

ค่าความดันของลำโมเลกุลกลุ่ม III จะมีผลต่ออัตราการก่อตัวของชั้นผลึก ถ้ามีความดันโมเลกุลกลุ่ม III มากขึ้น อัตราการปลูกชั้นผลึกก็จะสูงขึ้น หากความดันของลำโมเลกุลกลุ่ม V มีค่าน้อยเกินไปจะทำให้ผิวผลึกมีลักษณะการก่อตัวแบบ 3 Dimension และหากความดันของลำโมเลกุลกลุ่ม V มีค่ามากเกินไปจะทำให้ความดันภายในระบบมีค่าสูงมาก ซึ่งจะมีผลกระทบโดยตรงต่อระบบสุญญากาศ และทำให้ค่า mean free path ของลำโมเลกุลลดลง ค่าอัตราส่วนของความดันโมเลกุลกลุ่ม III ต่อ กลุ่ม V มักจะเป็น 1 ต่อ 5

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องมีการศึกษาตัวแปรการควบคุม flux ของโมเลกุลฟอสฟอรัส ด้วยการควบคุมอุณหภูมิของเป้าหมาย GaP decomposition cell เพื่อให้ได้ค่าความดันของลำโมเลกุลที่เหมาะสม และเพียงพอต่อการปลูกชั้นผลึก และจะต้องทดสอบความสามารถของ decomposition cell ที่ได้ทำการติดตั้งใช้งานสำหรับงานวิจัยนี้

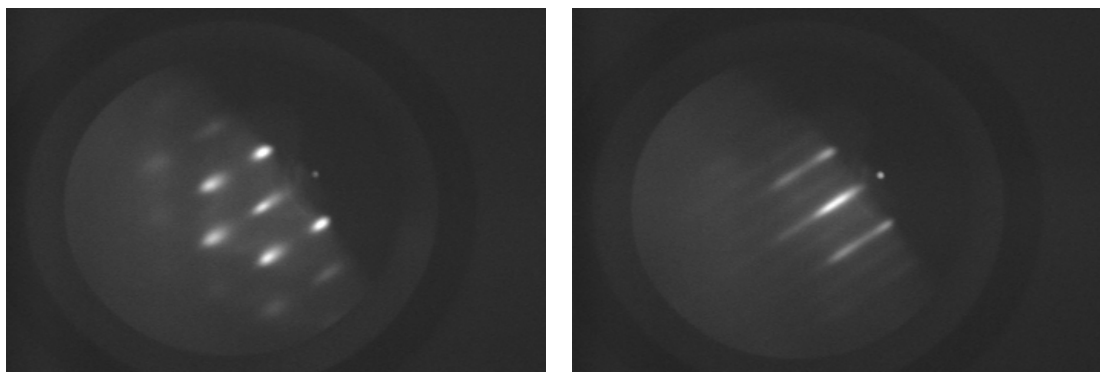
3.3 การเปรียบเทียบ Flux ของ Ga เพื่อปลูก GaAs ในอัตรา 0.52 ชั้นผลึกต่อวินาที

เป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบปริมาณ Flux ของ Ga ที่จะทำให้เกิดการก่อตัวของชั้นผลึกในอัตรา 0.52 ชั้นผลึกต่อวินาที เนื่องจากมีเป้าหมายที่จะทำการปลูกชั้นผลึก $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{P}$ ในอัตรา 1 ชั้นผลึกต่อวินาที ซึ่งเป็นอัตราการเกิดผลึกที่ใช้กันปกติในกระบวนการปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล ดังนั้นปริมาณของ Ga flux จึงต้องถูกควบคุมให้อยู่ในอัตราที่สัมพันธ์กับปริมาณที่จะปรากฏในชั้นผลึก InGaP คือประมาณ 0.5 แต่เนื่องจากผลึกฐานที่ใช้เป็น GaAs จึงมีข้อจำกัดทางเทคนิคในการทดลองเพราะจะไม่สามารถทดสอบการปลูกชั้นผลึก GaP บนผลึกฐาน GaAs โดยตรงได้ เนื่องจากมีค่าคงที่ของโครงสร้างต่างกันมาก (ประมาณ 4%) แต่เป็นที่ทราบแล้วว่าอัตราการปลูกชั้นผลึกจะขึ้นอยู่กับปริมาณ Flux ของ Ga เป็นสำคัญ ดังนั้นข้อมูลการเปรียบเทียบอัตราการปลูกผลึก GaAs ก็จะสามารถนำมาเป็นแนวทางอ้างอิงได้เช่นกัน

การทดลองในหัวข้อนี้จะทำการปลูกชั้นผลึก GaAs บนผลึกฐาน GaAs โดยให้อุณหภูมิของผลึกฐานคงที่ที่ 550°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิการแยกสลายชั้นออกไซด์ที่ผิวหน้า GaAs 10 องศา ปรับอุณหภูมิของ As-cell ให้ได้ระดับสุญญากาศภายใน Growth chamber เท่ากับ 5×10^{-8} Torr แล้วทำการปลูกชั้นผลึก GaAs โดยใช้อุณหภูมิของ Ga-cell ค่าต่าง ๆ ทำการบันทึกผลค่า RHEED oscillation ตั้งแต่เริ่มเปิด Ga-cell shutter ต่อหน่วยเวลา เพื่อหาค่าอุณหภูมิของ Ga-cell ที่จะต้องใช้ในการทดลองต่อไป

3.4 การทดลองปลูกชั้นผลึก $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{P}$

การทดลองนี้จะนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองต่าง ๆ ข้างต้นมาดำเนินการกระบวนการปลูกชั้นผลึก $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{P}$ โดยมีจุดมุ่งหมายที่จะได้ชั้นผลึกที่มีความเรียบสูงซึ่งจะสะท้อนถึงความสมบูรณ์ของชั้นผลึกนั้น สำหรับการตรวจสอบระหว่างการปลูกชั้นผลึกจะใช้วิธีสังเกตจาก RHEED pattern เป็นหลัก



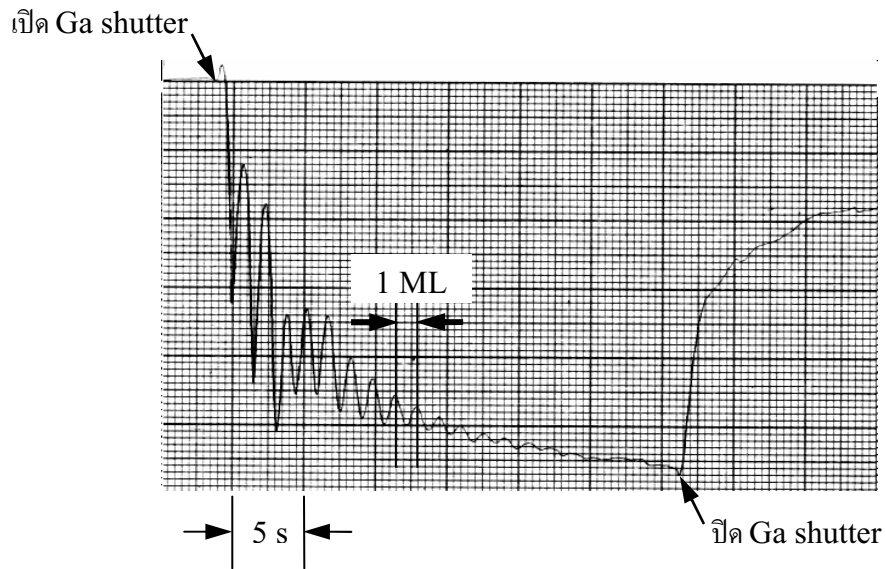
รูปที่ 20 เปรียบเทียบ RHEED pattern ของพื้นผิวขรุขระ (ซ้าย) และพื้นผิวเรียบ (ขวา)

4. ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองสร้างระบบวัด RHEED oscillation

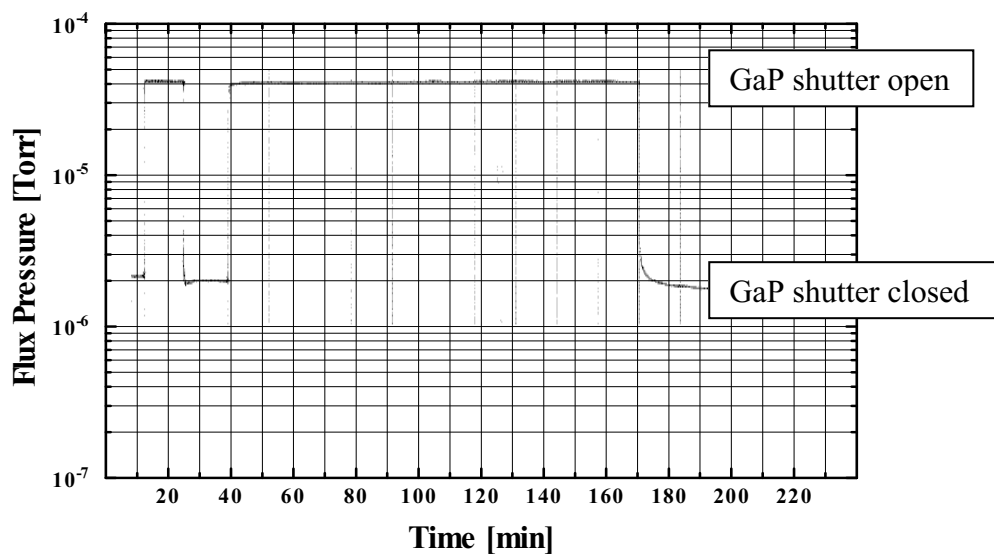
ระบบวัด RHEED oscillation สามารถทำงานได้ดีทำให้สามารถตรวจสอบอัตราการปลูกชั้นผลึกได้ในระดับต่ำกว่า 1 ML/s ทำให้สามารถตรวจวัดอัตราการปลูกชั้นผลึกได้รวดเร็วและถูกต้องมากขึ้น และได้ทำการใช้ระบบนี้ทำการวัดหาอัตราการปลูกชั้นผลึกในงานวิจัยนี้ดังต่อไปนี้

