และทำให้ค่าอัตราส่วนอะตอมคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่คาดหมายไว้มากยิ่งขึ้นด้วย ดังนั้นในการสร้างโครงสร้างควอนตัมเวลด์ของอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์/แกเลียมอาร์เซไนด์จึงควรสร้างที่อุณหภูมิที่ต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อที่จะควบคุมค่าอัตราส่วนอะตอมได้แม่นยำที่สุด

รูปที่ 4.8 เป็นผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ชิ้นงานสองชิ้นที่ทำการแปรค่าอัตราส่วนอะตอม โดยการควบคุมเวลาในการเปิดปิดชุดเตอร์ เส้นประแสดงผลการวัดชิ้นงานที่มีอัตราส่วนเวลาชุดเตอร์เป็น $\text{In:Ga} = 1:1$ ส่วนเส้นทึบเป็นผลการวัดชิ้นงานที่มีอัตราส่วนเวลาชุดเตอร์เป็น $\text{In:Ga} = 1:2$ ที่อุณหภูมิการวัดประมาณ 10 K จะสังเกตเห็นได้ว่าตำแหน่งยอดแหลมของเส้นประจะอยู่ที่ประมาณ 950 nm ซึ่งตรงกับยอดแหลมของเวลด์ที่มีค่า $x = 0.2$ ในรูปที่ 4.7 ส่วนตำแหน่งยอดแหลม



รูปที่ 4.7 ผลการวัดชิ้นงานที่ทำการแปรเปลี่ยนค่าอัตราส่วนอะตอมอินเดียมต่อแกเลียมด้วยวิธีโฟโตลูมิเนสเซนส์ ทำการวัดที่อุณหภูมิประมาณ 12 K

ของเส้นประจะอยู่ที่ประมาณ 900 nm ตำแหน่งนี้เองที่ไม่ปรากฏอยู่ในรูปที่ 4.7 แต่เป็นตำแหน่งที่คาดว่ามียอดแหลม เนื่องจากถูกสัญญาณรบกวนบดบังอยู่ และเป็นตำแหน่งที่มีค่า $x = 0.1$ ซึ่งใกล้เคียงกับค่า $x = 0.11$ ของชิ้นงานที่ใช้อัตราส่วนเวลาชุดเตอร์เป็น $\text{In:Ga} = 1:2$ นั่นเอง รูปที่ได้จากการทดลองทั้งสองสอดคล้องกัน แสดงให้เห็นว่าเราสามารถควบคุมอัตราส่วนอะตอมได้โดยใช้วิธีการควบคุมอัตราส่วนค่าความดันลำโมเลกุลของธาตุอินเดียมและแกเลียม หรือจะใช้การควบคุมเวลาในการเปิดปิดชุดเตอร์ของธาตุอินเดียมและแกเลียมก็ได้ โครงสร้างควอนตัมเวลต์ที่ได้จะให้ยอดแหลมที่ตำแหน่งใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติการควบคุมอัตราส่วนอะตอมโดยควบคุมความดันลำโมเลกุลจะทำได้ยากกว่า ดังตัวอย่างที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อการออกแบบการทดลองเรื่องนี้ (เรื่อง การเปลี่ยนตัวคงค่าจากการคงค่าความดันลำโมเลกุลของแกเลียมมาเป็นการคงค่าความดันลำโมเลกุลของอินเดียมแทน) ยิ่งไปกว่านั้น ในการสร้างชิ้นงานหลายชั้นเพื่อเปรียบเทียบ การแปรค่าความดันลำโมเลกุลซึ่งแปรโดยการแปรอุณหภูมิเซลล์อาจทำได้ไม่แม่นยำ ทำให้อัตราส่วนอะตอมที่ได้มีความคลาดเคลื่อนสูง การแปรค่าอัตราส่วนเวลาในการเปิดปิดชุดเตอร์จะทำได้แม่นยำมากกว่าโดยไม่จำเป็นต้องแปรอุณหภูมิของเซลล์แต่ละเซลล์เลย

