การปลูกผลึกอิพิแทกซี InGaAs ($E_g \approx 0.75$ eV) บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น (100) GaAs ด้วยวิธีการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากสถานะโมเลกุล

โดย

รศ.ดร. สมชัย รัตนธรรมพันธ์ D. Eng. (Chula)

โครงการวิจัยเลขที่ 81G-EE-2548

ทุนงบประมาณแผ่นดิน ปี 2548

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพฯ

ตุลาคม 2550

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ไม่รับผิดชอบต่อผลเสียใดๆ อันอาจเกิดจากการนำความคิดเห็นในเอกสารฉบับนี้ไปใช้ ความคิดเห็นที่ปรากฏในเอกสารเป็นความคิดเห็นของผู้เขียนซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นความคิดเห็นของคณะฯ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การปลูกผลึกอิพิแทกซี InGaAs ($E_g \approx 0.75$ eV) บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น (100) GaAs ด้วยวิธีการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุล

โดย

รศ.ดร. สมชัย รัตนธรรมพันธ์ D. Eng. (Chula)

โครงการวิจัยเลขที่ 81G-EE-2548

ทุนงบประมาณแผ่นดิน ปี 2548

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพฯ

ตุลาคม 2550

กิตติกรรมประกาศ

ส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสภาวิจัยแห่งชาติ ปีงบประมาณ 2548 ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญูแก้ว ที่ได้ให้การสนับสนุนและคำแนะนำชี้แนะที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการวิจัยนี้ ขอบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ปิยะสาร ประเสริฐธรรม และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวราจารย์ แห่งภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อนุเคราะห์เอื้อเฟื้อเครื่อง XRD Prof. Yoshiaki NAKANO แห่ง University of Tokyo ประเทศ ญี่ปุ่นที่ได้เอื้อเฟื้อเครื่อง XRD สำหรับการเปรียบเทียบตัวอย่างมาตรฐานและชุดระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ พร้อมทั้งคุณศุภโชค ไทยน้อย คุณขวัญเรือน ไทยน้อย คุณพรชัย ช่างม่วง คุณปุณยศิริ บุญเป็ง และคุณองอาจ ตั้งเมตตาจิตตดุล ที่ให้ความช่วยเหลือในการวิจัยนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เลขหมู่
เลขทะเบียน 013643
วัน, เดือน, ปี 30 พ.ค. 51

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้มีศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขในการปลูกผลึกอิพิแทกซี InGaAs บนแผ่นผลึกฐาน (100) GaAs ด้วยวิธีการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุล คุณภาพผิวหน้าของผลึกที่ได้มีลักษณะเรียบมันเงาคล้านกระจกเงา สำหรับการวิเคราะห์ความเรียบของผิวหน้า (Surface roughness) ของชั้นผลึกที่ปลูกได้กระทำโดยใช้เครื่อง Atomic Force Microscope (AFM) โดยทำการศึกษาอิทธิพลของค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึกและค่าความดันไอ As_4 ที่มีผลต่อคุณสมบัติของชั้นผลึกอิพิแทกซี InGaAs พบว่าชั้นผลึกอิพิแทกซี InGaAs ที่ไม่มีการเจือมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและแสดงค่าความหนาแน่นพาหะนำไฟฟ้ามีค่าอยู่ในช่วง 1.68×10^{16}-4.48×10^{16} cm^{-3} และค่าความคล่องพาหะอยู่ในช่วง 700-1,791 $cm^2/V\text{-}s$ จากการวัดด้วยวิธี van der PAUW ที่อุณหภูมิห้อง จากผลที่ได้ในงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าคุณภาพของชั้นผลึกอิพิแทกซี InGaAs ที่ปลูกได้ขึ้นกับเงื่อนไขต่างๆ ที่ใช้ในการปลูกผลึก ได้แก่ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกขณะทำการปลูกผลึกมีค่าในช่วง 440-480 °C และค่าความดันไอ As_4 มีค่าอยู่ในช่วง 3.3×10^{-6}-1.5×10^{-5} Torr นอกจากนี้ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของตัวอย่างในการทดลองนี้ไม่สามารถวัดได้ เนื่องมาจากผลของความเครียดที่เกิดจากความแตกต่างของค่าคงตัวผลึก รวมถึงคุณบัติของ Auger Recombination ที่เกิดขึ้นในเนื้อผลึก InGaAs ที่ทำให้คุณสมบัติการเปล่งแสงของผลึก InGaAs นี้มีค่าต่ำมากจนไม่สามารถวัดได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Abstract

In this work, the growth of InGaAs layers on GaAs substrates by molecular beam epitaxy (MBE) was investigated. The surface mophology of InGaAs layers on GaAs substrates was mirror-like. The surface morphology were characterized by surface roughness using atomic force microscope (AFM). The effect of growth temperature and V/III ratios on the properties of InGaAs epi-layers were studied. The undoped InGaAs layers showed n-type conduction behavior with a background carrier concentration of 1.68×10^{16}-4.48×10^{16} cm^{-3} and mobility of 700-1,791 $cm^2/V\text{-}s$. Both were measured by van der PAUW method at room temperature. These results showed a strong dependence of InGaAs epi-layer quality on the growth conditions such as growth temperature and As_4/(In+Ga) flux ratios. The growth temperature is in the range of 440-480 °C and the As_4 pressure in the range of 3.3×10^{-6}-1.5×10^{-5} torr. The photoluminescence of samples can not be obtained because the lattice mismatched is induced by the strained in InGaAs epi-layers and Auger recombination.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ II
บทคัดย่อภาษาไทย III
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ IV
สารบัญ V
สารบัญตาราง VI
สารบัญรูป IX
สารบัญสัญญลักษณ์ X
บทที่ 1 บทนำ 1
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐาน 4
2.1 การปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุล 4
2.1.1 ชุดระบบการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุล 4
2.1.2 Effusion cell 7
2.1.2.1 Knudsen cell 7
2.1.2.2 Cracker cell 9
2.1.2.3 Valved cracker cell 10
2.1.2.4 Gas injection cell 11
2.1.3 อุปกรณ์วิเคราะห์ 12
2.1.3.1 Reflection high energy diffraction electron (RHEED) 13
2.1.3.2 Residual gas analyzer 15
2.1.3.3 อุปกรณ์อื่นๆ ที่สามารถติดตั้งเข้าในระบบ MBE 15
2.2 กลไกการเกิดผลึกของการปลูกผลึกอิพิแทกซีวิธี MBE 16
2.3 สารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V 19
2.3.1 โครงสร้างของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V 19
2.3.2 คุณสมบัติของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V 21
2.4 การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ 22
2.5 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าวิธี van der PAUW 23
2.5.1 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) 24
2.5.2 วิธีการวัดของ van der PAUW 25

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.3 การวัด van der PAUW ในทางปฏิบัติ....29
2.5.3.1 การกำหนดนิยามการวัดค่าความต้านทาน....30
2.5.3.2 การวัดหาค่าสภาพต้านทาน....30
2.5.3.3 การกำหนดนิยามในการวัดหาค่าแรงดันฮอลล์....31
2.5.3.4 การวัดค่าแรงดันฮอลล์....32
บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง....34
3.1 การเตรียมตัวอย่าง....34
3.2 การวิเคราะห์ตัวอย่าง....36
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล....37
4.1 การตรวจสอบค่าความหนาของชั้นผลึก InGaAs ที่ได้....37
4.2 ผลการวัดผลด้วย X-RAY....39
4.3 ผลการวัด Surface mophology ด้วย AFM....41
4.4 ผลการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธี van der PAUW....43
4.5 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์....47
บทที่ 5 สรุป....48
บทที่ 6 ข้อเสนอแนะ....49
เอกสารอ้างอิง....50

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ภาพโครงสร้างชุดระบบ MBE ของ RIBER รุ่น 32 P....6

รูปที่ 2.2 ชุดระบบ MBE ที่ติดตั้งที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย....6

รูปที่ 2.3 แผนภาพโครงสร้าง Knudsen cell....7

รูปที่ 2.4 ภาพโครงสร้างของ Ga-trapping cap....9

รูปที่ 2.5 ภาพของโครงสร้าง Cracker cell....10

รูปที่ 2.6 ภาพของ Arsenic valve cracker cell....11

รูปที่ 2.7 ภาพโครงสร้างของ Effusion cell ชนิด Gas injector cell....12

รูปที่ 2.8 แผนภาพอธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลงความเข้มของอิเล็กตรอนในขณะทำการปลูกผลึก....14

รูปที่ 2.9 แผนภาพความสัมพันธ์ของรูปแบบ RHEED และอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐาน (100) GaAs, InP และ InAs ภายใต้ไอของ Dimer....15

รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาของการเกิดผลึก GaAs ในกรณี Ga-As_2-(100) GaAs....18

รูปที่ 2.11 ปฏิกิริยาของการเกิดผลึก GaAs ในกรณี Ga-As_4-(100) GaAs....19

รูปที่ 2.12 แผนภาพโครงสร้างแบบ Zinceblende....20

รูปที่ 2.13 แผนภาพจำลองการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงที่เกิดจากการรวมตัว....23

รูปที่ 2.14 แผนภาพระบบการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์....24

รูปที่ 2.15 แผนภาพปรากฏการฮอลล์....25

รูปที่ 2.16 ภาพโครงสร้างของตัวอย่างสำหรับการวัดหาค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าวิธี van der PAUW....27

รูปที่ 2.17 แผนภาพการวัดค่าสภาพต้านทานในวิธีการวัดของ van der PAUW....28

รูปที่ 2.18 แผนภาพการวัดหาค่าแรงดันฮอลล์ในวิธีการวัดของ van der PAUW....29

รูปที่ 3.1 แผนภาพโครงสร้างของตัวอย่างที่สร้างขึ้นในการทดลอง....34

รูปที่ 3.2 แผนภาพจำลองกระบวนการทำงานของการตั้งค่าอุณหภูมิและ Shutter ในการวิจัยนี้....35