- การปลูกชั้นผลึก GaAs ที่อุณหภูมิ Ga-cell ต่าง ๆ โดยใช้อุณหภูมิผลึกฐานคงที่ 550°C เพื่อหาอุณหภูมิของ Ga-cell ที่จะทำให้ได้อัตราการเกิดผลึก GaAs เท่ากับ 0.52 ML/s
- การปลูกชั้นผลึก GaAs ที่อุณหภูมิ Ga-cell คงที่ และมีการเปลี่ยนอุณหภูมิของผลึกฐาน เพื่อตรวจสอบว่ามีการเปลี่ยนแปลงอัตราการเกิดผลึกหรือไม่
- การปลูกชั้นผลึก InGaP เพื่อตรวจวัดอัตราการเกิดผลึก และสามารถปรับปรุงอัตราการเกิดผลึกให้เท่ากับ 1 ML/s เพื่อให้ได้ชั้นผลึก $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{P}$ ตามต้องการ



รูปที่ 21 ตัวอย่างผลการวัด RHEED oscillation จากการปลูก GaAs โดยใช้อุณหภูมิของ Ga-cell เท่ากับ 900°C

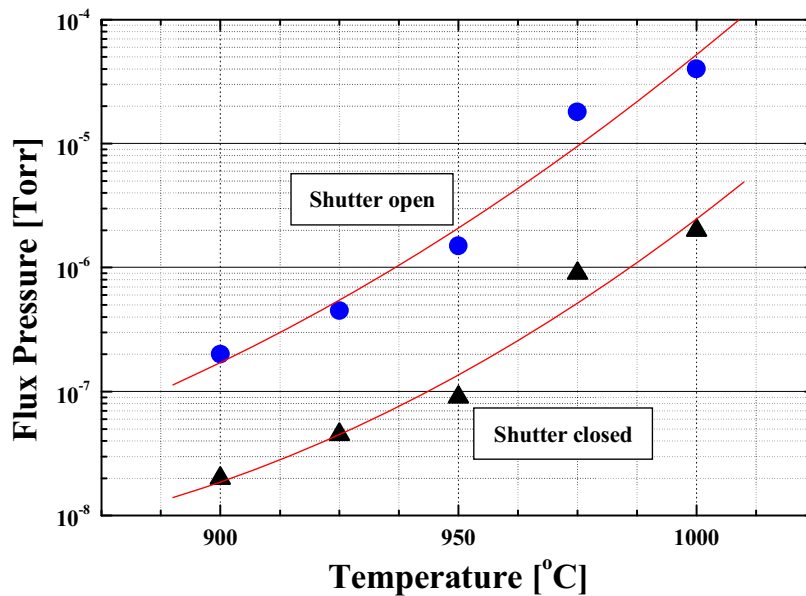
4.2 ผลการทดลองการควบคุม Flux ของ P_2



รูปที่ 22 ความดันของลำโมเลกุล P_2 ในขณะเปิด GaP shutter และความดันขณะปิด shutter ที่อุณหภูมิ GaP-cell เท่ากับ 1000°C

จากรูปที่ 22 จะเห็นว่าสามารถควบคุมความดันของลำโมเลกุลได้ดี ระบบมีการตอบสนองที่ดี ทั้งนี้จะต้องทำการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันของลำโมเลกุล P_2 กับอุณหภูมิ

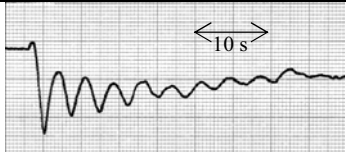
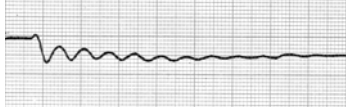
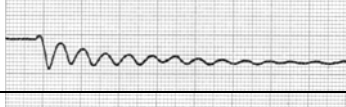
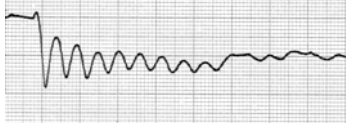
ของ Ga-cell เพื่อจะได้ทราบอุณหภูมิที่เหมาะสมในการรักษาอัตราส่วนความดันไอโมเลกุลระหว่างธาตุหมู่ V และหมู่ III ให้ได้เท่ากับ 5 ตามต้องการ

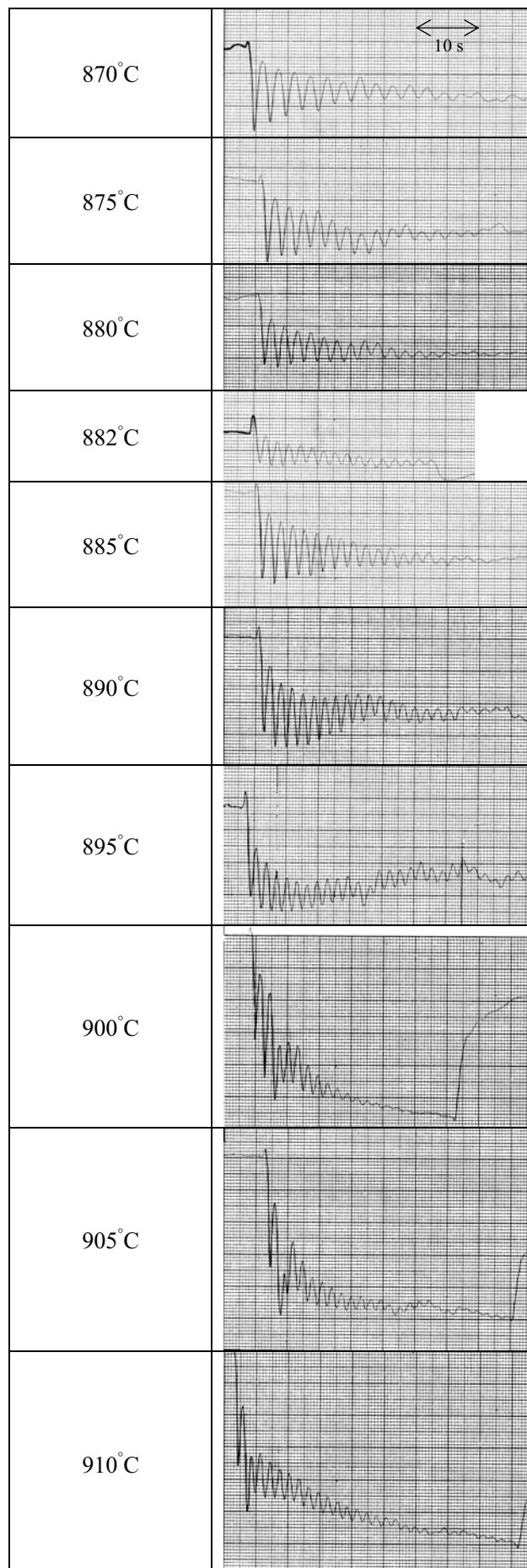


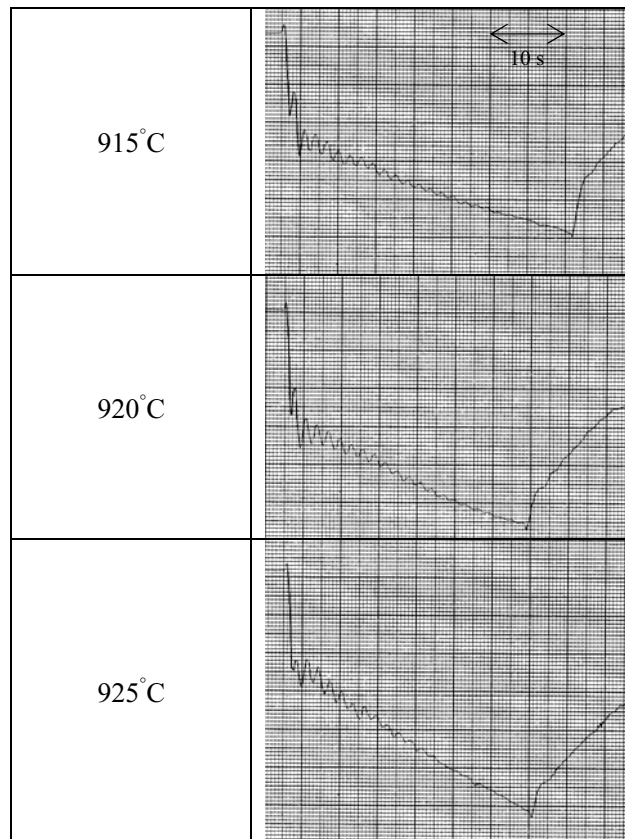
รูปที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของ GaP decomposition cell กับ flux ของ P_2

