



การปลูกผลึก InAs บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs
ด้วยวิธีการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล

โดย

สมชัย รัตนธรรมพันธ์ D.Eng. (Chula)

และ

ชุมพล อันตรเสน Dr.-Ing.(Toulouse)

โครงการวิจัยเลขที่ 65G-EE-2547

ทุนงบประมาณแผ่นดิน ปี 2547

สถาบันวิจัยประชากร


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพฯ

ตุลาคม 2547



สถาบันวิจัยและพัฒนาของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ไม่รับผิดชอบ
ต่อผลเสียใด ๆ อันอาจเกิดจากการนำความคิดเห็นในเอกสาร
ฉบับนี้ไปใช้ ความคิดเห็นที่ปรากฏในเอกสารเป็นความคิดเห็น
ของผู้เขียนซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นความคิดเห็นของสถาบันฯ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การปลูกผลึก InAs บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs ด้วยวิธีการปลูกผลึกอิตีเทกซีจากลำโมเลกุล

โดย

สมชัย รัตนธรรมพันธ์ D.Eng. (Chula)

และ

ชุมพล อินทรเสน Dr.-Ing.(Toulouse)

โครงการวิจัยเลขที่ 65G-EE-2547

ทุนงบประมาณแผ่นดิน ปี 2547

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพฯ

ตุลาคม 2547

กิตติกรรมประกาศ

ส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสภาวิจัยแห่งชาติ ปีงบประมาณ 2547 และ คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว ที่ได้ให้การสนับสนุนและคำแนะนำ ชี้นำที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการวิจัยนี้ พร้อมทั้งคุณสุภโชค ไทยน้อย คุณขวัญเรือน ไทยน้อย คุณพรชัย ช่างม่วง และคุณไมตรี ไพศาลภานุมาศที่ได้ให้ความช่วยเหลืองานวิจัยนี้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการปลูกผลึกอพิแทกซี InAs บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น (100) GaAs ด้วยวิธีการปลูกผลึกจากลำโมเลกุล ซึ่งคุณสมบัติเชิงไฟฟ้าของชั้นผลึกอพิแทกซี InAs เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) มีค่าความเข้มข้นพาหะอยู่ในช่วง 2.2×10^{16} - 8×10^{16} cm^{-3} ค่าความคล่องตัวพาหะ $5,400$ - $6,800$ $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ และค่าความไวผลตอบสนองแม่เหล็ก 0.8 - 1.4×10^5 Volt/Gauss โดยผลที่ได้นั้นขึ้นกับเงื่อนไขที่ใช้ในการปลูกผลึก ได้แก่ ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก ค่าอัตราส่วน BEP ของ As₄/In และค่าอัตราการปลูกผลึก นอกจากนี้คุณภาพผิวหน้าผลึก (Surface morphology) ที่ได้ก็ขึ้นกับเงื่อนไขดังกล่าวด้วยเช่นเดียวกัน สำหรับเงื่อนไขที่เหมาะสมในการปลูกผลึกอพิแทกซี InAs บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น (100) GaAs ที่มีคุณภาพผิวหน้าผลึกที่ดี ค่าความคล่องตัวพาหะ และค่าความไวผลตอบสนองแม่เหล็กสูงมีดังต่อไปนี้คือ ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึกอยู่ในช่วง 470 - 490°C ค่าอัตราส่วน BEP ของ As₄/In อยู่ในช่วง 26 - 30 และค่าอัตราการปลูกผลึกอยู่ในช่วง 0.35 - 0.45 ML/วินาที



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Abstract

The growth of InAs epi-layers on (100) GaAs substrates by solid-source molecular beam epitaxy (MBE) was investigated. The undoped InAs epi-layers showed n-type conduction behavior with a background carrier concentration of $2.2 \times 10^{16} - 8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, carrier mobility of $5,400 - 6,800 \text{ cm}^2/\text{V-s}$ and magnetic sensitivity of $0.8 - 1.4 \times 10^{-5} \text{ Volt/Gauss}$. These results showed a strong dependence on growth conditions such as growth temperatures, As_4/In BEP ratios and growth rates. The optimum growth condition for smooth morphology, high carrier mobility and magnetic sensitivity InAs epi-layer on GaAs substrate was the growth temperature in the range of $470 - 490^\circ\text{C}$, As_4/In BEP ratio in the range of 26-30 and growth rate in the range of 0.35-0.45 ML/sec.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| กิตติกรรมประกาศ..... | II |
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | III |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | IV |
| สารบัญ..... | V |
| สารบัญตาราง..... | VII |
| สารบัญรูป..... | VIII |
| สารบัญสัญลักษณ์..... | X |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| บทที่ 2 ความรู้พื้นฐาน..... | 3 |
| 2.1 การปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล..... | 3 |
| 2.1.1 ชุดระบบการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล..... | 3 |
| 2.1.2 Effusion cell..... | 6 |
| 2.1.2.1 Knudsen cell..... | 6 |
| 2.1.2.2 Cracker cell..... | 8 |
| 2.1.2.3 Valved cracker cell..... | 9 |
| 2.1.2.4 Gas injector cell..... | 10 |
| 2.1.3 อุปกรณ์วิเคราะห์..... | 11 |
| 2.1.3.1 Reflection high energy diffraction electron (RHEED)..... | 12 |
| 2.1.3.2 Residual gas analyzer..... | 14 |
| 2.1.3.3 อุปกรณ์อื่นๆ ที่สามารถติดตั้งเข้าในระบบ MBE..... | 14 |
| 2.2 กลไกการเกิดผลึกของการปลูกผลึกอพิแทกซีวิธี MBE..... | 15 |
| 2.3 สารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V..... | 18 |
| 2.3.1 โครงสร้างของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V..... | 18 |
| 2.3.2 คุณสมบัติของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V..... | 20 |
| 2.4 การวัดวิธี van der PAUW..... | 21 |
| 2.4.1 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect)..... | 21 |
| 2.4.2 วิธีการวัดของ van der PAUW..... | 23 |
| 2.4.3 การวัด van der PAUW ในทางปฏิบัติ..... | 25 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 2.4.3.1 การกำหนดนิยามในการวัดค่าสภาพด้านทาน..... | 26 |
| 2.4.3.2 การวัดหาค่าสภาพด้านทาน..... | 26 |
| 2.4.3.3 การกำหนดนิยามในการวัดฮอลล์..... | 27 |
| 2.4.3.4 การวัดหาค่าแรงดันฮอลล์..... | 28 |
| บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง..... | 30 |
| 3.1 การเตรียมแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น..... | 30 |
| 3.2 การปลูกชั้นผลึก Buffer GaAs..... | 30 |
| 3.3 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก..... | 32 |
| 3.4 การศึกษาอิทธิพลของค่าอัตราส่วน BEP ของ As ₄ /In..... | 32 |
| 3.5 การศึกษาอิทธิพลของค่าอัตราการปลูกผลึก..... | 32 |
| 3.6 การวิเคราะห์ผล..... | 34 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์..... | 35 |
| 4.1 การตรวจสอบค่าความหนาของชั้นผลึกอิพิแทกซ์ InAs ที่ปลูกได้..... | 35 |
| 4.2 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก..... | 36 |
| 4.3 การศึกษาอิทธิพลของค่าอัตราส่วน BEP ของ As ₄ /In..... | 39 |
| 4.4 การศึกษาอิทธิพลของค่าอัตราการปลูกผลึก..... | 41 |
| บทที่ 5 สรุป..... | 45 |
| บทที่ 6 ข้อเสนอแนะ..... | 46 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 47 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

| | | |
|--------------|---|----|
| ตารางที่ 2.1 | ตารางเปรียบเทียบชนิดของ Effusion Cell และชนิดของลำโมเลกุล ที่ได้จากวัสดุชนิดต่างๆ..... | 11 |
| ตารางที่ 2.2 | รายการส่วนประกอบพื้นฐานใน Growth Chamber ของระบบ MBE..... | 15 |
| ตารางที่ 2.3 | อุณหภูมิจุดระเหิดของสารประกอบ III-V ชนิดต่างๆ..... | 16 |
| ตารางที่ 2.4 | ตัวแปรทางกายภาพของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V ชนิด 2 ธาตุ..... | 19 |
| ตารางที่ 2.5 | ค่าแถบพลังงานของตัวอย่างสารประกอบชนิด 3 ธาตุและ 4 ธาตุ..... | 20 |
| ตารางที่ 3.1 | เงื่อนไขในการทดลองศึกษาอิทธิพลของค่าอัตราการผลิต..... | 33 |



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

| | | หน้า |
|-------------|---|------|
| รูปที่ 2.1 | ภาพโครงสร้างชุดระบบ MBE ของ RIBER รุ่น 32 P..... | 5 |
| รูปที่ 2.2 | ชุดระบบ MBE ที่ติดตั้งที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย..... | 5 |
| รูปที่ 2.3 | แผนภาพโครงสร้าง Knudsen cell..... | 6 |
| รูปที่ 2.4 | ภาพโครงสร้างของ Ga-trapping cap..... | 8 |
| รูปที่ 2.5 | แผนภาพโครงสร้างของ Cracker cell..... | 9 |
| รูปที่ 2.6 | ภาพของ As Valve Cracker cell..... | 10 |
| รูปที่ 2.7 | ภาพโครงสร้างของ Effusion cell ชนิด Gas injector cell..... | 11 |
| รูปที่ 2.8 | แผนภาพอธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลงความเข้มของอิเล็กตรอนในขณะที่ทำการปลูกผลึก..... | 13 |
| รูปที่ 2.9 | แผนภาพความสัมพันธ์ของรูปแบบ RHEED และอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐาน (100) GaAs, InP และ InAs ภายใต้ไอของ Dimer..... | 13 |
| รูปที่ 2.10 | ปฏิกิริยาของการเกิดผลึก GaAs ในกรณี Ga-As ₂ -(100) GaAs..... | 17 |
| รูปที่ 2.11 | ปฏิกิริยาของการเกิดผลึก GaAs ในกรณี Ga-As ₄ -(100) GaAs..... | 18 |
| รูปที่ 2.12 | แผนภาพโครงสร้างแบบ Zinblend..... | 19 |
| รูปที่ 2.13 | แผนภาพปรากฏการณ์ฮอลล์..... | 21 |
| รูปที่ 2.14 | ภาพโครงสร้างของตัวอย่างสำหรับการวัดค่าสมบัติเชิงไฟฟ้าวิธี van der PAUW..... | 23 |
| รูปที่ 2.15 | แผนภาพการวัดค่าสภาพต้านทานในวิธีการวัดของ van der PAUW..... | 24 |
| รูปที่ 2.16 | แผนภาพการวัดค่าแรงดันฮอลล์ในวิธีการวัดของ van der PAUW..... | 25 |
| รูปที่ 3.1 | รูปแบบของ RHEED จากผิวหน้าแผ่นผลึก GaAs สะอาดที่อุณหภูมิ 580°C..... | 31 |
| รูปที่ 3.2 | แผนภาพโครงสร้างตัวอย่างที่สร้างในการทดลอง..... | 33 |
| รูปที่ 3.3 | แผนภาพจำลองกระบวนการทำงานของการตั้งค่าอุณหภูมิและชัตเตอร์ในการทดลอง..... | 34 |
| รูปที่ 4.1 | ภาพตัดขวางของตัวอย่างผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน..... | 35 |
| รูปที่ 4.2 | ภาพผิวหน้าของชั้นผลึก InAs ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐาน GaAs โดยค่าอัตราส่วน BEP ของ As ₄ /In มีค่าเท่ากับ 20 และค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก : (ก) 400°C, (ข) 440°C, (ค) 480°C และ (ง) 530°C..... | 36 |
| รูปที่ 4.3 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคล่องตัวพาหะ ค่าความเข้มข้นอิเล็กตรอน และค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก โดยค่าอัตราส่วน BEP ของ As ₄ /In มีค่าเท่ากับ 20..... | 37 |

| | | |
|-------------|--|----|
| รูปที่ 4.4 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันฮอลล์และค่าความเข้มข้นแม่เหล็กของตัวอย่าง ในการศึกษาอิทธิพลของค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก โดยค่าอัตราส่วน BEP ของ As_4/In มีค่าเท่ากับ 20..... | 38 |
| รูปที่ 4.5 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไวผลตอบสนองแม่เหล็กและค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐาน ขณะทำการปลูกผลึก โดยค่าอัตราส่วน BEP ของ As_4/In มีค่าเท่ากับ 20..... | 38 |
| รูปที่ 4.6 | ภาพผิวหน้าของชั้นผลึก InAs โดยค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก $480^{\circ}C$ และค่าอัตราส่วน BEP ของ As_4/In มีค่า : (ก) 14, (ข) 22, (ค) 32 และ (ง) 36 | 39 |
| รูปที่ 4.7 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคล่องตัวพาหะ ค่าความเข้มข้นอิเล็กตรอน และค่าอัตราส่วน BEP ของ As_4/In โดยค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกขณะทำการปลูกผลึก $480^{\circ}C$ | 40 |
| รูปที่ 4.8 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความไวผลตอบสนองแม่เหล็กและค่าอัตราส่วน BEP ของ As_4/In โดยค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกขณะทำการปลูกผลึก $480^{\circ}C$ | 41 |
| รูปที่ 4.9 | ภาพผิวหน้าของชั้นผลึก InAs โดยค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก $480^{\circ}C$ ค่าอัตราส่วน BEP ของ As_4/In มีค่า 22-32 และค่าอัตราส่วนการปลูกผลึก : (ก) 0.2 ML/วินาที (ข) 0.34 ML/วินาที (ค) 0.4 ML/วินาที และ (ง) 0.6 ML/วินาที | 42 |
| รูปที่ 4.10 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคล่องตัวพาหะ ค่าความเข้มข้นอิเล็กตรอน และค่าอัตราส่วนการปลูกผลึก โดยค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก $480^{\circ}C$ และค่าอัตราส่วน BEP ของ As_4/In มีค่า 22-32 | 43 |
| รูปที่ 4.11 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไวผลตอบสนองแม่เหล็กและค่าอัตราส่วนการปลูกผลึก ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก $480^{\circ}C$ และค่าอัตราส่วน BEP ของ As_4/In มีค่า 22-32..... | 43 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญสัญลักษณ์

| | |
|----------|---|
| AlAs | : Aluminium Arsenide |
| AlP | : Aluminium Phosphide |
| AlSb | : Aluminium Antimonide |
| AlInAs | : Aluminium Indium Arsenide |
| AlGaInAs | : Aluminium Gallium Indium Arsenide |
| E_g | : Bandgap Energy |
| GaAs | : Gallium Arsenide |
| GaP | : Gallium Phosphide |
| GaSb | : Gallium Antimonide |
| GaInAsP | : Gallium Indium Arsenide |
| GaInAsP | : Gallium Indium Arsenide Phosphide |
| InAs | : Indium Arsenide |
| InP | : Indium Phosphide |
| InSb | : Indium Antimonide |
| MBE | : Molecular Beam Epitaxy |
| MOCVD | : Metal-organic Chemical Vapor Deposition |
| MOVPE | : Metal-organic Vapor Phase Epitaxy |
| MQW | : Multiquantum Well |
| RHEED | : Reflection High Energy Electron Diffraction |
| SLQW | : Strained Layer Quantum Well |
| SQW | : Single Quantum Well |
| UHV | : Ultra-high vacuum |

บทที่ 1

บทนำ

InAs เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญสำหรับอิเล็กทรอนิกส์ความเร็วสูงและออปโตอิเล็กทรอนิกส์ในช่วงอินฟราเรด (Infrared) เนื่องจากสมบัติพิเศษของ InAs ที่มีค่าความคล่องตัวพาหะ (Mobility) สูงสำหรับทรานซิสเตอร์และสิ่งประดิษฐ์เซ็นเซอร์สนามแม่เหล็ก (Magnetic sensor) นอกจากนี้ InAs มีค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Band-gap) มีค่าอยู่ในช่วงอินฟราเรดและช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบตรง (Direct band-gap) จึงเหมาะสมสำหรับใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสง (Light source) [1] และตัวตรวจจับแสง (Photodetector) [2] ในช่วงอินฟราเรดสำหรับการตรวจสอบปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ และการวิเคราะห์หาปริมาณของก๊าซบางชนิดได้ [3] โดยเฉพาะ InAs เป็นที่ต้องการในการสร้าง Hall sensor [4-8] ในเครื่องมือต่างๆ อย่างแพร่หลาย เช่น อุปกรณ์ส่วนวัดความเร็วรอบในรถยนต์ ส่วนวัดความเร็วรอบในอุปกรณ์เก็บข้อมูลของเครื่องคอมพิวเตอร์ ฯลฯ ซึ่งแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นสำหรับการสร้าง Hall Sensor นั้นนิยมใช้ GaAs เนื่องจากราคาถูกและการใช้แผ่นผลึกฐาน GaAs มีข้อดีคือสามารถลดผลของ Anti-phase domain (APD) ที่เกิดขึ้นในการปลูกผลึกที่มีค่าคงตัวผลึก (Lattice constant) แตกต่างไปจากค่าของแผ่นผลึกฐาน สำหรับวิธีการเตรียมผลึก InAs นั้นที่เหมาะสมที่สุด ได้แก่ วิธีการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล (Molecular-beam epitaxy : MBE) ซึ่งข้อดีของวิธีการปลูกอพิแทกซีจากลำโมเลกุลคือระบบการปลูกอพิแทกซีจากลำโมเลกุลสามารถใช้วัสดุตั้งที่อยู่ในรูปของแข็ง โดยการเก็บรักษาวัสดุตั้งและการใช้งานได้ง่าย นอกจากนี้ระบบ MBE มีอุปกรณ์ Quadrupole Mass spectrometer ติดตั้งอยู่ภายในระบบ ทำให้สะดวกในการวิเคราะห์สภาวะของก๊าซต่างๆ ในขณะที่ทำการปลูก รวมถึง Reflection high energy electron diffraction (RHEED) ทำให้สามารถวิเคราะห์คุณภาพของผิวผลึก และค่าอัตราการปลูกผลึกในขณะที่ทำการปลูกได้ ซึ่งในปัจจุบันผู้ผลิตรายใหญ่ที่สุดของโลก ได้แก่ บริษัท ASAHI ประเทศญี่ปุ่นได้ผลิต Hall Sensors ของ InAs ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs โดยใช้การปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล เนื่องจากมีความปลอดภัยสูงและความแม่นยำในกระบวนการผลิตสูง [9]

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุลในการปลูกผลึก InAs บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น (100) GaAs โดยศึกษาอิทธิพลของค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นขณะทำการปลูกผลึก ค่าอัตราส่วน Beam equivalent Pressure (BEP) ของ As₄/In และค่าอัตราการปลูกผลึกที่มีต่อคุณสมบัติเชิงไฟฟ้าของผลึก InAs ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น (100) GaAs พร้อมทั้งการวิเคราะห์โครงสร้างผิว (Surface morphology) ที่ได้จากการปลูกผลึกด้วยเงื่อนไขต่างๆ รวมถึงค่าความไวของผลตอบสนองในปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall sensitivity) ของตัวอย่างที่ได้จากการปลูกผลึกในเงื่อนไขแต่ละกรณี โดยเนื้อหาสาระของรายงานฉบับนี้มีดังนี้ ในบทที่ 2 กล่าวถึงความรู้พื้นฐานของการปลูกผลึกอพิแทกซีจาก

ถ้าโมเลกุล ได้แก่ รายละเอียดของโครงสร้างชุดระบบการปลูกผลึกอิตีแทกซีจากถ้าโมเลกุล กลไกการปลูกผลึกอิตีแทกซีจากถ้าโมเลกุล โครงสร้างและคุณสมบัติเชิงไฟฟ้าของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V การวัดคุณสมบัติเชิงไฟฟ้าวิธี Van der PAUW ในบทที่ 3 กล่าวถึงรายละเอียดและขั้นตอนการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นฐานขณะปลูกผลึก ค่าอัตราส่วน BEP ของ As₄/In และค่าอัตราการปลูกผลึกที่มีต่อสมบัติของผลึก InAs ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐาน GaAs ในบทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ ในบทที่ 5 เป็นสรุปผลการทดลอง และในบทที่ 6 ข้อเสนอแนะจากงานวิจัยนี้และแนวทางในการพัฒนาผลจากการทดลองที่ได้เพื่อการใช้งานต่อไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2 ความรู้พื้นฐาน

สำหรับในบทนี้เป็นการทบทวนความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้โดยสังเขป ซึ่งมีเนื้อหาสาระเกี่ยวกับเทคนิคการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy : MBE) กลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการปลูกผลึกอพิแทกซ์วิธี MBE ความรู้พื้นฐานของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V และการวัดคุณสมบัติเชิงไฟฟ้าวิธี Van der Pauw

2.1 การปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy : MBE)

การปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุลหรือ MBE เป็นเทคนิคการปลูกชั้นผลึกสารประกอบกึ่งตัวนำบนผิวของแผ่นผลึกฐาน (Substrate) ที่เป็นผลึกเดี่ยว (Single Crystal) โดยการพ่นลำโมเลกุลของก๊าซหรืออะตอมของธาตุที่เป็นวัตถุดิบลงบนผิวหน้าแผ่นผลึกฐาน ซึ่งเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลหรืออะตอมที่เป็นองค์ประกอบของสารประกอบสารกึ่งตัวนำ โมเลกุลเหล่านั้นได้จากการระเหยหรือระเหิด (Evaporation) วัสดุที่มีธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารประกอบ (Constituent species) ภายใต้สภาวะสุญญากาศระดับสูงพิเศษ (Ultra-high Vacuum) ปฏิกิริยาของการเกิดเป็นสารประกอบนี้เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน ค่าอัตราส่วนของสารประกอบและคุณสมบัติกายภาพของชั้นผลึกอพิแทกซ์ที่ปลูกได้นั้นขึ้นกับเงื่อนไขและตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการปลูกผลึก ได้แก่ อัตราส่วนค่าความดันไอของลำโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบ อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูก ฯลฯ เป็นต้น นอกจากนี้อัตราการปลูกนี้ขึ้นค่าความดันไอขององค์ประกอบที่มีคุณสมบัติการเกาะติด (impinging) ผิวหน้าแผ่นผลึกฐาน สำหรับข้อดีของการปลูกผลึกอพิแทกซ์วิธี MBE ได้แก่ การเตรียมผิวแผ่นผลึกฐานสามารถทำได้ง่าย โดยวิธีการทำความสะอาดด้วยความร้อน (Thermal cleaning) ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ความสามารถในการตรวจสอบ (Monitoring) โครงสร้างผิว (Surface structure) ที่สามารถกระทำได้ตลอดเวลาตั้งแต่ก่อนเริ่มต้นการปลูกผลึกจนถึงสิ้นสุดกระบวนการปลูกผลึก นอกจากนี้การปลูกผลึกอพิแทกซ์วิธี MBE ที่ดำเนินการในระบบสุญญากาศระดับสูงพิเศษ ทำให้ผลึกที่ปลูกได้นั้นมีความบริสุทธิ์สูงกว่าวิธีการอื่นๆ เนื่องจากก๊าซต่างๆ ที่มีผลกระทบบต่อคุณภาพผลึก ได้แก่ H_2O , O_2 , CO และ CO_2 เป็นต้น มีปริมาณที่ต่ำมาก ในสภาวะสุญญากาศระดับสูงพิเศษ จึงให้เราสามารถควบคุมคุณภาพของผลึกได้ตามที่เราต้องการ

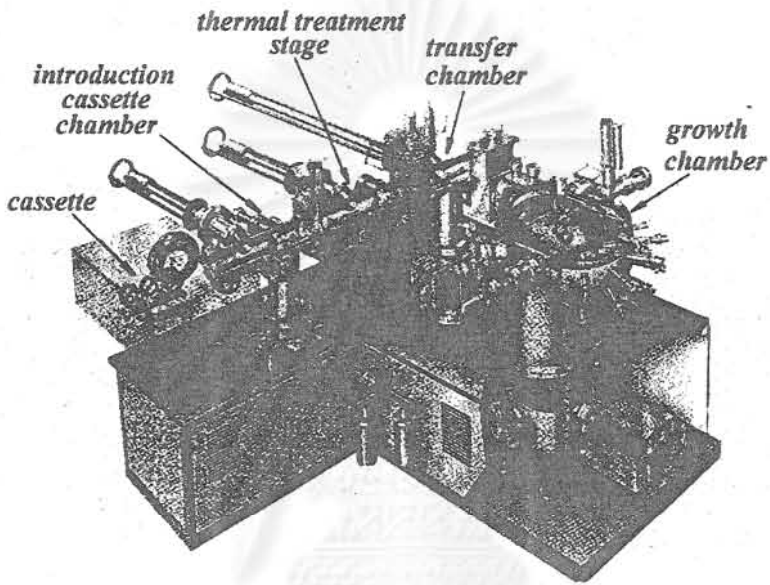
2.1.1 ชุดระบบการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุล

ชุดระบบการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุลที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชุดระบบ MBE ของบริษัท RIBER รุ่น 32 P ซึ่งมีลักษณะเป็น โมดูล (Module) โดยประกอบด้วยส่วน Cassette Introduction Chamber

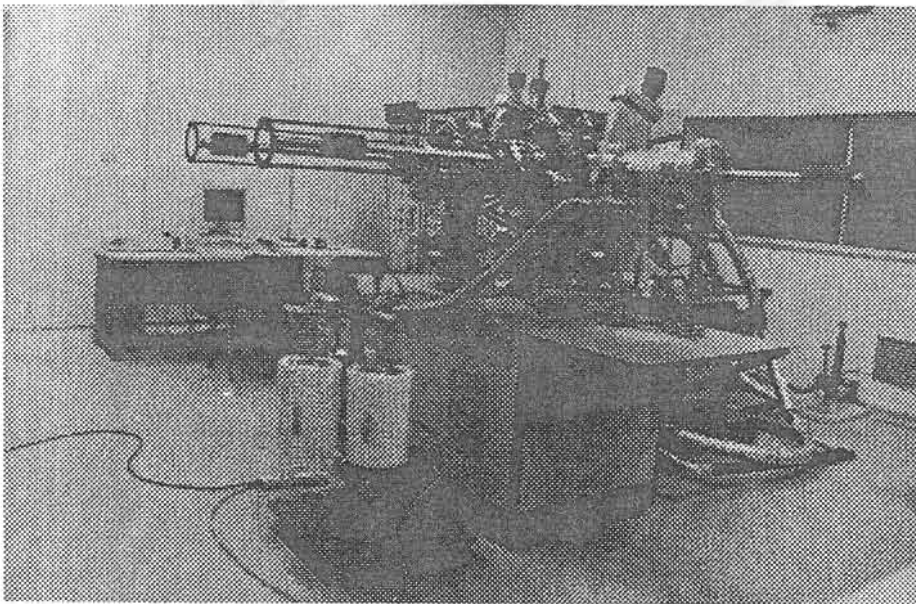
ส่วน Thermal Treatment Stage ส่วน Transfer Buffer Chamber และส่วน Growth Chamber ดังแผนภาพตามรูปที่ 2.1 โมดูลแต่ละส่วนที่ต่อกันนี้มี Gate Valve ต่อขึ้นกลางระหว่างโมดูล โดยจะเปิด Gate Valve ให้ Cassette ที่เป็น Carrier ผ่านเข้าออกจากโมดูลส่วนหนึ่งไปยังโมดูลอีกส่วนหนึ่ง และเพื่อปิดแยกให้โมดูลแต่ละส่วนเป็นอิสระจากกันและให้การรักษาสภาวะสุญญากาศในแต่ละส่วนเป็นอิสระจากกัน ส่วน Cassette introduction chamber เป็นส่วนติดต่อระหว่างภายนอกที่มีสภาวะความดันบรรยากาศปกติ (760 torr) และส่วน Thermal treatment stage ซึ่งมีสภาวะสุญญากาศในระดับ 10^{-10} torr โดยส่วน Cassette introduction chamber นี้มีปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) จำนวน 2 ชุดคือ Rotary Pump และ Sorption Pump ทำหน้าที่ปั๊มเพื่อสร้างสภาวะสุญญากาศระดับปานกลาง (10^{-4} torr) Cassette จากภายนอกสามารถลำเลียงผ่านโมดูลส่วนนี้ เพื่อลำเลียงเข้าสู่ระบบ MBE ต่อไป ในทำนองกลับกันการลำเลียง Cassette ออกจากระบบ MBE ก็ดำเนินการผ่านส่วน Cassette introduction chamber เช่นเดียวกัน และทำการปรับสภาวะจากสุญญากาศสู่สภาวะบรรยากาศปกติด้วยการเติมก๊าซไนโตรเจนสะอาด ส่วน Thermal treatment stage เป็นส่วนที่ใช้ในการทำ Outgassing แผ่นผลึกฐานก่อนการปลูกผลึก เพื่อไล่ความชื้นและขจัดออกไซด์ (บางส่วน) ที่ผิวของแผ่นผลึกฐาน ในส่วนนี้มีปั๊มสุญญากาศจำนวน 2 ชุดคือ Ion Pump และ Ti sublimation Pump ส่วน Transfer buffer chamber เป็นส่วนที่ใช้ในการลำเลียง Substrate Holder เข้าหรือออกจากส่วน Growth Chamber และส่วน Growth Chamber เป็นส่วนที่กระบวนการปลูกผลึกก็พิทักษ์ดำเนินการในโมดูลส่วนนี้ โดยแผนภาพของส่วน Growth Chamber ดังรูปที่ 2.1 ส่วนประกอบต่างๆ มีดังนี้ ส่วน Cyopanel เป็นช่องเปิดสำหรับรับไนโตรเจนเหลวจากภายนอก เพื่อทำหน้าที่หล่อเย็นระบายความร้อนที่เกิดจาก Effusion Cell ให้แก่ Growth chamber นอกจากนี้ไนโตรเจนเหลวยังช่วยทำให้สภาวะสุญญากาศในส่วน Growth Chamber คี้น เนื่องจากความเย็นของไนโตรเจนเหลวทำให้มวลของบรรยากาศภายในมีความหนาแน่นมากขึ้น ทำให้ระบบปั๊มสุญญากาศสามารถทำงานได้ดียิ่งขึ้น สำหรับวัสดุคิบัที่ใช้ในระบบของคณะผู้วิจัยได้แก่ Ga, Al, In, As, P (ได้จากการสลายตัวของ GaP ใน Knuden cell ที่มี Ga-trapping Cap) และ Si (สารเจือปนชนิดเอ็น : n-type Dopant)

นอกจากนี้ในส่วน Growth Chamber ยังมีอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ชุด Reflection High Energy Electron Diffraction หรือ RHEED, Gas Analyzer หรือ Quadupole Mass Spectrometry และ Ionization Gauge เป็นอุปกรณ์หลักพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อระบบ MBE โดย RHEED นี้เป็นเครื่องมือในการตรวจสอบโครงสร้างผิว นอกจากนี้ RHEED ยังสามารถใช้ในการควบคุมค่าความหนาของชั้นผลึกที่ปลูกได้จากปรากฏการณ์ RHEED Intensity oscillation ที่เกิดขึ้นในเทคนิค Phase-locked epitaxy หรือ PLE [10] และ Migration Enhanced epiatxy หรือ MEE [11] ที่สามารถควบคุมค่าความหนาได้ในระดับ Monolayer ของผลึกที่ปลูก ส่วน Gas Analyzer เป็นเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบสภาวะบรรยากาศภายใน Growth Chamber และ Ionization Gauge เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดเทียบค่าความดันไอของลำโมเลกุลต่างๆ ที่ใช้ในการปลูกผลึกแต่ละครั้ง เพื่อปรับแต่งเงื่อนไขค่าความดันไอขององค์ประกอบต่างๆ ในการปลูกผลึกแต่

ละครั้งให้ได้เงื่อนไขตามที่ต้องการ ในปัจจุบันระบบ MBE ได้มีการพัฒนาให้สามารถใส่อุปกรณ์อื่นๆ สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ที่เข้าไปในระบบ MBE ได้แก่ Ellipsometer ที่ใช้ในการควบคุมค่าความหนา (Thickness) ซึ่งทำให้เกิดความคล่องตัวและความต่อเนื่องในการทำงาน อันช่วยให้สามารถควบคุมการปลูกผลึก การวิเคราะห์โครงสร้างและสมบัติของผลึกที่ปลูกได้อย่างรวดเร็ว ทำให้การดำเนินการสามารถทำได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว



รูปที่ 2.1 ภาพโครงสร้างชุดระบบ MBE ของ RIBER รุ่น 32 P



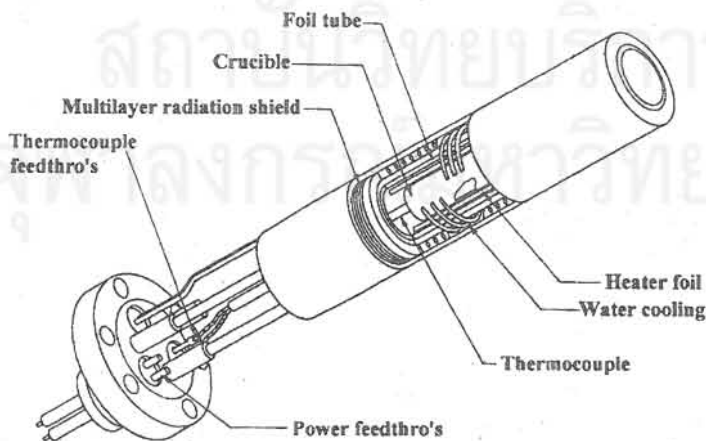
รูปที่ 2.2 ชุดระบบ MBE ที่ติดตั้งที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.2 Effusion Cell

Effusion Cell เป็นอุปกรณ์หลักสำคัญของระบบ MBE ในการผลิตลำโมเลกุลขององค์ประกอบจากวัตถุดิบที่ใช้ในการปลูกผลึก ซึ่งวัตถุดิบนี้เป็นธาตุบริสุทธิ์หรือสารประกอบที่มีธาตุที่เป็นองค์ประกอบก็ได้ และความสำคัญของ Effusion Cell นั้นเป็นกุญแจสำคัญที่ทำให้การปลูกผลึกวิธี MBE มีข้อดีเด่นที่เหนือกว่าเทคนิคอื่นๆ โดย Effusion Cell แต่ละชนิดนั้นมีความเหมาะสมสำหรับวัสดุแต่ละชนิดแตกต่างกันไป ซึ่งในรายงานวิจัยนี้นำเสนอเฉพาะ Effusion Cell ที่เกี่ยวข้องกับการปลูกผลึกอิมแพกซ์ของ GaAs และ InP เท่านั้น

2.1.2.1 Knudsen Cell

Knudsen Cell หรือ K-cell เป็น Effusion Cell แบบที่ง่ายที่สุด ซึ่งใช้ในการระเหยหรือระเหิด (Evaporate) วัตถุดิบให้เป็นลำโมเลกุลโดยใช้พลังงานจากความร้อน สำหรับโครงสร้างของ Knudsen Cell ดังในรูปที่ 2.3 วัตถุดิบที่ใช้ถูกบรรจุไว้ในเบ้าหลอม (Crucible) ซึ่งทำจากวัสดุ Pyrolytic boron nitride หรือ PBN โดยเบ้าหลอมนี้ถูกล้อมรอบด้วยขดลวดความร้อน (Heating elements) ขดลวดความร้อนเป็นตัวกำเนิดความร้อนให้แก่เบ้าหลอมจากการผ่านกระแสไฟฟ้าและที่ใต้เบ้าหลอมนี้มีเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ติดตั้งอยู่ เพื่อใช้ในการตรวจสอบอุณหภูมิและในการควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดความร้อนให้ได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ โดยอาศัยสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลต่อเข้ากับเครื่องควบคุมแบบ PID ที่ทำหน้าที่ควบคุมแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้ขดลวดความร้อนของ Effusion cell เพื่อให้เบ้าหลอมมีอุณหภูมิตามที่กำหนด สำหรับ K-Cell ที่มีขนาดของเบ้าหลอมขนาดใหญ่จำเป็นต้องมีท่อนำระบายความร้อนอยู่ภายใน เพื่อให้ความร้อนที่เกิดขึ้นไม่ไปรบกวนส่วนอื่นๆ อีกด้วย



รูปที่ 2.3 แผนภาพโครงสร้าง Knudsen Cell

สำหรับการควบคุมปริมาณของจำนวนโมเลกุลที่พ่นออกจาก Knudsen Cell ควบคุมได้จาก อุณหภูมิของขดลวดความร้อนภายใน Knudsen Cell ซึ่งปริมาณของจำนวน โมเลกุลของสารที่พ่นออกจาก Knudsen Cell สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$J = 1.118 \times 10^{22} \frac{pA}{l^2 \sqrt{MT}} \quad \text{molecules/cm}^2\text{-s} \quad (2.1)$$

โดย p คือค่าความดันไอของธาตุที่อุณหภูมิกำหนดมีหน่วยเป็นทอร์ (Torr)

A คือพื้นที่บริเวณปากช่องเปิดของ Knudsen Cell (Cell orifice area) มีหน่วยเป็น ตร. ซม.

l คือค่าระยะห่างจากปากช่องเปิดของ Knudsen Cell ถึงผิวหน้าของผลึกฐานมีหน่วยเป็น ซม.

M คือค่ามวลโมเลกุลขององค์ประกอบที่เป็นวัตถุดิบมีหน่วยเป็น AMU

T คือค่าอุณหภูมิจากสมการของภาชนะบรรจุใน Knudsen Cell มีหน่วยเป็นเคลวิน (K)

สำหรับอัตราการเกิดผลึก (Growth rate) ของการปลูกผลึกวิธี MBE สำหรับสารประกอบกลุ่ม III-V นี้ขึ้นกับจำนวนโมเลกุลของธาตุหมู่ III เช่นกรณีของ GaAs อัตราการเกิดผลึกสามารถคำนวณได้จาก สมการ

$$R = \alpha J_{\text{Ga}} \quad (2.2)$$

โดย R คืออัตราการเกิดผลึกมีหน่วยเป็น ไมครอน/ชั่วโมง

α คือค่าคงที่ ซึ่งค่าคงที่นี้ขึ้นกับค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกและทิศทางผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน

กลไกการเกิดผลึกของสารประกอบกลุ่ม III-V นั้นถูกกำหนดโดยอะตอมของธาตุหมู่ III ในสภาวะของก๊าซที่ถูกพ่นไปยังผิวหน้าของผลึกแผ่นฐานเป็นหลัก เนื่องจากอะตอมของธาตุหมู่ III มีค่าสัมประสิทธิ์การเกาะติด (Sticky coefficient) สูงกว่าอะตอมของธาตุหมู่ V โดยกลไกการเกิดผลึกขึ้นกับอัตราการพ่นของธาตุ III จาก K-cell ที่เกาะลงบนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน จากนั้นจะจับตัวรวมตัวกับอะตอมของธาตุหมู่ V ในรูปของสารประกอบเรียงตัวกันเป็นผลึกตามโครงสร้างของแผ่นผลึกฐาน ตัวอย่างเช่น In-As ที่ได้จากลำโมเลกุลของ In และ As₂ หรือ As₄ และ Ga-As ที่ได้จากลำโมเลกุลของ Ga และ As₂ หรือ As₄ ทำปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของผลึกแผ่นฐาน แล้วจึงก่อให้เกิดพันธะขึ้นเป็นโครงสร้างผลึก โดยกระบวนการเกิดผลึกนี้ขึ้นกับพลังงานกระตุ้นที่ให้แก่โมเลกุลเหล่านั้น ได้แก่ ความร้อนจากอุณหภูมิของผลึกแผ่นฐานและพลังงานจลน์ที่ได้จาก Knudsen cell

อย่างไรก็ตาม Knudsen cell นั้นมีขีดจำกัดสำหรับสารหรือธาตุบางชนิด เนื่องจากไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตลำโมเลกุลของสารหรือธาตุที่มีค่าความดันไอสูงได้ ตัวอย่างเช่น P, S, Se เป็นต้น เนื่องจากการควบคุมค่าความดันไอทำได้ยาก ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนา Knudsen Cell ที่มีสมบัติพิเศษ

ได้แก่ Valved Cracker Cell สำหรับสารเหล่านี้ แต่อย่างไรก็ดี Valved Cracker Cell นั้นมีราคาแพงและโครงสร้างซับซ้อน สำหรับสิ่งประดิษฐ์อีกชนิดหนึ่งที่ได้ออกแบบมาเพื่อใช้ร่วมกับ Knudsen cell แบบธรรมดา นี้ เพื่อใช้ในการผลิตดimer โมเลกุลชนิด Dimer ของ As (As_2) และ P (P_2) ได้แก่ Ga-trapping cap วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการนี้ เป็นสารประกอบ GaAs และ GaP เนื่องจากมีราคาถูกและอุณหภูมิของการสลายตัวมีค่าไม่สูงเกินไป และค่าความแตกต่างของค่าความดันไอของสารประกอบในสภาวะสมดุลที่มีค่าต่ำกว่าไอของ P_2 ที่อุณหภูมิเดียวกัน โดยอุณหภูมิมีค่าสูงกว่าค่าอุณหภูมิจุดระเหิดของสารประกอบ Ga-trapping cap นั้นทำหน้าที่กักไอของสารประกอบ GaP ไว้ภายในภาชนะหรือ Crucible ของ Knudsen cell โดย Ga-trapping cap ช่วยในการรักษาภาวะสมดุลของไอในสภาวะที่เกิดการสลายตัว (decomposition) ของสารประกอบ สำหรับการสลายตัวของสารประกอบดังกล่าวนี้เกิดขึ้นจากพลังงานความร้อนหรือการทำให้สารประกอบอยู่ในสภาวะอุณหภูมิสูง ซึ่งในสภาวะสมดุลนี้ สารประกอบกลุ่ม III-V มีจำนวนหรือปริมาณของอะตอมธาตุหมู่ III จำนวนมากกว่าธาตุหมู่ V และในสภาวะอุณหภูมิสูงนี้ ธาตุหมู่ V อยู่ในรูปของ Dimer (V_2) เป็นส่วนใหญ่ แต่เนื่องจากค่าความดันไอของโมเลกุล Dimer ของหมู่ V นั้นมีค่าสูงกว่า ทำให้โมเลกุลของ Dimer ที่เกิดขึ้นถูกพ่นออกมาเป็นโมเลกุลหลักเพียงอย่างเดียว โครงสร้างของ Ga-trapping cap ตามรูปที่ 2.4