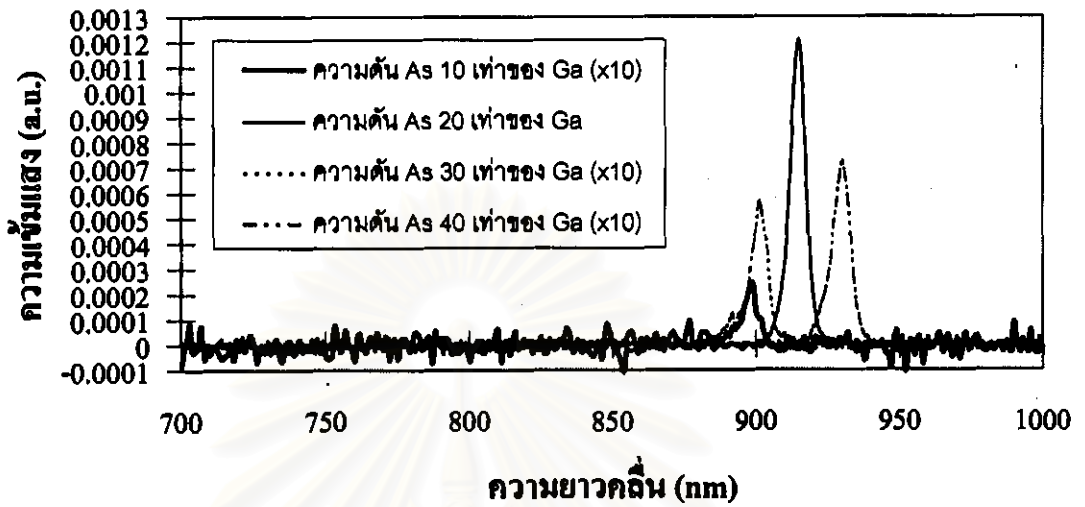


รูปที่ 4.8 ผลการวัดชิ้นงานที่ทำการแปรเปลี่ยนค่าอัตราส่วนเวลาในการเปิดปิดชุดเตอร์ของอินเดียมและแกลเลียมด้วยวิธีโฟโตลูมิเนสเซนส์ ทำการวัดที่อุณหภูมิประมาณ 12 K

4.4 การศึกษาผลของความดันที่ผิวหน้าแผ่นฐานที่มีต่อคุณภาพของผลึก

รูปที่ 4.9 เป็นผลการวัดชิ้นงานตัวอย่างที่มีโครงสร้างเป็นควอนตัมเวลด์เดี่ยวของอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์/แกลเลียมอาร์เซไนด์ 4 ชั้นที่มีการแปรเปลี่ยนค่าความดันลำโมเลกุลของอาร์เซนิก โดยมีค่าเป็น 10, 20, 30 และ 40 เท่าของความดันลำโมเลกุลของแกลเลียม ผลการวัดชิ้นงานแต่ละชั้นมีความเข้มแสงที่ได้จากการวัดแตกต่างกัน และมีตำแหน่งยอดแหลมแตกต่างกันเล็กน้อยซึ่งเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการปลูกผลึก จะสังเกตเห็นได้ว่า ยอดแหลมที่ได้จากเวลด์ที่สร้างภายใต้ความดันลำโมเลกุลของอาร์เซนิกเป็น 20 เท่าของแกลเลียม นั้นมีความเข้มแสงมากที่สุด ดังแสดงค่าสัมพัทธ์ได้ดังรูปที่ 4.10 แสดงว่าประสิทธิภาพในการรวมตัวแบบเปล่งแสงมีค่ามาก อันเกิดจากโครงสร้างที่ได้มีข้อบกพร่องน้อยนั่นเอง เมื่อนำยอดแหลมทั้งสี่ไปปรับเทียบกับกราฟรูปแบบเกาเซียนจะได้ค่า FWHM ของยอดแหลมดังตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่ายอดแหลมที่แคบที่สุดจะได้จากชิ้นงานที่สร้างโดยมีค่าความดันลำโมเลกุลของอาร์เซนิกเป็น 20 เท่าของแกลเลียม ยอดแหลมจะกว้างขึ้นเมื่อสร้างด้วยเงื่อนไขความดันลำโมเลกุลของอาร์เซนิกอื่น แสดงถึงความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างที่มีมากกว่า ทั้งนี้เกิดเนื่องจากที่ความดันลำโมเลกุลของอาร์เซนิกค่าต่ำจะไม่เกิดเสถียรภาพอาร์เซนิก โอกาสที่อะตอมของธาตุหมู่ III และ V จะหลุดจากผิวหน้าแผ่นฐานจะมีมาก แม้ในขณะที่มีการก่อผลึกด้วย โครงสร้างที่ได้จึงมีโอกาสเกิดข้อบกพร่องได้ง่าย ขณะที่ถ้าความดันลำโมเลกุลของอาร์เซนิกมีมากเกินไป ระยะปลดการชนของอะตอมต่างๆ ที่เคลื่อนตัวไปมาบนผิวหน้าแผ่นฐานจะสั้น ทำให้มีโอกาสเกิดผลึกในลักษณะที่เป็นเกาะสูงมากกว่าการเกิดผลึกในลักษณะ