รูปที่ 4.1 ภาพภาคตัดขวางของตัวอย่างชั้นผลึกอิพิแทกซี InGaAs ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐาน (100) GaAs.38

รูปที่ 4.2 ตัวอย่างสเปกตรัมของผลการวัด XRD ที่ได้จากตัวอย่าง (ก) InP บน GaAs และ (ข) InGaAs บน GaAs (T_s = 460 °C, As_4 = 5.3 ×10^{-6} torr)....40

รูปที่ 4.3 ภาพ AFM ขนาด 5X5 μm^2 ของตัวอย่างบางตัวอย่างและภาพแสดงภาคตัดขวางของผิวตามแนวเส้นหนาของในแต่ละภาพ....42

รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Surface roughness และค่า BEP As_4....43

หน้า

รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นพาหะ ค่าความคล่องตัวและค่าความดันไอ As_4 ภายใต้เงื่อนไขการปลูกผลึกที่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐาน 440 °C.....44
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นพาหะ ค่าความคล่องตัวและค่าความดันไอ As_4 ภายใต้เงื่อนไขการปลูกผลึกที่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐาน 460 °C.....45
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นพาหะ ค่าความคล่องตัวและค่าความดันไอ As_4 ภายใต้เงื่อนไขการปลูกผลึกที่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐาน 480 °C.....46

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบชนิดของ Effusion cell และชนิดของลำโมเลกุลที่ได้จากวัตถุดิบชนิดต่างๆ 12

ตารางที่ 2.2 รายการส่วนประกอบพื้นฐานใน Growth chamber ของระบบ MBE 16

ตารางที่ 2.3 อุณหภูมิจุดระเหิดของสารประกอบ III-V ชนิดต่างๆ 17

ตารางที่ 2.4 ตัวแปรกายภาพของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V ชนิด 2 ธาตุ 21

ตารางที่ 2.5 ค่าแถบพลังงานของตัวอย่างสารประกอบชนิด 3 ธาตุและ 4 ธาตุ 22

ตารางที่ 3.1 รายละอียดของเงื่อนไขที่ใช้ในการปลูกผลึก InGaAs ($E_g \approx 0.75$ eV) บนแผ่นผลึกฐาน GaAs 35

ตารางที่ 4.1 ค่า $\Delta\theta$ ที่ได้จากการวัด XRD ของชั้นผลึก InGaAs ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐาน GaAs 41

ตารางที่ 4.2 ค่าความเข้มข้นพาหะและค่าความคล่องตัวพาหะของตัวอย่างจากการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 440-480 °C 46

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญสัญญลักษณ์

AlAs	: Aluminium Arsenide
AlP	: Aluminium Phosphide
AlSb	: Aluminium Antimonide
AlInAs	: Aluminium Indium Aresenide
AlGaInAs	: Aluminium Gallium Indium Arsenide
d	Thickness
E_g	Bandgap Energy
GaAs	: Gallium Arsenide
GaP	: Gallium Phosphide
GaSb	: Gallium Antimonide
GaInAsP	: Gallium Indium Arsenide Phosphide
InAs	: Indium Arsenide
InP	: Indium Phosphide
InSb	: Indium Antimonide
MBE	: Molecular Beam Epitaxy
MOCVD	: Metal-Organic Chemical Vapor Deposition
μ	: Carrier mobility
N_d	: Electron Concentration
RHEED	: Reflection High Energy Electron Diffraction
UHV	: Ultra-high vacuum

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสงระยะไกลในย่านค่าความยาวคลื่น 1.5 ไมครอนต้องการสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่ตอบสนองแสงในย่านค่าความยาวคลื่นดังกล่าว [1-2] ซึ่งสิ่งประดิษฐ์เหล่านั้นส่วนใหญ่ประดิษฐ์ขึ้นจากสารประกอบกลุ่ม III-V ได้แก่ InGaAsP [3], InAlGaAs [4] และ AlGaAsSb [5] โดยผลึกของสารประกอบเหล่านั้นมีค่าคงตัวผลึก (Lattice constant) มีค่าเท่ากับค่าคงตัวผลึกของสารประกอบ InP ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องใช้แผ่นผลึกฐานเริ่มต้น InP ในกระบวนการประดิษฐ์ อันเป็นผลทำให้สิ่งประดิษฐ์สำหรับการสื่อสารทางแสงในย่านค่าความยาวคลื่น 1.5 ไมครอนจึงมีราคาแพง อันเนื่องมาจากแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น InP นั้นมีราคาแพง แต่ด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีการปลูกผลึกอิพิแทกซีที่ทำให้เราสามารถปลูกผลึกอิพิแทกซีที่มีค่าคงตัวผลึกแตกต่างไปจากค่าคงตัวผลึกของแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น (Lattice mismatched) ที่ทำให้เราสามารถประดิษฐ์สิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้างเป็นผลึกที่มีค่าคงตัวผลึกแตกต่างไปจากค่าของแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นได้ โดยคุณภาพของผลึกอิพิแทกซีในโครงสร้างสิ่งประดิษฐ์ที่ได้นั้นขึ้นกับเงื่อนไขของการปลูกผลึกอิพิแทกซี ได้แก่ ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก (Substrate temperature) ค่าอัตราการปลูกผลึก (Growth rate) และค่าอัตราส่วนของ V/III (V/III ratio) เป็นต้น ในปัจจุบันแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นที่นิยมใช้ในกระบวนการประดิษฐ์สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ GaAs และ InP แต่เมื่อพิจารณาในด้านราคาแล้วแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs มีข้อดีที่เหนือกว่า และในด้านเทคโนโลยีการผลิตแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs นั้นสามารถผลิตได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ใหญ่ถึง15 เซนติเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าของ InP ที่สามารถผลิตได้เพียงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตรอันเป็นผลทำให้ราคาสิ่งประดิษฐ์ต่อหน่วยมีราคาที่ถูกกว่า และอีกประการหนึ่งคือเทคโนโลยีสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ความถี่สูงที่ประดิษฐ์บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs ได้ถูกพัฒนาจนมีขีดความสามารถในการผลิตออกจำหน่ายในเชิงพาณิชย์อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ได้แก่ ทรานซิสเตอร์ความถี่สูงในโทรศัพท์ไร้สาย เครื่องรับสัญญาณโทรทัศน์ผ่านดาวเทียม เป็นต้น ดังนั้นหากเราสามารถประดิษฐ์แผงวงจรรวมที่ประกอบขึ้นด้วยสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้งานในย่าน 1.5 ไมครอนรวมเข้ากับสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ความถี่สูงได้ อันเป็นผลทำให้ราคาสิ่งประดิษฐ์มีราคาถูกลง มีความคล่องตัวในการใช้งานและความเป็นไปได้ในการผลิตออกจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ด้วยเทคโนโลยีของ GaAs ที่มีอยู่ในปัจจุบัน

สำหรับสารประกอบ InGaAsP, InAlGaAs และ AlGaAsSb นั้น InAlGaAs เป็นกลุ่มสารประกอบหนึ่งที่มีข้อดีเหนือกว่า InGaAsP และ AlGaAsSb ในด้านที่มีธาตุหมู่ V ตามในตารางธาตุเพียงชนิดเดียว อันทำให้การควบคุมค่าสัดส่วนประกอบอื่นๆ ที่เป็นธาตุหมู่ III ตามในตารางธาตุสามารถทำได้ง่ายกว่า เนื่องจากค่าสัดส่วนของธาตุหมู่ III มีความสัมพันธ์ในสภาวะไอและในสภาวะของแข็งนั้นมีความสัมพันธ์

ในแบบเชิงเส้น อีกประการหนึ่งคือความเป็นไปได้ในการใช้แผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs ซึ่งเป็นสารประกอบ As-based เช่นเดียวกันกับ InAlGaAs ทำให้กระบวนการปลูกผลึกสามารถทำได้อย่างต่อเนื่อง และการปรับเปลี่ยนค่าสัดส่วนองค์ประกอบ InAlGaAs สามารถทำได้ง่ายกว่า อันเนื่องมาจากตัวแปรสำหรับสารประกอบกลุ่มนี้เป็นธาตุหมู่ III ตามในตารางธาตุทั้งหมด ซึ่งสามารถควบคุมค่าสัดส่วนได้ง่ายกว่าสาเหตุจากค่าสัดส่วนของธาตุหมู่ III ตามในตารางธาตุมีความสัมพันธ์ในสภาวะไอและในสภาวะของแข็งมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น แต่ในกรณีของธาตุหมู่ V ตามในตารางธาตุนั้นมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งทำให้การควบคุมค่าสัดส่วนในกรณีนี้สามารถทำได้ยากกว่า

สำหรับสารประกอบ InAlGaAs นั้นเป็นสารประกอบที่ประกอบขึ้นจากสารประกอบชนิด 3 ธาตุ (Ternary) จำนวน 2 ชนิด ได้แก่ InGaAs ($E_g \approx 0.75$ eV) และ InAlAs ($E_g \approx 1.45$ eV) ซึ่งคุณสมบัติเชิงแสงของสารประกอบ InAlGaAs จะแปรเปลี่ยนไปตามค่าสัดส่วนของ InGaAs และ InAlAs ในสารประกอบดังกล่าว ดังนั้นเราจึงสามารถประดิษฐ์หรือสร้างสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ได้จากสารประกอบนี้ด้วยการปรับเปลี่ยนค่าสัดส่วนของชั้นผลึกอิพิแทกซีในโครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์ โดยเฉพาะสารประกอบ InGaAs นั้นมีบทบาทสำคัญอย่างมากในสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้งานในย่านค่าความยาวคลื่น 1.5 ไมครอนทั้งสิ่งประดิษฐ์เปล่งแสง (Light emitter) [6-7] และสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสง (Light detector) [8-9] รวมถึง InGaAs ($E_g \approx 0.75$ eV) มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับใช้ในการสร้างขั้วต่อโอห์มมิกที่มีค่าความต้านทานต่ำ [10] ดังนั้นสารประกอบ InGaAs ($E_g \approx 0.75$ eV) จึงมีบทบาทสำคัญสำหรับสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้งานในย่านค่าความยาวคลื่น 1.5 ไมครอน