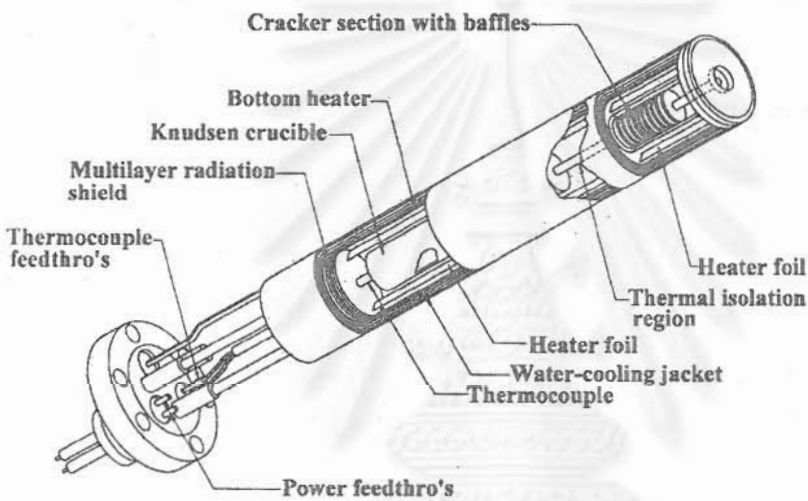


รูปที่ 2.4 ภาพโครงสร้างของ Ga-trapping cap [12]

2.1.2.2 Cracker Cell

Cracker Cell มีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Dissociation Cell เป็น Effusion Cell ที่ออกแบบเพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดดimer โมเลกุลของธาตุหมู่ V ชนิด Dimer (V_2) ซึ่งตามปกติดimer โมเลกุลของธาตุหมู่ V ที่ได้จาก Effusion Cell ตามปกติเป็นชนิด Tetramer (V_4) (ตัวอย่างเช่น As มี As_2 เป็นโมเลกุล dimer และ As_4

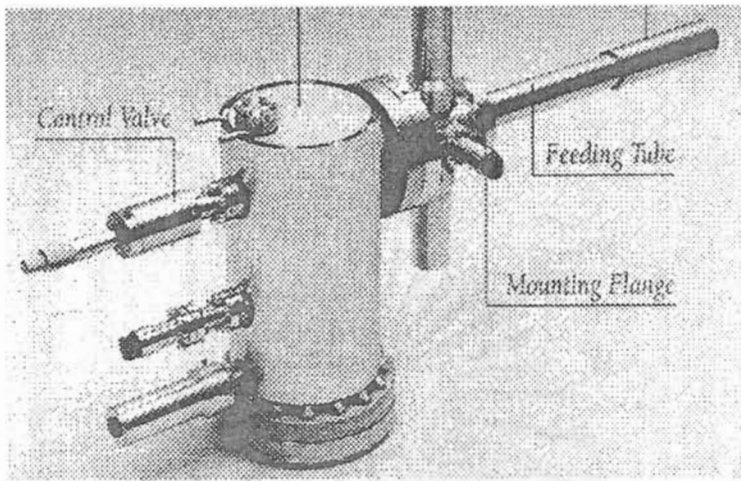
เป็นโมเลกุล Tetramer) โครงสร้างของ Cracker Cell มีลักษณะคล้ายคลึงกับ Knudsen Cell แต่ Cracker Cell นั้นมี Cracking Zone ซึ่งเป็นส่วนของขดลวดความร้อนที่ให้อุณหภูมิสูงในช่วง 800-1000°C เพื่อทำให้โมเลกุล Tetramer แตกตัวเป็นโมเลกุล Dimer และในการออกแบบนั้นมีข้อควรระวังคือต้องให้ส่วน Cracking Zone อยู่ห่างจาก Crucible หรือ Reservoir ที่บรรจุวัตถุดิบมากเพียงพอ เพื่อมิให้ความร้อนจาก Cracking Zone ซึ่งมีค่าอุณหภูมิสูงรบกวนส่วน Crucible อันมีผลต่อการควบคุมค่าความดันไอได้ ดังนั้น Effusion cell ชนิดนี้จึงมีความยาวกว่า Knudsen Cell และจำเป็นต้องมีส่วนของท่อนำหรือส่วนระบายความร้อนในลักษณะอื่นๆ สำหรับทำหน้าที่เป็นระบบระบายความร้อน (Cooling) เพื่อให้การควบคุมอุณหภูมิในส่วน Crucible สามารถทำได้



รูปที่ 2.5 แผนภาพโครงสร้างของ Cracker Cell

2.1.2.3 Valved Cracker Cell

Valved Cracker Cell เป็น Effusion Cell ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดลำโมเลกุลชนิด Dimer ของธาตุหมู่ V ซึ่ง Valved Cracker Cell มีกลไกของ Nozzle valve ที่ใช้ในการควบคุมค่าความดันไอจากการปรับตำแหน่งของ Valve รวมถึงความสามารถในการปิดกั้นไอไว้ภายใน Reservoir เพื่อไม่ให้ไอออกมาได้ในสภาวะที่เราไม่มีความต้องการ ทำให้มีความคล่องตัวในการกำหนดค่าความดันไอตามเงื่อนไขได้ง่ายและความสามารถในการตัดลำโมเลกุลได้ดีกว่า Effusion Cell ชนิดอื่นๆ โดยเฉพาะการปลูกผลึกของโครงสร้างเฮเทโร (Heterostructure) ที่มีสารประกอบของธาตุหมู่ V ที่ต่างชนิดกัน ข้อดีของ Valved Cracker Cell คือสามารถใช้วัตถุดิบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งแตกต่างจาก Knudsen Cell และ Cracker Cell ซึ่งวัตถุดิบภายในนั้นถูกทำให้กลายเป็นไอระเหยไหลออกมาตลอดเวลาถึงแม้ว่า Shutter อยู่ในตำแหน่งปิดก็ตาม

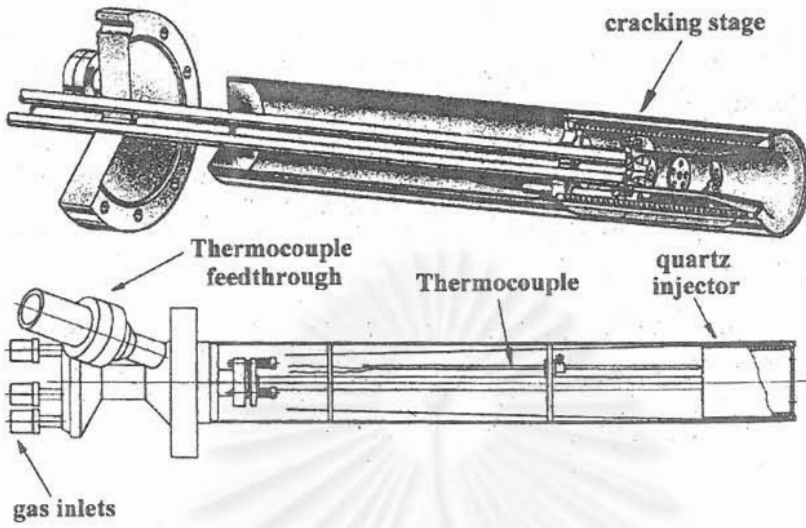


รูปที่ 2.6 ภาพของ Asenic Valve Cracker Cell [13]

2.1.2.4 Gas Injector Cell

Gas Injector Cell เป็น Effusion Cell ที่ใช้ก๊าซเป็นวัตถุดิบ ซึ่งอยู่ในรูปของ Hydride สำหรับแหล่งจ่ายธาตุหมู่ V เช่น PH_3 , AsH_3 และ Organic compound สำหรับแหล่งจ่ายธาตุหมู่ III ตัวอย่างได้แก่ TMGa และ TMIIn เป็นต้น โดยโครงสร้างของ Gas Injector Cell มีลักษณะคล้ายคลึงกับ Knudsen Cell ต่างกันแค่ขดลวดความร้อนที่ใช้ในนั้นมีอุณหภูมิสูงกว่า เพื่อให้ก๊าซที่ไหลผ่านแตกตัวออกเป็นโมเลกุลแบบ Dimer หรือ Tetramer สำหรับโมเลกุลธาตุหมู่ V และอะตอมเดี่ยวสำหรับธาตุหมู่ III ควบคุมได้จากค่าอุณหภูมิในส่วน Cracking Zone สำหรับข้อดีของการใช้ก๊าซเป็นวัตถุดิบคือความต่อเนื่องและความสะดวกในการเติมก๊าซวัตถุดิบ โดยไม่มีความจำเป็นในการทำให้ระบบร่วก่อนการเติมวัตถุดิบเหมือนระบบ MBE ทั่วๆ ไป เนื่องจากวัตถุดิบนั้นถูกเก็บไว้ในท่อก๊าซที่ต่อเข้าระบบ MBE ซึ่งสามารถปิดท่อของระบบการป้อนก๊าซที่ต่อเข้าระบบและทำการเปลี่ยนท่อก๊าซได้ โดยไม่กระทบกับสภาวะสุญญากาศของ Growth Chamber แต่อย่างไรก็ตามการใช้ก๊าซเป็นวัตถุดิบนั้นมีความจำเป็นที่ต้องติดตั้งระบบปั๊มสุญญากาศที่มีขนาดกำลังสูงเพียงพอและต้องเป็นปั๊มชนิดที่คงทนต่อการกัดกร่อนของก๊าซเหล่านั้น

คุณภาพของลำโมเลกุลที่ได้จาก Effusion Cell นั้นมีผลต่อคุณภาพและความสม่ำเสมอของผลึก ดังนั้นลำโมเลกุลที่ได้นั้นต้องมีเสถียรภาพ (Stable) ความสม่ำเสมอ ความสะอาดขององค์ประกอบต่างๆ ของ Effusion Cell และความบริสุทธิ์ของวัตถุดิบที่ใช้ก็มีส่วนสำคัญต่อคุณภาพของลำโมเลกุล ลำโมเลกุลชนิดต่างๆ ของธาตุหมู่ V และชนิด Effusion Cell และวัตถุดิบที่ใช้สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.7 ภาพโครงสร้างของ Effusion cell ชนิด Gas injector Cell [14]

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบชนิด Effusion cell และชนิดของลำโมเลกุลที่ได้จากวัสดุชนิดต่างๆ

| Effusion Cell | ชนิดของลำโมเลกุล | | | | |
|---------------------|------------------|----------|----------|----------|----------|
| | P_2 | As_2 | As_4 | Sb_2 | Sb_4 |
| Knudsen Cell | GaP | GaAs | Solid As | Solid Sb | Solid Sb |
| Cracking Cell | Solid P | Solid As | Solid As | Soild Sb | Soild Sb |
| Valve Cracking Cell | Solid P | Solid As | Solid As | Soild Sb | Soild Sb |
| Gas Injector Cell | PH_3 | AsH_3 | ----- | SbH_3 | ----- |

2.1.3 อุปกรณ์วิเคราะห์

ข้อเด่นของระบบ MBE ที่เหนือกว่าวิธีการปลูกผลึกอิตีแพกซ์วิธีอื่นๆ ในเชิงเทคนิคก็คือสามารถติดตั้งอุปกรณ์วิเคราะห์ต่างๆ เข้ากับระบบได้ ทำให้มีความต่อเนื่องในการตรวจสอบและวิเคราะห์และมีความสะดวก ซึ่งเหมาะสมสำหรับการวิจัยและการผลิตเชิงพาณิชย์ สำหรับในรายงานนี้ขอกล่าวถึงโดยสังเขปเฉพาะอุปกรณ์วิเคราะห์หลักที่เป็นพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับระบบ MBE เท่านั้น

2.1.3.1 Reflection High Energy Electron Diffraction (RHEED)

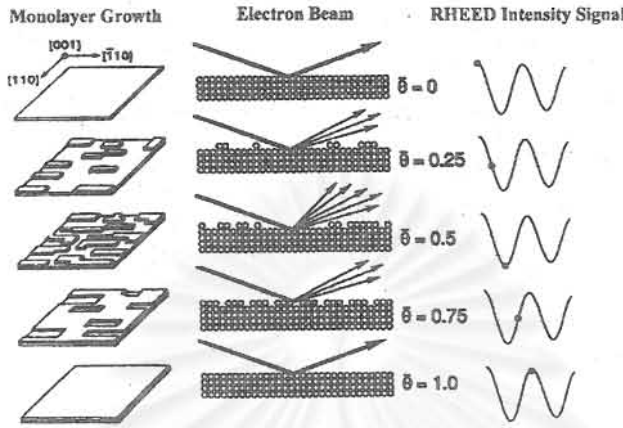
RHEED เป็นเครื่องมือหลักพื้นฐานที่สำคัญชนิดหนึ่งในระบบ MBE ที่ใช้ในการวิเคราะห์และตรวจสอบโครงสร้างผิว (Surface Structure) โดยข้อมูลที่ได้จาก RHEED นี้บ่งบอกรูปแบบของลักษณะโครงสร้างผิวในเชิง Microstructure และความเรียบของผิว (Smoothness) ซึ่งลักษณะรูปแบบ (Pattern) ที่ได้จาก RHEED นี้ขึ้นกับลักษณะการเรียงตัวของอะตอมในโครงร่างผลึกและความเรียบของผิวที่ทำให้ลำอิเล็กตรอนเบี่ยงเบน (Diffraction) ไปในลักษณะ 3 มิติ ทำให้รูปแบบของ RHEED ที่ปรากฏขึ้นแตกต่างกันไป

สำหรับหน้าที่หลักสำคัญของ RHEED ที่สรุปได้มีดังนี้

1. การตรวจสอบผิวหน้าแผ่นผลึกฐานในขณะที่ทำความสะอาดด้วยความร้อน (Thermal Cleaning) ก่อนการปลูกผลึก
2. การควบคุมสภาวะเริ่มต้นของการปลูกผลึก
3. การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผิวในขณะที่ทำการปลูกผลึก

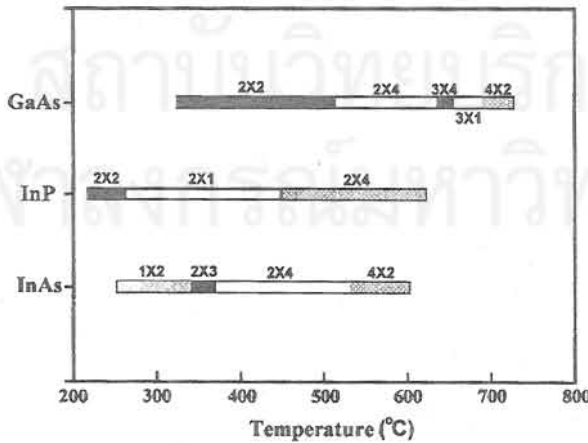
นอกจากนี้ RHEED ยังสามารถใช้ในการสอบเทียบอัตราการปลูกผลึก (Growth Rate Calibration) ได้ เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสง RHEED ในขณะทำการปลูกผลึก ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามรูปที่ 2.8 ตามปกติผิวหน้าของผลึกก่อนการปลูกผลึกมีความเรียบ ทำให้อิเล็กตรอนสามารถสะท้อนผ่านผิวหน้าผลึกที่มีอะตอมเรียงตัวเป็นระเบียบ ซึ่งความเข้มของอิเล็กตรอนที่สะท้อนผ่านไปในการนี้มีความเข้มสูงสุด แต่เมื่อการปลูกผลึกเริ่มต้นขึ้นการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสง RHEED มีค่าลดลงในขณะที่ทำการปลูกผลึกนี้เกิดจากการกระเจิง (Scattering) ของลำอิเล็กตรอน เนื่องจากผลึกที่เกิดขึ้นนั้นบนผิวหน้าของแผ่นผลึกเกิดการเรียงตัวของก้อนผลึกขนาดเล็ก (Cluster) โดยก้อนผลึกขนาดเล็กที่เกิดขึ้นนั้นมีลักษณะกระจัดกระจายไม่เป็นระเบียบ เป็นผลทำให้ความเข้มของลำอิเล็กตรอนมีค่าลดลงจนกระทั่งพื้นที่ของก้อนผลึกขนาดเล็กเหล่านั้นคลุมผิวหน้าของผลึกมากกว่าครึ่งหนึ่ง ความเข้มแสงของ RHEED จะกลับมามีความเข้มเพิ่มขึ้นอีก จนมีค่าสูงสุดเมื่อผลึกเรียงเต็มผิวหน้าแผ่นผลึกฐาน ซึ่งความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของความเข้มและค่าความหนาของผลึกที่เกิดขึ้นนี้มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบคลื่นรูปไซน์ (Sine) โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มหนึ่งรอบในการเปลี่ยนแปลงความหนาหนึ่งชั้นโมเลกุล (Monolayer) ด้วยเหตุนี้เองทำให้สามารถควบคุมค่าความหนาของชั้นผลึกที่ได้ในระดับชั้นโมเลกุล โดย RHEED เป็นเครื่องมือสำคัญในเทคนิค PLE และ MEE ซึ่งเป็นนิยมนำใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน อีกทั้งยังเป็นเทคนิคสำคัญในการสร้างโครงสร้าง Quantum Dot แต่อย่างไรก็ดีเทคนิคนี้มีขีดจำกัดคือการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสงไม่ชัดเจนในการปลูกผลึกของสารประกอบบางชนิดและ

การเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสง RHEED นั้นมีลักษณะที่แตกต่างกันไปตามเงื่อนไขในสภาวะที่แตกต่างกันอีกด้วย สำหรับรายละเอียดต่างๆ จะขอไม่กล่าวถึงในที่นี้



รูปที่ 2.8 แผนภาพอธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลงความเข้มของอิเล็กตรอนในขณะที่ทำการปลูกผลึก

นอกจากนี้รูปแบบ (Pattern) ของ RHEED ที่ได้ของผลึกแต่ละชนิดสามารถบ่งบอกถึงช่วงค่าอุณหภูมิของผิวหน้าผลึกได้ด้วยดังตัวอย่างในรูปที่ 2.9 ซึ่งปัจจุบันยังนิยมใช้วิธีนี้ในการตรวจสอบอุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานในการปลูกผลึกวิธี MBE และสามารถใช้ได้กับสารประกอบเกือบทุกชนิด โดยเฉพาะสารประกอบกึ่งตัวนำที่ค่าแถบพลังงานมีค่าน้อยมาก อันเป็นข้อดีที่เหนือกว่าวิธีการวัดด้วย Pyrometer ซึ่งไม่สามารถใช้ได้ในกรณีนี้ [15] แต่อย่างไรก็ดีวิธีการนี้มีความคลาดเคลื่อนมากกว่า 10°C และมีความยุ่งยากในการอ่านรูปแบบของ RHEED ในการวัดที่ขอบอุณหภูมิ โดยขึ้นกับความชำนาญมากของผู้อ่านเป็นอย่างมาก



รูปที่ 2.9 แผนภาพความถี่ของรูปแบบ RHEED และอุณหภูมิของแผ่นผลึก

(100) GaAs, InP และ InAs ภายใต้ไอของ Dimer [16]

2.1.3.2 Residual Gas Analyzer

Residual Gas Analyzer หรือ Quadrupole Mass Spectrometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของอนุภาคที่เป็นก๊าซภายในส่วน Growth Chamber ซึ่งทำให้เราสามารถรู้สภาพบรรยากาศภายในส่วน Growth Chamber นอกจากนี้ Residual Gas Analyzer ยังสามารถวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ (Composition) ของสารประกอบในขณะที่ทำการปลูกผลึกได้เช่นกัน [17] โดยข้อดีของ Residual Gas Analyzer ที่เหนือกว่าการใช้ Ionization gauge คือ Residual Gas Analyzer มีความละเอียดและความแม่นยำสูงกว่า อีกทั้งไม่มีผลของการเสื่อมของความไว (Sensitivity) เช่นเดียวกับ Ionization gauge เมื่อใช้งานไประยะเวลาหนึ่ง

2.1.3.3 อุปกรณ์อื่นๆ ที่สามารถติดตั้งเข้าในระบบ MBE

นอกจาก RHEED, Ionization Gauge และ Residual Gas Analyzer ซึ่งเป็นเครื่องมือหลักพื้นฐานที่ติดตั้งในส่วน Growth Chamber ของระบบ MBE อุปกรณ์อื่นๆ ที่ติดตั้งเพื่อช่วยในการปลูกผลึกสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น Pyrometer เพื่อใช้ในการวัดอุณหภูมิผิวหน้าแผ่นผลึกฐาน Ellipsometer เพื่อใช้ในการควบคุมค่าความหนาและอัตราส่วนของสารประกอบได้แม่นยำยิ่งขึ้น ด้วยลักษณะของระบบ MBE ที่เป็นโมดูลที่มีสภาวะสุญญากาศระดับพิเศษทำให้สามารถต่อระบบ MBE เข้ากับเครื่องมือวิเคราะห์อื่นๆ ได้แก่ Auger Electron Spectroscopy (AES), X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS), Secondary Ion Microscopic Spectroscopy (SIMS), Scanning Tunnelling Microscope (STM) ได้อีกด้วย จึงทำให้เราสามารถวิเคราะห์สมบัติของผลึกที่ปลูกได้อย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว โดยเฉพาะ STM เป็นเครื่องมือที่มีขีดความสามารถในการวิเคราะห์ที่ช่วยให้เราสามารถเข้าใจกลไกต่างๆ ในระดับขนาดของอะตอม [18] ซึ่งรายละเอียดต่างๆ ของเครื่องมือเหล่านั้นสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากเอกสารอื่นๆ สำหรับรายการของส่วนประกอบพื้นฐานใน Growth chamber สรุปไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 รายการส่วนประกอบพื้นฐานใน Growth Chamber ของระบบ MBE

| ส่วน (Facilities) | รายการเครื่องมือ (Component) | หน้าที่ (Function) |
|--------------------------|--|---|
| Beam Generators | Knudsen Cell Cracker Cell Valved Cracker Cell Gas Injector Cell | แหล่งจ่ายลำโมเลกุลหรืออะตอม |
| Beam Interruptors | Shutter | ทำหน้าที่เปิด-ปิดลำโมเลกุลที่ผ่านคู่วิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน เพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการปลูกผลึก |
| Beam and Growth Monitors | RHEED Quadupole mass spectrometer Ionization gauge | วิเคราะห์ข้อมูลโครงสร้างผลึก ข้อมูลค่าความดันไอของลำโมเลกุล และค่าอัตราส่วน |
| Process Environment | Multichamber UHV system | ระบบ Multichamber ช่วยให้ได้สามารถลดปริมาณของ residual gas ที่ active (ได้แก่ O_2 , CO_2 , H_2O , C_2O) ทำให้สามารถปลูกผลึกที่มีความบริสุทธิ์สูง |

2.2 กลไกการเกิดผลึกของการปลูกผลึกอพิแทกซีวิธี MBE

กลไกการเกิดผลึกของการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุลสำหรับสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V นั้นเกิดจากอะตอมของธาตุหมู่ III เป็นหลัก เนื่องจากความสามารถของการเกาะติดผิวแผ่นผลึกฐานของธาตุหมู่ III ซึ่งตามปกติแล้วผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานก่อนการปลูกถูกปกคลุมด้วยบรรยากาศของโมเลกุลธาตุหมู่ V เพื่อชะลอการสูญเสียในขณะที่แผ่นผลึกฐานมีค่าอุณหภูมิสูง อันเป็นผลทำให้ผิวหน้าแผ่นผลึกฐานเป็นชั้นของอะตอม V ดังนั้นอะตอมของธาตุหมู่ III จึงเรียงตัวเกาะลงบนชั้นของอะตอม V จนกลายเป็นชั้นของอะตอม III จากนั้นอะตอมของธาตุหมู่ V ทำปฏิกิริยาเกาะบนอะตอมของธาตุหมู่ III หรือถูกดูดซับ (Adsorp) จากอะตอมของธาตุหมู่ III โดยลักษณะของการเรียงตัวของอะตอมของธาตุหมู่ III และ V นั้นเรียงตัวสลับกันไปตลอดการปลูกผลึก ซึ่งอะตอมของธาตุหมู่ V ได้จากการแตกตัวของ

โมเลกุลที่อยู่ในรูป Dimer หรือ Tetramer ทำให้กระบวนการเกิดผลึกเป็นลักษณะได้สัดส่วนตามโครงสร้าง (Stoichiometric) โดยโมเลกุลส่วนเกินของธาตุหมู่ V นั้นถูกปล่อยคายออก (Desorp) จากผิวของแผ่นผลึกฐาน แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีความสำคัญสำหรับการปลูกผลึกวิธีนี้ ดังนั้นหากอุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีค่าสูงทำให้เกิดผลดังต่อไปนี้

ก) ในกรณีที่อุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีค่าสูงกว่าจุดระเหิดของธาตุหมู่ V ทำให้เกิดการปล่อยคายอะตอมของธาตุหมู่ V ออกจากผิวแผ่นผลึกฐาน

ข) ในกรณีที่อุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีค่าสูงขึ้นและมีค่าสูงกว่าจุดระเหิดของของธาตุหมู่ III ทำให้เกิดการปล่อยคายอะตอมของธาตุหมู่ III ออกจากผิวแผ่นผลึกฐาน

ตารางที่ 2.3 อุณหภูมิจุดระเหิดของสารประกอบ III-V ชนิดต่างๆ [19]

| สารประกอบ | $T_{CS}(^{\circ}C)$ | $T_{max}(V_4)(^{\circ}C)$ | $T_{max}(V_2)(^{\circ}C)$ | J_{V_4}/J_{III} |
|-----------|---------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------|
| AlP | >700 | 640 | 700 | ~1.0/1 |
| GaP | 670 | 490 | 750 | ~1.0/1 |
| InP | 363 | >450 | >500 | ~3.0/1 |
| AlAs | >750 | 630 | 750 | ~1.5/1 |
| GaAs | ~620 | 480 | >760 | ~1.0/1 |
| InAs | ~370 | ~450 | ~550 | ~5.0/1 |

T_{CS} หมายถึงอุณหภูมิของการระเหิด (Congruent Sublimation Temperature)

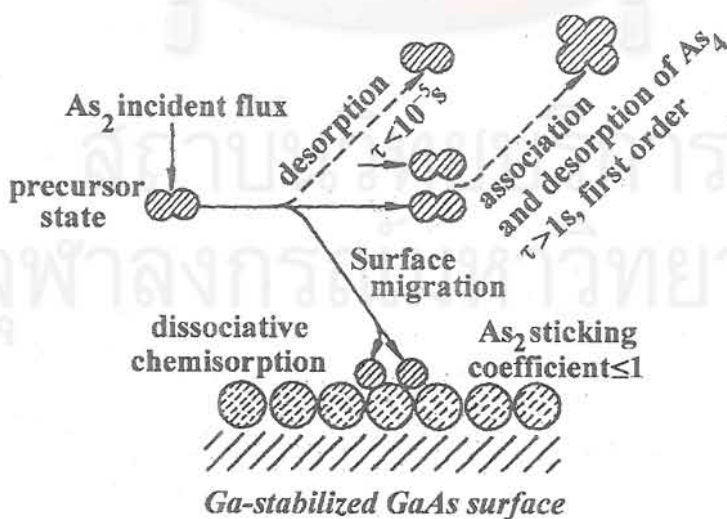
$T_{max}(V_4)$ หมายถึงอุณหภูมิสูงสุดภายบรรยากาศ tetramer โมเลกุลของธาตุหมู่ V

$T_{max}(V_2)$ หมายถึงอุณหภูมิสูงสุดภายบรรยากาศ dimer โมเลกุลของธาตุหมู่ V

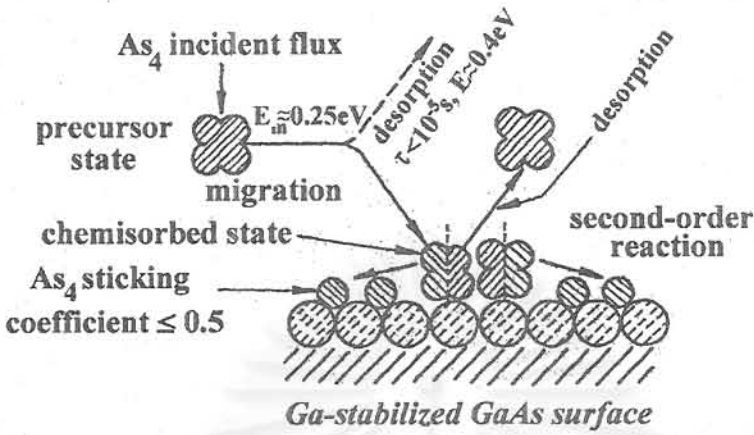
J_{V_4}/J_{III} หมายถึงค่าอัตราส่วน flux ของ V/III ที่เกิดจากการสลาย (Decomposition)

ดังนั้นอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานจึงควรอยู่ในระดับที่ไม่เกิดสาเหตุในข้อ ข) จึงมีความจำเป็นที่ต้องทำการชดเชยอะตอมธาตุของหมู่ V ที่สูญเสียไป เนื่องจากผลในข้อ ก) ซึ่งค่าอุณหภูมิการระเหิดของสารประกอบชนิดต่างๆ มีค่าตามตารางที่ 2.3

การอธิบายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุลนั้นเราสามารถใช่แบบจำลองตามรูปที่ 2.10 และ 2.11 อันเป็นตัวอย่างของ GaAs ซึ่งปฏิกิริยานั้นสามารถเกิดขึ้นได้ 2 กรณีคือกรณีของ Ga-As₂-(100) GaAs และกรณีของ Ga-As₄-(100) GaAs สำหรับในกรณี Ga-As₂-(100) GaAs ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเริ่มต้นจากอะตอมของ Ga เกาะติดบนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานเรียงตัวเป็นชั้น (layer) จากนั้นโมเลกุล As₂ ทำปฏิกิริยากับอะตอมของ Ga โดยแตกตัวเป็นอะตอม As และเกาะตัวบนชั้นอะตอม Ga สำหรับอัตราการเกาะของโมเลกุล As₂ ที่ผิวหน้าแผ่นผลึกฐานขึ้นกับค่า Flux ของ Ga สำหรับโมเลกุล As₂ ส่วนเกินนั้นจะระเหิดไปในรูปของโมเลกุล As₂ และ As₄ ทำให้การเกิดผลึกเป็นแบบ Stoichiometric Growth ดังในรูปที่ 2.10 สำหรับกรณี Ga-As₄-(100) GaAs นั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีความซับซ้อนกว่าโดยโมเลกุล As₄ คู่หนึ่งทำปฏิกิริยากับอะตอม Ga ที่อยู่ใกล้เคียง ซึ่งอะตอม Ga ได้เกาะอยู่ที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากโมเลกุล As₄ แต่ละโมเลกุลแตกตัวให้อะตอม As จำนวน 2 อะตอมเกาะลงบนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานด้วยการดูดซับ (adsorp) จากอะตอมของ Ga โดยจำนวนอะตอมของ As ที่เกาะลงบนผิวหน้ามีสัดส่วนเท่ากับจำนวนอะตอมของ Ga ที่เกาะที่ผิวหน้า ส่วนอะตอม As ส่วนที่เหลือจำนวน 4 อะตอมนั้นจะรวมตัวกันเป็นโมเลกุล As₄ และถูกปล่อยคาย (Desorp) ออกจากผิวไป ดังนั้นในกรณีนี้จึงมีความจำเป็นที่ต้องให้ค่าความหนาแน่นของโมเลกุล As₄ หรือ Flux ของ As₄ (J_{As_4}) มีค่ามากกว่าค่าความหนาแน่นของโมเลกุล Ga หรือ Flux ของ Ga (J_{Ga}) เพื่อให้จำนวนโมเลกุล As₄ มีจำนวนมากเพียงพอสำหรับปฏิกิริยาที่มีส่วนที่เกาะเรียงตัวในผลึกและส่วนที่ปล่อยคายออก ในขณะที่ทำการปลูกผลึกนั้นอะตอมของ As สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนหนึ่งที่เกาะลงบนผิว (Adsorp) ของอะตอม Ga เรียงตัวเป็น โครงผลึก และอีกส่วนหนึ่งที่ถูกปล่อยคาย (Desorp) ออกมา ซึ่งเป็นส่วนที่สูญเสียไปและการสูญเสียนี้มีอัตราเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาของการเกิดผลึก GaAs ในกรณี Ga-As₂-(100) GaAs



รูปที่ 2.11 ปฏิกิริยาของการเกิดผลึก GaAs ในกรณี Ga-As₄-(100) GaAs

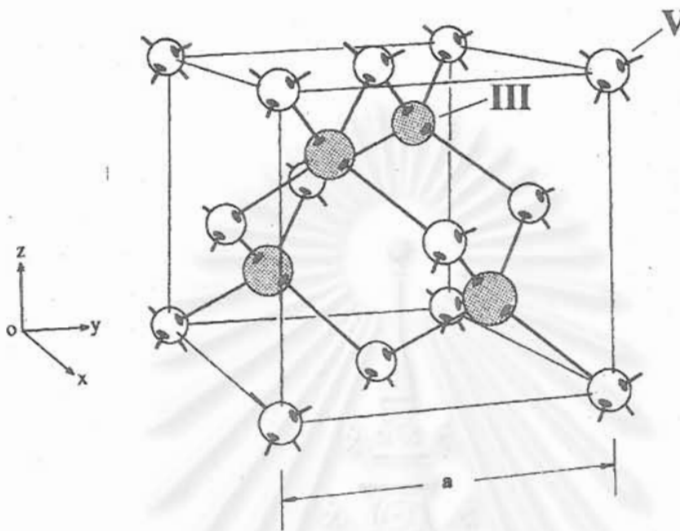
2.3 สารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V

นับตั้งแต่ทศวรรษที่ 50 ได้มีการค้นพบสารประกอบกึ่งตัวนำชนิดสองธาตุ (Binary) ของกลุ่ม III-V และสมบัติต่างๆ ของสารประกอบเหล่านี้มีสมบัติทางกายภาพที่หลากหลายตามชนิดและองค์ประกอบของสารประกอบ นับตั้งแต่ค่าแถบพลังงาน (Band Energy Gap) ในช่วง 0.18-2.42 eV ค่าดัชนีหักเห ฯลฯ เป็นต้น ต่อมาในทศวรรษที่ 60 ได้มีการพัฒนาวิธีการเตรียมของสารประกอบเหล่านี้เพื่อประยุกต์ใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ และเทคนิคการปลูกผลึกต่างๆ ได้เริ่มต้นขึ้นในช่วงนี้ การปลูกผลึกอพิแทกซีในยุคนี้ส่วนใหญ่เน้นมีวัตถุประสงค์เพื่อการสร้างสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ ประมาณปี 1970 สิ่งประดิษฐ์ที่เกี่ยวข้องกับ GaAs เป็นสิ่งประดิษฐ์ของสารประกอบ III-V กลุ่มแรกที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นและสิ่งประดิษฐ์ที่เกิดขึ้นในยุคนี้เป็นต้นแบบของสิ่งประดิษฐ์ในยุคต่อมา โดยเฉพาะสิ่งประดิษฐ์สำหรับระบบสื่อสารทางแสงในช่วงย่าน 1.3 และ 1.5 μm ที่สร้างจากสารประกอบ InGaAsP บนแผ่นผลึกฐาน InP ดังนั้นในหัวข้อนี้จะเป็นการทบทวนความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V

2.3.1 โครงสร้างของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V

สารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V มีโครงสร้างแบบ Zincblende ตามรูปที่ 2.12 ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างเพชร (Diamond) ได้แก่ ผลึกเพชร ผลึก Si และ ผลึก Ge โดยการเรียงตัวของอะตอมของธาตุหมู่ III และ V เรียงตัวสลับกันเป็นชั้นๆ ไปตามทิศทาง (100) ในโครงสร้าง ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมในโครงสร้างนี้เป็นแบบโควาเลนต์ (Covalent bond) และระยะห่างระหว่างอะตอมนั้นขึ้น

กับชนิดของอะตอมที่มาประกอบกันเป็นสารประกอบในโครงสร้าง ดังนั้นตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่เป็นสมบัติเฉพาะของสารประกอบแต่ละชนิดคือ ค่าคงตัวผลึก (Lattice constant : a) ซึ่งสารประกอบแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.4



รูปที่ 2.12 แผนภาพ โครงสร้างแบบ Zincblende

ตารางที่ 2.4 ตัวแปรทางกายภาพของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V ชนิด 2 ชาติ [20]

| สารประกอบ | ค่าคงตัวผลึก (Å) | ค่าแถบพลังงาน (eV) | ชนิดของแถบพลังงาน |
|-----------|------------------|--------------------|-------------------|
| AlP | 5.451 | 2.45 | แถบพลังงานไม่ตรง |
| AlAs | 5.6605 | 2.16 | แถบพลังงานไม่ตรง |
| AlSb | 6.1355 | 1.58 | แถบพลังงานไม่ตรง |
| GaP | 5.4512 | 2.26 | แถบพลังงานไม่ตรง |
| GaAs | 5.6533 | 1.42 | แถบพลังงานตรง |
| GaSb | 6.0959 | 0.72 | แถบพลังงานตรง |
| InP | 5.8686 | 1.35 | แถบพลังงานตรง |
| InAs | 6.0584 | 0.36 | แถบพลังงานตรง |
| InSb | 6.4794 | 0.17 | แถบพลังงานตรง |

2.3.2 สมบัติของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V

เนื่องจากสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V นั้นมีสมบัติที่หลากหลาย โดยขึ้นกับองค์ประกอบ และสัดส่วนปริมาณของธาตุที่ประกอบกันขึ้นเป็นสารประกอบ ตามปกติแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นส่วนใหญ่ นั้นเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำชนิด 2 ธาตุ (Binary) ซึ่งมีสมบัติทางกายภาพเฉพาะตัว เนื่องจากตัวแปร ขององค์ประกอบมีจำนวนน้อยที่สุด ดังนั้นในการสร้างแผ่นผลึกฐานจึงนิยมทำจากสารประกอบ 2 ธาตุ แต่สมบัติที่จำกัดของสารประกอบชนิด 2 ธาตุที่ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในบางกรณี คุณสมบัติที่สำคัญ คือสารประกอบชนิด 3 ธาตุและ 4 ธาตุได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างหัวต่อเฮเทอโร (Heterojunction) โดยมีค่า คงตัวผลึกเข้าได้กับแผ่นผลึกฐาน เนื่องจากค่าแถบพลังงานหรือค่าดัชนีหักเหที่มีค่าแตกต่างกันไป อันเป็น ผลทำให้มีความสะดวกในการออกแบบสร้างสิ่งประดิษฐ์และสามารถกำหนดควิสด์ที่มีความเหมาะสมกับ สิ่งประดิษฐ์ได้ สำหรับค่าตัวแปรต่างๆ ของสารประกอบกึ่งตัวนำตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 2.4 และ 2.5

ตารางที่ 2.5 ค่าแถบพลังงานของตัวอย่างสารประกอบชนิด 3 ธาตุและ 4 ธาตุ [21]

| สารประกอบ | ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (eV) ที่ 300 K | ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (eV) ที่ 300 K ในกรณี Matching กับ InP |
|---|--|---|
| สารประกอบ 3 ธาตุ | | |
| $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ | $E_g(I) = 0.36 + 2.35x + 0.24x^2$ $E_g(X) = 1.82 + 0.4x$ | $E_g(I) = 1.45, x = 0.52$ |
| $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ | $E_g(I) = 0.36 + 0.505x + 0.555x^2$ | $E_g(I) = 0.75, x = 0.53$ |
| $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ | $E_g(I) = 0.37 + 1.91x + 0.74x^2$ | $E_g(I) = 0.78, x = 0.5$ |
| สารประกอบ 4 ธาตุ | | |
| $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ | $E_g(I) = 1.35 + 0.668x - 1.068y + 0.758x^2$ $+ 0.078y^2 - 0.069xy - 0.322x^2y + 0.03xy^2$ $E_g(I) = 1.35 - 0.775y + 0.149x^2$ | $x = 0.47y$ $E_g(I) = 13.5 - 0.775y + 0.149y^2$ |
| $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$ | $E_g(I) = 0.36 + 2.093x + 0.629y + 0.577x^2$ $+ 0.436y^2 + 1.013xy - 2.0xy(1-x-y)$ | $(\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48})_z(\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47})_{1-z}\text{As}$ $x = 0.48z, 0.983x + y = 0.468$ $E_g(I) = 0.76 + 0.49z + 0.20z^2$ |