ของระนาบ เมื่อเกาะขยายขนาดมาบรรจบกันเป็นระนาบอาจเกิดข้อบกพร่องตรงรอยต่อระหว่าง
เกาะได้มาก โครงผลึกจึงมีข้อบกพร่องสูง ทำให้ได้ยอดแหลมจากการวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ที่กว้าง
นั่นเอง



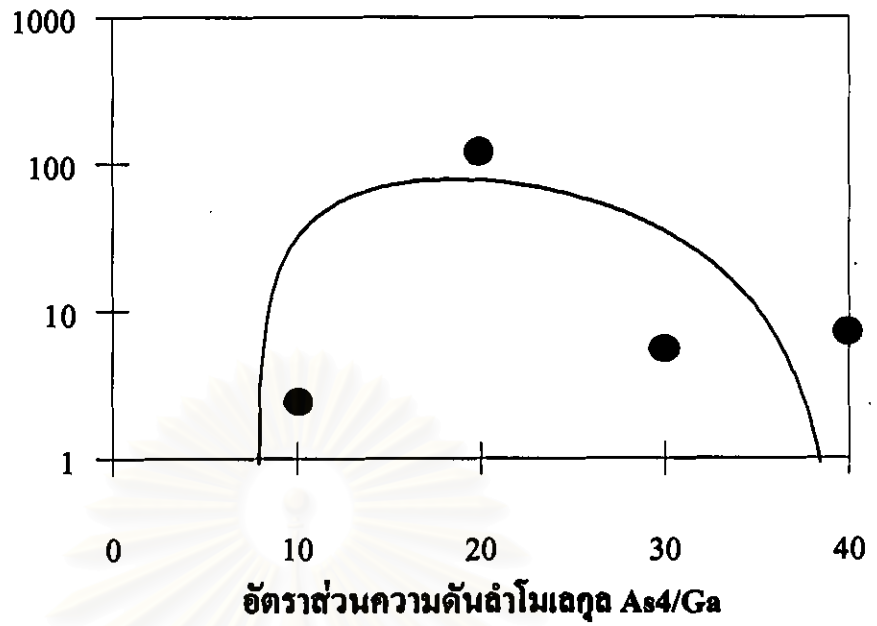
รูปที่ 4.9 ผลการวัดชิ้นงานที่ทำการแปรเปลี่ยนค่าความดันถ้าโมเลกุลของอาร์เซนิกด้วยวิธีโฟโตลูมิ
เนสเซนส์ ทำการวัดที่อุณหภูมิประมาณ 12 K

ตารางที่ 4.2 ความกว้างของยอดแหลมที่ได้จากการเปรียบเทียบผลการวัดในรูปที่ 4.9 กับกราฟรูปแบบ
เกาเซียน

ความดันถ้าโมเลกุลของอาร์เซนิก (จำนวนเท่าของความดันถ้าโมเลกุลของแกดเจียม)	ค่า FWHM ของยอดแหลม เกาเซียน (Gaussian) (meV)
10	10.6259
20	9.7416
30	13.3584
40	11.6322

ความเข้มแสงจากยอดแหลม PL สูงสุด

สัมพัทธ์ (อ.บ.)



รูปที่ 4.10 ค่าความเข้มแสงจากการวัดด้วยวิธีโฟโตลูมิเนสเซนส์สูงสุดสัมพัทธ์ η ค่าความดันต่ำโมเลกุลต่างๆ กัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย