

# การศึกษาปลูกผลึกเอพิแทกซ์ของแกเลียมอาร์เซไนด์

## STUDY ON EPITAXY GROWTH OF GaAs

บรรยง โตประเสริฐพงศ์

Banyong Toprasertpong

เกรียงศักดิ์ เฉลิมศิริกุล

Kriengsak Chalermtiragool

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,

Chulalongkorn University

### บทคัดย่อ

ได้ทำการพัฒนาอุปกรณ์และกระบวนการสำหรับปลูกชั้นเอพิแทกซ์เฟสของเหลว (Liquid phase epitaxy, LPE) ในแนวตั้งของแกเลียมอาร์เซไนด์ (Gallium arsenide, GaAs) ชั้นสเตรด (substrate) ที่ใช้เป็นเว่นผลึกแกเลียมอาร์เซไนด์ ที่มีทิศทางผลึก (100) ทำการทดลองปลูกผลึกหลายวิธีต่าง ๆ กัน โดยที่อุณหภูมิสมดุลของสารละลายแกเลียมมีค่า  $792^{\circ}\text{C}$ . ผลการทดลองพบว่าวิธี Super-cooling และ Step-cooling ให้ชั้นเอพิแทกซ์ที่เรียบที่สุดเมื่อ  $\Delta T$  น้อยกว่า  $5^{\circ}\text{C}$ . ส่วนวิธี Two-phase solution ให้ชั้นเอพิแทกซ์ที่ขรุขระที่สุด อย่างไรก็ตามก่อนการ “จุ่ม” มักจะมีฝุ่นและออกไซด์บนผิวหน้าของชั้นสเตรดทำให้ชั้นเอพิแทกซ์ที่ได้มีหลุมกระจายอยู่ทั่วไป หลุมเหล่านี้จะหายไปถ้าชั้นที่ปลูกหนากว่า 10 ไมครอน การมีการพาโดยตัวละลาย (solutal convection) ทำให้การเกิดชั้นเอพิแทกซ์ไวกว่าที่ทำนายผลโดยทฤษฎีการแพร่ และชั้นเอพิแทกซ์จะมีความหนาที่ค่อนข้างมากกว่าที่ค่อนข้างของตัวอย่าง เมื่อไม่ได้ใส่สารเจือปนลงในสารละลายแกเลียม พบว่าชั้นเอพิแทกซ์ที่ปลูกได้เป็นชนิดเอ็น (n) ซึ่งมีความเข้มข้นของอิเล็กตรอนเท่ากับ  $4.89 \times 10^{16}/\text{cm}^3$  และมีความคล่องตัวของอิเล็กตรอนเท่ากับ  $6390 \text{ cm}^2/\text{volt-วินาที}$  ที่อุณหภูมิห้อง

### ABSTRACT

*An apparatus and procedures have been developed for vertical liquid phase epitaxy (LPE) growth of GaAs layers. The substrates used were GaAs with (100) orientation. Different methods of growth were used in this experiment. The equilibrium temperature of the gallium solution was at  $792^{\circ}\text{C}$ . The smoothest layers were obtained by the Supercooling*

and Step-cooling methods when  $\Delta T$  less than  $5^{\circ}\text{C}$ , the roughest by the Two-phase solution method. However, dusts and oxides presented on the substrate surfaces prior to the 'dip' resulting in depressions in the epitaxial layers. These depressions were eliminated when the layers were grown thicker than 10 microns. Solutal convection caused the layers to grow faster than those predicted by the diffusion theory and the layers thicker at the top than at the bottom of the samples. Without doping of the gallium solution, the layers grown were n-type. At room temperature the electron concentration and mobility were measured to be  $4.89 \times 10^{16}/\text{cm}^3$  and  $6390 \text{ cm}^2/\text{V-s}$ , respectively.

## คำนำ

เอพิแทกซี (Epitaxy) มีรากศัพท์มาจากภาษากรีกว่า "Epi" + "taxis" ซึ่งแปลว่า "การเรียงตัวขึ้นบน" หมายความว่า การปลูกชั้นผลึกเดี่ยวบาง ๆ บนชั้นสเตรตผลึกเดี่ยว โดยที่อะตอมในชั้นที่ปลูกขึ้นเลียนแบบการจัดตัวของอะตอมชั้นสเตรต แม้ว่า การปลูกผลึกเดี่ยวโดยวิธีเอพิแทกซีจะให้อัตราการเติบโตของผลึกช้ากว่าการปลูกผลึกเดี่ยวโดยวิธี Bulk growth แต่ก็มีข้อดีในแง่การทำสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำคือ การปลูกผลึกด้วยวิธีเอพิแทกซีมักจะกระทำที่อุณหภูมิต่ำ ความสมบูรณ์และความบริสุทธิ์ของชั้นที่ปลูกจึงเหนือกว่าวิธี Bulk growth ซึ่งทำที่อุณหภูมิสูง วิธีเอพิแทกซีใช้ปลูกชั้นโลหะผสม (alloy) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนขององค์ประกอบเมื่อหลอมเหลวหรือกลายเป็นไอ ซึ่งถ้าปลูกก่อนผลึกโดยวิธี Bulk growth จะได้ก้อนผลึกที่มีสัดส่วนขององค์ประกอบแปรเปลี่ยนในทิศทางที่เกิดผลึก จะเห็นว่าเอพิแทกซีนี้ใช้ปลูกชั้นผลึกของสารกึ่งตัวนำทั้งแบบมูลฐานและแบบสารประกอบ เช่น ซิลิคอน (Silicon, Si) และแกเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) ซึ่งสามารถควบคุมความสมบูรณ์ของผลึก ความบริสุทธิ์ของผลึก และระดับการใส่สารเจือปน (doping) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นเทคนิคในการปลูกโลหะผสมกึ่งตัวนำที่มีหลายธาตุ เช่น  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  และ  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  เป็นต้น

การปลูกผลึกเอพิแทกซีแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ ขึ้นอยู่กับตัวกลางซึ่งอะตอมหรือโมเลกุลเคลื่อนที่ผ่านไปหาชั้นสเตรต อันได้แก่

1. เอพิแทกซีเฟสของเหลว (Liquid phase epitaxy, LPE) วิธีนี้ตัวถูกละลายที่หลอมเหลวซึ่งสัมผัสกับชั้นสเตรตถูกทำให้อยู่ในสภาวะอิ่มตัวยิ่งยวด (supersaturation) โดยทำให้เย็นยิ่งยวด (supercooling) วิธีนี้มีข้อดีคือชั้นที่สร้างมีคุณภาพทางไฟฟ้าและทางแสงที่ดี แต่มีข้อเสียคือสร้างชั้นที่หนา ๆ ไม่ได้ ลักษณะพื้นผิวไม่เรียบและการควบคุมที่ระหว่างผิว (interface) ลำบาก

2. เอพิแทกซีเฟสไอ (Vapor phase epitaxy) เกิดจากปฏิกิริยาเคมีความร้อนขององค์ประกอบของสารที่ต้องการปลูกที่บริเวณใกล้กับผิวหน้าชั้นสเตรตข้อดีของวิธีนี้คือทำเป็นปริมาณมาก ๆ เชิงอุตสาหกรรมได้ แต่มีข้อเสียคือใช้ปลูกผลึกที่สลับซับซ้อนเช่น  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  ได้ยาก

3. เอพิแทกซีลำโมเลกุล (Molecular beam epitaxy) เป็นวิธีที่คล้ายคลึงกับเอพิแทกซีเฟสไอ ข้อแตกต่างก็คือวิธีนี้ใช้ “ลำโมเลกุล” ข้อดีที่เห็นได้ชัดคือใช้ปลูกชั้นเอพิแทกซีของสารประกอบ III-V จำนวนมากรวมทั้งโลหะผสมของสารประกอบโดยมีความหนาแน่นยา ( $\sim 5 \text{ \AA}$ ) ข้อเสียก็คือค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากใช้ระบบ UHV และวิธีวัดปริมาณสารเจือปน (dopant) ในระหว่างการปลูกไม่สมบูรณ์พอ

งานวิจัยนี้ได้เลือกวิธีปลูกผลึกแบบเอพิแทกซีเฟสของเหลว และวัสดุที่ใช้ได้แก่ แกลเลียม-อาร์เซไนด์\* ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีศักยภาพสูงในอนาคตเมื่อเปรียบเทียบกับซิลิคอน คือมีความคล่องตัว (mobility) ของอิเล็กตรอนสูงเหมาะสำหรับทำสิ่งประดิษฐ์ไมโครเวฟ สามารถเปล่งแสงได้เมื่อถูกกระตุ้นเหมาะสำหรับทำสิ่งประดิษฐ์เปล่งแสง เช่น ไดโอดเปล่งแสง (light emitting diode) เลเซอร์ไดโอด (laser diode) เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าซิลิคอน และทนทานต่อรังสี เหมาะสำหรับทำสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้กับยานอวกาศและดาวเทียม

การปลูกผลึกเอพิแทกซีเฟสของเหลวโดยทั่วไปสามารถแบ่งได้ 2 วิธีคือ แบบทรานเซียนต์ (Transient) และแบบสภาวะอยู่ตัว (Steady state)

1. การปลูกผลึกแบบทรานเซียนต์ การปลูกผลึกแบบนี้สารที่ต้องการปลูกเป็นผลึกจะละลายในตัวทำละลาย เช่น โพลีแกลเลียมอาร์เซไนด์ (polygallium arsenide) ละลายในแกลเลียม และสารละลายแกลเลียมจะถูกควบคุมให้มีอุณหภูมิต่ำลงในขั้นตอนการเกิดผลึก เช่น ถ้าสารละลายซึ่งมีส่วนประกอบ  $X_A$  ที่อุณหภูมิ  $T_A$  ถูกนำมาสัมผัสกับชั้นสเตรตของแกลเลียมอาร์เซไนด์ซึ่งก็อยู่ที่อุณหภูมิ  $T_A$  เช่นกัน ระบบจะยังคงอยู่ในสมดุลไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากจุด A อยู่บนเส้น liquidus ของเฟสไดอะแกรม (phase diagram) รูปที่ 1 ซึ่งสารละลายอิมิตัวด้วยอาร์เซนิคพอดี แต่ถ้าระบบมีอุณหภูมิต่ำลงไปอยู่ที่จุด B สารละลายจะอิมิตัวยิ่งยวด เนื่องจากความสามารถในการละลาย (solubility) ของอาร์เซนิคลดลงตามอุณหภูมิ อาร์เซนิคส่วนเกินจะตกผลึก (precipitate) ออกมาเกาะชั้นสเตรตในรูปของโมเลกุลแกลเลียม-อาร์เซไนด์ เพื่อให้สารละลายมีส่วนประกอบลดลงเหลือ  $X_C$  ความหนาของชั้นฟิล์มบางที่เกิดขึ้นนั้น ขึ้นอยู่กับปริมาตรของสารละลาย นอกจากนี้ยังขึ้นกับอัตราการเย็นตัวและพื้นที่ของชั้นสเตรต

การปลูกผลึกแบบทรานเซียนต์แบ่งออกเป็น 4 วิธีย่อย ดังนี้ (รูปที่ 4)

ก. Equilibrium cooling วิธีนี้อุณหภูมิต่ำลงด้วยอัตราการที่ เมื่ออุณหภูมิต่ำลงถึงค่า  $T_1$  (สารละลายอิมิตัวพอดี) ชั้นสเตรตกับสารละลายจะถูกนำมาสัมผัสกัน

\* แกลเลียมอาร์เซไนด์เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ Zinc Blende มีพันธะแบบผสมระหว่างพันธะโคเวเลนต์และพันธะเชิงไอออน สามารถกรีด (cleave) ให้ปริแตกเป็นผิวเรียบได้ง่าย มีโครงสร้างแถบพลังงาน (energy diagram) เป็นแบบตรง จึงมีคุณสมบัติเปล่งแสง และจุดต่ำสุด 2 จุดของแถบนำไฟฟ้า (conduction band) มีพลังงานไม่ต่างกันมากนัก ถ้าใส่สนามไฟฟ้าค่าสูงเกิน  $3.2 \text{ kV/cm}$  จะเกิดปรากฏการณ์กันน์ (Gunn effect) ใช้ทำ Gunn oscillator ซึ่งทำให้เกิดไมโครเวฟได้

ข. Step-cooling วิธีนี้ทั้งชั้นสเตรตและสารละลายจะถูกทำให้เย็นตัวลงด้วยอัตราคงที่จนต่ำกว่า  $T_1$  เท่ากับ  $\Delta T_0$  แล้วคงอุณหภูมิไว้ให้คงที่ นำชั้นสเตรตมาสัมผัสกับสารละลาย ค่า  $\Delta T_0$  ไม่ควรมากเกินไปจนทำให้เกิดการตกผลึกเอง (spontaneous precipitation)

ค. Supercooling วิธีนี้ทั้งชั้นสเตรตและสารละลายจะถูกทำให้เย็นตัวลงด้วยอัตราคงที่เหมือนวิธี Step-cooling เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า  $T_1$  นำชั้นสเตรตมาสัมผัสกับสารละลาย แตกต่างจากวิธี Step-cooling คืออุณหภูมิยังคงลดต่อไปเรื่อย ๆ ด้วยอัตราคงที่ แต่ระหว่างการปลูกผลึกต้องไม่เกิดการตกผลึกเองเช่นเดียวกับวิธี Step-cooling

ง. Two-phase solution cooling วิธีนี้ทั้งชั้นสเตรตและสารละลายจะถูกลดอุณหภูมิลงต่ำกว่า  $T_1$  มาก จนสารละลายเกิดการตกผลึกเอง แล้วจึงนำชั้นสเตรตมาสัมผัสกับสารละลาย การตกผลึกเองจะทำให้ปริมาณของตัวถูกละลายลดลงเหลือเท่ากับที่สมดุลโดยประมาณ ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่าเป็นวิธี Equilibrium cooling โดยประมาณแต่อุณหภูมิของการเริ่มต้นปลูกผลึกไม่เท่ากับ  $T_1$

วิธีการทั้ง 4 วิธีนี้ ชั้นสเตรตและสารละลายจะถูกทำให้มีอุณหภูมิเท่ากันก่อนนำมาสัมผัสกัน นอกจากนี้ยังมีวิธีการปลูกผลึกแบบทรานเซียนต์อีกริธีหนึ่งซึ่งชั้นสเตรตถูกคงอุณหภูมิไว้ต่ำกว่าสารละลายก่อนนำมาสัมผัสกัน เมื่อสัมผัสกับชั้นสเตรตที่เย็นกว่าจะทำให้สารละลายรอบ ๆ ชั้นสเตรตมีอุณหภูมิต่ำลงก็เกิดการเย็นตัวยิ่งยวด เกิดชั้นเอพิแทกซ์ขึ้นได้ ถึงแม้ก่อนนำมาสัมผัสกันสารละลายจะอยู่ที่สมดุล แต่ชั้นเอพิแทกซ์จะเกิดขึ้นในระยะเวลาอันสั้นและในที่สุดจะหยุดเมื่อทั้งชั้นสเตรตและสารละลายมีอุณหภูมิเท่ากัน วิธีนี้เรียกว่า Transient-mode liquid epitaxy<sup>8</sup>

2. การปลูกผลึกแบบสภาวะอยู่ตัว ชั้นสเตรตของแกลเลียมอาร์เซไนด์มีอุณหภูมิ  $T_B$  และก้อนผลึกของแกลเลียมอาร์เซไนด์มีอุณหภูมิ  $T_A$  ซึ่งสูงกว่า  $T_B$  (รูปที่ 1) ชั้นสเตรตและก้อนผลึกของแกลเลียมอาร์เซไนด์แยกออกจากกันโดยมีแกลเลียมอยู่ตรงกลางเนื่องจากความสามารถในการละลายลดลงตามอุณหภูมิ แกลเลียมจะละลายก้อนผลึก GaAs และแพร่ไปยังผิวของชั้นสเตรตซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า เมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล การละลายของก้อนผลึก และการเกิดชั้นเอพิแทกซ์ที่ชั้นสเตรตจะมีอัตราเท่ากัน เกรเดียนต์ความเข้มข้นของสารละลาย ทำให้เกิดแรงขับ (driving force) สำหรับส่งตัวถูกละลายจากก้อนผลึกไปยังชั้นสเตรต

อัตราการเกิดชั้นเอพิแทกซ์เฟสของเหลวของแกลเลียมอาร์เซไนด์ สามารถคำนวณจากอัตราที่อาร์เซนิคออกจากสารละลายที่มีแกลเลียมมากไปยังผิวของชั้นสเตรต การถ่ายเทนี้เกิดขึ้นเพราะความสามารถในการละลายของอาร์เซนิคในสารละลายลดลงโดยการลดอุณหภูมิ แต่อัตราการถ่ายเทของอาร์เซนิคไม่สามารถหาโดยตรงจากเส้นโค้ง liquidus ที่สมดุลของเฟสไดอะแกรม Ga-As ทั้งนี้เพราะการปลูกผลึกแบบ LPE ไม่ใช่กระบวนการที่สมดุล แต่อัตราการเกิดจะขึ้นอยู่กับการแพร่ของอาร์เซนิคผ่านสารละลายไปยังผิวต่อการเกิดผลึกภายใต้แรงขับของเกรเดียนต์ความเข้มข้นของอาร์เซนิค เนื่องจากบริเวณใกล้ ๆ ผิวต่ออาร์เซนิคถูกใช้ในการเกิดผลึก จึงมีปริมาณต่ำกว่าบริเวณที่ห่างออกไปจากผิวต่อ ดังนั้น

อัตราการเกิดผลึกจึงหาได้โดยการแก้สมการการแพร่ในหนึ่งมิติภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมกับวิธีการปลูกผลึกที่ใช้ (เช่น แบบ Equilibrium cooling, Step-cooling หรือ Supercooling เป็นต้น) วิธีนี้ใช้ได้กับการปลูกผลึก LPE แบบเตนอน (horizontal LPE growth)<sup>6</sup> ซึ่งก็คือแบบเทคนิคการสไลด์นั่นเอง\* จะใช้ได้ถูกต้องก็ต่อเมื่อการตกผลึกของสารละลายเกิดขึ้นบนผิวของชั้นสเตรตทั้งหมดเท่านั้น ดังนั้นจึงใช้ไม่ได้กับการปลูกผลึกแบบ Two-phase solution cooling

ผลเฉลยของสมการการแพร่ของแต่ละวิธีการปลูกผลึก LPE ซึ่งมีเงื่อนไขขอบเขตต่างกัน จะให้ปริมาณของอาร์เซนิกซึ่งไปถึงชั้นสเตรตในฟังก์ชันของเวลา ความหนา (d) ของชั้นเอพิแทกซ์ทำได้จากปริมาณของอาร์เซนิกข้างต้นจะได้ดังนี้<sup>5,11</sup>

สำหรับ Equilibrium cooling technique

$$d = \frac{4}{3} (R/C_{As}^s m) (D/\pi)^{1/2} t^{3/2}$$

สำหรับ Step-cooling technique

$$d = 2\Delta T (1/C_{As}^s m) (D/\pi)^{1/2} t^{1/2}$$

และสำหรับ Supercooling technique

$$d = (1/C_{As}^s m) (D/\pi)^{1/2} (2\Delta T t^{1/2} + \frac{4}{3} R t^{3/2})$$

โดยที่  $C_{As}^s$  = ความเข้มข้นของอาร์เซนิกในผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์

$m = \frac{dT_1}{dC_{As}^l}$  ก็คือความชันของเส้นโค้ง liquidus ในเฟสไดอะแกรม

$C_{As}^l$  = ความเข้มข้นของอาร์เซนิกในของเหลว

$D$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ของอาร์เซนิก

$R$  = อัตราการเย็นตัวของสารละลาย

$t$  = ช่วงเวลาการปลูกผลึก

$\Delta T = T_2 - T_1$  เป็นผลต่างของอุณหภูมิ ซึ่งต้องไม่มากจนทำให้เกิดการตกผลึกขึ้นเองในสารละลาย

\* เทคนิคการสไลด์ (Sliding technique) เป็นเทคนิคล่าสุดที่พัฒนาเพื่อการปลูกชั้นผลึกหลาย ๆ ชั้นต่อเนื่องกัน เพื่อสร้างเลเซอร์สารกึ่งตัวนำทรานซิสเตอร์ความถี่สูงแบบเฮเทอโรจังก์ชัน (heterojunction) และเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากแกลเลียม-อาร์เซไนด์ เป็นต้น

ในปัจจุบันข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติพื้นฐานทางไฮโดรไดนามิกส์ของสารละลายเกลือยังมีน้อยมาก การควบคุมการเกิดผลึกจึงกระทำในขอบเขตที่จำกัด ผลสำคัญประการหนึ่งก็คือ ความแตกต่างระหว่างอัตราการเกิดผลึกในสารละลายซึ่งนิ่งกับสารละลายที่มีการกวน ซึ่งในกรณีที่มีการกวนสารละลาย อัตราการเกิดผลึกจะสูงกว่า คาดว่าเนื่องมาจากการแพร่ซึ่งมักเป็นตัวกำหนดอัตราการเกิดผลึก เริ่มจากเนื้อสารละลายที่ได้รับอิทธิพลของการกวนจนมีความเข้มข้นสม่ำเสมอ ผ่านชั้นขอบเขต (boundary layer) แคบ ๆ ซึ่งเกรเดียนต์ของความเข้มข้นของตัวละลายมีค่าสูงไปสู่ผิวต่อความกว้างของชั้นขอบเขตนี้จะน้อยกว่าในกรณีที่สารละลายอยู่นิ่งมาก ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับขนาดและลักษณะของการกวน

การกวนในสารละลายอาจเกิดจากการพาที่ถูกบังคับ (force convection) หรืออาจเกิดจากการพาตามธรรมชาติ (natural convection) ซึ่งเกิดจากเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ ทำให้เกิดการขยายตัวและความหนาแน่นที่บริเวณต่าง ๆ มีค่าไม่เท่ากัน การพาแบบนี้เรียกว่าการพาความร้อน (thermal convection) แต่ถ้าเกิดจากเกรเดียนต์ของความเข้มข้น โดยที่ความหนาแน่นของของเหลวขึ้นกับจำนวนตัวละลายเรียกการพาแบบนี้ว่า การพาโดยตัวละลาย (Solutal convection)

ในกรณีของการปลูกผลึกเกลืออาร์เซไนต์จากสารละลายเกลือซึ่งมีอุณหภูมิเท่ากันตลอดทั้งเนื้อ การที่อะตอมอาร์เซนิกแพร่ไปเกาะผิวข้อเสตรครในรูปของโมเลกุลเกลืออาร์เซไนต์ทำให้บริเวณผิวต่อบริเวณนั้นมีปริมาณอาร์เซนิกต่ำกว่าบริเวณที่ห่างออกไป อาร์เซนิกส่วนบนเหนือข้อเสตรครจะจมลงทดแทนเกิดการไหลวนขึ้น เกรเดียนต์ของความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่ส่วนบนของข้อเสตรครจะสูงกว่าส่วนล่าง อัตราการเกิดผลึกจึงสูงกว่า ทำให้ชั้นเอพิแทกซีที่ได้มีความหนาไม่เสมอกัน คือหนากว่าที่ตอนบนและค่อย ๆ บางลงในตอนล่าง ยิ่งถ้าปลูกผลึกนานความลาดเอียงของความหนา ก็จะยิ่งเพิ่มมากขึ้น

## อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นประเภทที่ใช้เทคนิคการจุ่ม (Dipping technique)<sup>15</sup> ซึ่งเทคนิคนี้ ข้อเสตรครถูกยึดไว้เหนือสารละลายเล็กน้อย หลังจากนั้นจุ่มข้อเสตรครลงในสารละลาย เมื่อได้ความหนาที่ต้องการจึงค่อยดึงข้อเสตรครขึ้น วิธีนี้ตัวท่อควอตซ์และขดลวดทำความร้อนอยู่ในแนวตั้ง จึงเรียกว่าการปลูกชั้นเอพิแทกซีในแนวตั้ง

### การติดตั้งเตาเอพิแทกซีเฟสของเหลวแนวตั้ง

เตาเอพิแทกซีเฟสของเหลวแนวตั้งที่ใช้เป็นแบบเดียวกับของ Baliga<sup>2</sup> ซึ่งประกอบด้วยเตาความต้านทาน (resistive furnace) ยาว 35 ซม. ควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่มีความแม่นยำ  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ . ห้องปฏิบัติการทำด้วยควอตซ์มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 55 มม. ส่วนบนของท่อควอตซ์ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) เป็นห้องเล็ก ๆ สำหรับพักข้อเสตรคร ส่วนที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม

แยกออกจากห้องปฏิกิริยาด้วยชุดเตอร์ และหล่อเย็นด้วยน้ำเย็นเพื่อไม่ให้ยางที่เชื่อมส่วนที่เป็นควอดซ์กับเหล็กกล้าไร้สนิมร้อนเกินไปและเพื่อให้ห้องพักชั้นสเตรดเย็นพอที่จะใส่ชั้นสเตรดเข้าไปได้ ก๊าซที่ผ่านเตาเป็นไฮโดรเจนที่ทำให้บริสุทธิ์ โดยผ่านเครื่อง Palladium-diffused hydrogen purifier ความดันของก๊าซไฮโดรเจนในห้องปฏิกิริยาถูกควบคุมให้สูงกว่าบรรยากาศเล็กน้อยโดยใช้เช็ควาล์ว (check valve) ก๊าซไฮโดรเจนตรงทางออกจะถูกทำให้เป็นฟองผ่านน้ำมันก่อนจะปล่อยออกสู่บรรยากาศข้างนอก มีเทอร์โมคัปเปิลติดไว้ 2 ตัว ตัวหนึ่งสำหรับตรวจจับอุณหภูมิกลางเตาเพื่อป้องกันเครื่องควบคุมอุณหภูมิ อีกตัวหนึ่งสำหรับวัดอุณหภูมิที่ก้นเบ้า (crucible) ซึ่งใส่แกลเลียมเหลว

**โพรไฟล์อุณหภูมิของเตา** เพื่อกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมของเบ้าใส่แกลเลียมเหลว ซึ่งจะทำให้การควบคุมการเกิดชั้นเอพิแทกซีเป็นไปตามที่คาดไว้ จากโพรไฟล์อุณหภูมิกับระยะก้นเตานี้ ผู้วิจัยจึงกำหนดให้ก้นเบ้าอยู่สูงจากก้นเตา 10 ซม.

**ภาวะอุณหภูมิของเตาเอพิแทกซี** เปิดเตาเอพิแทกซีแนวตั้งโดยตั้งอุณหภูมิของ indicator ที่เครื่องควบคุมอุณหภูมิไว้  $820^{\circ}\text{C}$ . ใช้เทอร์โมคัปเปิล วัดอุณหภูมิของแกลเลียมเหลวได้  $792^{\circ}\text{C}$ . ลองเพิ่มหรือลดการตั้งอุณหภูมิที่ indicator ไป  $10^{\circ}\text{C}$ . วัดอุณหภูมิในแกลเลียมเหลวจะพบว่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง  $10^{\circ}\text{C}$ . เช่นกัน ดังนั้นเพื่อความสะดวกตลอดการทำงานวิจัยนี้จะใช้อุณหภูมิสมมูลของสารละลายแกลเลียม  $792^{\circ}\text{C}$ .

### การทำให้สารละลายแกลเลียมอิมตัว

ก่อนที่จะจุ่มชั้นสเตรดลงในสารละลายเพื่อเริ่มการปลูกผลึกนั้น ต้องทำให้สารละลายแกลเลียมอิมตัวด้วยอาร์เซนิกก่อนทุกครั้ง ซึ่งแยกออกเป็นการทำให้แกลเลียมอิมตัวเบื้องต้น และการทำให้แกลเลียมอิมตัวก่อนการจุ่มชั้นสเตรด

ก. การทำให้แกลเลียมอิมตัวเบื้องต้น หลังจากบรรจุแกลเลียมบริสุทธิ์ลงในเบ้าควอดซ์ และทำความสะอาดแกลเลียมทั้งระบบด้วยความร้อนแล้ว ต้องทำให้สารละลายแกลเลียมอิมตัวด้วยอาร์เซนิกที่อุณหภูมิสมมูลเสียก่อน ใส่แกลเลียมจำนวน 50 ก. จำนวนปริมาณโพสิเทิลแกลเลียมอาร์เซไนต์ที่ทำให้แกลเลียมอิมตัวพอดีที่อุณหภูมิสมมูล  $792^{\circ}\text{C}$ . ได้เท่ากับ 2.117 ก. ใช้ก้อนโพสิเทิลแกลเลียมอาร์เซไนต์ 2 ก้อน ก้อนหนึ่งหนัก 1.5 ก. ใส่ลงในเบ้าควอดซ์ที่มีแกลเลียมเหลวอยู่ แล้วปล่อยให้ละลายในแกลเลียมที่อุณหภูมิสมมูล  $792^{\circ}\text{C}$ . เป็นเวลาอย่างน้อย 5 ชม. หลังจากนั้นนำโพสิเทิลแกลเลียมอาร์เซไนต์อีกก้อนหนึ่งหนักประมาณ 2.5 ก. ใส่ลงในตะกร้าของก้านควอดซ์ จุ่มลงในสารละลายแกลเลียมเพื่อละลายต่อไปจนกระทั่งอิมตัว ทิ้งไว้อย่างน้อย 10 ชม. หลังจากนั้นดึงก้านควอดซ์ที่มีก้อนโพสิเทิลแกลเลียมอาร์เซไนต์ออก

ข. การทำให้แกลเลียมอิมตัวก่อนการปลูกผลึก LPE ทุกครั้งสารละลายแกลเลียมที่ผ่านการทำให้อิมตัวมาแล้วและอาจใช้ในการปลูกผลึกมาแล้วซึ่งจะสูญเสียอาร์เซนิกไปจำนวนหนึ่ง จะต้องนำมาทำให้อิมตัวก่อนเริ่มการปลูกผลึก LPE ทุกครั้ง โดยการนำก้านควอดซ์ที่มีตะกร้าใส่ก้อนโพสิเทิลแกลเลียม

อาร์เซไนต์จุ่มลงในสารละลายเกลือลิเทียมที่อุณหภูมิสมมูลอย่างน้อย 4 ชม.

งานวิจัยนี้ได้ทดลองปลูกผลึกเอพิแทกซ์ของเกลือลิเทียมอาร์เซไนต์เฟสของเหลวด้วยวิธีต่าง ๆ โดยใช้ชั้นสเตรตของเกลือลิเทียมอาร์เซไนต์ 56 ชั้น ทำครั้งละหนึ่งชั้น และหนึ่งครั้ง ต้องใช้เวลาอย่างน้อย 1 วัน เมื่อทำการปลูกผลึกผ่านไป 2 ครั้ง ต้องทำความสะอาดเกลือลิเทียม โดยการเปิดเตาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิสมมูล ( $792^{\circ}\text{C}$ .) ประมาณ  $10-20^{\circ}\text{C}$ . เป็นเวลาอย่างน้อย 15 ชม. จึงจะทำการทดลองต่อไปได้ ซึ่งการทดลองสรุปได้สั้น ๆ ดังนี้

- ชั้นสเตรตที่ใช้เป็นชนิดอื่น (n) 52 ชั้น ชนิดพี (p) 2 ชั้น และเป็นแบบ semi-insulating ซึ่งเจือ (dope) ด้วย Cr 2 ชั้น

- ปลูกผลึกด้วยวิธี Equilibrium cooling 3 ครั้ง
- ปลูกผลึกด้วยวิธี Step-cooling 34 ครั้ง
- ปลูกผลึกด้วยวิธี Supercooling 12 ครั้ง
- ปลูกผลึกด้วยวิธี Two-phase solution cooling 2 ครั้ง
- ปลูกผลึกด้วยวิธี Transient-mode liquid epitaxy 5 ครั้ง
- ทำการกัดผิวหน้าชั้นสเตรตด้วยสารละลายเกลือลิเทียมก่อนการปลูกผลึก 6 ครั้ง
- ทำการตัดแปลงที่ยึดชั้นสเตรตเพื่อให้ชั้นสเตรตวางในแนวระดับกับสารละลาย 2 ครั้ง

จากนั้นนำผลึกไปวิเคราะห์คุณภาพของผลึก สภาพพื้นผิวและความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ที่ปลูกด้วยวิธีต่าง ๆ รวมทั้งคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นเอพิแทกซ์