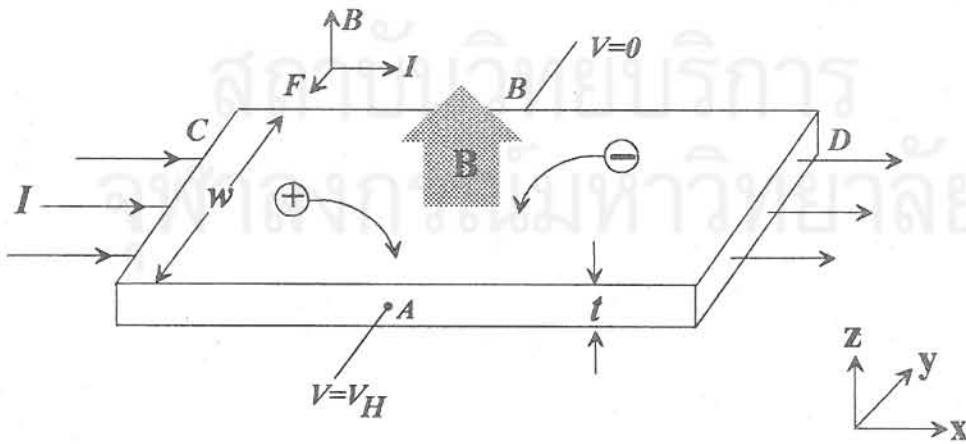
2.4 การวัดของ van der PAUW

วิธีการวัดของ van der PAUW เป็นวิธีการวัดสมบัติเชิงไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่ได้ประยุกต์มาจากปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) เพื่อตรวจสอบสมบัติเชิงไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำและสามารถวัดหาค่าตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ชนิดของพาหะนำไฟฟ้าส่วนใหญ่ (Majority Charge Carrier) ค่าความหนาแน่นพาหะนำไฟฟ้า (Carrier Concentration) และค่าความคล่องตัวของพาหะนำไฟฟ้า (Carrier Mobility) แต่อย่างไรก็ตามการคำนวณจากการวัดวิธีดังกล่าวนี้จำเป็นที่เราจะต้องรู้ค่าสภาพนำไฟฟ้า (Conductivity) หรือค่าสภาพต้านทาน (Resistivity) ในปัจจุบันวิธีการวัดของ van der PAUW มีความสำคัญอย่างมากต่ออุตสาหกรรมวัสดุและสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำงานเป็นที่ยอมรับให้เป็นวิธีมาตรฐาน เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่ายสะดวกและผลการวัดที่แม่นยำ

2.4.1 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)

ปรากฏการณ์ฮอลล์ได้ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1879 โดย Edwin H. Hall ซึ่งพบการเกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแสและสนามแม่เหล็กในแผ่นโลหะบางตามรูปที่ 2.13 ซึ่งต่อมาได้มีการอธิบายปรากฏการณ์นี้ด้วยแบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับแรงของลอเรนทซ์ (Lorentz force) โดยแรงของสนามแม่เหล็กที่กระทำต่อประจุนำไฟฟ้ามีค่า

$$F_y = v_x \times B_z \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.13 แผนภาพปรากฏการณ์ฮอลล์

เนื่องจากแรงกระทำที่มีต่อประจุนำไฟฟ้าในสภาวะสมดุล ทำให้เกิดจากสนามไฟฟ้าในแกน y ตามสมการ

$$E_y = \frac{J_x}{qp_0} B_z \quad (2.4)$$

ในทางปฏิบัติเราสามารถวัดค่าสนามไฟฟ้าจากค่าแรงดันฮอลล์ (Hall Voltage) ที่เกิดขึ้น ในกรณีของพาหะส่วนใหญ่ที่เป็น โฮลตามความสัมพันธ์

$$E_y = \frac{V_{AB}}{w} = \frac{I_x}{wt} \frac{1}{qp_0} B_z \quad (2.5)$$

สำหรับในกรณีที่พาหะส่วนใหญ่เป็นอิเล็กตรอน สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นมีทิศทางในทางตรงกันข้าม ซึ่งวิธีการวัดนี้ทำให้เราสามารถรู้ชนิดของพาหะประจุนำไฟฟ้าได้ จากสมการข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นหรือค่าความเข้มข้นพาหะในกรณีของพาหะส่วนใหญ่ที่เป็นโฮลได้จาก

$$p_0 = \frac{I_x B_z}{qtV_{AB}} \quad (2.6)$$

จากสมการของค่าสภาพต้านทาน (Resistivity)

$$\rho(\Omega\text{-cm}) = \frac{Rwt}{L} = \frac{V_{CD} wT}{I_x L} \quad (2.7)$$

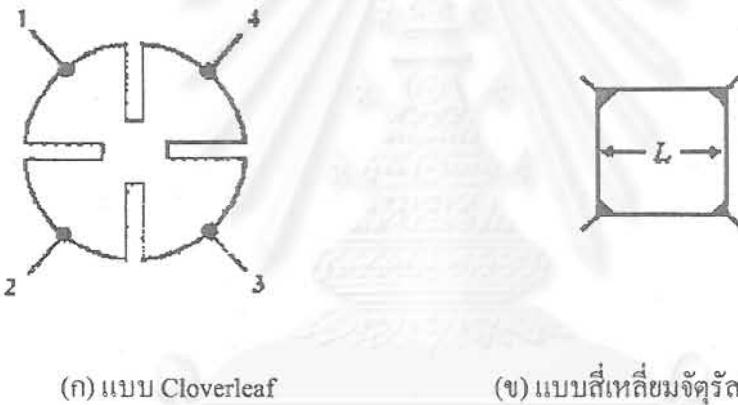
เราสามารถคำนวณหาค่าความคล่องตัวของพาหะได้จากค่าสภาพต้านทานตามสมการ

$$\mu = \frac{1}{\rho qp_0} \quad (2.8)$$

ดังนั้นในการวัดเพื่อหาค่าความหนาแน่นของพาหะและค่าความคล่องตัวของพาหะในปรภาการณ์ฮอลล์ จึงจำเป็นต้องมีการวัดหาค่าความต้านทานรวมอยู่ในการวัดนี้ เพื่อให้เราสามารถคำนวณหาผลได้ตามต้องการ

2.4.2 วิธีการวัดของ van der PUAW

เนื่องจากวิธีการวัดค่าต่างๆ ด้วยปรากฏการณ์ของฮอลล์นั้นมีความยุ่งยากซับซ้อน โดยต้องมีการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าหรือสภาพต้านทานเข้ามาเกี่ยวข้อง เพื่อนำค่ามาใช้ในการคำนวณหาค่าความคล่องตัวของพาหะและค่าความหนาแน่นพาหะ ดังนั้นวิธีการวัดของ van der PUAW [22] จึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้เป็นการสะดวกและง่ายสำหรับการเตรียมตัวอย่าง โดยการวัดนี้ยังคงใช้พื้นฐานจากปรากฏการณ์ฮอลล์ และวัดได้ผลละเอียดครบถ้วนไม่แตกต่างจากวิธีแบบเดิม สำหรับตัวอย่างในวิธีการวัดของ van der PUAW นั้นมีรูปร่างและลักษณะตามรูปที่ 2.14 โดยแบบ Cloverleaf ตามในรูปที่ 2.14 (ก) เป็นแบบที่ดีที่สุด แต่มีความยุ่งยากในกระบวนการเตรียมตัว และในการทดลองนี้ใช้แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตามรูปที่ 2.14 (ข) เนื่องจากการเตรียมทำได้ง่ายและสะดวกกว่า



(ก) แบบ Cloverleaf

(ข) แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส

รูปที่ 2.14 ภาพ โครงสร้างของตัวอย่างสำหรับการวัดหาค่าสมบัติเชิงไฟฟ้าวิธี van der PUAW

โดยวิธีการวัดของ van der PUAW สามารถวัดหา Sheet resistant (R_s) จากสมการ

$$\exp\left(\frac{-\pi R_A}{R_s}\right) + \exp\left(\frac{-\pi R_B}{R_s}\right) = 1 \quad (2.9)$$

ซึ่งค่า R_A และ R_B นั้นเป็นค่าความต้านทานที่วัดตามรูปที่ 2.15 โดยการป้อนกระแสไฟฟ้าตรงที่มีค่าคงที่ที่ขั้ว 1 ไหลผ่านตัวอย่างออกที่ขั้ว 2 และทำการวัดค่าแรงดันที่ขั้ว 3 และ 4 ในทำนองเดียวกันทำการป้อนกระแสไฟฟ้าตรงที่มีค่าคงที่ที่ขั้ว 2 ไหลผ่านตัวอย่างออกที่ขั้ว 3 และทำการวัดค่าแรงดันที่ขั้ว 1 และ 4 จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่า R_A และ R_B ตามสมการ

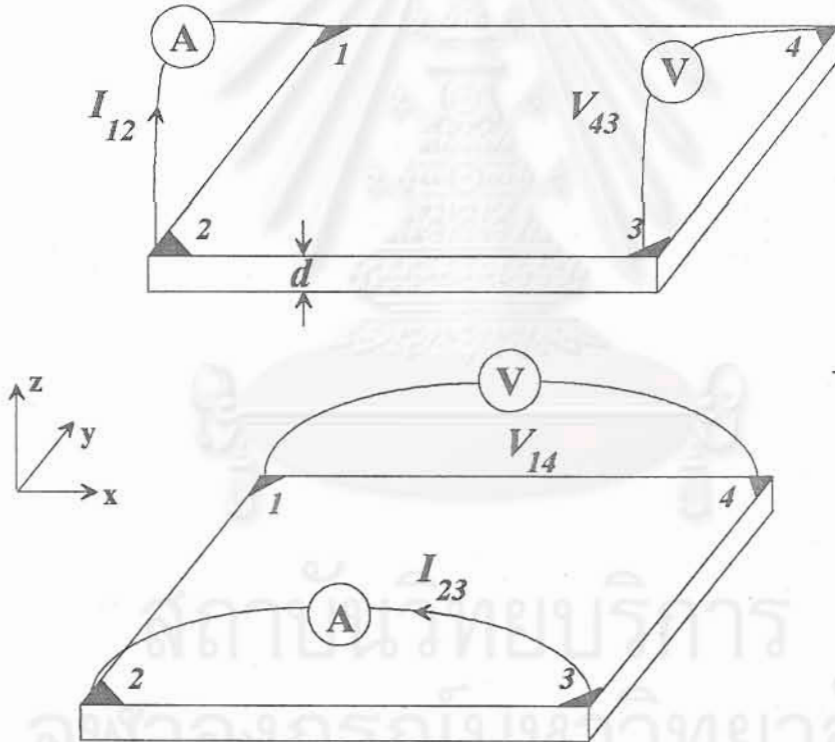
$$R_A = \frac{V_{43}}{I_{12}} \quad \text{และ} \quad R_B = \frac{V_{14}}{I_{23}} \quad (2.10)$$

โดยค่า R_s มีความสัมพันธ์กับค่าสภาพต้านทานตามสมการ

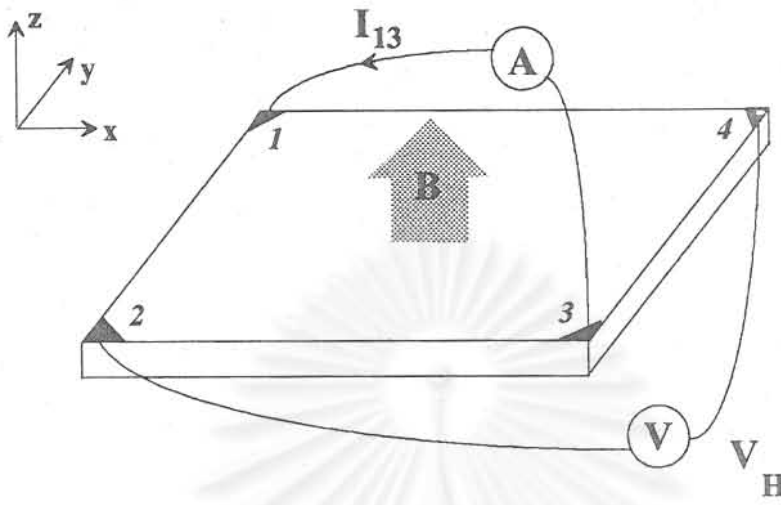
$$\rho = R_s d \quad (2.11)$$

d คือค่าความหนาของตัวอย่าง

สำหรับการวัดค่าแรงดันฮอลล์ในวิธีการวัดของ van der PAUW ซึ่งเป็นค่าที่สำคัญที่นำมาใช้ในการคำนวณหาค่าความหนาแน่นพาหะและค่าความคล่องตัวพาหะ ทำได้ด้วยการป้อนกระแสไฟฟ้าตรงที่มีค่าคงที่ที่ขั้ว 1 ไหลผ่านตัวอย่างออกที่ขั้ว 3 และทำการวัดค่าแรงดันที่ขั้ว 2 และ 4 โดยตัวอย่างอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กตามรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.15 แผนภาพการวัดค่าสภาพต้านทานในวิธีการวัดของ van der PAUW



รูปที่ 2.16 แผนภาพการวัดค่าแรงดันฮอลล์ในวิธีการวัดของ van der PAUW

จากค่าแรงดันฮอลล์ที่วัดได้นี้ เราสามารถนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นพาหะและค่าความคล่องตัวพาหะได้ ซึ่งวิธีการคำนวณจะได้กล่าวถึงต่อไป

2.4.3 การวัด van der PAUW ในทางปฏิบัติ

แบบจำลองของ van der PAUW ที่ได้กล่าวมานั้นเป็นแบบจำลองในอุดมคติ ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นมีผลกระทบจากตัวแปรอื่นๆ ได้แก่ ความไม่เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสในอุดมคติของรูปร่างตัวอย่าง ขนาดของขั้วโลหะมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับขนาดของตัวอย่าง และค่าความต้านทานของขั้วโลหะรวมถึงค่าความต้านทานของหัวรอยโลหะ-สารกึ่งตัวนำที่มีค่าสูง เป็นต้น นอกจากนี้ในขณะที่ทำการวัดนี้จำเป็นต้องป้องกันการเกิดพาหะส่วนเกินเนื่องจากการกระตุ้นด้วยแสงและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวอย่าง ดังนั้นตัวอย่างต้องอยู่ในที่ที่ไม่มีแสงและมีการควบคุมอุณหภูมิ โดยเฉพาะค่ากระแสที่ใช้ในการวัดนี้ต้องไม่มีค่าสูงเกินไปจนทำให้อุณหภูมิของตัวอย่างเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นในการวัดนี้เราจะใช้ค่ากระแสในการวัดให้ที่ค่าน้อยที่สุด ดังนั้นเพื่อการวัดให้ได้ค่าที่ถูกต้องสูงสุด

2.4.3.1 การกำหนดนิยามในการวัดค่าสภาพต้านทาน

จากรูปร่างของตัวอย่างนั้นมีขั้วโลหะนำไฟฟ้าอยู่ 4 ขั้ว ซึ่งกำกับหมายเลข 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา เรากำหนดให้

I_{12} เป็นค่ากระแสไฟฟ้าตรงที่ไหลจากผ่านขั้ว 1 ผ่านตัวอย่างไปออกที่ขั้ว 2 ในทำนองเดียวกัน สำหรับ I_{23} , I_{34} , I_{41} , I_{21} , I_{14} , I_{43} , I_{32} และมีหน่วยเป็นแอมแปร์

V_{12} เป็นค่าแรงดันที่วัดได้ทีระหว่างขั้ว 1 และ 2 ในทำนองเดียวกันสำหรับ V_{32} , V_{34} , V_{41} , V_{21} , V_{14} , V_{43} , V_{32} และมีหน่วยเป็นโวลต์

2.4.3.2 การวัดหาค่าสภาพต้านทาน

สำหรับในการวัดนั้นทำการป้อนกระแส I_{21} และวัดค่าแรงดัน V_{34} และทำการกลับทิศทางกระแส I_{12} และวัดค่าแรงดัน V_{43} จากนั้นทำการวัดในทำนองเดียวกันกับ 6 ค่าที่เหลือคือ V_{41} , V_{14} , V_{12} , V_{21} , V_{23} และ V_{32} จากนั้นนำค่าที่วัดได้ทั้ง 8 ค่ามาคำนวณหาค่าความต้านทาน เพื่อให้จำแนกค่าความต้านทานได้ง่ายขึ้น เรากำหนดให้ $R_{I,V}$ เป็นค่าความต้านทานที่ได้จากการป้อนกระแสที่ขั้ว I และแรงดันที่วัดได้ที่ขั้ว V ตามสมการ

$$R_{21,34} = \frac{V_{34}}{I_{21}}, R_{12,43} = \frac{V_{43}}{I_{12}} \quad (2.12 \text{ a})$$

$$R_{32,41} = \frac{V_{41}}{I_{32}}, R_{23,14} = \frac{V_{14}}{I_{23}} \quad (2.12 \text{ b})$$

$$R_{43,12} = \frac{V_{12}}{I_{43}}, R_{34,21} = \frac{V_{21}}{I_{34}} \quad (2.12 \text{ c})$$

$$R_{14,23} = \frac{V_{23}}{I_{14}}, R_{41,32} = \frac{V_{32}}{I_{41}} \quad (2.12 \text{ d})$$

จากการผลการวัดนี้เราสามารถตรวจสอบได้ว่า

$$R_{21,34} \approx R_{12,43} \quad (2.13 \text{ a})$$

$$R_{32,41} \approx R_{23,14} \quad (2.13 \text{ b})$$

$$R_{43,12} \approx R_{34,21} \quad (2.13 \text{ c})$$

$$R_{14,23} \approx R_{41,32} \quad (2.13 \text{ d})$$

สำหรับในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลง อันเนื่องมาจากความไม่คงที่ของกระแสหรือความแปรปรวนของอุณหภูมิ เราสามารถตรวจสอบได้จากสมการข้างต้น ซึ่งความแตกต่างของค่าในแต่ละสมการไม่ควรเกิน 3% ในทำนองเดียวกันเราจะได้

$$R_{21,34} + R_{12,43} \approx R_{43,12} + R_{34,21} \quad (2.14 \text{ a})$$

$$R_{32,41} + R_{23,14} \approx R_{14,23} + R_{41,32} \quad (2.14 \text{ b})$$

สำหรับการคำนวณหาค่าสภาพต้านทานนั้นเราสามารถคำนวณได้จากค่าความต้านทาน 2 ค่าที่ได้จากการวัดดังนี้

$$R_A = \frac{(R_{21,34} + R_{12,43} + R_{43,12} + R_{34,21})}{4} \quad (2.15 \text{ a})$$

$$R_B = \frac{(R_{32,41} + R_{23,14} + R_{14,23} + R_{41,32})}{4} \quad (2.15 \text{ b})$$

จากค่า R_A , R_B เราสามารถคำนวณหาค่า Sheet Resistance (R_s) และค่าสภาพต้านทาน (ρ) ได้จากสมการ (2.9) ในกรณีที่เรารู้ค่าความหนาของตัวอย่างจากสมการ (2.11) จากนั้นเราจะนำค่าที่วัดและคำนวณได้ในขั้นตอนนี้ไปใช้ในการหาค่าความคล่องพาหะต่อไป

2.4.3.3 การกำหนดนิยามในการวัดฮอลล์

ในการวัดฮอลล์นั้นเป็นการวัดค่าแรงดันที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของพาหะประจุนำไฟฟ้าที่เลี้ยวเบนไปภายใต้สนามแม่เหล็ก ซึ่งวิธีการนี้ทำให้เราสามารถรู้ได้ว่าพาหะนำไฟฟ้าส่วนใหญ่่นั้นเป็นอิเล็กตรอนหรือโฮลและทราบค่าความเข้มข้นพาหะหรือค่าความหนาแน่นของพาหะนำไฟฟ้าได้

I_{13} คือค่ากระแสไฟตรงที่ป้อนเข้าที่ขั้วที่ 1 ผ่านตัวอย่างออกที่ขั้ว 3 ในทำนองเดียวกันสำหรับ I_{31} , I_{42} และ I_{24}

B คือค่าสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางในแนวแกน z โดยกำหนดให้สนามแม่เหล็กมีค่าเป็นบวกเมื่อมีทิศทางไปตามในแนวแกน z ทางบวกและมีค่าเป็นลบในกรณีตรงกันข้าม

V_{24P} คือค่าแรงดันฮอลล์ที่วัดได้ระหว่างขั้วที่ 2 และ 4 ภายใต้สนามแม่เหล็กในทิศทางบวกในกรณีที่มีกระแสไฟฟ้า I_{13} ในทำนองเดียวกันกับ V_{42P} , V_{13P} และ V_{31P} สำหรับ V_{24N} , V_{42N} , V_{13N} และ V_{31N} เป็นค่าที่วัดในทำนองเดียวกัน โดยสนามแม่เหล็กที่ทิศทางไปในทางลบ

2.4.3.4 การวัดหาค่าแรงดันฮอลล์

สำหรับการวัดฮอลล์นั้นสามารถทำได้โดยการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว 1 ให้ไหลผ่านตัวอย่างออกที่ขั้ว 3 โดยตัวอย่างอยู่ในสนามแม่เหล็ก B ที่มีทิศทางในทางบวก ค่าแรงดันฮอลล์ที่วัดได้ในที่นี้คือ V_{24P} และวัดในกรณีที่มีการกลับทิศทางของกระแสเป็น I_{31} และวัดค่าแรงดันฮอลล์ V_{42P} ด้วยวิธีการวัดในลักษณะเดียวกันจะได้ V_{13P} และ V_{31P} ด้วยกระแส I_{42} และ I_{24} ตามลำดับ จากนั้นทำการวัดในทำนองเดียวกันโดยการกลับทิศทางสนามแม่เหล็ก วัดค่าแรงดัน V_{24N} , V_{42N} , V_{13N} และ V_{31N} ด้วยกระแส I_{13} , I_{31} , I_{42} และ I_{24} ตามลำดับ