วิธีการปลูกผลึกอิพิแทกซีที่นิยมใช้ในการผลิตเชิงพาณิชย์สำหรับ InGaAs ($E_g \approx 0.75$ eV) ได้แก่ วิธีการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุล (Molecular beam epitaxy : MBE) และวิธีการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากสถานะไอของโลหะ-อินทรีย์ (Metal-organic Vapor Phase Epitax : MOVPE) ในปัจจุบันกระบวนการผลิตสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการสื่อสารทางแสงในย่านค่าความยาวคลื่น 1.5 ไมครอนในเชิงพาณิชย์นั้น ส่วนใหญ่นิยมใช้แผ่นผลึกฐานเริ่มต้นจาก InP แต่อย่างไรก็ตามได้มีนักวิจัยบางกลุ่มได้พยายามประดิษฐ์สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์สำหรับใช้ในการสื่อสารทางแสงในย่านค่าความยาวคลื่น 1.5 ไมครอน โดยใช้แผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs และใช้เทคนิคการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุล อันเนื่องมาจากมีความปลอดภัยสูงและความแม่นยำในกระบวนการผลิตสูง [11]

ดังนั้นเพื่อเป็นการเตรียมพร้อมทางด้านองค์ความรู้ (Knowhow) สำหรับวัสดุสารประกอบกึ่งตัวนำ InGaAs ($E_g \approx 0.75$ eV) คณะผู้วิจัยจึงดำริโครงการวิจัยนี้เพื่อเตรียมพร้อมในการรองรับการวิจัยสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการสื่อสารทางแสงในย่านค่าความยาวคลื่น 1.5 ไมครอน และการพัฒนาศักยภาพในการใช้ชุดระบบการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุลในการสังเคราะห์สารประกอบ

InGaAs ($E_g \approx 0.75$ eV) เพื่อรองรับการพัฒนาและการวิจัยในด้านเลเซอร์ไดโอดและตัวตรวจรับแสงหรือโฟโตดีเทกเตอร์สำหรับระบบสื่อสารทางแสงระยะไกลต่อไป

สำหรับรายงานวิจัยนี้มีเนื้อหาสาระดังนี้ ในบทที่ 2 กล่าวถึงความรู้พื้นฐานของการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุล ได้แก่ รายละเอียดของโครงสร้างชุดระบบการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุล กลไกการเกิดผลึกในการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุล ความรู้พื้นฐานของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V การวัดคุณสมบัติเชิงไฟฟ้าวิธี van de PAUW ในบทที่ 3 กล่าวถึงรายละเอียดและขั้นตอนการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและค่าอัตราส่วน BEP ของ As_4/(In+Ga) ที่มีต่อคุณสมบัติของผลึก InGaAs ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐาน GaAs ในบทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ ในบทที่ 5 เป็นการสรุปผลการทดลอง และในบทที่ 6 ข้อเสนอแนะจากงานวิจัยนี้และแนวทางในการพัฒนาเพื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปใช้งานต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
ความรู้พื้นฐาน

สำหรับในบทนี้เป็นการทบทวนความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้โดยสังเขป ซึ่งมีเนื้อหาสาระเกี่ยวข้องกับเทคนิคการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy : MBE) กลไกการเกิดผลึกที่เกิดขึ้นในกระบวนการปลูกผลึกอิพิแทกซีวิธี MBE ความรู้พื้นฐานของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence) และการวัดคุณสมบัติเชิงไฟฟ้าวิธี Van der Pauw

2.1 การปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมกุล (Molecular Beam Epitaxy : MBE)

การปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมกุลหรือ MBE เป็นเทคนิคการปลูกชั้นผลึกสารประกอบกึ่งตัวนำบนผิวของแผ่นผลึกฐาน (Substrate) ที่เป็นผลึกเดี่ยว (Single Crystal) โดยการพ่นลำโมเลกุลของก๊าซหรืออะตอมของธาตุที่เป็นวัตถุดิบลงบนผิวหน้าแผ่นผลึกฐาน ซึ่งเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลหรืออะตอมที่เป็นองค์ประกอบของสารประกอบสารกึ่งตัวนำ โมเลกุลเหล่านั้นได้จากการระเหยหรือระเหิด (Evaporation) วัสดุที่มีธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารประกอบ (Constituent species) ภายใต้สภาวะสุญญากาศระดับสูงพิเศษ (Ultra-high Vaccum) ปฏิกิริยาของการเกิดเป็นสารประกอบนี้เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน ค่าอัตราส่วนของสารประกอบและคุณสมบัติทางกายภาพของชั้นผลึกอิพิแทกซีที่ปลูกได้นั้นขึ้นกับเงื่อนไขและตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการปลูกผลึก ได้แก่ อัตราส่วนค่าความดันไอของลำโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบ อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูก ฯลฯ เป็นต้น นอกจากนี้อัตราการปลูกผลึกนี้ขึ้นค่าความดันไอขององค์ประกอบที่มีคุณสมบัติการเกาะติด (Impinging) ผิวหน้าแผ่นผลึกฐาน สำหรับข้อดีของการปลูกผลึกอิพิแทกซีวิธี MBE ได้แก่ การเตรียมผิวแผ่นผลึกฐานสามารถทำได้ง่าย โดยวิธีการทำความสะอาดด้วยความร้อน (Thermal cleaning) ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ความสามารถในการตรวจสอบ (Monitoring) โครงสร้างผิว (Surface structure) ที่สามารถกระทำได้ตลอดเวลาตั้งแต่ก่อนเริ่มต้นการปลูกผลึกจนสิ้นสุดกระบวนการปลูกผลึก นอกจากนี้การปลูกผลึกอิพิแทกซีวิธี MBE ที่ดำเนินการในระบบสุญญากาศระดับสูงพิเศษ ทำให้ผลึกที่ปลูกได้นั้นมีความบริสุทธิ์สูงกว่าวิธีการอื่นๆ เนื่องจากก๊าซต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อคุณภาพผลึก ได้แก่ H_2O, O_2, CO และ CO_2 เป็นต้น มีปริมาณที่ต่ำมากๆ ในสภาวะสุญญากาศระดับสูงพิเศษ จึงให้เราสามารถควบคุมคุณภาพของผลึกได้ตามที่เราต้องการ

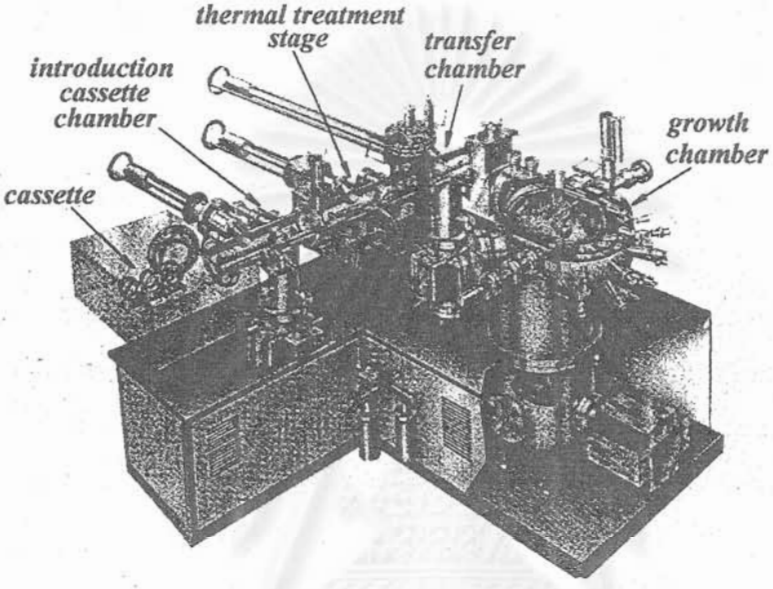
2.1.1 ชุดระบบการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุล

ชุดระบบการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุลที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชุดระบบ MBE ของบริษัท RIBER รุ่น 32 P ซึ่งมีลักษณะเป็นโมดูล (Module) โดยประกอบด้วยส่วน Introduction chamber ส่วน