## ผลการทดลอง

### การวิเคราะห์คุณภาพของผลึก

นำตัวอย่าง\* ที่ทำการปลูกชั้นเอพิแทกซ์หนา 44 ไมครอนไปวิเคราะห์ด้วยวิธีการกระเจิงกลับของรังสีเอ็กซ์แบบเลออี (Laue X-rays backscattering)<sup>7</sup> โดยให้ผิวหน้าชั้นเอพิแทกซ์รับและวางตั้งฉากกับลำรังสีเอ็กซ์จากแหล่งกำเนิดที่ใช้ไอเล็กตรอน เคลื่อนที่ผ่านความต่างศักย์ 30 กิโลโวลต์ ที่ค่ากระแส 25 มิลลิแอมแปร์ โดยมีฟิล์มวางอยู่ข้างหน้าชั้นเอพิแทกซ์ห่างออกไป 4 ซม. ใช้เวลาทั้งสิ้น 4 ชม. diffraction pattern มีลักษณะเช่นเดียวกับ pattern ที่ได้จากชั้นสเตรตที่ไม่มีชั้นเอพิแทกซ์ พบว่ามีสมมาตร 4 ทบ (4 folds symmetry) ของระนาบ (100) แสดงว่าชั้นเอพิแทกซ์เป็นผลึกเดี่ยว

\* เพื่อความสะดวกจะเรียกชั้นสเตรตที่ใช้แต่ละชั้นว่า "ตัวอย่าง"

## องค์ประกอบของชั้นเอพิแทกซ์

การหาค่าองค์ประกอบของชั้นเอพิแทกซ์ที่ปลูกทำได้โดยอาศัย Electron probe microanalysis<sup>10</sup> หลักการก็คือใช้ลำอิเล็กตรอนของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาด (scanning electron microscope, SEM) ยิ่งไปยังตัวอย่าง จากนั้นใช้หัววัด (detector) ตรวจสอบสเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์ซึ่งเกิดจากอิเล็กตรอนขององค์ประกอบที่ถูกกระตุ้น เนื่องจากอิเล็กตรอนมีพลังงานต่ำ อำนาจในการทะลุทะลวงน้อย ข้อมูลที่ได้จะได้จากผิวของตัวอย่างซึ่งเป็นชั้นเอพิแทกซ์ ตัวอย่างที่นำไปวัดมีชั้นเอพิแทกซ์หนา 21.5 ไมครอน สเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์ที่ปรากฏในรูปที่ 2 แสดงว่าธาตุสำคัญที่เป็นองค์ประกอบของชั้นเอพิแทกซ์ก็คือ แกลเลียมและอาร์เซนิกเท่านั้น ถ้าจะมีธาตุอื่นเจือปนอยู่ก็มีความเข้มข้นต่ำมาก คือต่ำกว่าขีดความสามารถของเครื่องมือจะวิเคราะห์ได้ (น้อยกว่า 1 ใน 100 ส่วน)

## การตรวจสอบสภาพพื้นผิวของชั้นเอพิแทกซ์

นำตัวอย่างที่ปลูกชั้นเอพิแทกซ์ด้วยวิธีการต่าง ๆ และเงื่อนไขต่าง ๆ กันมาตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา (optical microscope) พบว่าผิวของชั้นเอพิแทกซ์มีลักษณะเป็นหลุมกระจายอยู่ทั่วไป สาเหตุอาจเกิดจากฝุ่นละอองหรือออกไซด์ที่เกาะบนผิวชั้นสเตรตก่อนการจุ่ม<sup>4</sup> หรือฝุ่นแกรไฟต์ซึ่งหลุดออกมาจากที่ขีดชั้นสเตรตซึ่งทำด้วยแกรไฟต์ และพบว่ามี meniscus lines ซึ่งเป็นรอยของขอบบนของผิวสารละลายซึ่งเกิดขึ้นตอนดึงชั้นสเตรตออกจากสารละลายแกลเลียม นอกจากนี้ตัวอย่างที่  $\Delta T$  มากกว่า  $5^{\circ}\text{C}$ . ผลึกที่ปลูกมักจะมีสารละลายเกาะติดอยู่ และอาจมีเม็ดผลึกที่ตกผลึกเองในสารละลายมาเกาะบนผิวชั้นสเตรต ทำให้ชั้นเอพิแทกซ์ที่ปลูกมีผิวหยาบ และลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างกันไปตามวิธีการปลูกผลึก จะเห็นได้ชัดเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มของตัวอย่าง

**สภาพพื้นผิวที่ปลูกด้วยวิธี Equilibrium cooling** สภาพพื้นผิวของชั้นเอพิแทกซ์ที่ได้จะมีลักษณะขรุขระ สะท้อนให้เห็นกลไกการก่อตัวของผลึกใหม่บนชั้นสเตรต ว่าเกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งผิว

**สภาพพื้นผิวที่ปลูกด้วยวิธี Step-cooling** ได้สภาพพื้นผิวที่มีลักษณะเรียบดี และเนื่องจากเวลาที่ใช้ในการปลูกนานพอสมควรหลุมที่เกิดจากฝุ่นแกรไฟต์หรือออกไซด์ที่ผิวจะถูกกลบไปมาก ถึงแม้ชั้นสเตรตที่ใช้จะมีผิวหน้าเพียงเบนไปจากระนาบ (100) ถึง  $2^{\circ}$  การที่ได้ผิวหน้าเรียบสันนิษฐานว่าสภาวะเย็นตัวยิ่งยวดทำให้ผลึกเล็ก ๆ ที่เกิดเริ่มแรกบนชั้นสเตรตมีความหนาแน่นสูงนั่นเอง<sup>14</sup>

**สภาพพื้นผิวที่ปลูกด้วยวิธี Supercooling** อัตราการลดอุณหภูมิทำได้ 2 วิธี คือ การดับเตาแล้วปล่อยให้เย็นตัวตามธรรมชาติ และการควบคุมที่เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) วิธีแรกให้อัตราการลดของอุณหภูมิมือคือ  $4^{\circ}\text{C}/\text{นาที่}$  ถ้าจุ่มชั้นสเตรตลงในสารละลายขณะที่อุณหภูมิลดลงจากจุดสารละลายอิ่มตัว  $2^{\circ}\text{C}$ . และดึงขึ้นก่อนที่จะเกิดการตกผลึกเองในสารละลาย ชั้นเอพิแทกซ์ที่ได้ก็ยังคงมีผิวหน้าที่เรียบดี ส่วนวิธีที่ 2 สามารถควบคุมอัตราการเย็นตัวได้ถึง  $0.125^{\circ}\text{C}/\text{นาที่}$  ได้ชั้นเอพิแทกซ์ที่ปลูกได้มีสภาพผิวหน้าที่เรียบพอ ๆ กับวิธี Step-cooling

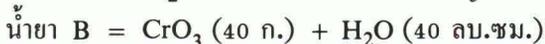
**สภาพพื้นผิวที่ปลูกด้วยวิธี Two-phase solution cooling** ระหว่างทำการทดลองหาภาวะอุณหภูมิของเตาที่เหมาะสม ได้สังเกตเห็นผิวหน้า melt (สารละลายแคลเซียม) ที่ทำให้เย็นลงพบว่า ถ้า  $\Delta T$  มากกว่า 5°C. จะเกิดการตกผลึกเองใน melt จึงได้ทดลองปลูกผลึกด้วยวิธี Two-phase solution cooling 2 ครั้ง ชั้นเอพิแทกซ์ที่ได้มีผิวลักษณะเป็นคลื่นอาจจะเนื่องมาจากสภาวะแปรปรวนรอบกวนบริเวณผิวต่อจากการเกิดเม็ดผลึกเล็ก ๆ ในสารละลายนั้น

**สภาพพื้นผิวที่ปลูกด้วยวิธี Transient-mode liquid epitaxy** การจุ่มซับสเตรดที่เย็นกว่าลงในสารละลายแคลเซียมที่ร้อนกว่า จะทำให้เกิดสภาวะเย็นตัวยิ่งยวดได้ในระดับที่สูงกว่าการปลูกผลึกด้วยวิธี Step-cooling โดยไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการตกผลึกเองมากนัก ผิวของชั้นเอพิแทกซ์ที่ได้ก็เรียบดีกว่า สำหรับการจุ่มซับสเตรดที่เย็นกว่าลงในสารละลายที่ร้อนกว่าได้อ่อนนุ่มขึ้นได้ชั้นเอพิแทกซ์ที่บางมากแต่ยังใช้ประโยชน์ไม่ได้ เพราะมีหลุมเล็ก ๆ กระจายอยู่ทั่วไป

**สภาพพื้นผิวที่ปลูกหลังจากการกัดผิวหน้าด้วยแคลเซียม** การกัดผิวหน้าของซับสเตรดด้วยสารละลายแคลเซียม ทำได้โดยทำให้สารละลายเกิดสภาวะไม่อิ่มตัว โดยการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายขึ้นสูงกว่าอุณหภูมิสมดุลแล้วจุ่มซับสเตรดลงไป ซับสเตรดจะถูกกัดผิวหน้าไปจำนวนหนึ่งขึ้นอยู่กับเวลาในการจุ่ม หลังจากนั้นจึงเริ่มต้นการปลูกชั้นเอพิแทกซ์ขึ้นบนผิวหน้าที่ถูกกัด ซึ่งอาจทำอย่างต่อเนื่องโดยจุ่มซับสเตรดทิ้งไว้ในสารละลายเพื่อกัดผิวหน้าแล้วลดอุณหภูมิลงทันที หรือดึงซับสเตรดขึ้นเหนือสารละลายก่อน หลังจากลดอุณหภูมิลงจนเกิดสภาวะอิ่มตัวยิ่งยวดแล้ว จึงค่อยจุ่มซับสเตรดลงไปอีกครั้งหนึ่ง การกัดผิวหน้าซับสเตรดก่อนปลูกผลึกนี้มีข้อเสียคือถ้าผิวของซับสเตรดสกปรก จะทำให้สารละลายสกปรกไปด้วย (สารละลายใช้หลายครั้งก่อนจะเปลี่ยนใหม่) ซึ่งอาจมีผลต่อชั้นเอพิแทกซ์ที่ปลูกขึ้นได้ ในการทดลองทั้ง 6 ครั้งนี้ยังไม่พบภาวะของการกัดผิวหน้าซับสเตรดให้เรียบ ดังนั้นผลที่ได้ก็คือชั้นเอพิแทกซ์มีผิวไม่เรียบ นอกจากนี้แล้วยังไม่สามารถแยกความแตกต่างระหว่างการจุ่มซับสเตรดทิ้งค้างไว้หลังจากกัดผิวแล้วและทำการลดอุณหภูมิตันที กับการดึงซับสเตรดขึ้นเหนือสารละลายก่อนหลังจากลดอุณหภูมิลงแล้วจึงค่อยจุ่มซับสเตรดลงไป

### การหาความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาด

ความหนาของชั้นเอพิแทกซ์สามารถหาได้โดยการกรีดตัวอย่างผ่านบริเวณที่มีชั้นเอพิแทกซ์โดยใช้เข็มเพชรกรีดที่ด้านหลัง (ด้านตรงกันข้ามกับที่มีชั้นเอพิแทกซ์) เป็นรอยสั้น ๆ แล้วคว่ำตัวอย่างลงให้ชั้นเอพิแทกซ์อยู่ด้านล่าง ใช้ปลายแหลมของปากคีบ (tweezer) กดเบา ๆ ที่รอยกรีด ตัวอย่างจะแตกจากแนวกรีดไปตลอดทั้งแผ่นเป็นเส้นตรง มีเส้นที่เรียบเป็นมันขึ้นมา หลังจากนั้นนำไป stain ในน้ำยา A-B ในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตรตามสูตรของ Olsen<sup>12</sup> ดังนี้