4.3 ผลการทดลองการปรับเทียบ Flux ของ Ga

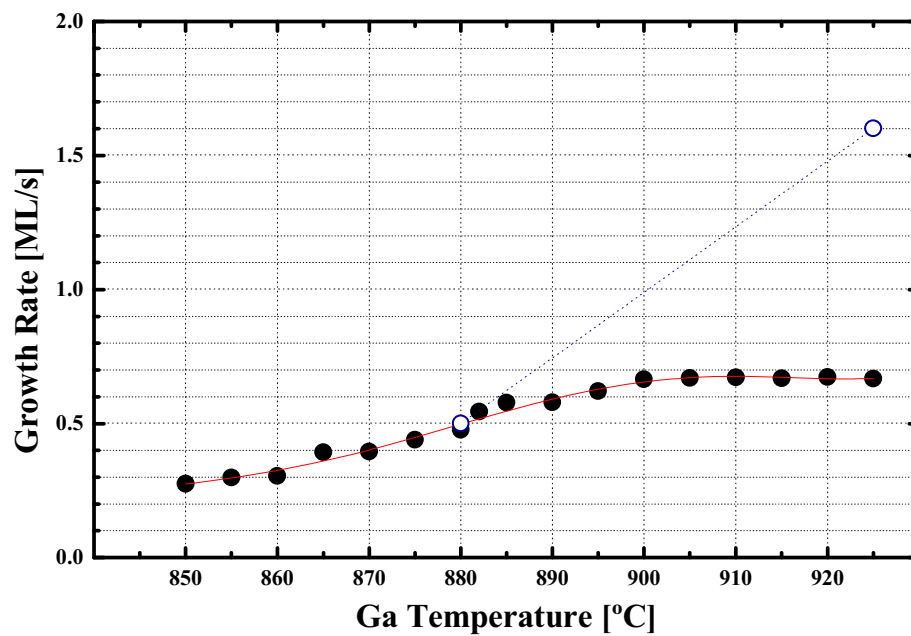
ตารางที่ 3 ผลการทดลองวัด RHEED oscillation ของการปลูกผลึก GaAs ที่อุณหภูมิ Ga-cell ต่าง ๆ โดยใช้อุณหภูมิของผลึกฐานคงที่ 550 °C

อุณหภูมิ Ga-cell	RHEED oscillation
850 °C	
855 °C	
860 °C	
865 °C	





จากตารางที่ 3 จะสามารถตรวจสอบอัตราการปลูกชั้นผลึก GaAs ที่อุณหภูมิผลึกฐาน 550°C ได้ดังรูปที่ 24

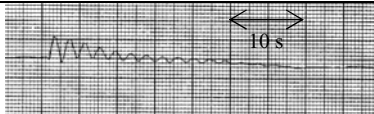
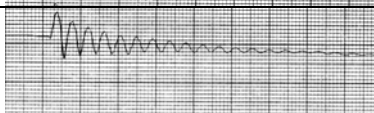
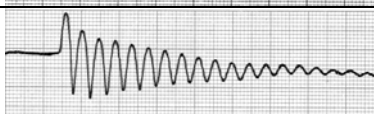


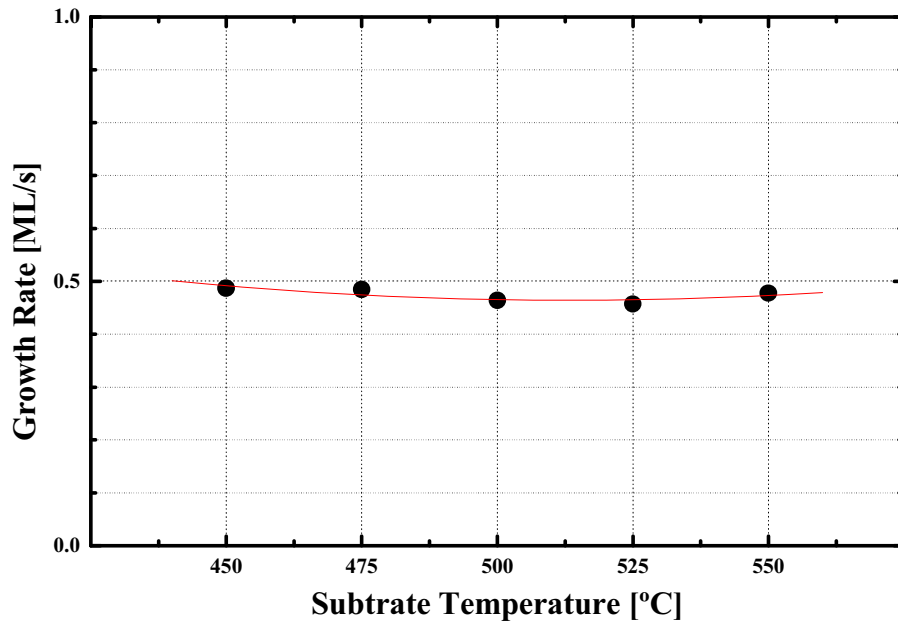
รูปที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของ Ga-cell กับอัตราการเกิดชั้นผลึก GaAs เมื่ออุณหภูมิผลึกฐานเท่ากับ 550°C

ผลการทดลองนี้จะเห็นว่าอัตราการเกิดชั้นผลึกเกิดการอิ่มตัว ทั้งนี้เกิดจากการคงค่าอุณหภูมิของ As-cell เพราะสาเหตุทางเทคนิคที่ไม่ต้องการให้ความดันของระบบสูงเกินไป และได้มีการทดลองตรวจสอบแล้วว่าหากมีการเพิ่มปริมาณ flux ของ As จะสามารถเพิ่มอัตราการปลูกผลึก GaAs ขึ้นไปได้ถึง 1.6 ML/s ในขณะที่เมื่อใช้อุณหภูมิของ Ga-cell เท่ากับ 880°C ก็จะได้อัตราการเกิดผลึกเท่าเดิม

อย่างไรก็ตามการทดลองปลูกชั้นผลึก InGaP จะต้องเริ่มกระทำที่อุณหภูมิผลึกฐานต่ำกว่า 550°C จึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบว่าอัตราการเกิดผลึกมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของผลึกฐานหรือไม่อย่างไร โดยการทดลองนี้จะใช้ข้อมูลจากการปลูกผลึก GaAs ที่อัตราการเกิดผลึกเท่ากับ 0.5 ML/s ซึ่งที่จุดนี้จะใช้อุณหภูมิของ Ga-cell เท่ากับ 880°C ทำการปลูกชั้นผลึก GaAs ที่อุณหภูมิผลึกฐานต่าง ๆ และตรวจสอบด้วย RHEED oscillation

ตารางที่ 4 ผลการทดลองวัด RHEED oscillation ของการปลูกผลึก GaAs ที่อุณหภูมิผลึกฐานต่าง ๆ โดยใช้อุณหภูมิของ Ga-cell คงที่ 880°C

อุณหภูมิผลึกฐาน	RHEED oscillation
450°C	
475°C	
500°C	
525°C	
550°C	



รูปที่ 25 อัตราการเกิดชั้นผลึกเมื่อมีการเปลี่ยนอุณหภูมิของผลึกฐาน
โดยอุณหภูมิของ Ga-cell คงที่เท่ากับ 880°C

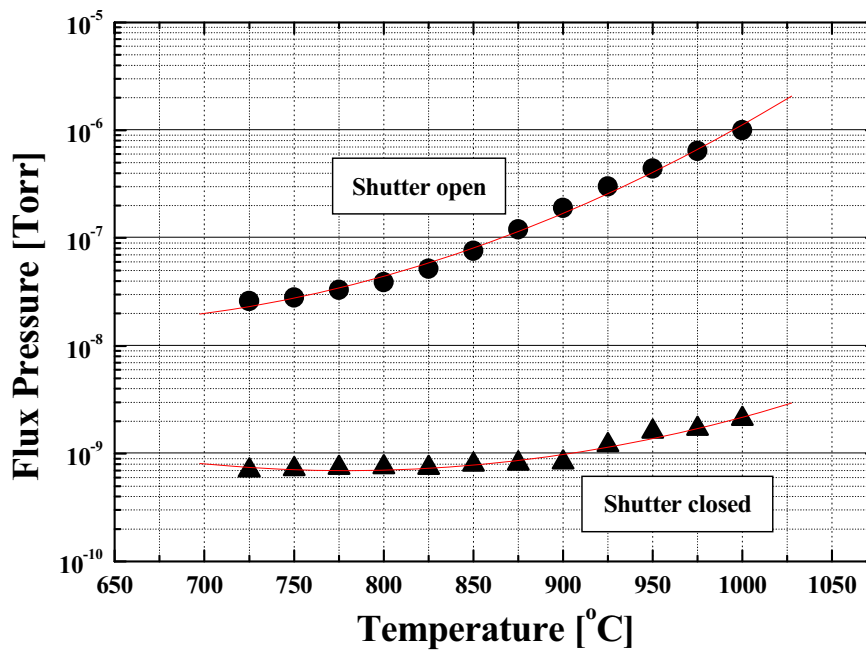
ผลการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงของอัตราการเกิดผลึกเพียงเล็กน้อยคือประมาณ $\pm 1.5\%$ (max-min = 0.03) เท่านั้น จึงพอสรุปได้ว่าสามารถใช้ค่าอุณหภูมิของ Ga-cell เป็นตัวแปรควบคุมอัตราการเกิดชั้นผลึก GaAs เพียงตัวแปรเดียว

4.4 ผลการทดลองตัวแปรต่าง ๆ ในการปลูกชั้นผลึก

งานวิจัยนี้จะเกี่ยวข้องกับการปลูกชั้นผลึกหมู่ III-V จำนวน 2 กลุ่มคือ

- 1) การปลูกชั้นผลึก GaAs เพื่อเป็นชั้น buffer ซึ่งจะต้องปลูกในบรรยากาศของ As
- 2) การปลูกชั้นของ GaP พร้อมกับชั้นของ InP เพื่อให้เกิดเป็นชั้นผลึก InGaP ซึ่งจะต้องปลูกในบรรยากาศของ P

ในช่วงที่ใช้บรรยากาศของ As เพื่อทำการปลูก GaAs นั้นจะกระทำที่อุณหภูมิและเงื่อนไขการปลูกชั้นผลึกตามแบบแผนปกติคือใช้อุณหภูมิผลึกฐาน 550°C โดยปรับค่า flux ของ Ga ให้ได้อัตราการเกิดชั้นผลึก GaAs เท่ากับ 0.52 ML/s และจะใช้ค่า flux ของ Ga ในขั้นตอนนี้ในการปลูกชั้นต่อไป และจากการทดลองในขั้นตอนการปรับเทียบ flux ของ Ga พบว่าจะต้องใช้อุณหภูมิของ Ga-cell เท่ากับ 885°C เพื่อให้ได้ Ga flux ประมาณ 1.5×10^{-7} torr



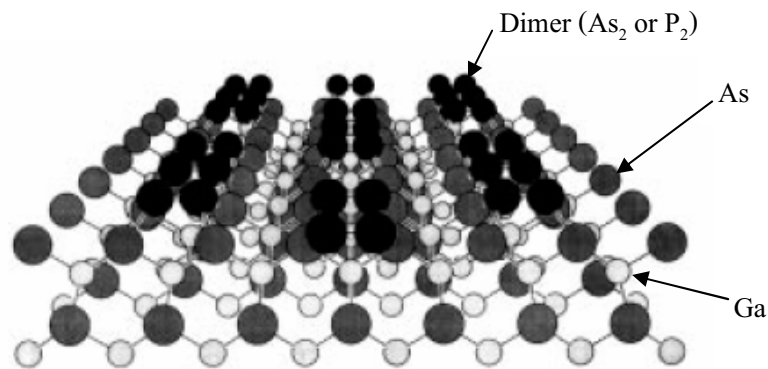
รูปที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของ Ga- cell กับ flux ของ Ga

สาเหตุหลักในการปลูกชั้นผลึก GaAs ในบรรยากาศของ As ก็คือที่อุณหภูมิพื้นฐานสูงเกิน 350°C จะต้องรักษาความดันของโมเลกุล As ที่ผิวหน้าของผลึกฐานเพื่อรักษาสภาพพื้นผิวผลึก มิเช่นนั้นจะเกิดปรากฏการณ์ desorption คือโมเลกุลของ As จะหลุดหนีออกมาจากผิวผลึก ส่งผลให้ผิวผลึกจะเหลือแต่โมเลกุลของ Ga ซึ่งจะกลายเป็นการกัดผิวหน้าของผลึกในลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้โมเลกุลของ Ga จะรวมตัวกันเป็น cluster และก่อให้เกิดผิวผลึกที่มีลักษณะขรุขระขึ้น ดังนั้นเมื่อจะต้องเปลี่ยนกลุ่มของโมเลกุลหมู่ V หรือจาก As ไปเป็น P จะต้องลดอุณหภูมิของผลึกฐานลงให้เหลือต่ำกว่า 350°C เพื่อความปลอดภัยของผิวหน้าผลึก

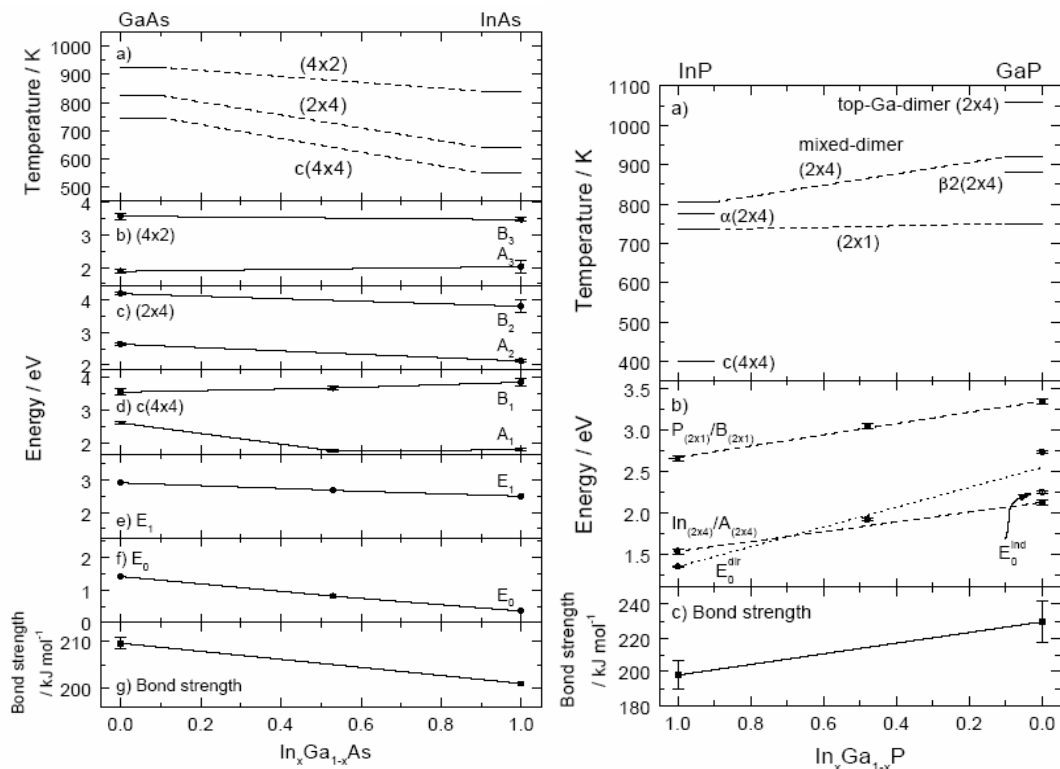
ขั้นตอนต่อไปของการทดลองคือการตรวจสอบเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการเริ่มต้นปลูกชั้นผลึก InGaP ในบรรยากาศของ P_2 ซึ่งการทดลองนี้จะใช้ความดันของ P_2 flux เท่ากับ flux ของ As ที่ใช้ระหว่างการปลูกผลึก GaAs buffer ซึ่งจะเท่ากับ 6×10^{-6} torr และตัวแปรหลักในการทดลองนี้ประกอบด้วย

- 1) อุณหภูมิของผลึกฐานขณะเริ่มต้นปลูกชั้นผลึก InGaP เนื่องจากลักษณะการปลูกชั้นผลึกจะเป็นรอยต่อแบบต่างชนิด (hetero structure) ซึ่งจะมีผลของอะตอมโลหะที่ผิวหน้าของผลึกซึ่งในกรณีนี้คือ Ga ซึ่งหากทำการปลูก InGaP ลงบนผิวผลึกที่มี Ga อยู่ (Ga rich surface) จะทำให้มีโอกาสที่จะเกิดชั้นผลึก GaP ขึ้นในบริเวณรอยต่อซึ่งจะส่งผลให้เกิดจุดบกพร่องในโครงผลึกเนื่องจากเกิดความต่างของค่าคงที่โครงผลึก และชั้นผลึกที่เกิดขึ้นตามมาก็จะเกิดความเสียหายได้

ดังนั้นจะต้องควบคุมจุดที่เกิดการเปลี่ยนชั้นผลึกให้มีแต่ผิวของอโลหะ (As หรือ P) โดยการปรับสภาพผิวหน้าของผลึกสามารถทำได้โดยใช้การควบคุมอุณหภูมิของผลึกฐาน ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าหากลดอุณหภูมิของผลึกฐานลงในบรรยากาศของโมเลกุลของธาตุกลุ่ม V (อโลหะ) จะทำให้เกิดการเปลี่ยนสมดุลของสภาพผิวซึ่งสามารถตรวจสอบได้ด้วยการสังเกต RHEED pattern [13] โดยหากผิวผลึกมีอะตอมของธาตุกลุ่ม III (โลหะ) เช่น Ga rich surface จะเกิด RHEED pattern แบบ (2x4) ถ้าเป็นผิวเป็นอะตอม As (As rich surface) จะเกิด RHEED pattern แบบ c(4x4) และถ้าที่ผิวเป็นอะตอม P (P rich surface) จะเกิด RHEED pattern แบบ (2x1) โดยอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยน RHEED pattern นี้จะเรียกว่า Phase transition temperature

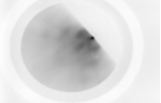
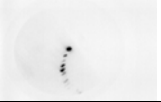
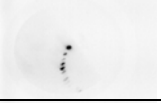
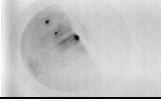
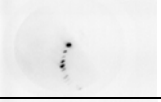
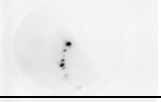
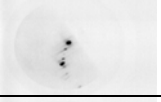
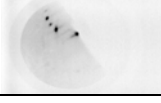
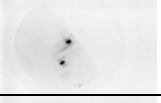
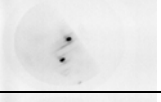
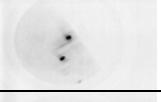
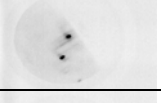
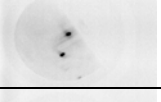
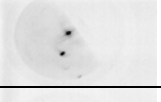
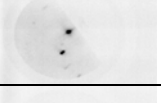
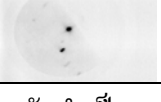


รูปที่ 27 ผิวผลึก GaAs (001) ที่มีโมเลกุลอโลหะที่เป็น dimer อยู่ทีผิว



รูปที่ 28 เปรียบเทียบ Phase transition temperature ระหว่างระบบผลึก InGaAs กับ InGaP

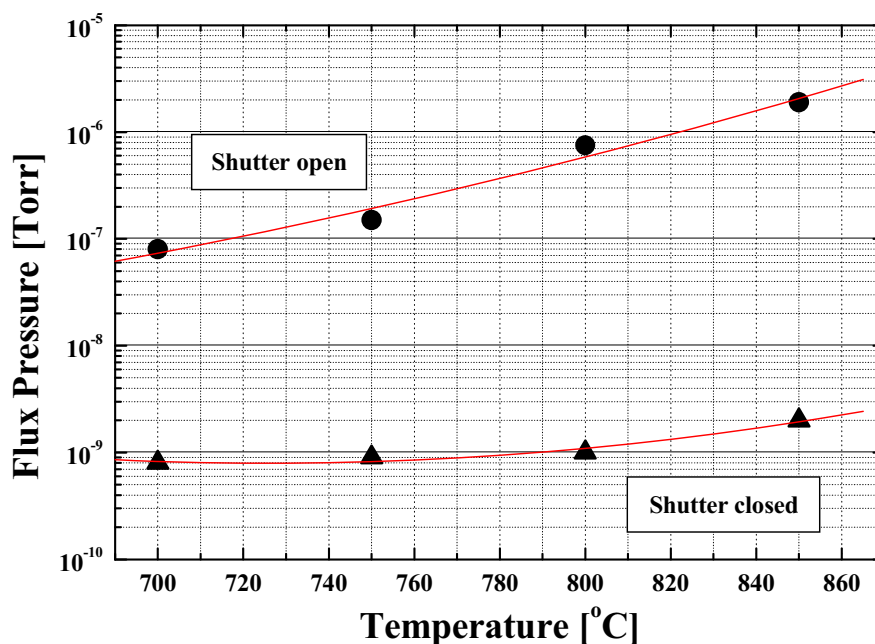
ตารางที่ 5 การตรวจสอบหา Phase transition temperature จากชิ้นงานจำนวน 3 ตัวอย่าง

อุณหภูมิพื้นฐาน	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	Pattern type
550°C				(2×4)
540°C				
530°C				
520°C				
510°C				
500°C				
490°C				
485°C				
480°C				
475°C				c(4×4)
470°C				
465°C				
460°C				
455°C				
450°C				(2×1)

หมายเหตุ ภาพ RHEED ที่ปรากฏเป็นภาพกลับดำเป็นขาว เพื่อให้ง่ายต่อการสังเกต

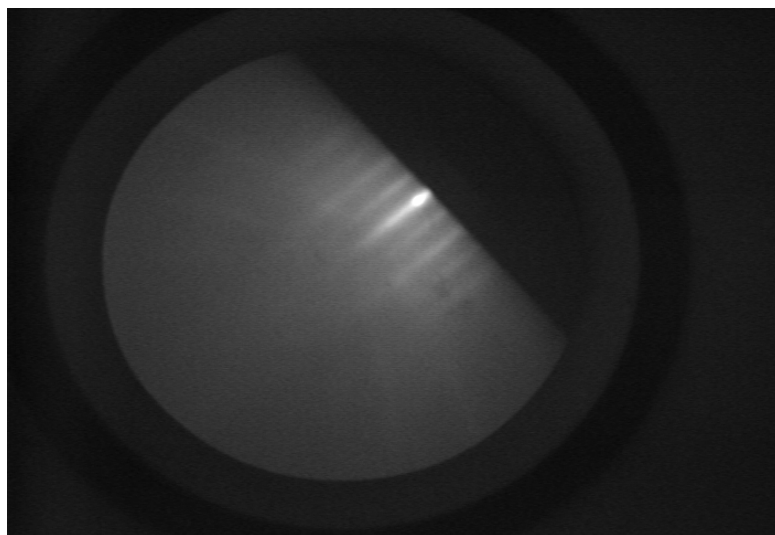
ผลการทดลองในตารางที่ 5 แสดงการตรวจสอบ RHEED pattern ในระหว่างการลดอุณหภูมิผลึกฐานหลังการปลูกชั้น buffer ของ GaAs อย่างต่อเนื่องเพื่อหาอุณหภูมิจริงที่เกิดการเปลี่ยนแปลง phase ของผิวผลึก พบว่า Phase transition temperature ของผิวผลึก GaAs ในการทดลองนี้เท่ากับ 475°C

- 2) ค่าความดันลำโมเลกุลของ In ที่จะประกอบรวมกับ Ga ให้เกิดเป็นชั้นผลึก $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{P}$ เนื่องจากข้อจำกัดของการทดลองนี้ ทำให้ไม่สามารถทำการปลูกชั้นผลึก InP หรือ InAs เพื่อเปรียบเทียบอัตราการปลูกได้เหมือนกับที่ใช้อัตราการปลูก GaAs เป็นตัวเปรียบเทียบความดันลำโมเลกุลของ Ga เพราะจะต้องใช้ผลึกฐานชนิด InP หรือ InAs ซึ่งไม่มีใช้ และไม่มีข้อมูลพื้นฐานการปลูกมาก่อน และหากจะปลูกบนผลึกฐาน GaAs ย่อมเป็นไปได้เนื่องจากมีความแตกต่างของค่าคงที่โครงสร้างผลึกมาก ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีการทดลองปลูกชั้นผลึก InGaP ที่ค่าความดันโมเลกุลของ In ต่าง ๆ โดยทำการตรวจวัด RHEED oscillation ซึ่งการทดลองนี้จะใช้ข้อมูลการตรวจวัดความดันโมเลกุลของ In ตามรูปที่ 29

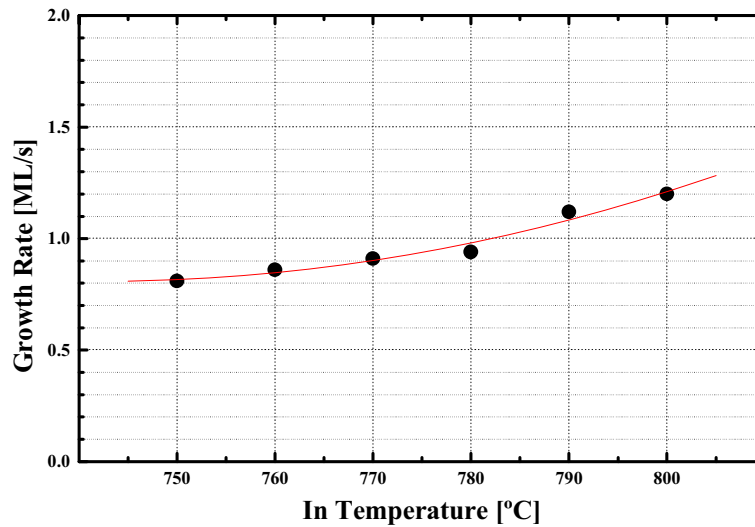


รูปที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของ In- cell กับ flux ของ In

และถ้าพิจารณาจากอัตราส่วน 0.48 ต่อ 0.52 ของโมเลกุล In ต่อ Ga จะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกัน ปริมาณอะตอมต่อหน่วยเวลาของ In และ Ga ควรจะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ทั้งนี้จะต้องพิจารณาจากความสามารถในการตรวจวัดของ BEP ion gauge ที่ใช้เป็นประการสำคัญ เพราะ ion gauge ที่ใช้ในระบบ MBE นี้มีค่าการตอบสนองต่ออะตอมหรือโมเลกุลของธาตุชนิดต่าง ๆ ไม่เท่ากัน ซึ่งจากข้อมูลของ ion gauge นี้พบว่าประสิทธิภาพการตอบสนองต่ออะตอมของ Ga และ In เท่ากับ 1.73 และ 2.5 ตามลำดับ ดังนั้นหากต้องการปริมาณอะตอมต่อหน่วยเวลาที่เท่ากันของ In และ Ga จะต้องอ่านค่าความดันของลำโมเลกุล In ได้มากกว่า Ga เท่ากับ $2.5/1.73 = 1.44$ เท่า อย่างไรก็ตามยังมีตัวแปรอื่นอีกในการปลูกชั้นผลึกที่จะสามารถส่งผลกระทบต่ออัตราการเกิดชั้นผลึก เช่น ความสามารถในการเกาะติดของโมเลกุลต่าง ๆ ซึ่งมีค่าไม่เท่ากัน รวมถึงมีการแปรค่าที่อุณหภูมิผิวผลึกต่าง ๆ เป็นต้น จึงต้องมีการทดลองปลูกชั้นผลึก InGaP โดยใช้อุณหภูมิผิวผลึกที่ 350°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการเปลี่ยนจากบรรยากาศของ As เป็น P เพื่อให้ผิวผลึกมีเสถียรภาพของการเป็น P_2 -rich เพียงพอ และใช้ความดันลำโมเลกุล Ga เท่ากับ 1.5×10^{-7} torr และแปรค่าความดันลำโมเลกุลของ In ด้วยการควบคุมอุณหภูมิ In-cell ในช่วง 750°C ถึง 800°C ทำการวิเคราะห์ทั้ง RHEED pattern เพื่อตรวจสอบลักษณะผิวของผลึก และทำการวัด RHEED oscillation เพื่อตรวจสอบอัตราการเกิดชั้นผลึกได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 30 และ รูปที่ 31 ตามลำดับ



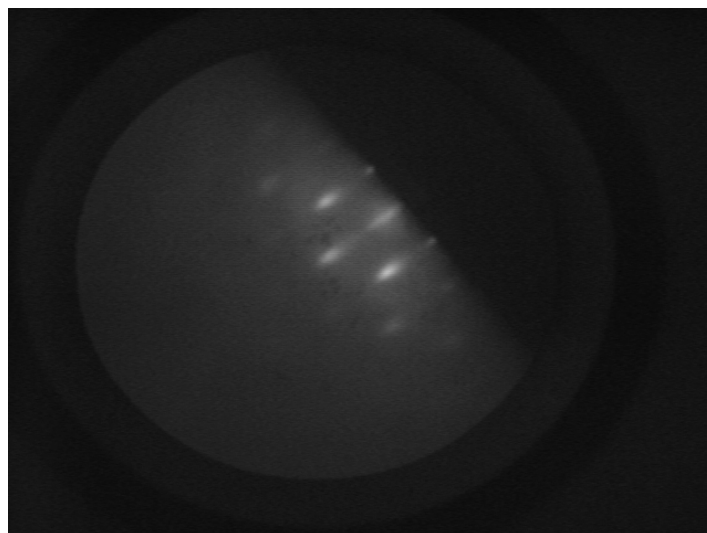
รูปที่ 30 RHEED pattern แบบ (2×1) ของผิวผลึก $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$ หลังการปลูกจำนวน 5 ML ที่อุณหภูมิผิวผลึกฐาน 350°C



รูปที่ 31 ผลการวัด RHEED oscillation ของการปลูกผลึก $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$ ที่อุณหภูมิผลึกฐาน 350°C

จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิของ In-cell ที่จะทำให้เกิดชั้นผลึก $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$ ด้วยอัตรา 1.0 ML/s เท่ากับ 780°C ซึ่งที่อุณหภูมินี้จะได้ In flux เท่ากับ $4 \times 10^{-7} \text{ torr}$ ดังนั้นชั้นผลึกที่ปลูกได้นี้จะเป็น $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{P}$ ซึ่งมีค่าคงที่โครงสร้างผลึกเท่ากับ GaAs ดังจะเห็นได้จาก RHEED pattern ที่ตรวจสอบได้หลังการปลูกผลึก จะเห็นว่ามัลักษณะเป็นเส้นตรงชัดเจนมาก

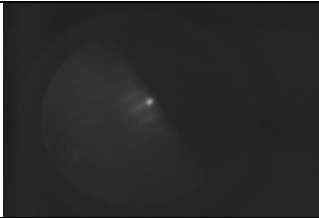
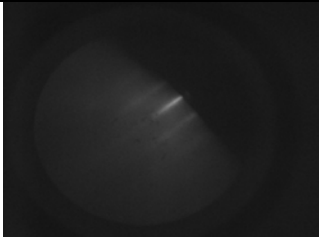
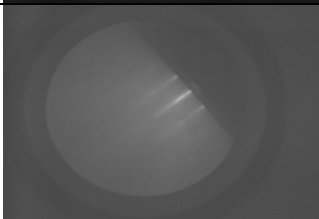
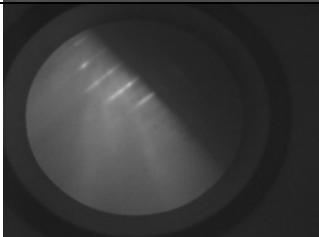
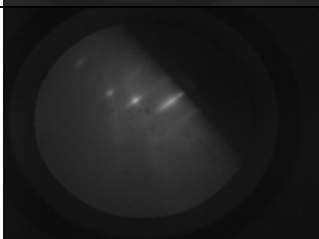
อย่างไรก็ตามพบว่าหากปลูกชั้นผลึก $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{P}$ ที่อุณหภูมิต่ำเกินไปจะมีโอกาสในการเกิด cluster ของอะตอมโลหะซึ่งจะส่งผลให้ผิวผลึกมีลักษณะขรุขระ เพราะการเกิดชั้นผลึกจะเริ่มเป็นแบบ 3D-construction ดังแสดงในรูปที่ 32



รูปที่ 32 RHEED pattern ของผิวผลึก $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{P}$ หลังการปลูก 50 ML ที่อุณหภูมิผลึกฐาน 350°C

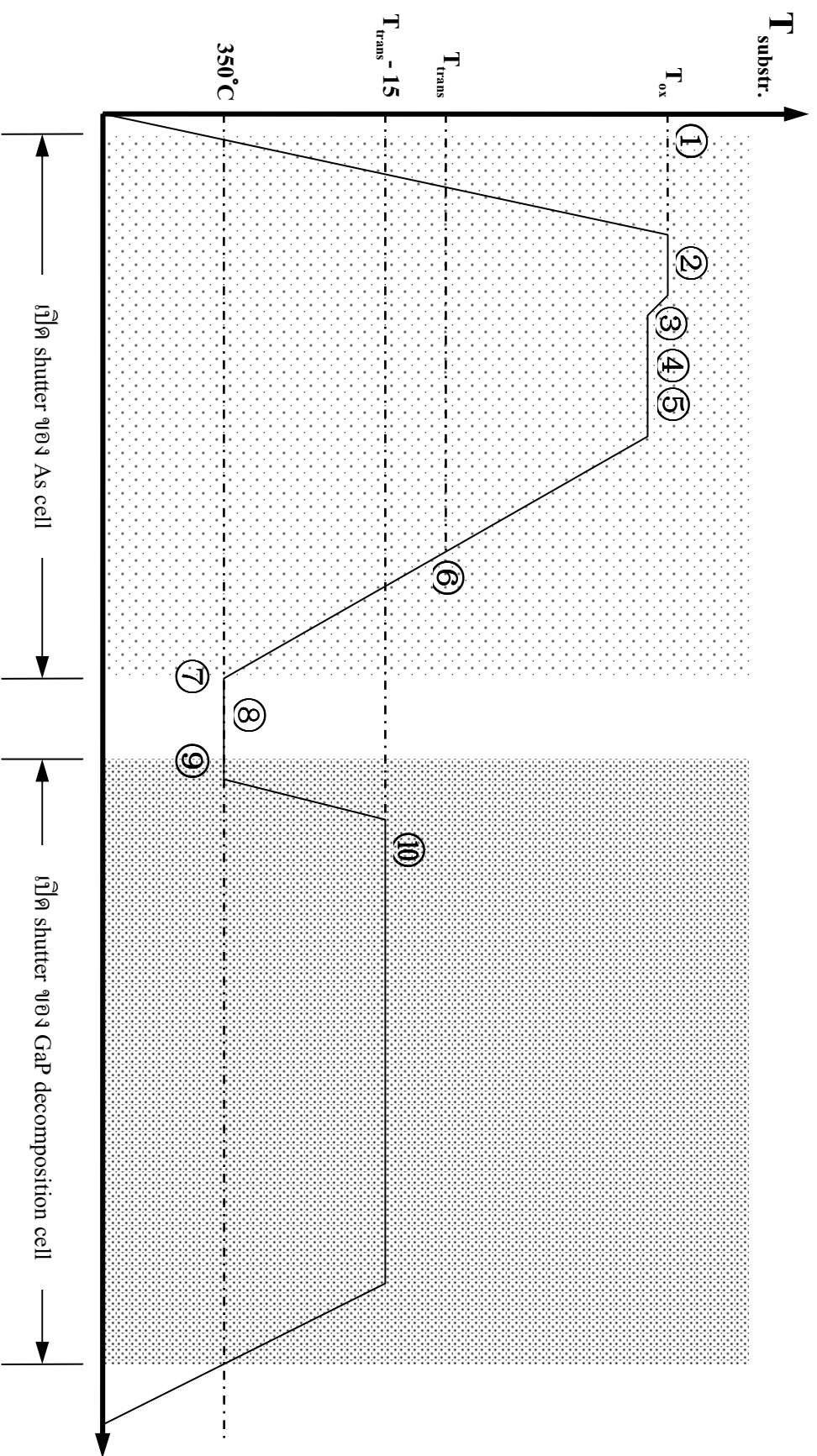
ดังนั้นจึงต้องทดลองเพิ่มอุณหภูมิของผลึกฐานในขั้นตอนการปลูกชั้นผลึก $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{P}$ เพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว ซึ่งจากการศึกษา และการทดลองพบว่าควรใช้ อุณหภูมิผลึกฐานต่ำกว่า Phase transition temperature เล็กน้อย ซึ่งในการทดลองนี้ได้ เลือกใช้ที่อุณหภูมิ 460°C ($T_{\text{trans}} - 15^\circ\text{C}$) พบว่าสามารถปลูกชั้นผลึก $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{P}$ จนกระทั่งมีความหนาได้ถึง 2000 ML โดยยังสามารถตรวจสอบพบ RHEED pattern ที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงเด่นชัด แสดงถึงลักษณะของผิวผลึกที่มีการก่อตัวแบบ 2D-construction ตามต้องการ

ตารางที่ 6 RHEED pattern จากชิ้นงานที่ทำการปลูกชั้นผลึก $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{P}$ ที่อุณหภูมิ ผลึกฐาน 460°C โดยมีความหนาของการปลูกต่าง ๆ กัน

ความหนา	RHEED pattern		
50 ML			
550 ML			
1000 ML			
1500 ML			
2000 ML			

4.5 สรุปลำดับขั้นตอนการปลูกชั้นผลึกอพิแทกซ์ InGaAs บนผลึกฐาน GaAs (100)

- ① กำหนดให้ Beam equivalent pressure (BEP) ของ As มีค่าประมาณ 6×10^{-6} torr
- ② ทำการเตรียมพื้นผิวของผลึกฐาน GaAs ตามกระบวนการ deoxidation ให้ได้ RHEED pattern แบบ (2×4) – surface reconstruction โดยอุณหภูมิของผลึกฐาน ($T_{\text{substr.}}$) ในขั้นตอนนี้จะเรียกว่า T_{ox} ($T_{\text{substr.}} = T_{\text{ox}}$)
- ③ เพิ่มอุณหภูมิของ Ga cell ให้ได้ BEP ของ Ga flux ตามที่ได้ทำการทดลองเงื่อนไขการปลูกผลึก GaAs ด้วยอัตราการปลูก 0.52 ML/s
- ④ เพิ่มอุณหภูมิของ In cell ให้ได้ BEP ของ In flux มากกว่า Ga ประมาณ 2.67 เท่า
- ⑤ ทำการปลูกชั้น buffer ของ GaAs ให้มีความหนาประมาณ 50-100 nm เพื่อเตรียมพื้นผิว GaAs (100) ที่เหมาะสมต่อการปลูกชั้นผลึกในลำดับต่อไป
- ⑥ ลดอุณหภูมิของผลึกฐานลง และในขณะเดียวกันต้องคอยตรวจสอบ RHEED pattern ว่ามีการเปลี่ยนแปลงจาก (2×4) surface reconstruction ไปเป็น $c(4 \times 4)$ reconstruction ที่อุณหภูมิผลึกฐานเท่าใด ซึ่งตามปกติจะมีค่าต่ำกว่า T_{ox} ประมาณ 100°C จุดนี้จะเรียกว่า Phase transition temperature (T_{trans})
- ⑦ ลดอุณหภูมิของผลึกฐานลงไปถึง 350°C เพื่อสามารถเปลี่ยน background beam จาก As เป็น P ได้โดยไม่ทำให้พื้นผิว GaAs เกิดการ desorption ของโมเลกุล As
- ⑧ เพิ่มอุณหภูมิของ GaP decomposition cell ไปที่อุณหภูมิที่จะทำให้ได้ BEP ของ P_2 flux เท่ากับ 6×10^{-6} torr
- ⑨ เปิด shutter ของ GaP decomposition cell และภายใน 30 วินาทีจะต้องทำการเปิด shutter ของ In และ Ga cell พร้อมกันเป็นเวลา 5 วินาที เพื่อปลูกผลึกชั้นบาง ๆ ของ InGaP ที่อุณหภูมิต่ำ หลังจากกระบวนการนี้ควรจะได้ RHEED pattern ที่มีลักษณะแบบ (2×1) reconstruction
- ⑩ เพิ่มอุณหภูมิผลึกฐานขึ้นไปถึง $T_{\text{trans}} - 15^\circ\text{C}$ ซึ่งเป็นจุดที่เหมาะสมในการปลูกชั้นผลึก InGaP และปลูกชั้นผลึก InGaP ที่ละ 20-30 ML เพื่อตรวจสอบ RHEED oscillation ให้ได้อัตราการก่อตัวของชั้นผลึกเท่ากับ 1 ML/s โดยการปรับอุณหภูมิ In cell ให้ได้ In flux ที่เหมาะสม ซึ่งผลที่ได้คือการเกิดชั้นผลึก $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{P}$

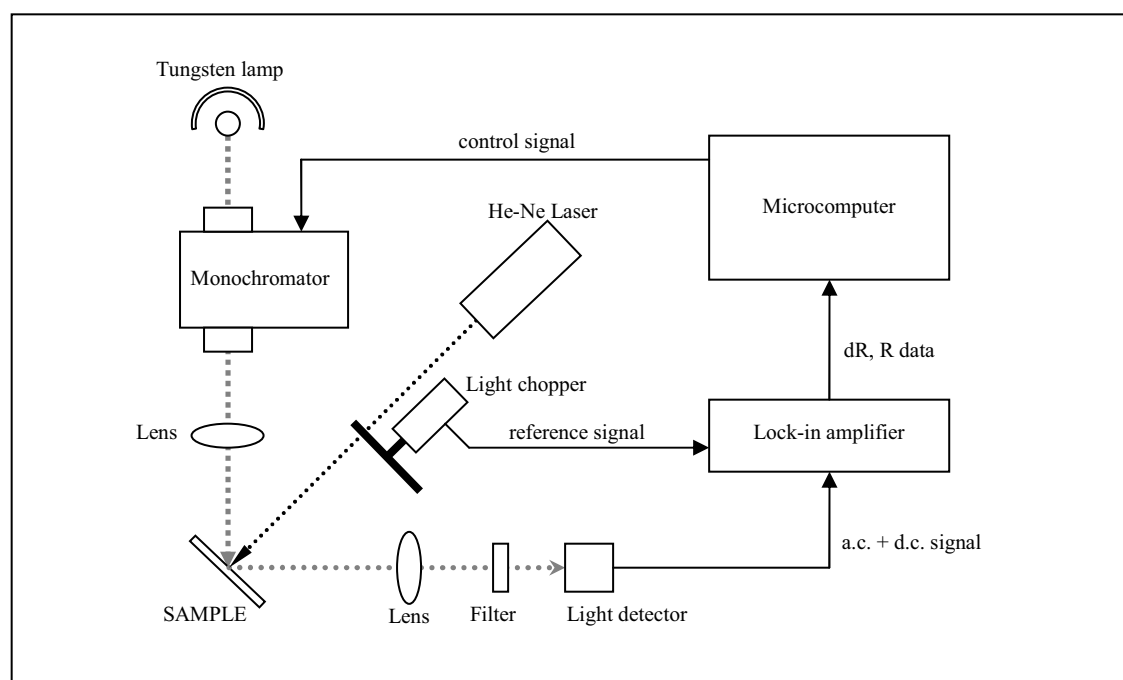


รูปที่ 33 แผนภูมิเชิงอุณหภูมิของผลึกฐาน GaAs ในการทดลองการปลูกชั้นผลึก $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{P}$

5. การตรวจสอบคุณสมบัติของชั้นผลึกด้วยวิธีโฟโตรีเฟลกแตนซ์ (Photoreflectance Spectroscopy)

เทคนิคโฟโตรีเฟลกแตนซ์ จะใช้หลักการมอดูเลตสนามไฟฟ้าในสารตัวอย่างโดยอาศัยการกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮล ด้วยแสงเลเซอร์ผ่านตัวตัดแสง (chopper) เมื่อมีการกระตุ้นจะทำให้เกิดกระบวนการเกิด (generation) และเมื่อหยุดกระตุ้นจะเกิดกระบวนการรวมตัว (recombination) ที่บริเวณแถบพลังงานต้องห้ามของสารกึ่งตัวนำนั้น สัญญาณที่วัดได้จะมี 2 ส่วน คือสัญญาณชนิด a.c. ที่มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงการสะท้อนแสง (differential reflectivity: dR) และสัญญาณชนิด d.c. ที่มีความสัมพันธ์กับการสะท้อนแสง (reflectivity: R)

การมอดูเลตคือการรบกวนเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงแสงของสารกึ่งตัวนำ ในกรณีนี้คือค่าการสะท้อนแสง เมื่อนำข้อมูล dR/R ที่ค่าความยาวคลื่นแสงต่าง ๆ มาทำการวิเคราะห์ ก็จะสามารถหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามของสารกึ่งตัวนำได้ อีกทั้งยังสามารถให้ข้อมูลลักษณะของรอยต่อในการปลูกผลึกแบบรอยต่อต่างชนิด (heterostructure) ได้อีกด้วยเพราะเทคนิคการมอดูเลต จะช่วยให้สามารถตรวจวัดความแตกต่างของสัญญาณในปริมาณน้อย ๆ ได้ดีขึ้น



รูปที่ 34 ระบบตรวจวัดโฟโตรีเฟลกแตนซ์

ระบบตรวจวัดตามรูปที่ 34 ประกอบด้วยหลอดทั้งสแตน ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงขาว ซึ่งจะถูกแยกสเปกตรัมออกเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ ด้วยโมโนโครเมเตอร์ที่ถูกควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ แสงนี้จะถูกโฟกัสลงบนชิ้นงานที่จะทำการวิเคราะห์ พร้อมกับการกระตุ้น

ด้วยแสงเลเซอร์ชนิด He-Ne ที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ผ่านอุปกรณ์ตัดแสง (light chopper) ที่ความถี่ Ω_m เพื่อให้เกิดการกระตุ้นแบบร่ายคาบ ซึ่งการมอดูเลตนี้จะทำให้แสงที่สะท้อนออกมาเกิดการผสมกันระหว่างค่าการสะท้อนแสง (R) และการเปลี่ยนแปลงค่าการสะท้อน (dR) เข้าสู่หัวตรวจวัดแสง

สัญญาณที่วัดได้จะถูกนำมาขยายด้วย Lock-in amplifier ซึ่งจะขยายสัญญาณตามช่วงเวลาต่าง ๆ โดยสามารถอ้างอิงกับสัญญาณจาก light chopper เพื่อจะได้แยกสัญญาณ dR และ R ออกจากกันและส่งให้ระบบคอมพิวเตอร์ทำการคำนวณค่า dR/R และนำเสนอในรูปของความสัมพันธ์ระหว่าง dR/R และค่าความยาวคลื่น

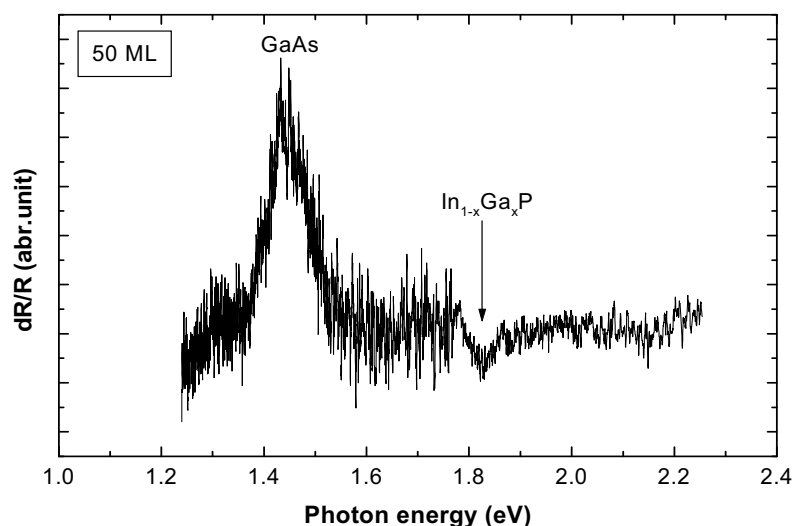
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง คือการเปลี่ยนแปลงสภาพสะท้อนเฟรสเนล (Fresnel reflectivity: R) ตามการเปลี่ยนแปลงของค่าไดอิเล็กตริก (ϵ) ของสาร ซึ่งเราสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้ได้โดยใช้วิธีมอดูเลตทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า หรือแสงนั่นเอง เมื่อมีการส่งแสง I_0 แต่ละความยาวคลื่น λ มายังสารตัวอย่าง จะเกิดการสะท้อนด้วยปริมาณ R ซึ่งจะเปลี่ยนไปตาม λ นั่นคือสัญญาณที่ตรวจวัดได้จากส่วนนี้คือสัญญาณในรูปแบบ d.c. มีค่า $I_0(\lambda) R(\lambda)$ ส่วนค่าการสะท้อนจากการมอดูเลตที่ความถี่ Ω_m คือ $I_0(\lambda)dR(\lambda)$ และค่า dR/R จะสามารถสรุปเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$dR/R = \alpha \Delta \epsilon + \beta \Delta \epsilon$$