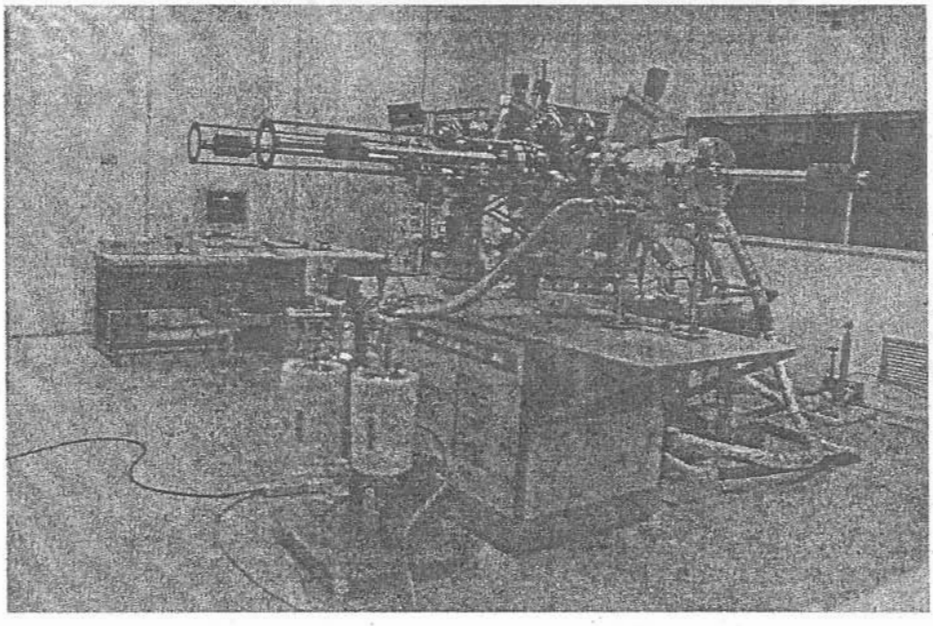
Thermal treatment stage ส่วน Transfer buffer chamber และส่วน Growth chamber ดังแผนภาพตามรูปที่ 2.1 โมดูลแต่ละส่วนที่ต่อกันนี้มี Gate valve ต่อขั้นกลางระหว่างโมดูล โดยจะเปิด Gate valve ให้ Cassette ที่เป็น Carrier ในการบรรทุก Substrate holder ผ่านเข้าออกจากโมดูลส่วนหนึ่งไปยังโมดูลอีกส่วนหนึ่ง และเพื่อปิดแยกให้โมดูลแต่ละส่วนเป็นอิสระจากกัน เพื่อให้การรักษาสภาวะสุญญากาศในแต่ละส่วนเป็นอิสระจากกัน ส่วน Introduction chamber เป็นส่วนติดต่อระหว่างภายนอกที่มีสภาวะความดันบรรยากาศปกติ (760 torr) และส่วน Thermal treatment stage ซึ่งมีสภาวะสุญญากาศในระดับ 10^{-10} torr โดยส่วน Introduction chamber นี้มีปั๊มปั๊สุญญากาศ (Vacuum pump) จำนวน 2 ชุดคือ Rotary pump และ Sorption pump ทำหน้าที่ปั๊มปั๊เพื่อสร้างสภาวะสุญญากาศระดับปานกลาง (10^{-4} Torr) โดย Cassette จากภายนอกสามารถลำเลียงผ่านโมดูลส่วนนี้ เพื่อลำเลียงเข้าสู่ระบบ MBE ต่อไป ในทำนองกลับกันการลำเลียง Cassette ออกจากระบบ MBE ก็ดำเนินการผ่านส่วน Introduction chamber เช่นเดียวกัน และทำการปรับสภาวะจากสุญญากาศสู่สภาวะบรรยากาศปกติด้วยการเติมก๊าซไนโตรเจนสะอาด ส่วน Thermal treatment stage เป็นส่วนที่ใช้ในการทำ Outgassing แผ่นผลึกฐานก่อนการปลูกผลึก เพื่อไล่ความชื้นและขจัดออกไซด์ (บางส่วน) ที่ผิวของแผ่นผลึกฐาน ในส่วนนี้มีปั๊มปั๊สุญญากาศจำนวน 2 ชุดคือ Ion pump และ Ti sublimation pump ส่วน Transfer buffer chamber เป็นส่วนที่ใช้ในการลำเลียง Substrate holder เข้าหรือออกจากส่วน Growth chamber และส่วน Growth chamber เป็นส่วนที่กระบวนการปลูกผลึกอิพิแทกซีดำเนินการในโมดูลส่วนนี้ โดยแผนภาพของส่วน Growth chamber ดังรูปที่ 2.1 ส่วนประกอบต่างๆ มีดังนี้ ส่วน Cyopanel เป็นช่องเปิดสำหรับรับไนโตรเจนเหลวจากภายนอก เพื่อทำหน้าที่หล่อเย็นระบายความร้อนที่เกิดจาก Effusion cell ให้แก่ Growth chamber นอกจากนี้ไนโตรเจนเหลวยังช่วยทำให้สภาวะสุญญากาศในส่วน Growth chamber ดีขึ้น เนื่องจากความเย็นของไนโตรเจนเหลวทำให้มวลของบรรยากาศภายในมีความหนาแน่นมากขึ้น ทำให้ระบบปั๊มปั๊สุญญากาศสามารถทำงานได้ดียิ่งขึ้น สำหรับวัตถุดิบที่ใช้ในระบบของคณะผู้วิจัย ได้แก่ 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 [12] และ Migration enhanced epiatxy หรือ MEE [13] ที่สามารถควบคุมค่าความหนาได้ในระดับ Monolayer ของผลึกที่ปลูก ส่วน Gas analyzer เป็นเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบสภาวะบรรยากาศภายใน Growth chamber และ Ionization gauge เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดเทียบค่าความดันไอของลำโมเลกุลต่างๆ ที่ใช้ในการปลูกผลึกแต่ละครั้ง เพื่อปรับแต่งเงื่อนไขค่าความดันไอขององค์ประกอบต่างๆ ในการปลูกผลึกแต่ละครั้งให้

ได้เงื่อนไขตามที่ต้องการ ในปัจจุบันระบบ MBE ได้มีการพัฒนาให้สามารถใส่อุปกรณ์อื่นๆ นอกเหนือจากนี้ สำหรับใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของผลึกเข้าไปในระบบ MBE ได้แก่ Ellipsometer ที่ใช้ในการควบคุมค่าความหนา (Thickness) ซึ่งทำให้เกิดความคล่องตัวและความต่อเนื่องในการทำงาน อันช่วยให้สามารถควบคุมการปลูกผลึก การวิเคราะห์โครงสร้างและคุณสมบัติของผลึกที่ปลูกได้อย่างรวดเร็ว ทำให้การดำเนินการสามารถทำได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว



รูปที่ 2.1 ภาพโครงสร้างชุดระบบ MBE ของ RIBER รุ่น 32 P



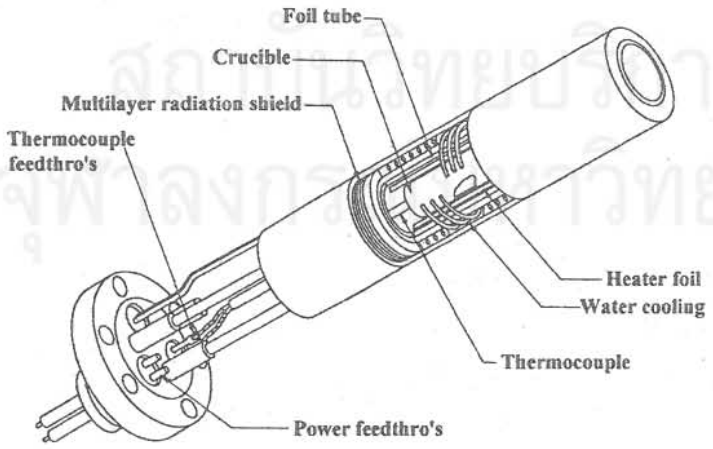
รูปที่ 2.2 ชุดระบบ MBE ที่ติดตั้งในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.2 Effusion cell

Effusion cell เป็นอุปกรณ์หลักสำคัญของระบบ MBE ในการผลิตลำโมเลกุลขององค์ประกอบจากวัตถุดิบที่ใช้ในการปลูกผลึก ซึ่งวัตถุดิบนี้เป็นธาตุบริสุทธิ์หรือสารประกอบที่มีธาตุที่เป็นองค์ประกอบก็ได้ และความสำคัญของ Effusion cell นั้นเป็นกุญแจสำคัญที่ทำให้การปลูกผลึกวิธี MBE มีข้อดีเด่นที่เหนือกว่าเทคนิคอื่นๆ โดย Effusion cell แต่ละชนิดนั้นมีความเหมาะสมสำหรับวัสดุแต่ละชนิดแตกต่างกันไป ซึ่งในรายงานวิจัยนี้นำเสนอเฉพาะ Effusion cell ที่เกี่ยวข้องกับการปลูกผลึกอิพิแทกซีของ GaAs และ InP เท่านั้น

2.1.2.1 Knudsen cell

Knudsen cell หรือ K-cell เป็น Effusion cell แบบที่ง่ายที่สุด ซึ่งใช้ในการระเหยหรือระเหิด (Evaporate) วัตถุดิบให้เป็นลำโมเลกุลด้วยพลังงานความร้อน สำหรับโครงสร้างของ Knudsen Cell ดังในรูปที่ 2.3 วัตถุดิบที่ใช้ถูกบรรจุไว้ในเบ้าหลอม (Crucible) ซึ่งทำจากวัสดุ Pyrolytic boron nitride หรือ PBN โดยเบ้าหลอมนี้ถูกล้อมรอบด้วยขดลวดความร้อน (Heating elements) ขดลวดความร้อนเป็นตัวกำเนิดความร้อนให้แก่เบ้าหลอมจากการผ่านกระแสไฟฟ้า และที่ใต้เบ้าหลอมนี้มีเทอร์โมคัปเปอร์ (Thermocouple) ติดตั้งอยู่ เพื่อใช้ในการตรวจสอบอุณหภูมิและในการควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดความร้อนให้ได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ โดยอาศัยสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปอร์ต่อเข้ากับเครื่องควบคุมแบบ PID ที่ทำหน้าที่ควบคุมแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้ขดลวดความร้อนของ Effusion cell เพื่อทำให้เบ้าหลอมมีอุณหภูมิตามที่กำหนด สำหรับ K-cell ที่มีเบ้าหลอมขนาดใหญ่นั้นจำเป็นต้องมีท่อน้ำระบายความร้อนอยู่ภายใน เพื่อให้ความร้อนที่เกิดขึ้นไม่ไปรบกวนส่วนอื่นๆ อีกด้วย



รูปที่ 2.3 แผนภาพโครงสร้าง Knudsen Cell

สำหรับการควบคุมปริมาณของจำนวนโมเลกุลที่พ่นออกจาก Knudsen cell ควบคุมได้จากอุณหภูมิของขดลวดความร้อนภายใน Knudsen cell ซึ่งปริมาณของจำนวนโมเลกุลของสารที่พ่นออกจาก Knudsen cell สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$J = 1.118X10^{22}\frac{pA}{l^2\sqrt{MT}} \quad \text{molecules/cm}^2\text{-s} \qquad (2.1)$$

โดย p คือค่าความดันไอของธาตุที่อุณหภูมิกำหนดมีหน่วยเป็นทอรร์ (Torr)

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

l คือค่าระยะห่างจากปากช่องเปิดของ Knudsen Cell ถึงผิวหน้าของผลึกฐานมีหน่วยเป็น ซม.