น้ำยา A-B เป็น selective etching จะกัดตรงบริเวณรอยต่อของซับสเตรตกับชั้นเอพิแทกซ์เร็วกว่าบริเวณอื่นเนื่องจากมีความเครียดสูงกว่า เวลาในการ stain 3 วินาทีแล้วล้างด้วยน้ำ DI (deionized water) หลังจากนั้นฉาบด้วยทองบางในสุญญากาศบริเวณสั้นก่อนนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาด

**ความหนาที่ปลูกด้วยวิธี Equilibrium cooling** สำหรับบางตัวอย่างเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณทางทฤษฎีแสดงไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งจะเห็นว่าเทอร์โมไดนามิกส์มิได้มีบทบาทในการกำหนดความหนาของชั้นเอพิแทกซ์แต่อย่างใด การที่อัตราการเกิดผลึกสูงกว่าที่คำนวณโดยทฤษฎีการแพร่ นั้น เพราะสภาวะแวดล้อมของการเกิดผลึกในระบบนี้เอื้ออำนวยให้มีการพาเกิดขึ้นโดยง่าย

**ความหนาที่ปลูกด้วยวิธี Step-cooling** ความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ที่วัดได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาด พร้อมทั้งการคำนวณทางทฤษฎีแสดงการเปรียบเทียบไว้ในตารางที่ 2 ส่วนรูปที่ 3 ก. เป็นกราฟแสดงความหนาของชั้นเอพิแทกซ์จากการวัดที่ช่วงเวลาการปลูกผลึกต่าง ๆ กัน เมื่อ  $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$ . โดยเปรียบเทียบกับกราฟทางทฤษฎี รูปที่ 3 ข. เป็นกราฟแสดงความหนาของชั้นเอพิแทกซ์จากการวัดที่  $\Delta T$  ต่าง ๆ กันโดยที่เวลาปลูกผลึกคงที่ คือ 40 นาที (ในรูปได้แสดงเส้นโค้งทางทฤษฎีไว้เปรียบเทียบด้วย)

จากกราฟจะเห็นว่า การปลูกผลึกด้วยภาวะเดิมซ้ำกันหลาย ๆ ครั้ง แต่ความหนาที่วัดได้ไม่เท่ากัน แสดงถึงความไม่แน่นอนในอัตราการเกิดผลึก อันเนื่องมาจากการรบกวนบางอย่างที่เกิดขึ้นในสารละลาย ซึ่งมีค่าแปรผันในการทดลองแต่ละครั้ง จากการดูชั้นเอพิแทกซ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่าความหนาไม่คงที่ตอนบนของตัวอย่างจะหนากว่าตอนล่างซึ่งสอดคล้องกับสมมุติฐานการเกิดการพาโดยตัวละลาย

**ความหนาที่ปลูกด้วยวิธี Supercooling** ความหนาที่วัดได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับที่คำนวณจากทฤษฎี แสดงไว้ในตารางที่ 3 ความหนาที่ได้จากวิธี Supercooling นี้จะมากกว่าที่ได้จากวิธี Step-cooling ในช่วงอุณหภูมิที่ลดลงไปเท่ากัน

**ความหนาที่ปลูกด้วยวิธี Two-phase solution cooling** ความหนาที่วัดได้ด้วย SEM แสดงในตารางที่ 4 ความหนาทางทฤษฎีสำหรับวิธีนี้ไม่มี การปลูกผลึกด้วยวิธีนี้มีอัตราการโตของผลึกมาก แต่ใช้ประโยชน์ไม่ได้เนื่องจากผิวขรุขระมาก นอกจากจะนำไป lap ผิวหน้าให้เรียบ

**ความหนาที่ปลูกด้วยวิธี Transient-mode liquid epitaxy** ความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ของตัวอย่างที่ปลูกด้วยวิธีนี้แสดงไว้ในตารางที่ 5 การปลูกผลึกด้วยวิธีนี้ถ้าจุ่มซับสเตรตลงในสารละลายที่อิ่มตัวพอดีแล้วดึงขึ้นอย่างรวดเร็ว จะได้ชั้นเอพิแทกซ์ที่บางมาก เช่น ตัวอย่างหมายเลข 32 มีความหนาเพียง 0.8 ไมครอน ถ้าสามารถสร้างชั้นเอพิแทกซ์ให้เรียบทั้งผิวหน้าโดยไม่มีหลุมอันเนื่องมาจากฝุ่นหรือออกไซด์ เชื่อว่าสามารถนำไปทำสิ่งประดิษฐ์ที่มีชั้นบาง ๆ ต่าง ๆ ได้ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น

## สมบัติทางไฟฟ้าของชั้นเอพิแทกซ์

นอกจากลักษณะพื้นผิวและความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ที่ปลูกแล้ว ถ้าจะนำไปทำสิ่งประดิษฐ์ อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์ หรือเซลล์แสงอาทิตย์ จำเป็นต้องรู้สมบัติทางไฟฟ้าของชั้นเอพิแทกซ์ด้วย ได้แก่ลักษณะกระแส-แรงดัน (I-V characteristics) สภาพความต้านทาน ความเข้มข้นของพาหะ ความคล่องตัวของพาหะ และชนิดของชั้นเอพิแทกซ์ว่าเป็นชนิดเอ็น หรือชนิดพี

ก. ลักษณะกระแส-แรงดันของชั้นเอพิแทกซ์บนซับสเตรตชนิดเอ็น นำตัวอย่างหมายเลข 13 ซึ่งเป็นการปลูกชั้นเอพิแทกซ์บนซับสเตรตชนิดเอ็น มาทำผิวสัมผัสแบบโอห์มมิก (ohmic contact) ดังนี้

ด้านหน้าที่เป็นชั้นเอพิแทกซ์ ฉาบด้วยไอโลหะ 2 ชนิด ผ่านหน้ากากโลหะซึ่งจะเป็นวงกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มม. การฉาบไอโลหะนี้กระทำในเครื่องระเหยสุญญากาศ (vacuum evaporator) ซึ่งดูดอากาศออกเหลือความดันไอประมาณ  $10^{-6}$  torr

โลหะชั้นแรกเป็นโลหะผสม Au-Ge ซึ่งมี Ge 12% โดยน้ำหนัก ฉาบหนา 2000 Å โลหะชั้นที่สองเป็น Ni ฉาบหนา 500 Å

ด้านหลังที่เป็นซับสเตรต ฉาบด้วยไอโลหะ 2 ชนิด เหมือนด้านหน้าทุกประการแต่ให้โลหะคลุมทั้งผิวโดยไม่มีหน้ากากโลหะ

หลังจากทำผิวสัมผัสแล้วนำมาดูลักษณะกระแส-แรงดัน โดยใช้ curve tracer จะได้ว่ารูปซึ่งมีลักษณะดัดกระแส (rectifying) จากนั้นนำไปอบความร้อน (anneal) ที่อุณหภูมิ  $450^{\circ}\text{C}$ . เป็นเวลา 1 นาที ในบรรยากาศของ forming gas (ก๊าซผสมระหว่าง  $\text{H}_2$  กับ  $\text{N}_2$  ในอัตราส่วน  $\text{H}_2 : \text{N}_2 = 1:10$  โดยปริมาตร) นำมาดูด้วย curve tracer อีกครั้งหนึ่งจะได้เส้นตรง ซึ่งแสดงว่าผิวสัมผัสทั้งด้านหน้าและด้านหลังเป็นแบบโอห์มมิก แต่เนื่องจากโลหะที่ใช้ทำผิวสัมผัสนั้น จะให้ผิวสัมผัสแบบโอห์มมิกบนสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเมื่ออบความร้อนด้วยภาวะที่เหมาะสม<sup>9</sup> จึงบอกได้ว่าชั้นเอพิแทกซ์ที่ได้จากระบบ LPE ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นแบบเอ็น

เมื่อพิจารณากราฟก่อนนำไปอบความร้อน ซึ่งมีลักษณะดัดกระแส พบว่าแรงดันพังทลาย (breakdown voltage) มีค่า 35 โวลต์ ซึ่งจะคำนวณ<sup>3</sup>ได้ความเข้มข้นของพาหะในชั้นเอพิแทกซ์มีค่า  $3 \times 10^{16}/\text{ซม.}^3$

ข. ลักษณะกระแส-แรงดันของชั้นเอพิแทกซ์บนซับสเตรตชนิดพี เพื่อยืนยันว่าชั้นเอพิแทกซ์ที่ได้เป็นชนิดเอ็น จึงได้นำเอาซับสเตรตชนิดพี มาปลูกชั้นเอพิแทกซ์ หลังจากนั้นนำมาทำผิวสัมผัสโอห์มมิก เพื่อดูลักษณะกระแส-แรงดัน คือ ด้านหน้าที่เป็นชั้นเอพิแทกซ์ฉาบด้วยไอของโลหะ Au-Ge และ Ni ผ่านหน้ากากโลหะเหมือนในข้อ ก.ทุกประการ เพื่อทำให้เป็นผิวสัมผัสโอห์มมิก ด้านหลังที่เป็นซับสเตรต ฉาบด้วยไอของ Au-Zn ใน vacuum evaporator ภายใต้อากาศประมาณ  $10^{-6}$  torr เพื่อให้

เป็นผิวสัมผัสแบบโอห์มมิก<sup>13</sup>

หลังจากทำผิวสัมผัสแล้ว นำมาดูลักษณะกระแส-แรงดันด้วย curve tracer จะเห็นว่ากระแสด้านไบแอสตรง (forward bias) ไหลน้อยมาก เมื่อนำไปอบความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C. เป็นเวลา 1 นาที ในบรรยากาศของ forming gas แล้วนำมาดูด้วย curve tracer อีกครั้งหนึ่งจะพบว่ากระแสด้านไบแอสตรงเพิ่มขึ้นสูงมากในลักษณะตัดกระแส เพราะก่อนการอบความร้อนผิวต่อระหว่างโลหะด้านหน้ากับชั้นเอพิแทกซ์ยังสัมผัสกันไม่แนบแน่น อาจมีชั้นระหว่างผิวต่อ (interfacial layer) บาง ๆ คั่นอยู่ซึ่งขัดขวางการเคลื่อนที่ของพาหะ ชั้นระหว่างผิวต่อนี้ อาจเป็นชั้นของไอน้ำหรือออกไซด์บาง ๆ ก็ได้ เมื่ออบความร้อนด้วยภาวะที่เหมาะสม เจอร์เมเนียมซึ่งเป็นสารเจือปนชนิดเอ็น จะแพร่ซึมเข้าไปที่ผิวหน้าของชั้นเอพิแทกซ์ ทำให้ความเข้มข้นของสารเจือปนชนิดเอ็น ในชั้นเอพิแทกซ์สูงขึ้นมากจนกระทั่งชั้นที่กั้น ที่มีอยู่บางมาก ๆ ยอมให้พาหะวิ่งผ่านด้วยปรากฏการณ์ tunnelling<sup>13</sup> ได้ แต่ลักษณะกระแส-แรงดันก็ยังคงเป็นแบบตัดกระแส แสดงว่าการตัดกระแสไม่ได้มาจากผิวสัมผัสแต่มาจากหัวต่อ พี-เอ็น (pn junction) ซึ่งเกิดจากชั้นเอพิแทกซ์ (ชนิดเอ็น) กับซับสเตรต (ชนิดพี) เมื่อพิจารณาแรงดันที่กระแสเริ่มไหลทางด้านไบแอสตรง (cut-in voltage) พบว่ามีค่าประมาณ 1 โวลต์ ซึ่งเป็นแรงดัน cut-in ของหัวต่อ พี-เอ็น ของเกลเลียม-อาร์เซไนด์ จากการวัดนี้สรุปได้ว่าชั้นเอพิแทกซ์เป็นชนิดเอ็น

การวัดโดยอาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) ได้นำตัวอย่างหมายเลข 55 ซึ่งซับสเตรตเป็นเกลเลียมอาร์เซไนด์กึ่งฉนวน และมีชั้นเอพิแทกซ์อยู่ด้านบนมาทำแบบ (pattern) ของขั้วไฟฟ้า ซึ่งเป็นผิวสัมผัสแบบโอห์มมิก แบบประกอบด้วยขั้วไฟฟ้ายาว ๆ ขนานกัน 4 อัน และขั้วไฟฟ้าเป็นจุด 2 อัน<sup>1</sup> แบบของโลหะทำได้โดยการฉาบไอของ Au-Ge/Ni ในสุญญากาศผ่านหน้ากากพลาสติกที่ออกแบบไว้ หลังจากฉาบไอโลหะแล้วอบความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C. เป็นเวลา 1 นาที เพื่อทำให้เป็นผิวสัมผัสแบบโอห์มมิก แล้วตัดตัวอย่างให้เป็นรูปร่างตามรูปที่ 5 ปล่อยกระแสไฟฟ้าหลาย ๆ ค่าผ่านเข้าขั้ว 1 และออกที่ขั้ว 4 วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้ว 2 กับ 3 ด้วยโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานขาเข้าสูงมาก ผลการวัดแสดงในรูปที่ 6 จะได้ความต้านทานของชั้นเอพิแทกซ์ระหว่างจุด 2 กับ 3 เท่ากับ 75 โอห์ม จากมิติของตัวอย่าง สามารถหาสภาพต้านทานของเอพิแทกซ์ได้เท่ากับ 0.02 โอห์ม-ซม.

หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ เพื่อหาชนิดของสารและความเข้มข้นของพาหะ โดยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านระหว่างขั้ว 1 และขั้ว 4 หลาย ๆ ค่า ภายใต้สนามแม่เหล็กที่มีความเข้มต่าง ๆ กัน วัดแรงดันฮอลล์ (Hall voltage,  $V_H$ ) ระหว่างขั้ว 5 กับ 6 สรุปได้ว่าพาหะข้างมากเป็นอิเล็กตรอน ซึ่งก็หมายถึงชั้นเอพิแทกซ์เป็นชนิดเอ็น และคำนวณความเข้มข้นของอิเล็กตรอนในชั้นเอพิแทกซ์ได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $4.89 \times 10^{16}/\text{ซม.}^3$  (ตารางที่ 6) ซึ่งค่าที่ได้ใกล้เคียงกับการหาจากแรงดันฟังก์ทาลาย ( $3 \times 10^{16}/\text{ซม.}^3$ ) แสดงว่าวิธีการหาแม่นยำ

เมื่อรู้สภาพด้านทานและความเข้มข้นของพาหะ สามารถหาความคล่องตัวของพาหะได้จากสูตร

$$\delta = qn\mu_n$$

เมื่อ  $\delta$  = สภาพนำไฟฟ้า = ส่วนกลับของสภาพด้านทาน

$\mu_n$  = ความคล่องตัวของพาหะ (อิเล็กตรอน)

$q$  = ประจุของอิเล็กตรอน

$n$  = ความเข้มข้นของอิเล็กตรอน

แทนค่า  $\delta$  และ  $n$  เข้าไปในสมการ จะได้ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนเท่ากับ 6390 ซม.<sup>2</sup>/โวลต์-วินาที ซึ่งสูงมากใกล้เคียงกับค่าของความคล่องตัวในแกเลียมอาร์เซไนด์บริสุทธิ์ (8500 ซม.<sup>2</sup>/โวลต์-วินาที) แสดงว่าระบบที่ใช้ในการปลูกผลึก LPE นี้มีความสะอาดอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

## สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ ดังนี้

- ชั้นเอพิแทกซีที่ปลูกโดยไม่ได้ใส่สารเจือปนเป็นชนิดอื่น มีความเข้มข้นของอิเล็กตรอนเท่ากับ  $4.89 \times 10^{16}$ /ซม.<sup>3</sup>
- วิธีปลูกผลึกแบบ Supercooling, Step-cooling และ Transient-mode liquid epitaxy ให้สภาพพื้นผิวที่เรียบกว่าวิธีอื่น ๆ
- ชั้นเอพิแทกซีจะมีหลุมกระจายอยู่ทั่วไปมากบ้างน้อยบ้าง หลุมเหล่านี้อาจเกิดจากฝุ่นของแกรไฟต์หรือออกไซด์ที่ผิวหน้าซบสเตรต หลุมเหล่านี้จะคืนขึ้นถ้าชั้นเอพิแทกซีหนาขึ้น และจะหายไปถ้าชั้นเอพิแทกซีหนาถึง 10 ไมครอน
- ถ้าลดอุณหภูมิของสารละลายต่ำกว่าที่อุณหภูมิสมดุลเกิน 5°C. จะเกิดการตกผลึกเองในสารละลาย เม็ดผลึกเหล่านี้ อาจเกาะบนผิวหน้าตัวอย่างเมื่อตั้งขึ้นจากสารละลาย ทำให้ได้ผิวหน้าที่ไม่เรียบ
- ระหว่างการปลูกผลึกถ้ามีการกระทบกระเทือนที่เตา ผิวหน้าจะเป็นฝ้าเร็วขึ้น ซึ่งเกิดจากการตกผลึกที่ผิวนั่นเอง และถ้าผิวหน้าเป็นฝ้าอาจจะเกาะบนตัวอย่างเมื่อตั้งขึ้นจากสารละลาย
- การปลูกผลึกด้วยวิธี Equilibrium cooling ให้ผิวหน้าที่ขรุขระ เพราะจำนวนนิวเคลียส (ผลึกเล็ก ๆ) ที่เกิดบนผิวซบสเตรตตอนแรก) มีน้อย ไม่เพียงพอต่อการเกิดผลึกได้เต็มหน้าพร้อมกัน
- ได้พยายามกัดผิวของซบสเตรตด้วยสารละลายแกเลียมในเตาก่อนการปลูกผลึกเพื่อกำจัดฝุ่นหรือออกไซด์ที่คาดว่าจะมีที่ผิว แต่ผิวที่กัดแล้วไม่เรียบขรุขระมาก ชั้นเอพิแทกซีที่ปลูกขึ้นบนผิวที่ถูกกัด

## ก็ขรุขระเช่นกัน

- วิธีปลูกผลึกแบบ Supercooling ให้ชั้นเอพิแทกซีที่หนากว่าวิธีปลูกผลึกแบบ Step-cooling หรือแบบ Transient-mode liquid epitaxy สำหรับอุณหภูมิของสารละลายที่ลดลงไปด้วยค่าเท่ากัน

- เกิดการพาโดยตัวละลายขึ้น ทำให้ชั้นเอพิแทกซีตอนบนของตัวอย่างหนากว่าตอนล่าง นอกจากนี้ความหนาที่ได้ยังมากกว่าการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีการแพร่ เพราะในทฤษฎีการแพร่สารละลายอยู่นิ่ง ส่วนในการทดลองสารละลายมีการกวนเกิดขึ้น

- ผลึกที่ปลูกได้ในงานวิจัยนี้มีทั้งแบบ  $n/n^+$  ซึ่งใช้ทำไดโอดแบบช็อตกีย์ (Schottky diode) ได้ และแบบ  $n/p^+$  ซึ่งใช้ทำไดโอดหัวต่อ พี-เอ็นได้

- ชั้นบางมาก ๆ (น้อยกว่า 1 ไมครอน) ปลูกได้โดยวิธี Transient-mode liquid epitaxy แต่ยังมีปัญหาเรื่องหลุมกระจายอยู่ที่ผิว

หลังจากแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นและพัฒนาตัดแปลงระบบที่ใช้ให้ดีขึ้น จึงมีข้อเสนอแนะดังนี้

- กวอดซ์ที่ใช้ทำเบ้าใส่เกลือเป็นชนิดที่คุณภาพไม่ดีพอ ถ้าใช้ชนิดที่ดีจะทำให้ได้ชั้นเอพิแทกซีที่บริสุทธิ์กว่านี้

- หลุมที่ปรากฏบนชั้นเอพิแทกซีอาจหมดไปถ้าทำให้ระบบสะอาดขึ้น เช่นการ load ชับสเตรตควรกระทำใน nitrogen hood เพื่อลดปัญหาเรื่องฝุ่นและออกไซด์ที่ผิว และที่ยึดชับสเตรต ทำด้วยกวอดซ์ pyrolytic graphite หรือโบรอนไนไตรด์เพื่อลดปัญหาเรื่องฝุ่นของแกรไฟต์

- การปรับอุณหภูมิให้มีอัตราคงที่กระทำด้วยมือ ทำให้ไม่สะดวก อาจปรับปรุงระบบโดยการต่อ ramp generator แทรกเข้าที่เทอร์โมคัปเปิลที่ป้อนสัญญาณกลับ

- ถ้าตัดแปลงเบ้าใส่เกลือให้มีหลาย ๆ ใบ ก็จะสามารถจะปลูกชั้นเอพิแทกซีหลาย ๆ ชั้นในเตาเดียวกันได้

- ควรพยายามทำไดโอดเปล่งแสงให้ได้ เพราะเป็นก้าวแรกของการทำเลเซอร์ไดโอด

## คำขอบคุณ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยประจำปี 2527 ดร.วิโรจน์ ตันตราภรณ์ ผศ.สมพงษ์ ฉัตรภรณ์ และคุณอนุพงศ์ สรงประภา รวมทั้งเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลืองานวิจัยนี้จนสำเร็จ