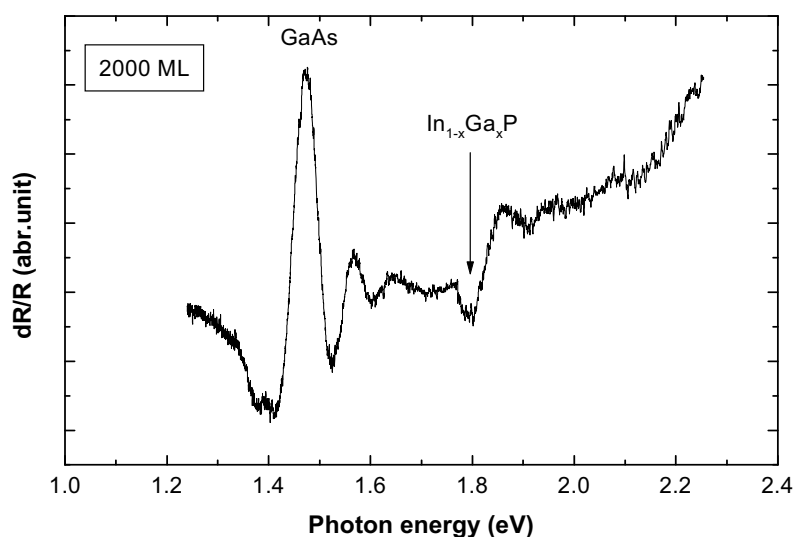
ซึ่ง α, β คือค่าสัมประสิทธิ์ของ Seraphin และ $\Delta \epsilon$ จะมีความสัมพันธ์กับความถี่ Ω_m และแถบพลังงาน E ดังต่อไปนี้

$$\Delta \epsilon = (\hbar \Omega_m)^3 / 3E^2 \cdot \partial^3 [E^3 \epsilon(E, 0, \Gamma)] / \partial E^3$$

รายละเอียดของสมการความสัมพันธ์ดังกล่าว อธิบายไว้อย่างละเอียดโดย D.E. Aepnes [14] ซึ่งสามารถสรุปเป็นใจความสำคัญได้ว่า จากการวิเคราะห์สเปกตรัมระหว่างค่า dR/R และความยาวคลื่นแสงจะสามารถอธิบายโครงสร้างแถบพลังงาน (band-energy structure) ของสารกึ่งตัวนำและสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างที่แตกต่างกัน (hetero-structure) ได้ ในปัจจุบันมีรายงานวิจัยมากกว่า 200 เรื่องที่ใช้เทคนิคนี้ในการตรวจวิเคราะห์ และในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคนี้ในการตรวจวิเคราะห์ชั้นผลึกอินเดียมแกลเลียมฟอสไฟด์ที่ปลูกได้ว่ามีลักษณะสมบัติเป็น $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{P}$ หรือไม่ นอกจากนี้ยังสามารถตรวจวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของแถบพลังงานต้องห้ามระหว่าง $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{P}$ และ GaAs ซึ่งเป็นผลึกฐานได้อีกด้วย



รูปที่ 35 ผลการวัดโฟโตรีเฟลกแตนซ์ของชั้นงานที่ปลูกชั้นผลึก $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$ หนา 50 ML



รูปที่ 36 ผลการวัดโฟโตรีเฟลกแตนซ์ของชั้นงานที่ปลูกชั้นผลึก $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$ หนา 2000 ML

จากข้อมูลการวัดโฟโตรีเฟลกแตนซ์พบว่าชั้นผลึก $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$ ที่มีความหนา 50 ML และ 2000 ML ที่ปลูกได้นี้มีค่า E_g เท่ากับ 1.82 และ 1.79 eV ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกลับเป็นค่า x ตามสมการในตารางที่ 2 จะได้เท่ากับ 0.57 และ 0.54 ตามลำดับ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นประมาณ 9.6 และ 3.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

เมื่อทำการคำนวณเป็นค่าคงที่โครงผลึกตามสมการในตารางที่ 1 พบว่าค่าคงที่โครงผลึกของชั้นผลึก $\text{In}_{0.43}\text{Ga}_{0.57}\text{P}$ และ $\text{In}_{0.46}\text{Ga}_{0.54}\text{P}$ เท่ากับ 5.6307 Å และ 5.6432 Å ตามลำดับ มีค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าคงที่โครงผลึก $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{P}$ ซึ่งเท่ากับ 5.6532 Å อยู่เท่ากับ 0.39 และ 0.17 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าคลาดเคลื่อนที่น้อยมาก การปลูกชั้นผลึกสามารถดำเนินต่อไปได้ โดยยังมีความสมบูรณ์ของผิวผลึกซึ่งตรวจสอบได้จาก RHEED pattern

6. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้สามารถดำเนินการทดลองปลูกชั้นผลึกอินเดียมแกลเลียมฟอสไฟด์ ($\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$) บนผลึกฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) ได้โดยการปรับค่าอัตราส่วนโมเลกุลระหว่าง อินเดียม กับ แกลเลียม ให้ค่า x มีความใกล้เคียงกับ 0.52 ซึ่งทำให้ได้ชั้นผลึกที่มีค่าคงที่โครงผลึกใกล้เคียงกับผลึกฐาน ส่งผลให้ชั้นผลึกที่ปลูกได้มีคุณลักษณะที่ดีจากการตรวจสอบด้วย RHEED pattern ซึ่งสามารถระบุได้ว่าชั้นผลึกที่ปลูกมีความเรียบสมบูรณ์เพียงพอที่จะนำไปประยุกต์เป็นโครงสร้างของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในกลุ่มที่ต้องใช้ฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบต่อไป ทำให้เพิ่มศักยภาพในการพัฒนาอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำแบบสารประกอบมากขึ้นจากการที่แต่เดิมได้ทำการพัฒนาเฉพาะในกลุ่มที่ใช้อาร์เซนิกเป็นองค์ประกอบเท่านั้น

นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ผลการวิจัยนี้ต่อไปเกี่ยวกับการพัฒนาอุปกรณ์ที่สร้างด้วยสารประกอบกึ่งตัวนำบนผลึกฐานซิลิกอน เนื่องจากมีสารประกอบแกลเลียมฟอสไฟด์เพียงชนิดเดียวที่มีค่าคงที่โครงผลึกใกล้เคียงกับซิลิกอนมากที่สุด (แกลเลียมฟอสไฟด์มีค่าคงที่โครงผลึก 5.4512 Å ต่างจากซิลิกอนซึ่งมีค่าคงที่โครงผลึก 5.4250 Å เท่ากับ 0.48 เปอร์เซ็นต์) ประกอบกับความสามารถของเครื่องปลูกผลึกอพิแทกซ์ด้วยลำโมเลกุลที่สามารถแปรเปลี่ยนอัตราส่วนองค์ประกอบของโมเลกุลในชั้นอพิแทกซ์ได้ จะทำให้การพัฒนาอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำด้วยสารประกอบในตระกูลต่าง ๆ สามารถเป็นไปได้ต่อไปในทางปฏิบัติ

บรรณานุกรม

- [1] Arthur, J.R., J. Phys. & Chem. Solids, 28 (1967) p.2257.
- [2] “An Introduction to MBE Growth”,
http://www.ece.utexas.edu/projects/ece/mrc/groups/street_mbe/mbechapter.html
- [3] G. E. Stillman, L. W. Cook, N. Tabatabaie, G. E. Bullman and V. M. Robbins, IEEE Trans. Dev., ED-30 (1983) 364.
- [4] D. Botez, “High Power, Al-free Diode Lasers”, Compound Semiconductor, Vol.5 (6), 1999, p.24.
- [5] K. A. Bertness, et.al., “High-Efficiency GaInP/GaAs Tandem solar Cells for Space and Terrestrial Applications”, First WCPEC, Dec. 5-9, 1994, Hawaii, p.1671.
- [6] D. J. Friedman, et.al., “GaInP/GaAs Monolithic Tandem Concentrator Cells”, First WCPEC, Dec. 5-9, 1994, Hawaii, p.1829.
- [7] Sarah R. Kurtz, et.al., “19.6% Electron-Irradiated GaInP/GaAs Cells”, First WCPEC, Dec. 5-9, 1994, Hawaii, p.2108.
- [8] J. Lammasniemi, et.al., “Molecular Beam Epitaxy Grown GaInP Top Cells and GaAs Tunnel Diodes for Tandem Applications”, 25th PVSC, May 13-17, 1996, Washington D.C., p.97
- [9] W. Li, et.al., “GaInP/AlInP Tunnel Junction for GaInP/GaAs tandem Solar Cells”, Elec. Lett., Feb.19, 1998, Vol.34, No.4, p.406.
- [10] M. K. Zundel, et.al., “Structural and Optical Properties of Vertically Aligned InP Quantum Dots”, Appl. Phys. Lett., 71(20), 1997, p.2972.
- [11] K. Eberl, “Quantum-Dot Lasers”, Physics World, September, 1997, p.47.
- [12] R.F.C. Farrow, J. Phys. D, 7 (1974) p.2436.
- [13] M. Zorn, “Optical in-situ Studies and On-Line Growth Control of Binary and Ternary III-V Semiconductors with Respect to The (001) Surface”, June 24, 1999, TU-Berlin PhD. Dissertation.
- [14] D. E. Aepnes, “Modulation Spectroscopy”, Surface Science, Vol.37, 1973, p.418.