M คือค่ามวลโมเลกุลขององค์ประกอบที่เป็นวัตถุดิบมีหน่วยเป็น AMU

T คือค่าอุณหภูมิองศาสมบูรณ์ของภาชนะบรรจุใน Knuden Cell มีหน่วยเป็นเคลวิน (K)

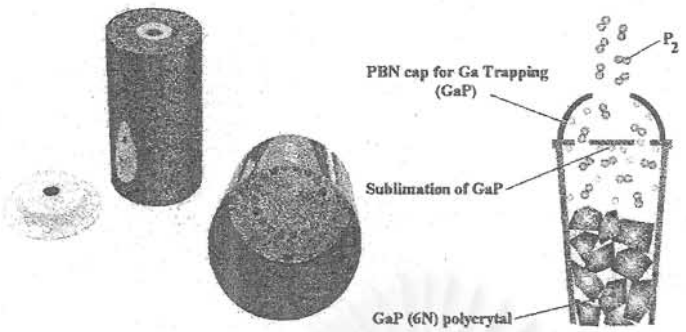
สำหรับค่าอัตราการเกิดผลึก (Growth rate) ของการปลูกผลึกวิธี MBE สำหรับสารประกอบกลุ่ม III-V นี้ขึ้นกับจำนวนโมเลกุลของธาตุหมู่ III เช่นกรณีของ GaAs อัตราการเกิดผลึกสามารถคำนวณได้จากสมการ

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

โดย R คืออัตราการเกิดผลึกมีหน่วยเป็น ไมครอน/ชั่วโมง

α คือค่าคงตัว (Constant) ซึ่งค่าคงตัวนี้ขึ้นกับค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกและทิศทางผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน (Substrate orientation)

กลไกการเกิดผลึกของสารประกอบกลุ่ม III-V นั้นถูกกำหนดโดยอะตอมของธาตุหมู่ III ในสภาวะของก๊าซที่ถูกพ่นไปยังผิวหน้าของผลึกแผ่นฐานเป็นหลัก อันเนื่องมาจากอะตอมของธาตุหมู่ III มีค่าสัมประสิทธิ์การเกาะติด (Sticky coefficient) สูงกว่าอะตอมของธาตุหมู่ V โดยกลไกการเกิดผลึกขึ้นกับอัตราการพ่นของธาตุ III จาก K-cell ที่เกาะลงบนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน จากนั้นจะจับรวมตัวทางเคมีกับอะตอมของธาตหมู่ V ในรูปของสารประกอบ และเรียงตัวกันเป็นผลึกตามโครงสร้างของแผ่นผลึกฐาน ตัวอย่างเช่น In-As ที่ได้จากลำโมเลกุลของ In และ As_4 หรือ As_2 และ Ga-As ที่ได้จากลำโมเลกุลของ Ga และ As_4 หรือ As_2 ทำปฏิกริยาที่ผิวหน้าของผลึกแผ่นฐาน แล้วจึงก่อให้เกิดพันธะขึ้นเป็นโครงผลึกที่มีลักษณะเช่นเดียวกับของแผ่นผลึกฐาน โดยกระบวนการเกิดผลึกนี้ขึ้นกับพลังงานกระตุ้นที่ให้แก่โมเลกุลเหล่านั้น ได้แก่ ความร้อนจากอุณหภูมิของผลึกแผ่นฐานและพลังงานจลน์ที่ได้จาก Knudsen cell

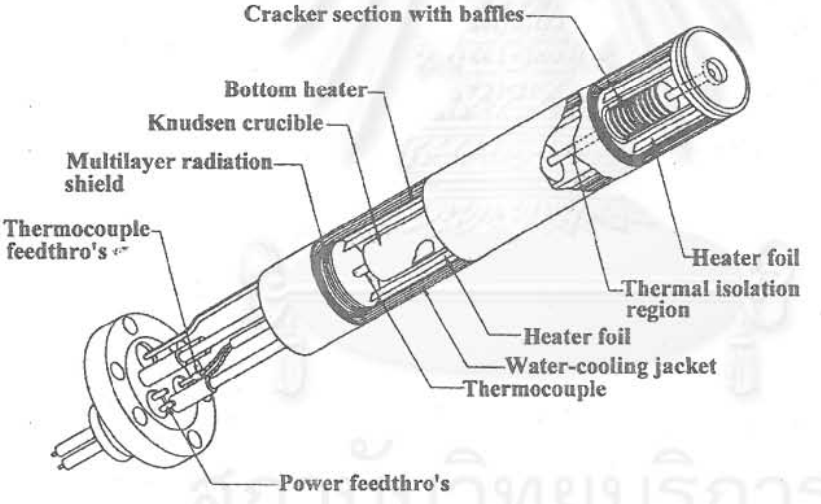


รูปที่ 2.4 ภาพโครงสร้างของ Ga-trapping cap [14]

อย่างไรก็ตาม Knudsen cell นั้นมีขีดจำกัดสำหรับสารหรือธาตุบางชนิด เนื่องจากไม่เหมาะสมสำหรับในการผลิตลำโมเลกุลของสารหรือธาตุที่มีค่าความดันไอสูงได้ ตัวอย่างเช่น P, S, Se เป็นต้น เนื่องจากการควบคุมค่าความดันไอทำได้ยาก ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนา Knudsen Cell ที่มีคุณสมบัติพิเศษได้แก่ Valved cracker cell สำหรับสารเหล่านี้ แต่อย่างไรก็ดี Valved cracker cell นั้นมีราคาแพงและโครงสร้างซับซ้อน สำหรับสิ่งประดิษฐ์อีกชนิดหนึ่งที่ได้ออกแบบมาเพื่อใช้ร่วมกับ Knudsen cell แบบธรรมดานี้ เพื่อใช้ในการผลิตลำโมเลกุลชนิด Dimer ของ As (As_2) และ P (P_2) ได้แก่ Ga-trapping cap วัตถุดิบที่ใช้ในการนี้เป็นสารประกอบ GaAs และ GaP เนื่องจากมีราคาถูกและอุณหภูมิของการสลายตัวมีค่าไม่สูงเกินไป และค่าความแตกต่างของค่าความดันไอของ Ga และสารประกอบในสภาวะสมดุลที่มีค่าต่ำกว่าไอของ As_2 หรือ P_2 ที่อุณหภูมิเดียวกัน โดยอุณหภูมินี้มีค่าสูงกว่าค่าอุณหภูมิจุดระเหิดของสารประกอบ Ga-trapping cap นั้นทำหน้าที่กักไอของสารประกอบ GaP ไว้ภายในภาชนะหรือ Crucible ของ Knudsen cell โดย Ga-trapping cap ช่วยในการรักษาสภาวะสมดุลของไอในสภาวะที่เกิดกลไกการสลายตัว (Decomposition) ของสารประกอบ สำหรับการสลายตัวของสารประกอบดังกล่าวนี้เกิดขึ้นจากพลังงานความร้อนหรือการทำให้สารประกอบอยู่ในสภาวะอุณหภูมิสูง ซึ่งในสภาวะสมดุลนี้สารประกอบกลุ่ม III-V มีจำนวนหรือปริมาณของอะตอมธาตุหมู่ III จำนวนมากกว่าธาตุหมู่ V และในสภาวะอุณหภูมิสูงนี้ธาตุหมู่ V อยู่ในรูปของ Dimer (V_2) เป็นส่วนใหญ่ แต่เนื่องจากค่าความดันไอของโมเลกุล Dimer ของหมู่ V นั้นมีค่าสูงกว่า จึงทำให้โมเลกุลของ Dimer ที่เกิดขึ้นถูกพ่นออกมาเป็นโมเลกุลหลักเพียงอย่างเดียว โครงสร้างของ Ga-trapping cap ดังในรูปที่ 2.4

2.1.2.2 Cracker cell

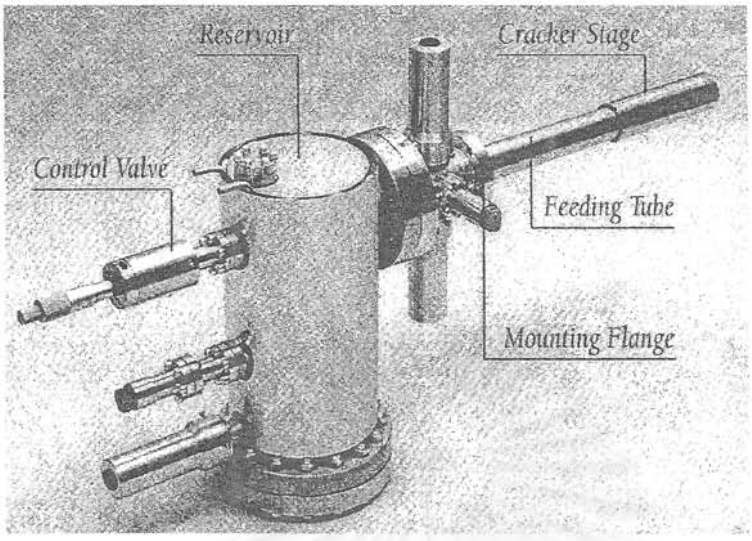
Cracker cell มีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Dissociation cell เป็น Effusion cell ที่ออกแบบเพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดลำโมเลกุลของธาตหมู่ V ชนิด Dimer (V_2) ซึ่งตามปกติลำโมเลกุลของธาตุหมู่ V ที่ได้จาก Effusion cell ตามปกติเป็นชนิด Tetramer (V_4) (ตัวอย่างเช่น As มี As_2 เป็นโมเลกุล Dimer และ As_4 เป็นโมเลกุล 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 Knudesn Cell และจำเป็นต้องมีส่วนของท่อน้ำหรือส่วนระบายความร้อนในลักษณะอื่นๆ สำหรับทำหน้าที่เป็นระบบระบายความร้อน (Cooling) เพื่อให้การควบคุมอุณหภูมิในส่วน Crucible สามารถทำได้



รูปที่ 2.5 ภาพโครงสร้างของ 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 รวมถึงความสามารถในการปิดกักไอไว้ภายใน Reservoir เพื่อไม่ให้