## เอกสารอ้างอิง

1. รัตนธรรมพันธ์, สมชัย และ โตประเสริฐพงษ์, บรรยง. เครื่องวัดความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กแบบสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น การประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 8 สถาบันอุดมศึกษาครั้งที่ 7 ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตธนบุรี, 2527, ข 167 - ข 173.
2. Baliga, B.J. Kinetics of Epitaxial Growth of Silicon from a Tin Melt. *J. Electrochem. Soc.*, 1977, **124**, 1627 - 1631.
3. Baliga, B.J. Breakdown Characteristics of Gallium Arsenide. *IEEE Electron Device Letters*, 1981, **EDL-2**, 302 - 304.
4. Bauser, E. Development of Depressions and Voids during LPE Growth of GaAs. *Appl. Phys.*, 1978, **15**, 243 - 252.
5. Casey, H.C. Jr. and Panish, M.B. Heterostructure Lasers. Academic Press, 1978, 71 - 155.
6. Casey, H.C. Jr., Panish, M.B. et al. *J. Electrochem. Soc.*, 1969, **116**, 899.
7. Cullity, B.D. Element of X-ray Diffraction. Addison-Wesley Publishing Company, Massachusettes, 1959, 89 - 93.
8. Deitch, R.H. Liquid-Phase Epitaxial Growth of Gallium Arsenide under Transient Thermal Conditions. *J. Crystal Growth*, 1970, **7**, 69 - 73.
9. Heime, K., Konig, U., Kohn, E. and Wortmann, A. Very Low Resistance Ni-AuGe-Ni Contacts to n-GaAs. *Solid-State Electronics*, 1974, **17**, 835 - 837.
10. Honig, R.E. Surface and Thin Film Analysis of Semiconductor Materials. *Thin Solid Films*, 1976, **31**, 89 - 122.
11. Hsieh, J.J. Thickness and Surface Morphology of GaAs LPE Layers Grown by Supercooling, Step-cooling, Equilibrium cooling and Two-Phase Solution Techniques. *J. Crystal Growth*, 1974, **27**, 49 - 61.
12. Olsen, G.H. and Ettenberg, M. Universal Stain/Etchant for Interfaces in III-V Compounds. *J. Appl. Phys.*, 1974, **45**, 5112 - 5114.
13. Toprasertpong, B. Contribution à l' Étude des Contacts Ohmiques Métal-Semiconducteur Cas de l' Au-Zn/GaAs (p). Dr.Ing Thesis, University of Paul Sabatier, Toulouse, 1980.
14. Toyoda, N., Mihara, M. and Hara, T. Liquid-Phase Epitaxial Growth of Thin GaAs Layers from Supercooled Solutions. *J. Appl. Phys.*, 1976, **47**, 443 - 448.
15. Woodall, J.M., Rupprecht, H. and Reuter W. *J. Electrochem. Soc.*, 1969, **116**, 899.

ตารางที่ 1. ความหนาของชั้นเอพิเทกซึ่งปลุกโดยวิธี Equilibrium cooling เปรียบเทียบกับการคำนวณโดยทฤษฎี

หมายเลข ตัวอย่าง	อุณหภูมิที่ เริ่มจุ่ม ซัลสเตอร์ด (°ซ.)	อุณหภูมิที่ ดึงเหล็กขึ้น (°ซ.)	อัตราการลด ของอุณหภูมิ (°ซ./นาที)	ช่วงเวลาใน การปลุกเหล็ก (นาที)	ความหนา (ไมครอน)		
					คำนวณจาก เทอร์โมได- นามิกส์	คำนวณโดย ทฤษฎีการ แพร่	วัดจากตัวอย่าง ที่ตำแหน่ง กึ่งกลาง
3	792	786	2	3	445	1.8	7.5
4	792	777	2.5	6	381	6.0	16.0
17	792	787	1	5	1084	1.9	15.1

ตารางที่ 2. ความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ซึ่งปลูกโดยวิธี Step-cooling เปรียบเทียบกับการคำนวณโดยทฤษฎี

หมายเลขตัวอย่าง	$\Delta T$ (°ซ.)	ช่วงเวลาการจุ่ม ซัลเฟอร์	ความหนา (ไมครอน)		
			คำนวณจาก เทอร์โมไดนามิกส์	คำนวณโดย ทฤษฎีการแพร่	วัดจากตัวอย่าง ที่ตำแหน่งกึ่งกลาง
6	5	10	381.2	4.0	4
7	5	40	381.2	8.0	11.6
9	5	10	381.2	4.0	4.3
10*	5	20	381.2	5.7	4.7
11	5	20	381.2	5.7	4.3
13	5	45	381.2	8.5	9.4
14	5	60	381.2	9.8	10
15	5	45	381.2	8.5	13
19	5	20	381.2	5.7	9.6
22	5	30	381.2	6.9	14
25	5	40	381.1	8.0	6.7
27	1	40	77.9	1.7	12.6
29	2	40	154.9	3.3	4.3
40	3	40	231.1	4.9	8
47	4	40	306.6	6.5	5.2
49	5	30	381.2	6.9	13
50	5	45	381.2	8.5	10

\* ซัลเฟอร์เป็นชนิดที่เจือด้วยสังกะสี

ตารางที่ 3. ความหนาของชั้นออกไซด์ที่เกิดโดยวิธี Supercooling เปรียบเทียบกับการคำนวณโดย ทฤษฎี

หมายเลข ตัวอย่าง	อุณหภูมิ เริ่มกลุ่ม ชั้นสเตรต (°ซ.)	$\Delta T$ (°ซ.)	อุณหภูมิที่ ดึงผลึกขึ้น (°ซ.)	อัตราการ ลดอุณหภูมิ เฉลี่ยใน ระหว่างการ ปลูกผลึก (°ซ./นาที)	ช่วงเวลา ในการ ปลูกผลึก (นาที)	ความหนา (ไมครอน)		
						คำนวณจาก เทอร์โมได- นามิกส์	คำนวณโดย ทฤษฎี การแพร่	วัดจาก ตัวอย่างที่ ตำแหน่ง กึ่งกลาง
38	790	2	784.9	0.25	19.5	518	5.9	27
39	790	2	785	0.125	40	528	8.6	18.7
44	791	1	786	0.125	40	455	7.1	21.5
54	790	2	786.3	3.7	1	455	1.2	2.6
55*	790	2	784	3	2	600	2.2	5

\* ชั้นสเตรตเป็นแกเลียมอาร์เซไนด์ในตั้งผวน (semi-insulating gallium arsenide) ชนิดเอ็นเจ็ดด้วยโครเมียม

ตารางที่ 4. ความหนาของชั้นเอพิเทกซ์ที่ปลูกโดยวิธี Two-phase solution cooling เมื่อสารละลายถูกทำให้ร้อนด้วยอุณหภูมิ 792 °ซ.

หมายเลข ตัวอย่าง	อุณหภูมิที่เริ่ม จุ่มซับสเตรต (°ซ.)	$\Delta T$ (°ซ.)	อุณหภูมิที่ ตั้งผลึกขึ้น (°ซ.)	อัตราการลดอุณหภูมิ เฉลี่ยในระหว่าง การปลูกผลึก (°ซ./นาที)	ช่วงเวลาใน การปลูกผลึก (นาที)	ความหนาวัดจาก ตัวอย่างที่ตำแหน่ง กึ่งกลาง (ไมครอน)
1	769	23	757	4	3	22
2	784	8	776	4	2	18

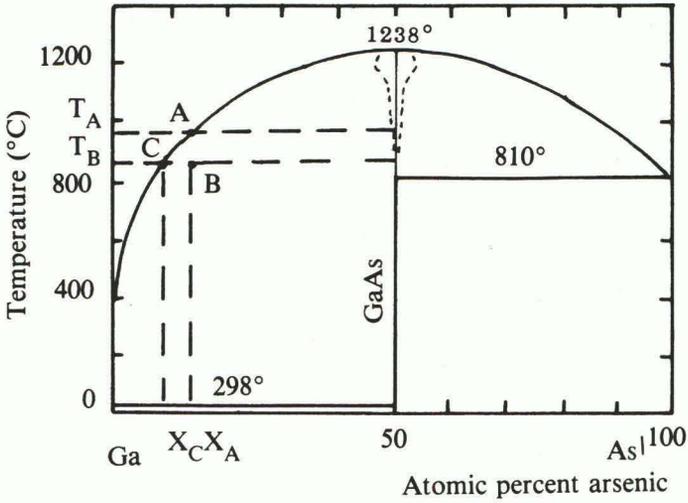
ตารางที่ 5. ความหนาของชั้นเอพิเทกซ์ที่ปลูกโดยวิธี Transient-mode liquid epitaxy

หมายเลข ตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่มต้น ของซับสเตรต (°ซ.)	อุณหภูมิสารละลาย เมื่อเริ่มจุ่ม ซับสเตรต (°ซ.)	อุณหภูมิที่ตั้ง ผลึกขึ้น (°ซ.)	ช่วงเวลาในการ ปลูกผลึก (นาที)	ความหนาวัดจาก ตัวอย่างที่ตำแหน่ง กึ่งกลาง (ไมครอน)
32*	748	792	792	3	0.8
35	745	789	789	60	10.9
37	724	789	789	40	10.9

\* ซับสเตรตเคลือบเลเซอร์เซโนคิงจนวน ชนิดเอ็นเจ็ดด้วยโครเมียม

ตารางที่ 6. ผลการทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ และผลการคำนวณความเข้มข้นของพาหะในชั้นเอพิแทกซี  
ของตัวอย่างหมายเลข 55

กระแส I (มิลลิแอมแปร์)	ความเข้มข้น แม่เหล็ก B (เวเบอร์/ตร.ม.)	ความต่างศักย์ ที่วัดได้ V (มิลลิโวลต์)	ความต่างศักย์ของฮอลล์ $V_H = \frac{V_1 + V_4 - V_2 - V_3}{4}$ (มิลลิโวลต์)	ความเข้มข้นของ พาหะ n (/ซม. <sup>3</sup> )
+ 16.65	+ 0.27	- 112.21	$V_1$	5.08 × 10 <sup>16</sup>
+ 16.65	- 0.27	+ 102.02	$V_2$	
- 16.65	+ 0.27	+ 127.59	$V_3$	
- 16.65	- 0.27	- 101.54	$V_4$	
+ 11.91	+ 0.27	- 90.10	$V_1$	4.93 × 10 <sup>16</sup>
+ 11.91	- 0.27	+ 72.51	$V_2$	
- 11.91	+ 0.27	+ 90.82	$V_3$	
- 11.91	- 0.27	- 72.72	$V_4$	
+ 16.65	+ 0.19	- 94.52	$V_1$	4.79 × 10 <sup>16</sup>
+ 16.65	- 0.19	+ 69.66	$V_2$	
- 16.65	+ 0.19	+ 95.59	$V_3$	
- 16.65	- 0.19	- 70.44	$V_4$	
+ 1.00	+ 0.23	- 7.00	$V_1$	4.77 × 10 <sup>16</sup>
+ 1.00	- 0.23	+ 5.31	$V_2$	
- 1.00	+ 0.23	+ 6.49	$V_3$	
- 1.00	- 0.23	- 4.81	$V_4$	
+ 0.62	+ 0.27	- 4.79	$V_1$	4.87 × 10 <sup>16</sup>
+ 0.62	- 0.27	+ 3.85	$V_2$	
- 0.62	+ 0.27	+ 4.73	$V_3$	
- 0.62	- 0.27	- 3.79	$V_4$	
				ค่าเฉลี่ย $\bar{n} = 4.89 \times 10^6$