จากการวัดภายใต้สนามแม่เหล็ก วัดแรงดันฮอลล์ได้ 8 ค่า V_{24P} , V_{42P} , V_{13P} , V_{31P} , V_{24N} , V_{42N} , V_{13N} และ V_{31N} นำค่าแรงดันฮอลล์ที่ได้มาคำนวณตามสมการ

$$V_C = V_{24P} - V_{24N} \quad (2.16 \text{ a})$$

$$V_D = V_{42P} - V_{42N} \quad (2.16 \text{ b})$$

$$V_E = V_{13P} - V_{13N} \quad (2.16 \text{ c})$$

$$V_F = V_{31P} - V_{31N} \quad (2.16 \text{ d})$$

จากค่าแรงดัน V_C , V_D , V_E และ V_F นี้เราสามารถตรวจสอบได้ว่าชนิดของพาหะนำไฟฟ้าส่วนใหญ่ของตัวอย่างว่าเป็นโฮลหรืออิเล็กตรอน โดยพิจารณาจากผลบวกของ V_C , V_D , V_E และ V_F ในกรณีที่ผลบวกมีค่าเป็นบวก ตัวอย่างมีพาหะนำไฟฟ้าส่วนใหญ่เป็นโฮล ดังนั้นจึงเป็นชนิดพี (p-type) ส่วนในกรณีที่ผลบวกมีค่าเป็นลบตัวอย่างมีพาหะนำไฟฟ้าส่วนใหญ่เป็นอิเล็กตรอนและเป็นชนิดเอ็น (n-type)

สำหรับค่า Sheet carrier density สามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$P_S = \frac{8 \times 10^{-8} IB}{q(V_C + V_D + V_E + V_F)} \quad (\text{cm}^{-2}) \quad (2.17)$$

ในกรณีที่ผลบวกมีค่าเป็นบวก หรือ

$$n_s = \left| \frac{8 \times 10^{-8} IB}{q(V_C + V_D + V_E + V_F)} \right| \quad (2.18)$$

สำหรับกรณีที่ผลบวกมีค่าเป็นลบ

โดย B คือค่าสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็นเกาส์ (Gauss : G)

I คือค่ากระแสไฟฟ้ากระแสตรงมีหน่วยเป็นแอมแปร์ (Ampere : A)

ค่า B และ I ในการทดลองมีค่าคงตัว (Constant) ตลอดในการวัดแต่ละครั้ง
ค่าความหนาแน่นพาหะนำไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$n = \frac{n_s}{d} \quad (2.19)$$

$$p = \frac{p_s}{d} \quad (2.20)$$

ในทำนองเดียวกันค่าคล่องตัวพาหะนำไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\mu = \frac{1}{qn_s R_s} \quad (2.21)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การออกแบบการทดลอง

สำหรับในบทนี้เป็นรายละเอียดและขั้นตอนของกระบวนการทดลองในงานวิจัยนี้ เพื่อทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรหรือเงื่อนไขต่างๆ ในการปลูกผลึกที่มีต่อสมบัติของชั้นผลึกอพิเทกซี InAs ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐาน (100) GaAs ตัวแปรที่ได้ศึกษาในการทดลองนี้ได้แก่ ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก ค่าอัตราส่วนความดันไอสมมูล (Beam-equivalent pressure :BEP) ของ As₄/In และค่าอัตราการปลูกผลึก (Growth rate)

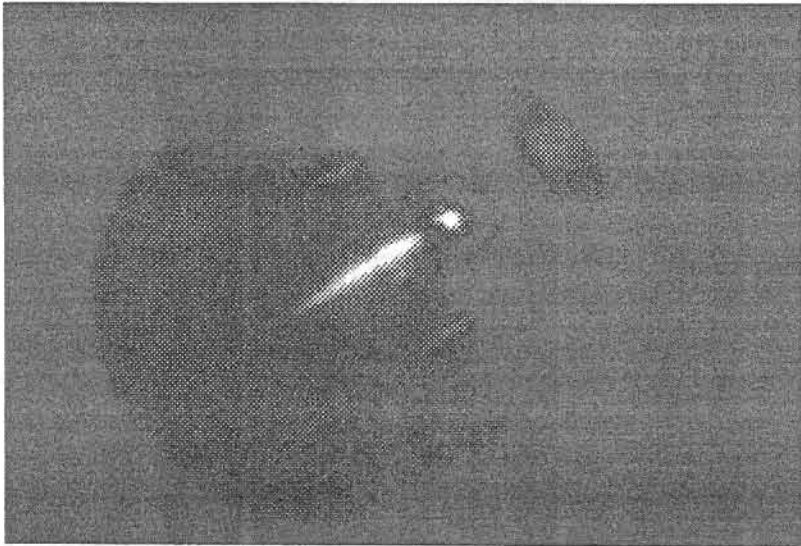
3.1 การเตรียมแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น

แผ่นผลึกฐาน (Substrate) เริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองนี้คือแผ่นผลึกเดี่ยว (Single Crystal Wafer) GaAs ที่มีทิศทางของผิวหน้าผลึก (Orientation) อยู่ในระนาบ (100) แผ่นผลึกฐาน GaAs ที่ใช้ในการทดลองนี้มีสมบัติกึ่งฉนวน (Semi-insulator) และมีรูปร่างเป็นวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50.8 มม. โดยตัวอย่างแต่ละตัวอย่างเป็นส่วน 1 ส่วนที่ได้จากการตัดแบ่งแผ่นผลึกเดี่ยว GaAs ข้างต้นออกเป็น 4 ส่วนตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางให้มีรูปร่าง 1/4 ของวงกลม จากนั้นนำไปล้างด้วย Trichloroethylene เค็ดและ Acetone เค็ดเป็นเวลาไม่น้อยกว่าอย่างละ 5 นาทีตามลำดับและล้างทำความสะอาด (Rinse) ด้วยน้ำ DI (Deionized Water) จนสะอาด หลังจากนั้นแช่ตัวอย่างในสารละลาย HCl:H₂O (1:1 โดยปริมาตร) เป็นเวลานานไม่น้อยกว่า 10 นาที สุดท้ายทำการล้าง (rinse) ด้วยน้ำ DI และเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ จากนั้นนำแผ่นผลึกฐาน GaAs ที่ผ่านการล้างแล้วไปติดตั้งบน Mo Block ด้วย In ที่หลอมเหลวด้วยความร้อน แล้วทิ้งไว้จนกระทั่ง Mo Block ที่มีแผ่นผลึกฐาน GaAs ติดอยู่เย็นลง ในขั้นนี้ตัวอย่างที่ได้พร้อมจะนำเข้าสู่ระบบ MBE ต่อไป

3.2 การปลูกชั้นผลึก Buffer GaAs

หลังจากนั้นนำ Mo Block ที่มีแผ่นผลึกฐาน GaAs ติดอยู่บรรจุใส่ใน Cassette เพื่อใช้ Cassette เป็นพาหนะลำเลียง Mo Block ภายในระบบ MBE โดยผ่าน Cassette introduction chamber ไปยัง Thermal treatment chamber หรือ Preparation Chamber เพื่อทำการไล่ความชื้นและสิ่งสกปรกที่ผิว (Outgassing) ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการลำเลียง Mo Block ที่มีแผ่นผลึกฐาน GaAs ติดอยู่เข้าสู่ห้องปลูกผลึก (Growth Chamber) ซึ่งก่อนการนำ Mo Block ที่มีแผ่นผลึกฐาน GaAs ติดอยู่เข้าสู่ห้องปลูกผลึก (Growth chamber) นั้นได้มีการปรับตั้งค่าอุณหภูมิของแหล่งจ่าย Ga, In และ As หรือ Effusion cell ที่บรรจุ Ga, In และ As (ในการทดลองนี้ Ga และ In มีความบริสุทธิ์ 99.9999% สำหรับ As

มีความบริสุทธิ์ 99.9999%) ให้มีค่าความดันไอตามที่ได้กำหนดไว้ สำหรับการปลูก Buffer GaAs ให้แหล่งจ่ายมีค่าความดันไอสมมูลดังนี้คือ $P_{Ga} = 2.7 \times 10^{-7}$ torr และ $P_{As_4} = 5.4 \times 10^{-6}$ torr ตามลำดับ จากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิของ Mo block ให้ผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีค่า 580°C จากอุณหภูมิในขณะนั้น ในอัตราการเพิ่ม 10°C/นาที ในขณะที่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานมีค่าตั้งแต่ 300°C ขึ้นไปทำการเปิดชัตเตอร์ (Shutter) ของแหล่งจ่าย As_4 เพื่อป้องกันผิวหน้าแผ่นผลึกฐานเสียหาย เนื่องจากสูญเสีย As ที่เกิดจากการสลายตัว (Decomposition) ด้วยความร้อนที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง เมื่ออุณหภูมิของมีค่า 580°C ให้ทิ้งไว้เป็นเวลานานประมาณ 30 นาที ซึ่งได้จากสังเกตรูปแบบของ RHEED โดยภาพรูปแบบของ RHEED ที่ได้จากผิวหน้าแผ่นผลึก GaAs นั้นมีรูปแบบของ c(2X4) ดังในรูปที่ 3.1 หลังจากผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน GaAs สะอาดปราศจากออกไซด์แล้ว จากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานไปที่ 600°C และเริ่มทำการปลูกผลึก GaAs โดยการเปิดชัตเตอร์ของแหล่งจ่าย Ga เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเมื่อสิ้นสุดการปลูกผลึกตามเวลาที่ได้กำหนดไว้ให้ทำการปิดชัตเตอร์ของแหล่งจ่าย Ga จากนั้นทำการลดอุณหภูมิของแหล่งจ่าย Ga ลงไปสู่ค่าอุณหภูมิ 400°C ในค่าอัตราการลด 10°C/นาที ซึ่งได้ความหนาของชั้นผลึก Buffer GaAs ประมาณ 5000 Å ในลำดับต่อมาทำการลดอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานลงในอัตรา 10°C/นาที จนกระทั่งอุณหภูมิผิวหน้าแผ่นผลึก GaAs มีค่าอุณหภูมิที่กำหนดไว้สำหรับการทดลองปลูกผลึก InAs ในลำดับต่อไป พร้อมทั้งปรับค่าอุณหภูมิแหล่งจ่าย In และ As_4 ให้ได้ค่าตามที่กำหนดไว้ใน การทดลองที่กำหนดไว้ในแต่ละกรณี ซึ่งเป็นอันสิ้นสุดการปลูกชั้นผลึก Buffer GaAs และในขั้นนี้ตัวอย่างที่ได้พร้อมที่เข้าสู่การทดลองในลำดับต่อไป



รูปที่ 3.1 ภาพรูปแบบ RHEED แบบ c(2X4) ที่ได้จากแผ่นผลึกฐาน GaAs ที่อุณหภูมิ 580°C

3.3 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก

หลังจากสิ้นสุดการปลูกชั้นผลึก Buffer GaAs แล้ว ลำดับต่อไปเป็นการปลูกชั้นผลึก InAs โดยค่าความดันไอ BEP ของ As_4 และ In มีค่า 1×10^{-5} torr และ 5×10^{-7} torr ตามลำดับ ในกรณีนี้ค่าอัตราส่วน BEP ของ As_4/In มีค่าเท่ากับ 20 โดยค่าตัวแปรในการทดลองนี้คือค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก InAs ซึ่งมีค่าดังนี้ $400^\circ C$, $440^\circ C$, $480^\circ C$, และ $520^\circ C$ ตามลำดับ สำหรับค่าอุณหภูมินี้เป็นค่าอุณหภูมิจริงผิวหน้าแผ่นผลึกฐานที่ได้จากการสอบเทียบ (Calibration) จากรูปแบบของ RHEED และค่าอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิล หลังจากสิ้นสุดการปลูกผลึก InAs ทำลดอุณหภูมิของ Mo Block ลงในอัตรา $10^\circ C/นาท$ ไปยังค่าอุณหภูมิตั้งที่ห้องปกติ ในขณะที่อุณหภูมิตกลงนั้นชัตเตอร์ของแหล่งจ่าย As_4 ยังคงเปิดอยู่เพื่อป้องกันมิให้ผิวหน้าเสียหายเนื่องจากสูญเสีย As ด้วยการทำให้แผ่นผลึกฐานอยู่ภายใต้บรรยากาศของ As_4 เมื่ออุณหภูมิมิมีค่าต่ำกว่า $300^\circ C$ ทำการเปิด Shutter ของแหล่งจ่าย As_4 สำหรับช่วงระยะเวลาในปลูกผลึก InAs เป็นเวลานาน 115 นาที โดยได้ค่าความหนาของชั้นผลึก InAs ประมาณ $1 \mu m$

3.4 การศึกษาอิทธิพลค่าอัตราส่วน BEP ของ As_4/In

ในการทดลองนี้เริ่มต้นเช่นเดียวกันกับการศึกษาอิทธิพลของค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึกตามในหัวข้อที่ 3.3 หลังจากที่ผ่านมาการปลูกชั้นผลึก Buffer GaAs แล้ว สำหรับในการทดลองนี้ค่าอัตราส่วนของ As_4/In แปรค่าอยู่ในช่วง 10 เท่าถึง 35 เท่า โดยที่ค่าความดันไอ BEP ของ In มีค่า 5×10^{-7} torr ตลอดการทดลองนี้ และอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก $480^\circ C$ หลังจากสิ้นสุดการปลูกผลึก InAs ทำลดอุณหภูมิของ Mo Block ลงในอัตราการเพิ่ม $10^\circ C/นาท$ ไปยังค่าอุณหภูมิตั้งที่ห้องปกติ ในขณะที่อุณหภูมิตกลงนั้นชัตเตอร์ของแหล่งจ่าย As_4 ยังคงเปิดอยู่ เพื่อป้องกันมิให้ผิวหน้าเสียหายเนื่องจากสูญเสีย As ด้วยการทำให้แผ่นผลึกฐานอยู่ภายใต้บรรยากาศของ As_4 เมื่ออุณหภูมิมิมีค่าต่ำกว่า $300^\circ C$ ทำการเปิดชัตเตอร์ของแหล่งจ่าย As_4 สำหรับช่วงระยะเวลาในปลูกผลึก InAs เป็นเวลานาน 115 นาที โดยได้ค่าความหนาของชั้นผลึก InAs ประมาณ $1 \mu m$

3.5 การศึกษาอิทธิพลค่าอัตราการปลูกผลึก

หลังจากสิ้นสุดการปลูกชั้นผลึก Buffer GaAs แล้วเช่นเดียวกันกับการทดลองตามหัวข้อที่ 3.2 และ 3.3 สำหรับเงื่อนไขในการทดลองนี้ค่าอัตราการปลูกผลึก InAs มีค่า 0.2, 0.34, 0.4 และ 0.6 ML/วินาที โดยค่าอัตราการปลูกผลึกนี้ได้จากการวัด RHEED Oscillation และค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึกมีค่า $480^\circ C$ และค่าอัตราส่วน BEP ของ As_4/In มีค่าอยู่ในช่วง 22-32 สำหรับค่าอัตราการปลูกผลึก

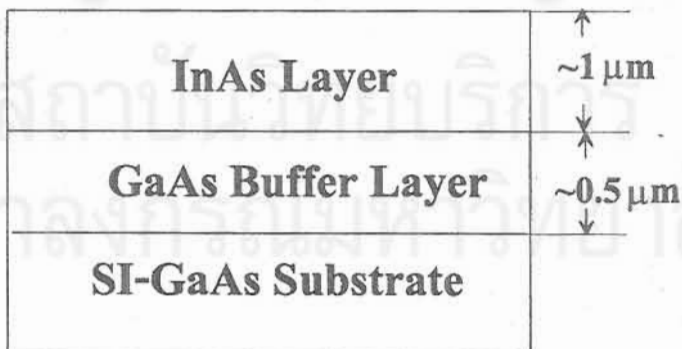
ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขในการทดลองศึกษาอิทธิพลของค่าอัตราการปลูกผลึก

| ตัวอย่าง | ค่าตัวแปรที่ใช้ในการปลูกผลึก InAs | | |
|----------|------------------------------------|---|--------------------------------|
| | ค่าอัตราการปลูกผลึก (ML/วินาที) | ค่าอัตราส่วน BEP ของ As ₄ /In | ค่าความหนาของผลึก InAs (μm) |
| 1 | 0.2 | 32 | 1 |
| 2 | 0.34 | 32 | 1 |
| 3 | 0.4 | 25 | 1 |
| 4 | 0.6 | 22 | 1 |

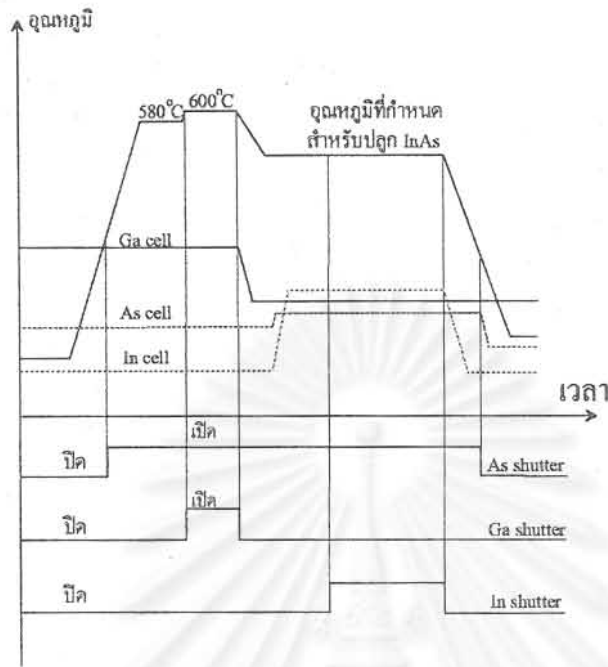
แต่ละค่าอัตราส่วน BEP ของ As₄/In ตามในตารางที่ 3.1 ค่าความหนาของชั้นผลึก InAs ในแต่ละตัวอย่างในกรณีนี้มีค่าประมาณ 1 μm

สำหรับในการทดลองที่มีค่าอัตราการปลูกผลึก 0.4 และ 0.6 ML/วินาที ค่าอัตราส่วน BEP ของ As₄/In มีค่า 25 และ 22 สาเหตุจากค่าความดันไอสมดุลของ As₄ ถูกจำกัดที่ 2×10^{-5} torr ทั้งสองกรณีเนื่องจากเป็นค่าสูงสุดระบบปั๊มปีสุญญากาศสามารถรองรับได้

สำหรับตัวอย่างในการทดลองแต่ละกรณีนั้นมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของตัวอย่างที่สร้างในการทดลอง



รูปที่ 3.3 แผนภาพจำลองกระบวนการทำงานของการตั้งค่าอุณหภูมิและชัตเตอร์ในการทดลองนี้

3.6 การวิเคราะห์ผล

ตัวอย่างที่ได้จากการปลูกผลึกอพิแทกซีจากถ้ำโมเลกุลถูกนำไปวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธี Van der PAUW ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.4.3 โดยตัดตัวอย่างออกเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมจตุรัสขนาด $5 \times 5 \text{ mm}^2$ ทำการสร้างผิวสัมผัสโอห์มิกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 0.5 ม.ม. ที่มุมแต่ละด้าน โดยมีระยะห่างจากด้านแต่ละด้านน้อยกว่า 0.5 ม.ม. ด้วยโลหะ In และมีค่าความหนาประมาณ 1000 \AA ซึ่งฉายด้วยการระเหยไอในสุญญากาศ (Vacuum Evaporation) จากนั้นทำการอบแอนนัลที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาที [23] เพื่อให้ผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำมีสมบัติแบบโอห์มิก (Ohmic Contact) หรือเชิงเส้น สำหรับคุณภาพผิวหน้าผลึก (Surface Morphology) ทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ สำหรับค่าความหนาของชั้นผลึก InAs ได้มีการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope) สุดท้ายเป็นการทดสอบค่าความไวผลตอบสนองแม่เหล็กของตัวอย่างที่ได้ในแต่ละกรณี โดยผลที่ได้นี้แสดงไว้ในบทที่ 4

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

สำหรับในบทนี้นำเสนอผลการทดลองที่ได้ดำเนินการในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ผลจากการศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้าและค่าความไวผลตอบสนองแม่เหล็ก (Magnetic sensitivity) ของชั้นผลึกอพิแทกซี InAs ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐาน (100) GaAs ด้วยวิธีการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล และผลการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการปลูกผลึก ได้แก่ ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกขณะทำการปลูกผลึก ค่าอัตราส่วน BEP ของ As₄/In และค่าอัตราการปลูกผลึกที่มีต่อสมบัติของชั้นผลึกอพิแทกซี InAs ที่ปลูกได้ในเงื่อนไขแต่ละกรณี

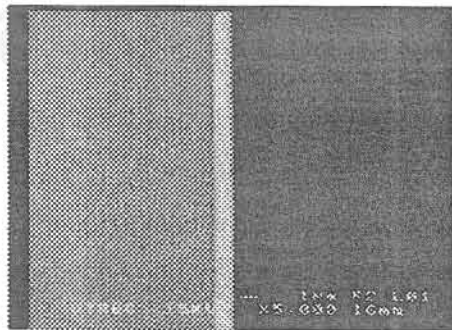
4.1 การตรวจสอบค่าความหนาของชั้นผลึกอพิแทกซี InAs ที่ปลูกได้