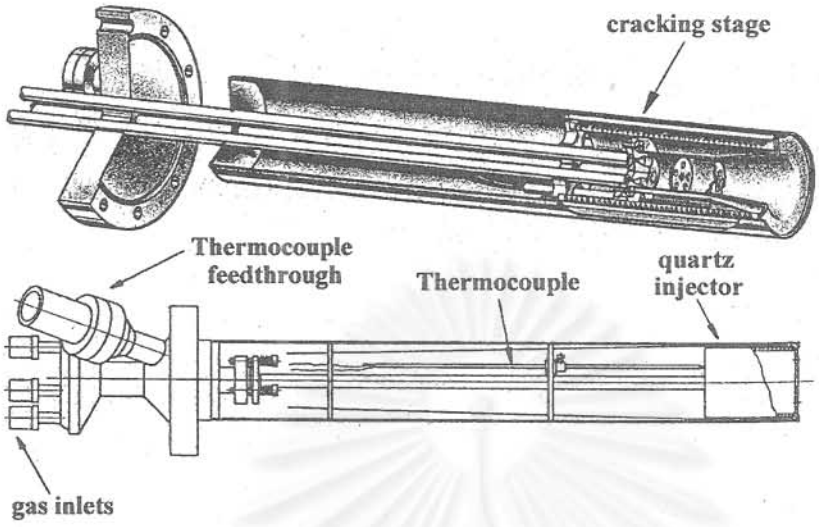


รูปที่ 2.6 ภาพของ Arsenic Valve Cracker Cell [15]

ไอออกมาได้ในสภาวะที่เราไม่มีความต้องการ ทำให้มีความคล่องตัวในการกำหนดค่าความดันไอตามเงื่อนไขได้ง่ายและความสามารถในการตัดลำโมเลกุลได้ดีกว่า Effusion cell ชนิดอื่นๆ โดยเฉพาะการปลูกผลึกของโครงสร้างเฮเทโร (Heterostructure) ที่มีสารประกอบของธาตุหมู่ V ที่ต่างชนิดกัน ข้อดีของ Valved cracker cell คือสามารถใช้วัตถุดิบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งแตกต่างจาก Knudsen cell และ Valved cracker cell ซึ่งวัตถุดิบภายในนั้นถูกทำให้กลายเป็นไอระเหิดออกมาตลอดเวลา ถึงแม้ว่า Shutter อยู่ในตำแหน่งปิดก็ตาม

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 TMIn เป็นต้น โดยโครงสร้างของ Gas injector cell มีลักษณะคล้ายคลึงกับ Knuden cell ต่างกันแต่ขดลวดความร้อนที่ใช้นั้นมีอุณหภูมิสูงกว่า เพื่อให้ก๊าซที่ไหลผ่านแตกตัวออกเป็นโมเลกุลแบบ Dimer หรือ Tetramer สำหรับโมเลกุลธาตุหมู่ V และอะตอมเดียวสำหรับธาตุหมู่ III นั้นสามารถควบคุมได้จากค่าอุณหภูมิในส่วน Cracking zone สำหรับข้อดีของการใช้ก๊าซเป็นวัตถุดิบคือความต่อเนื่องและความสะดวกในการเติมก๊าซวัตถุดิบ โดยไม่มีความจำเป็นในการทำให้ระบบรั่วก่อนการเติมวัตถุดิบเหมือนระบบ MBE ทั่วๆ ไป เนื่องจากวัตถุดิบนั้นถูกเก็บไว้ในท่อก๊าซที่ต่อเข้าระบบ MBE ซึ่งสามารถปิดท่อของระบบการป้อนก๊าซที่ต่อเข้าระบบและทำการเปลี่ยนท่อก๊าซได้ โดยไม่มีผลกระทบต่อสภาวะสุญญากาศของ Growth chamber แต่อย่างไรก็ตามการใช้ก๊าซเป็นวัตถุดิบนั้นมีความจำเป็นที่ต้องติดตั้งระบบปั๊มป์สุญญากาศที่มีขนาดกำลังสูงเพียงพอและต้องเป็นปั๊มป์ชนิดที่คงทนต่อการกัดกร่อนของก๊าซเหล่านั้น



รูปที่ 2.7 ภาพโครงสร้างของ Effusion cell ชนิด Gas injector Cell [16]

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

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบชนิด Effusion cell และชนิดของลำโมเลกุลที่ได้จากวัตถุดิบชนิดต่างๆ

Effusion Cell	ชนิดของลำโมเลกุล				
	P_2	As_2	As_4	Sb_2	Sb_4
Knundsen cell	GaP	GaAs	Solid As	Solid Sb	Solid Sb
Cracking cell	Solid P	Solid As	Solid As	Soild Sb	Soild Sb
Valved 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 ที่เหนือกว่าวิธีการปลูกผลึกอิพิแทกซีวิธีอื่นๆ ในเชิงเทคนิคก็คือสามารถติดตั้งอุปกรณ์วิเคราะห์ต่างๆ เข้ากับระบบได้ ทำให้มีความต่อเนื่องในการตรวจสอบและวิเคราะห์และมีความสะดวก ซึ่งเหมาะสมสำหรับการวิจัยและการผลิตเชิงพาณิชย์ สำหรับในรายงานนี้ขอกล่าวถึงโดยสังเขปเฉพาะอุปกรณ์วิเคราะห์หลักพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับระบบ 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

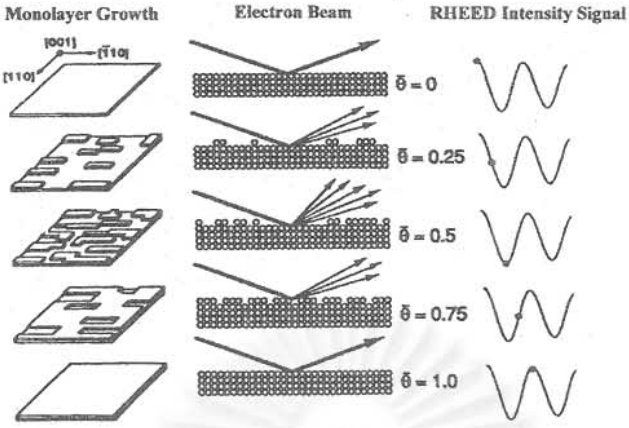
สำหรับหน้าที่หลักสำคัญของ RHEED ที่สรุปได้มีดังนี้

1.การตรวจสอบผิวหน้าแผ่นผลึกฐานในขณะที่ทำความสะอาดด้วยความร้อน (Thermal Cleaning) ก่อนการปลูกผลึก

2. การควบคุมสภาวะเริ่มต้นของการปลูกผลึก

3. การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผิวในขณะที่ทำการปลูกผลึก

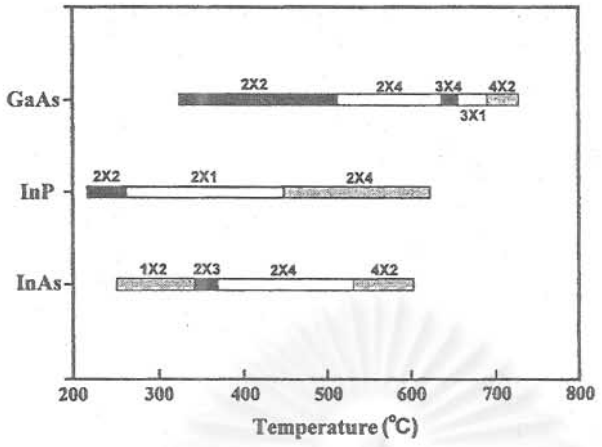
นอกจากนี้ RHEED ยังสามารถใช้ในการสอบเทียบค่าอัตราการปลูกผลึก (Growth rate calibration) ได้ เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสง RHEED ในขณะที่ทำการปลูกผลึก ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามรูปที่ 2.8 ตามปกติผิวหน้าของผลึกก่อนการปลูกผลึกมีความเรียบ ทำให้อิเล็กตรอนสามารถสะท้อนผ่านผิวหน้าผลึกที่มีอะตอมเรียงตัวเป็นระเบียบ ซึ่งความเข้มของอิเล็กตรอนที่สะท้อนผ่านไปในกรณีนี้มีค่าความเข้มสูงสุด แต่เมื่อการปลูกผลึกเริ่มต้นขึ้นการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสง RHEED มีค่าลดลงในขณะที่ทำการปลูกผลึกนี้เกิดจากการกระเจิง (Scattering) ของลำอิเล็กตรอน อันเนื่องจากผลึกที่เกิดขึ้นนั้นบนผิวหน้าของแผ่นผลึกเกิดการเรียงตัวของก้อนผลึกขนาดเล็ก (Cluster) โดยก้อนผลึกขนาดเล็กที่เกิดขึ้นนั้นมีลักษณะกระจัดกระจายไม่เป็นระเบียบ อันเป็นผลทำให้ความเข้มของลำอิเล็กตรอนมีค่าลดลง จนกระทั่งพื้นที่ของก้อนผลึกขนาดเล็กเหล่านั้นคลุมผิวหน้าของผลึกมากกว่าครึ่งหนึ่ง ความเข้ม



รูปที่ 2.8 แผนภาพอธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลงความเข้มของอิเล็กตรอนในขณะทำการปลูกผลึก

แสงของ RHEED จะกลับมามีความเข้มเพิ่มขึ้นอีก จนมีค่าสูงสุดเมื่อผลึกเรียงเต็มผิวหน้าแผ่นผลึกฐาน ซึ่งความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของความเข้มและค่าความหนาของผลึกที่เกิดขึ้นนี้มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบคลื่นรูปไซน์ (Sine) โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มหนึ่งรอบในการเปลี่ยนแปลงความหนาหนึ่งชั้นโมเลกุล (Monolayer) ด้วยเหตุนี้เองทำให้สามารถควบคุมค่าความหนาของชั้นผลึกที่ได้ในระดับชั้นโมเลกุล โดย RHEED เป็นเครื่องมือสำคัญในเทคนิค PLE และ MEE ซึ่งเป็นนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน อีกทั้งยังเป็นเทคนิคสำคัญในการสร้างโครงสร้าง Quantum Dot แต่อย่างไรก็ดีเทคนิคนี้มีขีดจำกัดคือการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสงไม่ชัดเจนในการปลูกผลึกของสารประกอบบางชนิด และการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสง RHEED นั้นมีลักษณะที่แตกต่างกันไปตามเงื่อนไขในสภาวะที่แตกต่างกันอีกด้วย สำหรับรายละเอียดต่างๆ จะขอไม่กล่าวถึงในที่นี้