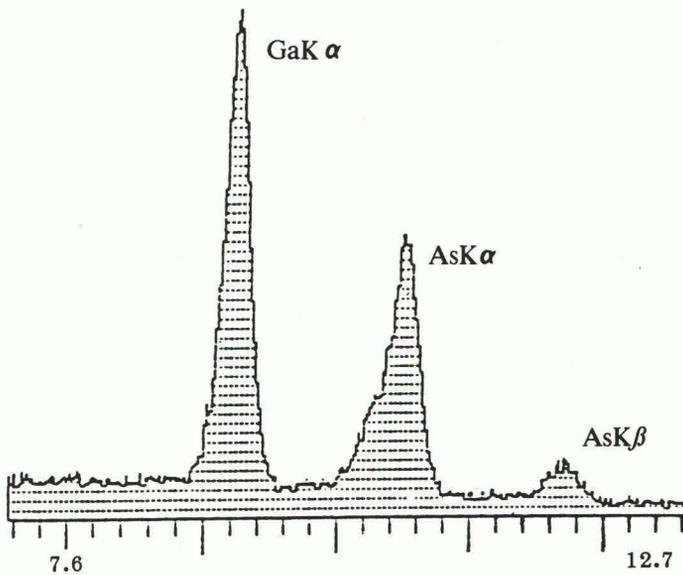


รูปที่ 1. เฟสไดอะแกรมของ GaAs เส้นโค้ง solidus แสดงด้วยเส้นประ

214 CNT

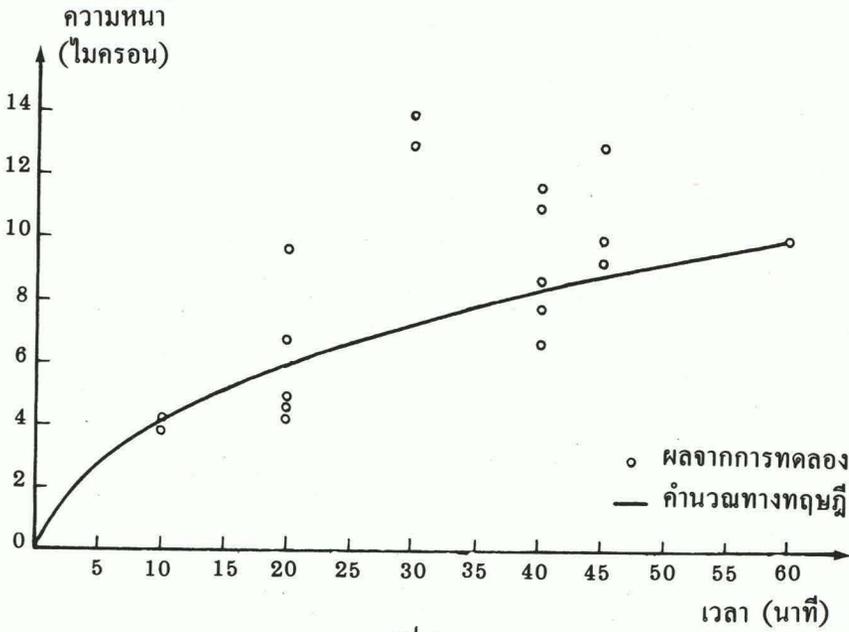
2K FS: A

10120 EV 20 EV/CHAN

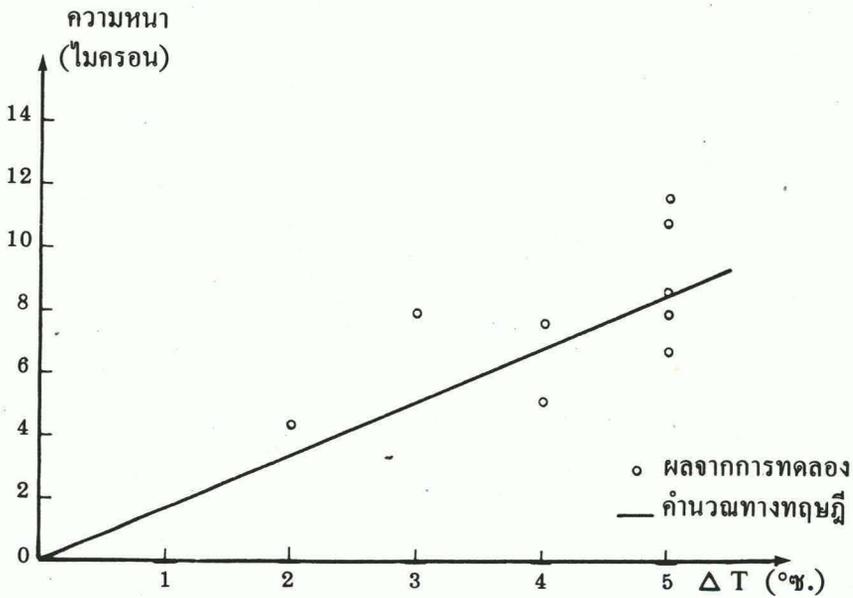


DT = 34% REM-LT = 65498 SECS

รูปที่ 2. สเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากการวิเคราะห์หาชนิดของธาตุในชั้นเอพิแทกซ์ด้วยวิธี Electron probe microanalysis



รูป ก.

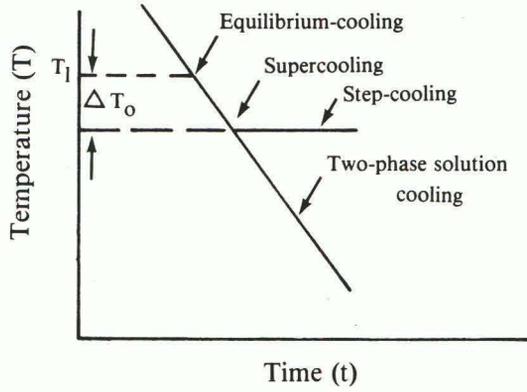


รูป ข.

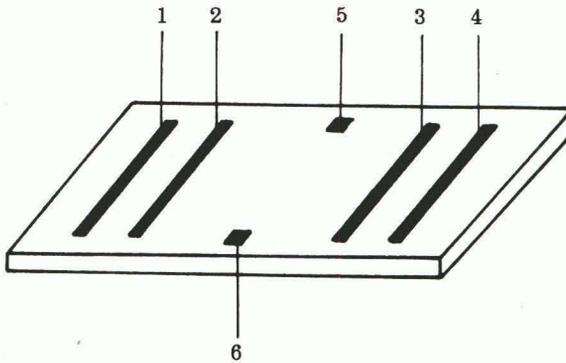
รูปที่ 3. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเอพิแทกซ์ซึ่งปลูกด้วยวิธี Step-cooling เปรียบเทียบกับการคำนวณโดยทฤษฎีการแพร่

ก. เมื่อ  $\Delta T$  คงที่ =  $40^{\circ}\text{ซ.}$

ข. เวลาในการปลูกผลึกคงที่ =  $40^{\circ}\text{ซ.}$



รูปที่ 4. กระบวนการทำให้สารละลายเย็นตัวสำหรับการปลูกผลึกแบบทรานเซียนต์ 4 วิธี

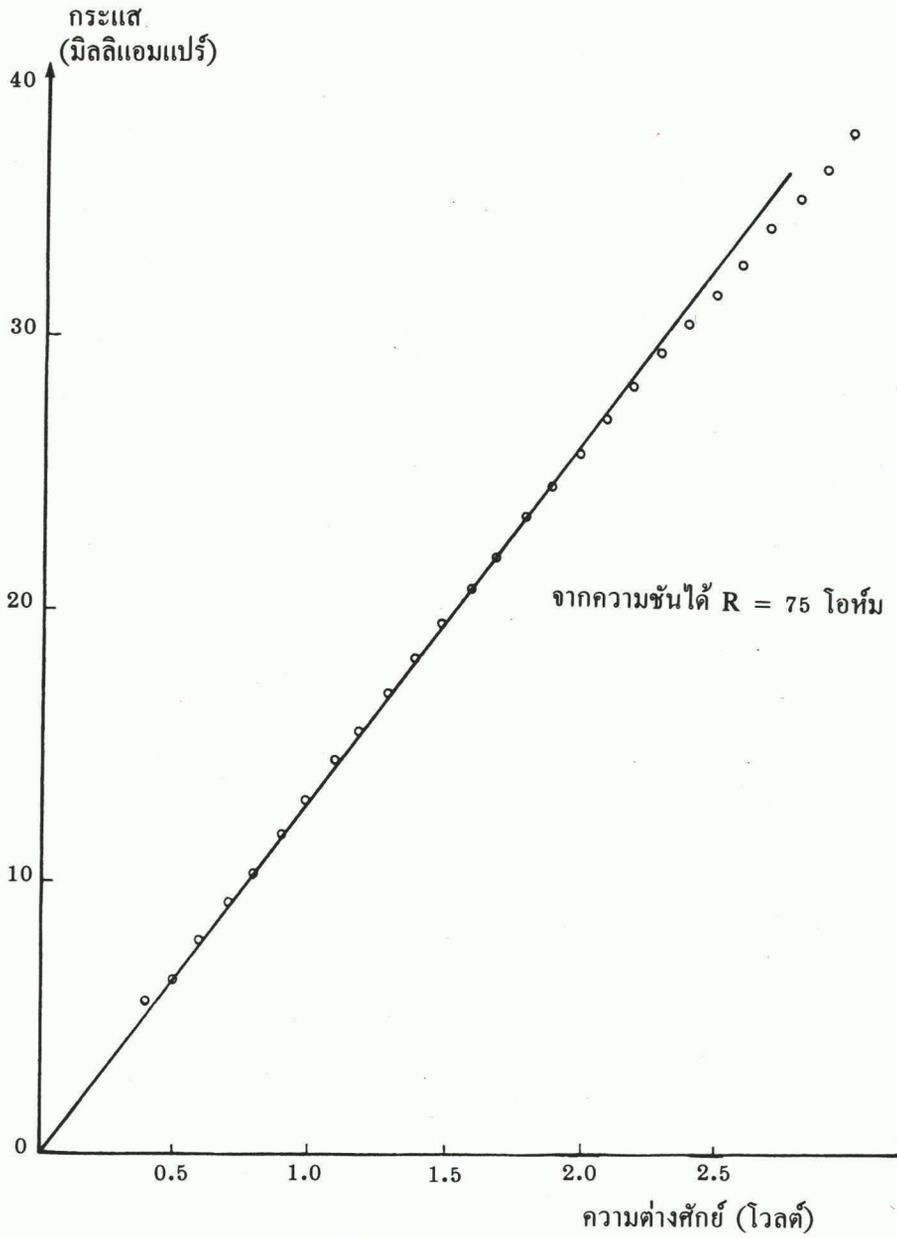


รูปที่ 5. ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์และวัดสภาพนำไฟฟ้า

ขั้วที่ 1 และ 4 ใช้สำหรับผ่านกระแส

ขั้วที่ 2 และ 3 ใช้วัดความต่างศักย์

ขั้วที่ 5 และ 6 ใช้วัดแรงดันฮอลล์



รูปที่ 6. ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ เพื่อหาสภาพต้านทานของชั้นเอพิแทกซี