ชั้นผลึกอพิแทกซี InAs ที่ปลูกได้ในการทดลองนี้ เมื่อทำการวัดค่าความหนาของชั้นผลึกที่ปลูกได้ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope) มีค่าความหนาประมาณ 1 μm ดังในรูปที่ 4.1 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้จาก RHEED oscillation ที่ได้ ซึ่งในการทดลองที่ 3.2 และ 3.3 ค่า $P_{in} = 5 \times 10^{-7}$ torr ผลจาก RHEED oscillation ได้ค่าอัตราการปลูกผลึก 0.48 ML/วินาที และระยะเวลาการปลูกผลึก 160 นาที สำหรับค่าความหนาของชั้นผลึก InAs สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$1 \text{ Monolayer}_{\text{InAs}} = \frac{a_{\text{InAs}}}{2} = \frac{6.0854}{2} = 3.0292 \text{ \AA}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าความหนาของ InAs ที่ปลูกได้} &= 0.48 \text{ Monolayer/วินาที} \times 115 \text{ นาที} \times 60 \text{ วินาที/นาที} \times 3.0292 \text{ \AA} \\ &= 1.00327 \mu\text{m} \end{aligned}$$

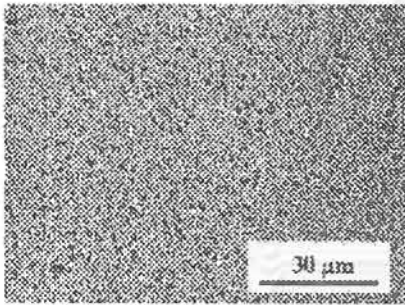
จากค่าที่คำนวณได้ข้างต้นมีผลใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนดังในรูปที่ 4.1



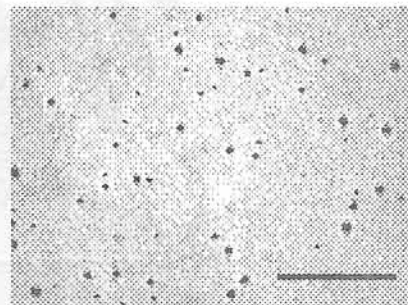
รูปที่ 4.1 ภาพตัดขวางของตัวอย่างผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

4.2 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะปลูกผลึก

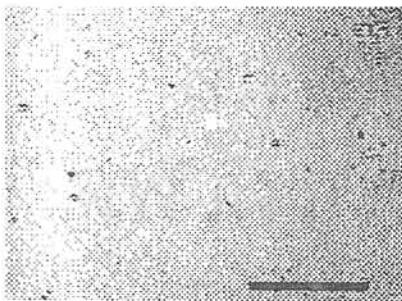
ภาพผิวหน้าของตัวอย่างที่ได้ในการทดลองนี้ภายใต้เงื่อนไขในแต่ละกรณีดังในรูปที่ 4.2 โดยรูปที่ 4.2 (ก) ผิวหน้าของตัวอย่างที่ได้จากการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 400°C มีลักษณะเป็นผิวหยาบ เนื่องจากการเกิดผลึกในกรณีนี้เป็นสภาวะที่ไม่ได้สัดส่วน (Non-stoichiometric) ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำและปริมาณของ As_4 ที่ไม่สอดคล้องกับสภาวะอุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกผลึก ซึ่งในกรณีนี้ปริมาณของ As_4 มีมากเกินไป (Excess) อันเป็นผลทำให้ผิวหน้าที่ได้ในกรณีนี้มี As มาก (As-rich) สำหรับรูปที่ 4.2 (ข) และ (ค) ผิวหน้าของตัวอย่างที่ได้มีลักษณะคล้ายกระจกที่มีจุดบกพร่องลดลงตามลำดับ เนื่องจาก As_4 สามารถประกอบรวมเข้าในผลึกได้อย่างมีสัดส่วน (Stoichiometric) มากขึ้นในกรณีที่อุณหภูมิการปลูกผลึกมีค่าสูงขึ้น สำหรับตัวอย่างที่ปลูกที่อุณหภูมิ 520°C ดังในรูปที่ 4.2 (ง) ผิวหน้ามีจุดบกพร่องในลักษณะคล้ายเซิร์ฟบอร์ด (Surfboard-shap-like defect) อันเนื่องจากการปลูกผลึกในกรณีนี้ปริมาณ As_4 ที่ใช้ไม่เพียงพอที่เกิดจากการสูญเสีย As_4 ที่อุณหภูมิสูงและทำให้ปริมาณของ In มีมากเกินไป ซึ่งลักษณะผิวหน้าที่ได้ในกรณีนี้แตกต่างไปจากกรณีตามรูปที่ 4.2 (ก) อย่างชัดเจน สำหรับผิวหน้าในกรณีนี้เป็นผิวหน้าที่มี In มาก (In-rich)



(ก)



(ข)

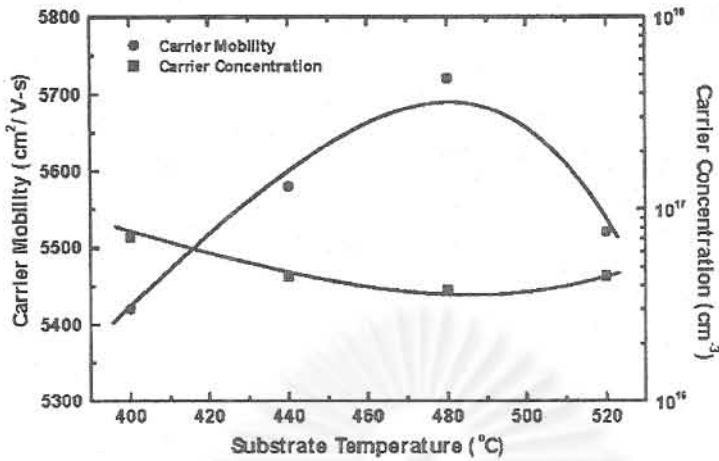


(ค)



(ง)

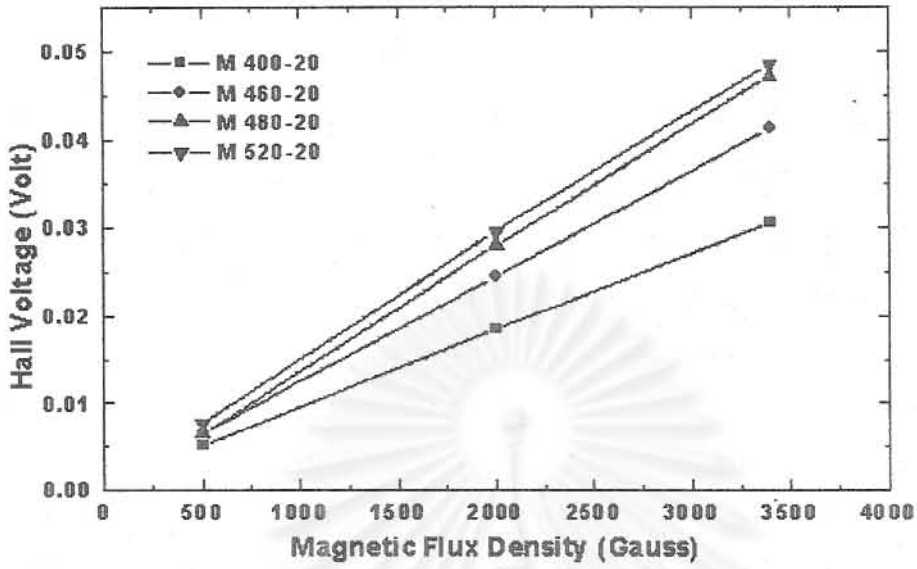
รูปที่ 4.2 ภาพผิวหน้าของชั้นผลึก $InAs$ ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐาน $GaAs$ โดยค่าอัตราส่วน BEP ของ As_4/In มีค่าเท่ากับ 20 และค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก : (ก) 400°C, (ข) 440°C, (ค) 480°C และ (ง) 520°C



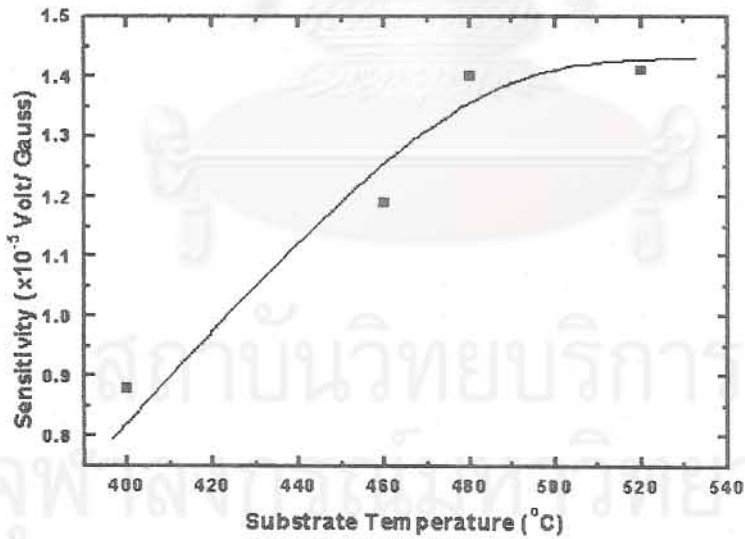
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคล่องตัวพาหะ ค่าความเข้มข้นอิเล็กตรอน และค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก โดยค่าอัตราส่วน BEP ของ As_4/In มีค่าเท่ากับ 20

สำหรับสมบัติเชิงไฟฟ้าจากการวัดวิธี van der PUAW ของตัวอย่างที่ได้ในกรณีนี้ตัวอย่างแสดงสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) และความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคล่องตัวพาหะ ค่าความเข้มข้นอิเล็กตรอนและค่าอุณหภูมิขณะทำการปลูกผลึกดังในรูปที่ 4.3 ซึ่งค่าความคล่องตัวพาหะที่ได้มีค่าอยู่ในช่วง 5,400-5,700 $cm^2/V-s$ และค่าความเข้มข้นอิเล็กตรอนมีค่าอยู่ในช่วง 4×10^{16} - $8 \times 10^{16} cm^{-3}$ โดยค่าความคล่องตัวพาหะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการปลูกผลึกที่มีค่าเพิ่มขึ้นสำหรับในช่วง 400-480°C และมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิมีสค่าสูงกว่า 480°C สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นอิเล็กตรอนมีลักษณะลดลงในช่วง 400-480°C และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิมีสค่าสูงกว่า 480°C แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นอิเล็กตรอนในกรณีนี้มีค่าไม่มากนัก

สำหรับค่าความไวผลตอบสนองแม่เหล็กของตัวอย่างในกรณีนี้หาได้จากค่าความชัน (Slope) ของความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันฮอลล์และค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้นดังในรูปที่ 4.4 ซึ่งค่าความชันที่ได้จากกราฟของแต่ละตัวอย่างในที่นี้คือค่าความไวผลตอบสนองแม่เหล็ก (Magnetic sensitivity) เมื่อนำค่าความชันของกราฟที่ได้จากแต่ละตัวอย่างมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไวผลตอบสนองแม่เหล็กและค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานทำการปลูกผลึกได้ดังในรูปที่ 4.5 จากกราฟในรูปที่ 4.5 ค่าความไวผลตอบสนองแม่เหล็กมีค่าอยู่ในช่วง $0.9-1.4 \times 10^{-5} Volt/Gauss$ โดยค่าความไวผลตอบสนองแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกขณะทำการปลูกผลึกมีเพิ่มขึ้นในลักษณะเป็นเชิงเส้นในช่วง 400-470°C และมีเมื่ออุณหภูมิมีสค่าสูงกว่า 470°C ค่าความไวผลตอบสนองแม่เหล็กมีค่าการเพิ่มในลักษณะเข้าสู่ค่าอิ่มตัว



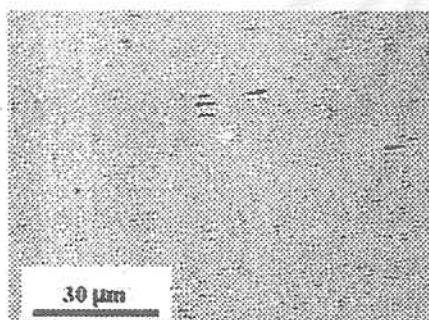
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันฮอลล์และค่าความเข้มสนามแม่เหล็กของตัวอย่างในการศึกษาอิทธิพลของค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก



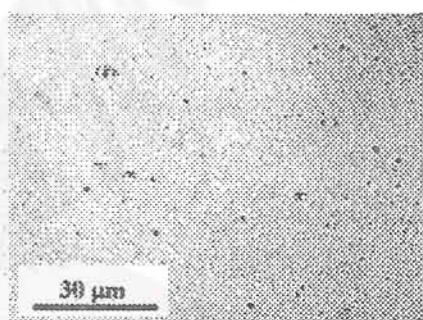
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไวผลตอบสนองแม่เหล็กและค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก

4.3 การศึกษาอิทธิพลของค่าอัตราส่วน BEP ของ As_4/In

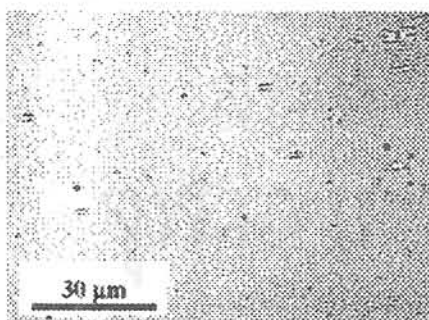
ภาพผิวหน้าของตัวอย่างที่ได้ในการทดลองดังในรูปที่ 4.6 โดยรูปที่ 4.6 (ก) นั้นมีลักษณะคล้ายกับผิวหน้าของตัวอย่างที่ได้จากการปลูกผลึกที่อุณหภูมิสูงตามในหัวข้อที่ 4.2 (รูปที่ 4.2 (ง)) เนื่องจากค่าอัตราส่วน BEP ของ As_4/In ที่ใช้ในกรณีนี้มีค่าต่ำเกินไปและค่าปริมาณของ As_4 ไม่สอดคล้องกับค่าอุณหภูมิที่ทำการปลูกผลึก ในกรณีนี้ผิวหน้ามีลักษณะเป็นผลึกที่ไม่ได้สัดส่วนขององค์ประกอบจากการมีปริมาณของ In มาก สำหรับในรูปที่ 4.6 (ข) ผิวหน้าที่ได้มีความเรียบมากยิ่งขึ้นในกรณีที่ค่าอัตราส่วน BEP ของ As_4/In มีเพิ่มขึ้นเป็น 22 และในรูปที่ 4.6 (ค) ผิวหน้าของตัวอย่างที่ได้มีความเรียบ แต่มีจุดบกพร่องเกิด (Point defect) ขึ้นเล็กน้อย เมื่อค่าอัตราส่วน BEP ของ As_4/In ที่มีค่าสูงขึ้นเป็น 32 ซึ่ง จุดบกพร่องเกิดจากปริมาณของ As_4 ในกรณีมีมากเกินไป ส่วนในกรณีที่ค่าอัตราส่วน BEP ของ As_4/In มีค่า 36 ดังในรูปที่ 4.6 (ง) ผิวหน้ามีลักษณะคล้ายกับผลึกที่ได้ในรูปที่ 4.2 (ก) เนื่องจากปริมาณของ As_4 ที่ใช้ในกรณีนี้มีมากเกินไปและมีความหยาบอย่างเด่นชัด



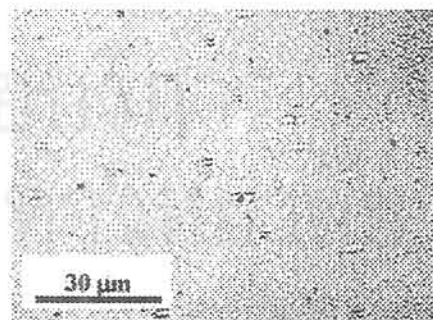
(ก)



(ข)

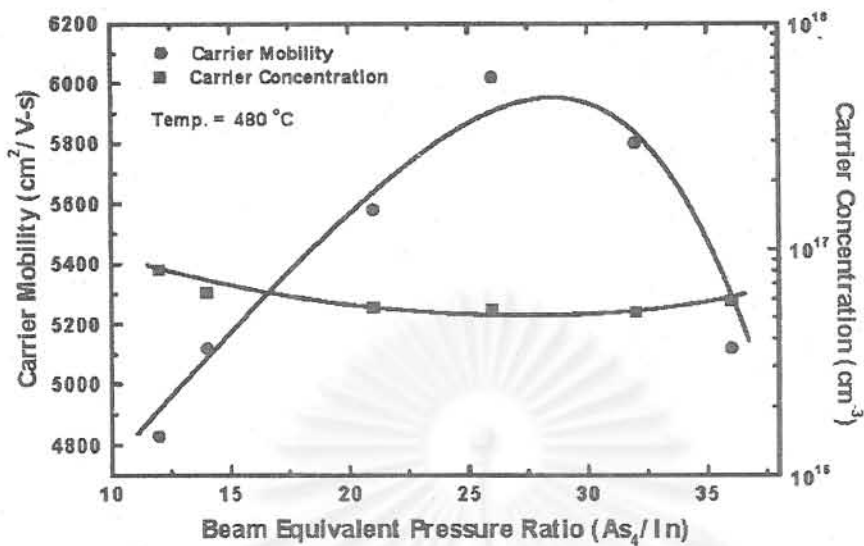


(ค)



(ง)

รูปที่ 4.6 ภาพผิวหน้าของชั้นผลึก InAs ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกขณะทำการปลูกผลึก $480^{\circ}C$ และค่าอัตราส่วน BEP ของ As_4/In มีค่า : (ก) 14, (ข) 22, (ค) 32 และ (ง) 36

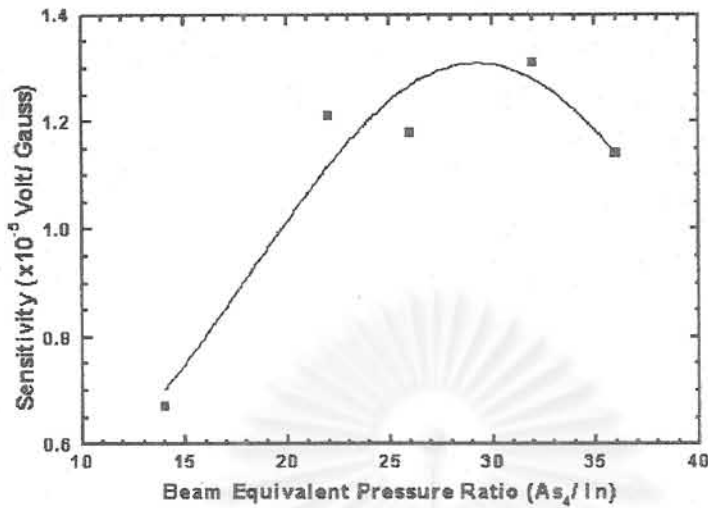


รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคล่องตัวพาหะ ค่าความเข้มข้นอิเล็กตรอน

และค่าอัตราส่วน BEP ของ As_4/In โดยมีค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกขณะทำการปลูกผลึก $480^{\circ}C$

สำหรับสมบัติเชิงไฟฟ้าจากการวัดวิธี van der PUAW ของตัวอย่างที่ได้ในกรณีนี้ตัวอย่างแสดงสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นเช่นเดียวกัน และความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคล่องตัวพาหะ ค่าความเข้มข้นอิเล็กตรอนและค่าอุณหภูมิขณะทำการปลูกผลึกดังในรูปที่ 4.7 ซึ่งค่าความคล่องตัวพาหะที่ได้มีค่าอยู่ในช่วง $5,100-6,000 \text{ cm}^2/V-s$ และค่าความเข้มข้นอิเล็กตรอนมีค่าอยู่ในช่วง $6 \times 10^{16}-8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ โดยค่าความคล่องตัวพาหะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าอัตราส่วน BEP ของ As_4/In ในช่วง 14-26 จากนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะอิมิตัวเมื่อค่าอัตราส่วน BEP ของ As_4/In มีค่ามากกว่า 26 และมีค่าลดลงเมื่อค่าอัตราส่วน BEP ของ As_4/In มีค่าสูงกว่า 28 สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นอิเล็กตรอนมีลักษณะลดลงในช่วงค่าอัตราส่วน BEP ของ As_4/In ในช่วง 14-26 และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าอัตราส่วน BEP ของ As_4/In สูงกว่า 28 แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นอิเล็กตรอนในกรณีนี้มีค่าไม่มากนัก