นอกจากนี้รูปแบบ (Pattern) ของ RHEED ที่ได้ของผลึกแต่ละชนิดสามารถบ่งบอกถึงช่วงค่าอุณหภูมิของผิวหน้าผลึกได้ด้วยดังตัวอย่างในรูปที่ 2.9 ซึ่งปัจจุบันยังนิยมใช้วิธีนี้ในการตรวจสอบอุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานในการปลูกผลึกวิธี MBE และสามารถใช้ได้กับสารประกอบเกือบทุกชนิด โดยเฉพาะสารประกอบกึ่งตัวนำที่ค่าแถบพลังงานมีค่าน้อยมาก อันเป็นข้อดีที่เหนือกว่าวิธีการวัดด้วย Pyrometer ซึ่งไม่สามารถใช้ได้ในกรณีนี้ [17] แต่อย่างไรก็ดีวิธีการนี้มีความคลาดเคลื่อนมากกว่า 10°C และมีความยุ่งยากในการอ่านรูปแบบของ RHEED ในการวัดเทียบอุณหภูมิ โดยขึ้นกับความชำนาญของผู้อ่านเป็นอย่างมาก



รูปที่ 2.9 แผนภาพความสัมพันธ์ของรูปแบบ RHEED และอุณหภูมิของแผ่นผลึก (100) GaAs, InP และ InAs ภายใต้ไอของ Dimer [18]

2.1.3.2 Residual gas analyzer

Residual gas analyzer หรือ Quadupole mass spectrometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของอนุภาคที่เป็นก๊าซภายในส่วน Growth chamber ซึ่งทำให้เราสามารถรู้สภาพบรรยากาศภายในส่วน Growth chamber นอกจากนี้ Residual gas analyzer ยังสามารถใช้วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ (Composition) ของสารประกอบในขณะที่ทำการปลูกผลึกได้เช่นกัน [19] โดยข้อดีของ Residual gas analyzer ที่เหนือกว่าการใช้ Ionization gauge คือ Residual gas analyzer มีความละเอียดและความแม่นยำสูงกว่า อีกทั้งไม่มีผลของการเสื่อม (Degradation) ของความไว (Sensitivity) ในการวัด 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 Ellipsometor เพื่อใช้ในการควบคุมค่าความหนาและค่าอัตราส่วนของสารประกอบได้แม่นยำยิ่งขึ้น ด้วยลักษณะของระบบ MBE ที่เป็นโมดูลที่มีสภาวะสุญญากาศระดับพิเศษทำให้สามารถต่อระบบ MBE เข้ากับเครื่องมือวิเคราะห์อื่นๆ ได้แก่ Auger electron spectroscopy (AES), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), Secondary ion

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-ปิดลำโมเลกุลที่พ่นสู่ผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน เพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการปลูกผลึก
Beam and Growth Monitors	RHEED Quadupole mass spectrometer Ionization gauge	วิเคราะห์ข้อมูลโครงสร้างผิว ข้อมูลค่าความดันไอของลำโมเลกุล และค่าอัตราส่วน
Process Environment	Multichamber UHV system	ระบบ Multichamber ช่วยให้สามารถลดปริมาณของ residual gas ที่ active (ได้แก่ O_2, CO_2, H_2O, C_2O) ทำให้สามารถปลูกผลึกที่มีความบริสุทธิ์สูง

microscopic spectroscopy (SIMS), Scanning tunnelling microscope (STM) ได้อีกด้วย จึงทำให้เราสามารถวิเคราะห์สมบัติของผลึกที่ปลูกได้อย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว โดยเฉพาะ STM เป็นเครื่องมือที่มีขีดความสามารถในการวิเคราะห์ที่ช่วยให้เราสามารถเข้าใจกลไกต่างๆ ในระดับขนาดของอะตอม [20] ซึ่งรายละเอียดต่างๆ ของเครื่องมือเหล่านั้นสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากเอกสารอื่นๆ สำหรับรายการของส่วนประกอบพื้นฐานใน Growth chamber สรุปไว้ในตารางที่ 2.2

2.2 กลไกการเกิดผลึกของการปลูกผลึกอิพิแทกซีวิธี MBE

กลไกการเกิดผลึกของการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุลสำหรับสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V นั้นเกิดจากอะตอมของธาตุหมู่ III เป็นหลัก เนื่องจากความสามารถของการเกาะติดผิวแผ่นผลึกฐานของธาตุหมู่ III ซึ่งตามปกติแล้วผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานก่อนการปลูกถูกปกคลุมด้วยบรรยากาศของโมเลกุลธาตุหมู่ V เพื่อชดเชยการสูญเสียในขณะที่แผ่นผลึกฐานมีค่าอุณหภูมิสูง อันเป็นผลทำให้ผิวหน้าแผ่นผลึกฐานเป็นชั้นของอะตอม V ดังนั้นอะตอมของธาตุหมู่ III จึงเรียงตัวเกาะลงบนชั้นของอะตอม V จนกลายเป็นชั้นของอะตอม III จากนั้นอะตอมของธาตุหมู่ V ทำปฏิกิริยาเกาะบนอะตอมของธาตุหมู่ III หรือถูกดูดซับ (Adsorp) จากอะตอมของธาตุหมู่ III โดยลักษณะของการเรียงตัวของอะตอมของธาตุหมู่ III และ V นั้นเรียงตัวสลับกันไปตลอดการปลูกผลึก ซึ่งอะตอมของธาตุหมู่ V ได้จากการแตกตัวของโมเลกุลที่อยู่ในรูป Dimer หรือ Tetramer ทำให้กระบวนการเกิดผลึกเป็นลักษณะได้สัดส่วนตามโครงสร้าง (Stoichiometric) โดยโมเลกุลส่วนเกินของธาตุหมู่ V นั้นถูกปล่อยคายออก (Desorp) จากผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน แต่อย่างไรก็ตามค่าอุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีความสำคัญสำหรับการปลูกผลึกวิธีนี้ ดังนั้นหากอุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีค่าสูงทำให้เกิดผลดังต่อไปนี้

ก) ในกรณีที่อุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีค่าสูงกว่าจุดระเหิดของธาตุหมู่ V ทำให้เกิดการปล่อยคายอะตอมของธาตุหมู่ V ออกจากผิวแผ่นผลึกฐาน

ข) ในกรณีที่อุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีค่าสูงขึ้นและมีค่าสูงกว่าจุดระเหิดของธาตุหมู่ III ทำให้เกิดการปล่อยคายอะตอมของธาตุหมู่ III ออกจากผิวแผ่นผลึกฐาน

ตารางที่ 2.3 อุณหภูมิจุดระเหิดของสารประกอบ III-V ชนิดต่างๆ [21]

สารประกอบ	T_{CS}(°C)	$T_{max(V4)}$(°C)	$T_{max(V2)}$(°C)	J_{V4}/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)

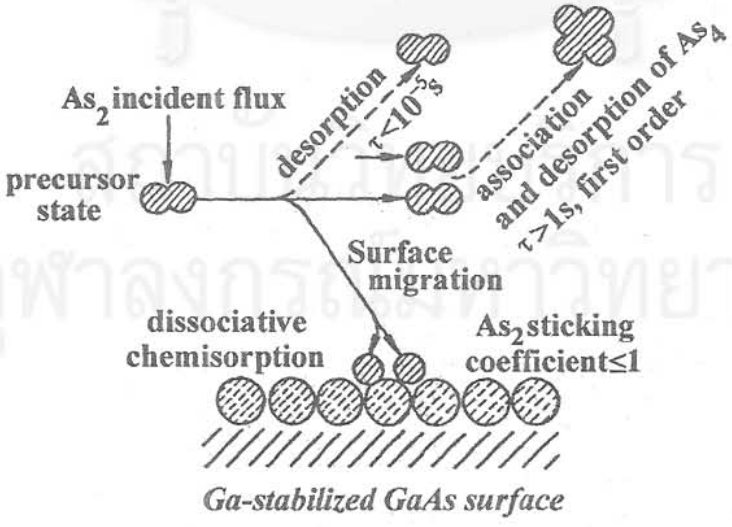
$T_{max}(V_4)$ หมายถึงอุณหภูมิสูงสุดภายใต้บรรยากาศ tetramer โมเลกุลของธาตุหมู่ V

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

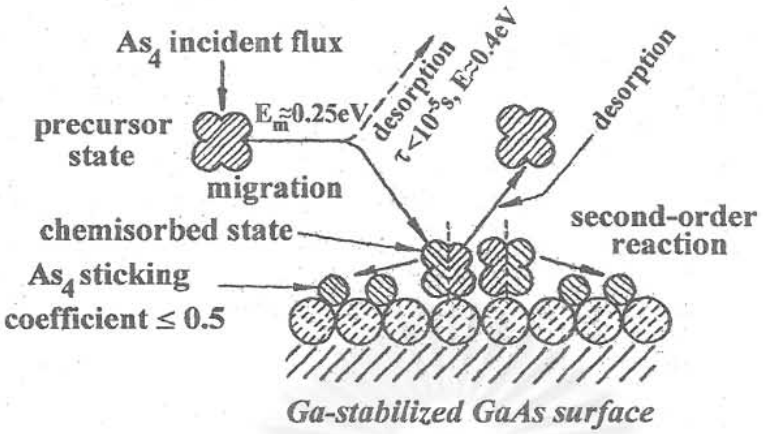
J_{V4}/J_{III} หมายถึงค่าอัตราส่วน flux ของ V/III ที่เกิดจากการสลาย (Decomposition)