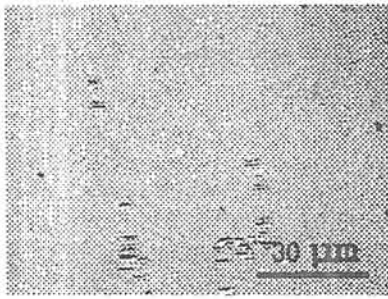
สำหรับค่าความไวผลตอบสนองแม่เหล็กของตัวอย่างในกรณีนี้มีความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไวผลตอบสนองแม่เหล็กและค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานทำการปลูกผลึกได้ดังในรูปที่ 4.8 ซึ่งค่าความไวผลตอบสนองแม่เหล็กมีค่าอยู่ในช่วง $0.7-1.3 \times 10^5 \text{ Volt/Gauss}$ โดยค่าความไวผลตอบสนองแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกขณะทำการปลูกผลึกมีเพิ่มขึ้นในลักษณะเป็นเชิงเส้นสำหรับค่าอัตราส่วน BEP ของ As_4/In ในช่วง 14-26 สำหรับค่าความไวผลตอบสนองแม่เหล็กเมื่อค่าอัตราส่วน BEP ของ As_4/In มีค่าสูงกว่า 26 มีลักษณะการเพิ่มแบบอิมิตัว และค่าอัตราส่วน BEP ของ As_4/In สูงกว่า 30 ค่าความไวผลตอบสนองแม่เหล็กมีค่าลดลง



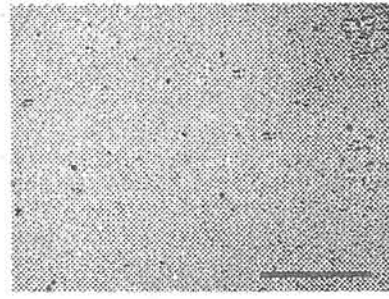
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไวผลตอบสนองแม่เหล็กและค่าอัตราส่วน BEP ของ As_4/In โดยมีค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกขณะทำการปลูกผลึก $480^{\circ}C$

4.4 การศึกษาอิทธิพลของค่าการปลูกผลึก

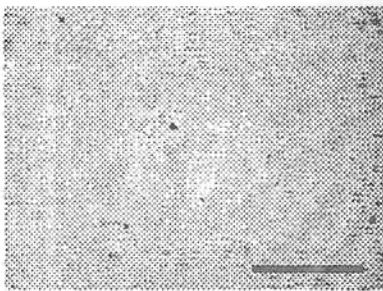
ผิวหน้าของตัวอย่างที่ได้จากการทดลองนี้ดังในรูปที่ 4.9 โดยรูปที่ 4.9 (ก) ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ได้จากปลูกด้วยค่าอัตราการปลูก 0.2 ML/วินาที ผิวหน้าในกรณีนี้มีสภาพปกติและมีลักษณะคล้ายคลึงกับผลที่ได้จากการปลูกในอัตราการปลูกผลึก 0.34 ML/วินาทีดังในรูปที่ 4.9 (ข) และสำหรับผิวของตัวอย่างที่ปลูกด้วยค่าอัตราการปลูก 0.4 ML/วินาที ดังในรูปที่ 4.9 (ค) นั้น มีผิวหน้าที่หยาบเล็กน้อย และผิวหน้าหยาบมากขึ้นเมื่อค่าอัตราการปลูกมีค่าสูงขึ้นเป็น 0.6 ML/วินาที ดังในรูปที่ 4.9 (ง) ซึ่งผลทั้งสองกรณีนี้เป็นผลจากความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นในชั้นผลึกอพิแทกซี $InAs$ ที่ปลูกลงบนแผ่นผลึกฐาน $GaAs$ ที่มีความแตกต่างกันของค่าคงตัวผลึก โดยมีค่าความแตกต่างกันถึง 7.4% ดังนั้นผลของค่าอัตราการปลูกจึงมีผลปรากฏขึ้นที่ผิวหน้าของสำหรับในกรณีนี้ เนื่องจากชั้นผลึกอพิแทกซีที่ปลูกนั้นมีค่าความเครียดเกิดขึ้นภายใน หากอัตราการปลูกผลึกมีค่าที่เหมาะสมทำให้ชั้นผลึกอพิแทกซีมีระยะเวลาผ่อนคลาย (Relaxation time) เพื่อให้เกิดการผ่อนคลายความเครียดดังผลตามในรูปที่ 4.9 (ก) และ (ข) แต่ในกรณีที่ค่าอัตราการปลูกผลึกมีค่าสูงๆ มีผลทำให้ระยะเวลาผ่อนคลายสั้นลง จึงเป็นผลทำให้เกิดความบกพร่อง (Defect) ขึ้นที่ผิวหน้าของชั้นผลึกตามผลที่ได้ในการทดลองนี้



(ก)



(ข)



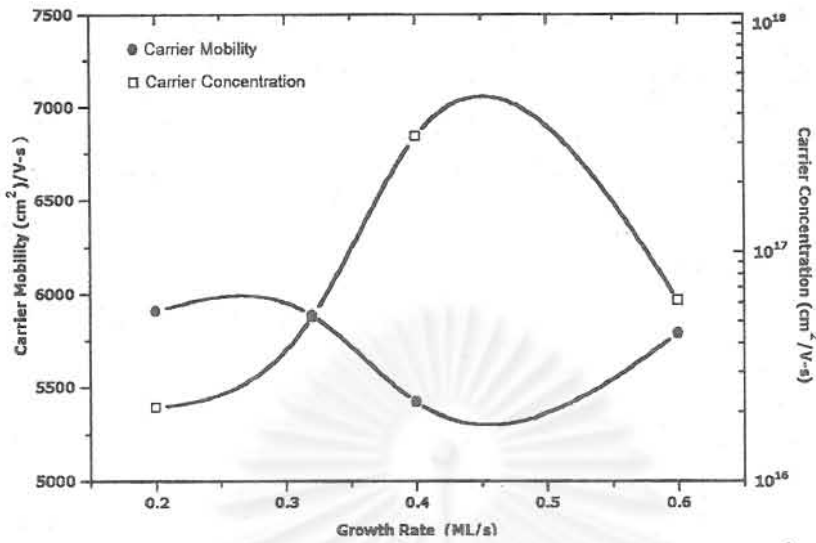
(ค)



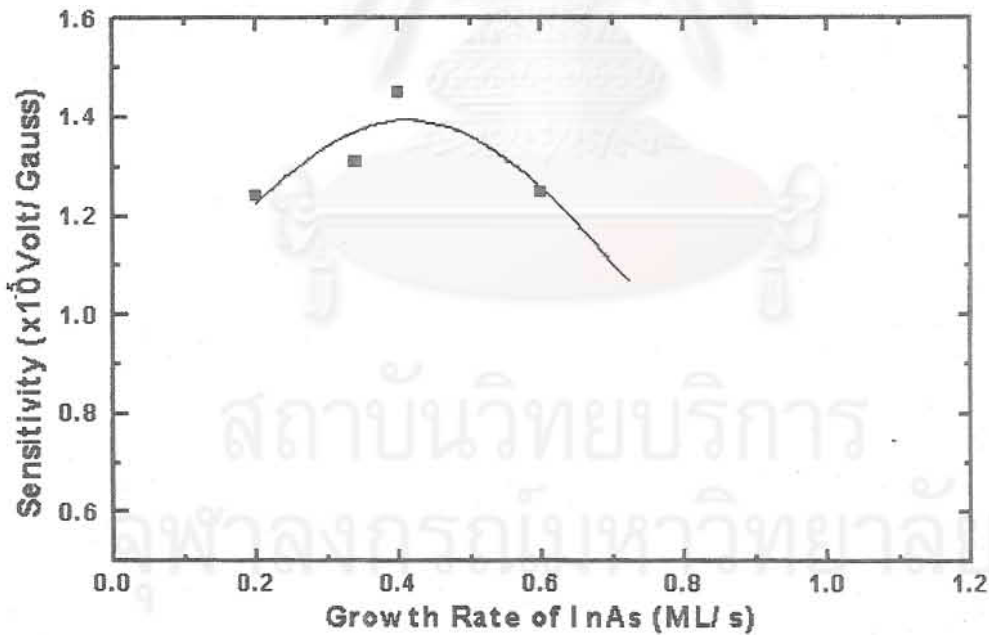
(ง)

รูปที่ 4.9 ภาพผิวหน้าของชั้นผลึก InAs โดยค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกขณะทำการปลูกผลึก 480°C ค่าอัตราส่วน BEP ของ As/In มีค่า 22-32 และค่าอัตราการปลูกผลึก:
(ก) 0.2 ML/วินาที, (ข) 0.34 ML/วินาที, (ค) 0.4 ML/วินาที และ (ง) 0.6 ML/วินาที

สำหรับสมบัติเชิงไฟฟ้าจากการวัดวิธี van der PUAW ของตัวอย่างที่ได้ในกรณีนี้ตัวอย่างแสดงสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเช่นเดียวกัน และความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคล่องตัวพาหะ ค่าความเข้มข้นอิเล็กตรอนและค่าอุณหภูมิขณะทำการปลูกผลึกดังในรูปที่ 4.10 ซึ่งค่าความคล่องตัวพาหะที่ได้มีค่าอยู่ในช่วง $5,400-6,800 \text{ cm}^2/\text{V-s}$ และค่าความเข้มข้นอิเล็กตรอนมีค่าอยู่ในช่วง $2.2 \times 10^{16}-5.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ โดยค่าความคล่องตัวพาหะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าอัตราการปลูกผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นสำหรับในช่วง 0.2-0.4 ML/วินาที และมีค่าอัตราการปลูกผลึกมีค่า 0.4 ML/วินาที สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นอิเล็กตรอนมีลักษณะลดลงในช่วง 0.2-0.4 ML/วินาที และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าอัตราการปลูกผลึกสูงกว่า 0.4 ML/วินาที แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นอิเล็กตรอนในกรณีมีค่าไม่มากนัก



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคล่องตัวพาหะ ค่าความเข้มข้นอิเล็กตรอน และค่าอัตราการปลูกผลึก โดยมีค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกขณะทำการปลูก 480°C และค่าอัตราส่วน BEP ของ As₄/In มีค่า 22-32



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไวผลตอบสนองสนามแม่เหล็กและค่าอัตราการปลูกผลึก โดยมีค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกขณะทำการปลูก 480°C และค่าอัตราส่วน BEP ของ As₄/In มีค่า 22-32

สำหรับค่าความไวผลตอบสนองสนามแม่เหล็กของตัวอย่างในกรณีนี้ ดังในรูปที่ 4.11 ซึ่งค่าความไวผลตอบสนองสนามแม่เหล็กของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าอัตราการปลูกผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นสำหรับช่วง 0.2-0.4 ML/วินาที และค่าความไวผลตอบสนองสนามแม่เหล็กของตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่อค่าอัตราการปลูกผลึกมีค่าสูงกว่า 0.4 ML/วินาที



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุป

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขที่ใช้ในการปลูกผลึกอพิแทกซีของ InAs บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น (100) GaAs ด้วยวิธีการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุลที่ใช้แหล่งจ่ายที่เป็นของแข็ง (Solid source) เงื่อนไขหรือตัวแปรต่างๆ ในการปลูกผลึกที่ได้ทำการศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะปลูกผลึก (Growth temperature) ค่าอัตราส่วน BEP ของ As₄/In และค่าอัตราการปลูกผลึก (Growth rate) ที่มีต่อสมบัติเชิงไฟฟ้าของผลึก InAs ที่ปลูกและคุณภาพผิว (Surface Morphology) ของผลึกที่ปลูกได้ สำหรับชั้นผลึกอพิแทกซี InAs ที่ได้มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) หรือมีพาหะนำไฟฟ้าส่วนใหญ่เป็นอิเล็กตรอน โดยมีค่าความคล่องตัวพาหะอยู่ในช่วง 5,400-6,800 cm²/V-s ค่าความเข้มข้นพาหะอยู่ในช่วง 2.2×10^{16} - 8×10^{16} cm⁻³ และค่าความไวผลตอบสนองแม่เหล็ก (Magnetic sensitivity) อยู่ในช่วง 0.8 - 1.4×10^{-5} Volt/Gauss ซึ่งค่าทั้งหมดที่ได้เป็นค่าที่วัดได้ที่อุณหภูมิห้อง (300K) รวมถึงคุณภาพของผิวน้ำชั้นผลึกที่ได้ขึ้นกับเงื่อนไขที่ใช้ในการปลูกผลึก สำหรับเงื่อนไขที่เหมาะสมในการปลูกผลึกอพิแทกซี InAs บนแผ่นผลึกฐาน (100) GaAs ที่มีค่าความคล่องตัวพาหะสูงสุด และมีค่าความไวผลตอบสนองแม่เหล็กสูงสุด ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึกอยู่ในช่วง 470-490°C ค่าอัตราส่วน BEP ของ As₄/In อยู่ในช่วง 26-30 และค่าอัตราการปลูกผลึกอยู่ในช่วง 0.35-0.45 ML/วินาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

ข้อเสนอแนะ

สำหรับงานวิจัยนี้ค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองเป็นค่าที่ได้จากเปรียบเทียบรูปแบบของ RHEED จากผิวหน้าของ GaAs ที่จุดเปลี่ยนแปลงต่างๆ ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนมากกว่า 10°C สำหรับวิธีการที่ดีที่สุดคือการใช้ Pyrometer แต่เครื่องมือนี้มีราคาแพง สำหรับอีกวิธีการหนึ่ง ได้แก่ การใช้โลหะหรือวัสดุที่มีค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวในช่วงที่เราทำงาน เช่น Al มีจุดหลอมเหลวที่ 660°C หรือ InSb มีจุดหลอมเหลวที่ 525°C ติดไว้บน Block ที่มีแผ่นผลึกฐานติดอยู่ และทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จาก Pyrometer และค่าที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิล เพื่อให้สามารถกำหนดค่าอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น แต่วิธีการนี้ยุ่งยากและไม่เหมาะสมสำหรับการทำงานในช่วงอุณหภูมิที่กว้างมากได้ หากใช้ในการผลิตเชิงพาณิชย์จำเป็นต้องใช้ Pyrometer เพื่อให้การผลิตสามารถทำซ้ำได้ (Repeatability) โดยข้อระมัดระวังในการเลือกโลหะหรือวัสดุสำหรับการเทียบวัดอุณหภูมินี้คือ โลหะหรือวัสดุนั้นต้องมีค่าความดันไอต่ำมาก มิฉะนั้นไอที่เกิดขึ้นมีผลทำให้เราไม่สามารถควบคุมสัดส่วนของผลึกหรือปริมาณของสารเจือปนได้ สำหรับการนำผลจากงานวิจัยนี้ไปใช้ในการผลิตสิ่งประดิษฐ์ Hall sensor ในเชิงพาณิชย์นั้น จำเป็นต้องมีการศึกษาในด้านเสถียรภาพเชิงอุณหภูมิและรูปร่างที่เหมาะสมเพื่อให้ได้สัญญาณขาออกที่มีค่าสูงสุด รวมถึงอิทธิพลของสารเจือปนที่มีต่อเสถียรภาพเชิงอุณหภูมิและสัญญาณขาออก เนื่องจากการใช้งานจริงในเครื่องมือหรืออุปกรณ์ต่างๆ นั้นเสถียรภาพเชิงอุณหภูมิมิมีความสำคัญอย่างยิ่ง ตัวอย่างเช่น เครื่องวัดความเร็วรอบในรถยนต์ที่ตัว Sensor ต้องใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง ($-20-150^{\circ}\text{C}$) หาก Hall sensor ที่ใช้ไม่มีเสถียรภาพเชิงอุณหภูมิมีผลทำให้การทำงานของระบบอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องทำงานผิดพลาดได้ อันเป็นผลทำให้เกิดความเสียหายอย่างร้ายแรงได้ สำหรับการพัฒนารสร้างสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์จาก GaSb/GaAlSb, GaSb/InPsb ที่ใช้แผ่นผลึกฐานเริ่มต้น (100) GaAs สำหรับแสงอินฟราเรดสามารถนำผลงานวิจัยนี้ไปเป็นพื้นฐานในการวิจัยต่อไปได้เช่นกัน สุดท้ายคณะผู้วิจัยหวังไว้ว่าโครงการอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยจะได้รับการส่งเสริมและสนับสนุนเพื่อนำผลที่ได้ไปใช้ในการพัฒนาประเทศต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง

1. Gu Hyun Kim, Jung Bum Choi, Jae-Young Leem, Joo In Lee, Sam Kyu Noh, Jong Su Kim, Jin Soo Kim, Se-Kyung Kang and Seung Il Ban, "Optical properties of InAs epilayers grown on GaAs by molecular beam epitaxy", *Journal of Crystal Growth*, Vol.234, pp. 110-114, 2002.
2. Mikhail V. Kisin, Michael A. Strosio, Serge Luryi and Gregory Belenky, "Interband tunneling depopulation in type-II InAs/GaSb cascade laser heterostructure", *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, Volume 10, Issue 4, June 2001, Pages 576-586
3. Seung-Hwan Kim and Sheng S. Li, "Theoretical investigation of InAs/GaInSb type-II superlattice infrared detectors for long wavelength and very long wavelength infrared applications", *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, Volume 16, pp. 199-208, 2003.
4. Hall Effect Sensing and Application, Honeywell, 1998.
5. V. Mosser, F. Kobbi, S. Contreras, J.M. Mercy, O. Callen, J.L. Roberts, S. Aboulhoda, J. Chevrier and D. Adam, "Low-cost 2DEG magnetic sensor with metrological performance for magnetic field and current sensing", 1997 International Conference on Solid State Sensors and Actuators, Vol.1, pp.401-404. 1997.
6. M. Behet, J. Das, J. De Boeck and G. Borghs, "InAs/(Al,Ga)Sb Quantum Well Structure for Magnetic Sensors", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 34, No. 4, 1998, pp. 1300-1302.
7. Vladimir Cambel, Goran Karapetrov, Peter Elias, Stanisla Hasenohrl, Wai-Kwong Kwok, Jochen Krause, Jan Manka, "Approaching the pT range with a 2DEG InGaAs/InP Hall sensor at 77K", *Microelectronic engineering*, 51-52, (2000), pp.333-342.
8. J.L. Robert, S. Contreras, J. Sicart, V. Mosser, F. Kobbi, "Pressure and Hall sensors : what does MBE allow to do ?", *Journal of Crystal Growth*, Vol. 201/202, 1999, pp.727-733.
9. Ichiro Shibasaki, "Mass Production of InAs Hall elements by MBE", *Journal of Crystal Growth*, Vol.175-176, 1997, pp.13-21.
10. Tsunenori SAKAMOTO, Hideo FUNABASHI, Kimihiro OHTA, Tadashi NAKAGAWA, Naoyuki KAWAI and Takeshi KOJIMA, "Phase-locked epitaxy using RHEED intensity oscillation", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.23, No.9, pp.L657-L659, 1984.

11. Yoshiji HORIKOSHI, Minoru KAWASHIMA and Hiroshi YAMAGUCHI, "Migration-enhanced Epitaxy of GaAs and AlGaAs", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 27, No.2, pp.169-179, 1988.
12. MBE Komponenten products, Dr. Karl Eberl MBE-Komponenten, 2003, pp. 45.
13. MBE Components & Accessories, Valved Arsenic Cracker Cells, RIBER, February 1999.
14. M.A. Herman and H. Sitter, "Molecular Beam Epitaxy : Fundamentals and Currents Status", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1989, pp. 96.
15. A.S. Bracker, M.J. Yang, B.R. Bennett, J.C. Culbertson, W.J. Moore, "Surface Reconstruction Phase for InAs, AlSb And GaSb", *Journal of Crystal Growth*, Vol.220, Pp. 384-392, 2000.
16. B. Junno, S. Jeppesen, M.S. Miller, L. Samuelson, "A Comparison of RHEED Reconstruction Phase On (100) InAs, GaAs and InP", *Journal of Crystal Growth*, Vol.164, pp.66-70, 1996.
17. F.G. Celii, Y.C. Kao and H.Y. Liu, "In situ composition monitoring of InGaAs/InP using quadrupole mass spectrometry", *Journal Vac. Sci. Technol.* Vol.A14, No.6, pp.3203-3207, 1996.
18. K.B. Ozanyan, P.J. Parbrook, M. Hopkinson, And C.R. Whitehouse, "In situ monitoring of the surface reconstructions on InP (100) prepared by molecular beam epitaxy", *J. Appl. Phys.*, Vol.82, No.1, pp.474-476, 1996.
19. GaInAsP Alloy Semiconductor, Edited By T.P. Pearsal, Wiley & Sons, 1982.
20. Data in Science and Technology, Editor in Chief : R. Poerschke, Semiconductors Group IV Elements and III-V Compounds, Editor : O. Madelung, Springer-Verlag, 1991.
21. InP-based Materials and Devices, Edited by Osamu WADA and Hideki HASEKAWA, John Wiley & Sons, 1999.
22. L.J. Van Der Pauw, "A method of Measuring the resistivity and Hall Coefficient on lamellage of arbitrary shape", *Phillips technical review*, Vol.20, pp.220-224, 1958.
23. Mitsuaki Yano, Masaharu Nogami, Yuichi Matsushima and Morihiko Kimata, "MolecularBeam Epitaxy Growth of InAs", *Japanesc Journal of Applied Physics*, Vol.16, No.12, 1977, pp. 2131-2137.