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

การอธิบายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุลนั้นเราสามารถใช้แบบจำลองตามรูปที่ 2.10 และ 2.11 อันเป็นตัวอย่างของ GaAs ซึ่งปฏิกิริยานั้นสามารถเกิดขึ้นได้ 2 กรณีคือกรณีของ Ga-As_2-(100) GaAs และกรณีของ Ga-As_4-(100) GaAs สำหรับในกรณี Ga-As_2-(100) GaAs ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเริ่มต้นจากอะตอมของ Ga เกาะติดบนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานเรียงตัวเป็นชั้น (layer) จากนั้นโมเลกุล As_2 ทำปฏิกิริยากับอะตอมของ Ga โดยแตกตัวเป็นอะตอม As และเกาะตัวบนชั้นอะตอม Ga สำหรับอัตราการเกาะของโมเลกุล As_2 ที่ผิวหน้าแผ่นผลึกฐานขึ้นกับค่า Flux ของ Ga สำหรับโมเลกุล As_2 ส่วนเกินนั้นจะระเหิดไปในรูปของโมเลกุล As_2 และ As_4 ทำให้การเกิดผลึกเป็นแบบ Stoichiometric growth ดังในรูปที่ 2.10 สำหรับกรณี Ga-As_4-(100) GaAs นั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีความซับซ้อนกว่าโดยโมเลกุล As_4 คู่หนึ่งทำปฏิกิริยากับอะตอม Ga ที่อยู่ใกล้เคียง ซึ่งอะตอม Ga ได้เกาะอยู่ที่ผิวหน้าของ



รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาของการเกิดผลึก GaAs ในกรณี Ga-As_2-(100) GaAs



รูปที่ 2.11 ปฏิกิริยาของการเกิดผลึก GaAs ในกรณี Ga-As_4-(100) GaAs

แผ่นผลึกฐาน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากโมเลกุล As_4 แต่ละโมเลกุลแตกตัวให้อะตอม As จำนวน 2 อะตอม ลงบนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานด้วยการดูดซับจากอะตอมของ Ga โดยจำนวนอะตอมของ As ที่เกาะลงบนผิวหน้ามีสัดส่วนเทียบกับจำนวนอะตอมของ Ga ที่เกาะที่ผิวหน้า ส่วนอะตอม As ส่วนที่เหลือจำนวน 4 อะตอมนั้นจะรวมตัวกันเป็นโมเลกุล As_4 และถูกปล่อยคายออกจากผิวไป ดังนั้นในกรณีนี้จึงมีความจำเป็นที่ต้องให้ค่าความหนาแน่นของโมเลกุล As_4 หรือ Flux ของ As_4 (J_{As4}) มีค่ามากกว่าค่าความหนาแน่นของโมเลกุล Ga หรือ Flux ของ Ga (J_{Ga}) เพื่อให้จำนวนโมเลกุล As_4 มีจำนวนมากเพียงพอสำหรับปฏิกิริยาที่มีส่วนที่เกาะเรียงตัวในผลึกและส่วนที่ปล่อยคายออก ในขณะที่ทำการปลูกผลึกนั้นอะตอมของ As สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนหนึ่งที่เกาะลงบนผิวของอะตอม Ga เรียงตัวเป็นโครงผลึก และอีกส่วนหนึ่งที่ถูกปล่อยคายออกมา ซึ่งเป็นส่วนที่สูญเสียไปและการสูญเสียนี้มีอัตราเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีค่าสูงขึ้น

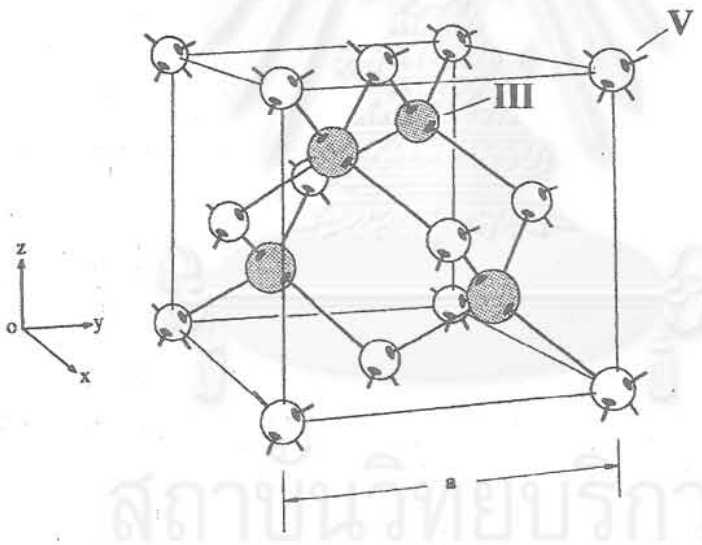
2.3 สารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V

นับตั้งแต่ทศวรรษที่ 50 ได้มีการค้นพบสารประกอบกึ่งตัวนำชนิดสองธาตุ (Binary) ของกลุ่ม III-V และคุณสมบัติต่างๆ ของสารประกอบเหล่านี้มีคุณสมบัติทางกายภาพที่หลากหลายตามชนิดและองค์ประกอบของสารประกอบ นับตั้งแต่ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Energy gap) ในช่วง 0.18-2.42 eV ค่าดัชนีหักเห ฯลฯ เป็นต้น ต่อมาในทศวรรษที่ 60 ได้มีการพัฒนาวิธีการเตรียมของสารประกอบเหล่านี้เพื่อประยุกต์ใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ และเทคนิคการปลูกผลึกต่างๆ ได้เริ่มต้นขึ้นในช่วงนี้ การปลูกผลึกอิพิแทกซีในยุคนี้ส่วนใหญ่นั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อการประดิษฐ์สิ่งประดิษฐ์ต่างๆ ประมาณปี 1970 สิ่งประดิษฐ์ที่เกี่ยวข้องกับ GaAs เป็นสิ่งประดิษฐ์ของสารประกอบ III-V กลุ่มแรกที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นและ

สิ่งประดิษฐ์ที่เกิดขึ้นในยุคนี้เป็นต้นแบบของสิ่งประดิษฐ์ในยุคต่อมา 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 ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับโครงผลึกเพชร (Diamond) ได้แก่ ผลึกเพชร ผลึก Si และ ผลึก Ge โดยการเรียงตัวของอะตอมของธาตุหมู่ III และ V เรียงตัวสลับกันเป็นชั้นๆ ไปตามทิศทาง (100) ในโครงผลึก ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมในโครงสร้างนี้เป็นพันธะโควาเลนท์ (Covalent bond) และระยะห่างระหว่างอะตอมนั้นขึ้นกับชนิดของอะตอมที่มาประกอบกันเป็นสารประกอบในโครงผลึก ดังนั้นตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่เป็นคุณสมบัติเฉพาะของสารประกอบแต่ละชนิดคือ ค่าคงตัวผลึก (Lattice constant : a) ซึ่งสารประกอบแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.4



รูปที่ 2.12 แผนภาพโครงสร้างแบบ Zincblende

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 ตัวแปรทางกายภาพของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V ชนิด 2 ธาตุ [22]

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 นั้นมีคุณสมบัติที่หลากหลาย โดยขึ้นกับองค์ประกอบและสัดส่วนปริมาณของธาตุที่ประกอบกันขึ้นเป็นสารประกอบ ตามปกติแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นส่วนใหญ่นั้นเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำชนิด 2 ธาตุ (Binary) ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพเฉพาะตัว เนื่องจากตัวแปรขององค์ประกอบมีจำนวนน้อยที่สุด ดังนั้นในการสร้างแผ่นผลึกฐานจึงนิยมทำจากสารประกอบ 2 ธาตุ แต่คุณสมบัติที่จำกัดของสารประกอบชนิด 2 ธาตุที่ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในบางกรณี กุญแจสำคัญคือสารประกอบชนิด 3 ธาตุและ 4 ธาตุได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างหัวต่อเฮเทโร (Heterojunction) โดยมีค่าคงตัวผลึกเข้าได้กับแผ่นผลึกฐาน เนื่องจากค่าแถบพลังงานหรือค่าดัชนีหักเหที่มีค่าแตกต่างกันไป อันเป็นผลทำให้มีความสะดวกในการออกแบบและประดิษฐ์สิ่งประดิษฐ์จากความสามารถในการกำหนดวัสดุที่มีความเหมาะสมกับสิ่งประดิษฐ์ได้ สำหรับค่าตัวแปรต่างๆ ของสารประกอบกึ่งตัวนำตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 2.4 และ 2.5

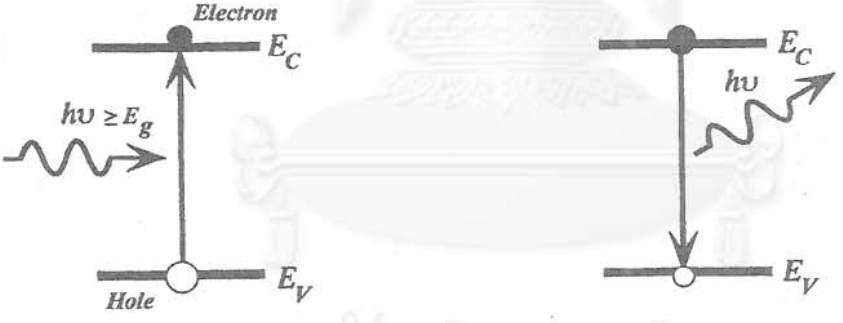
ตารางที่ 2.5 ค่าแถบพลังงานของตัวอย่างสารประกอบชนิด 3 ธาตุและ 4 ธาตุ [23]

สารประกอบ	ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (eV) ที่ 300 K	ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (eV) ที่ 300 K ในกรณีที่ Matching กับ InP
สารประกอบ 3 ธาตุ		
$Al_xIn_{1-x}As$	$E_g(\Gamma) = 0.36+2.35x+0.24x^2$ $E_g(X) = 1.82+0.4x$	$E_g(\Gamma) = 1.45,\ x = 0.52$
$Ga_xIn_{1-x}As$	$E_g(\Gamma) = 0.36+0.505x+0.555x^2$	$E_g(\Gamma) = 0.75,\ x = 0.53$
$GaAs_{1-x}Sb_x$	$E_g(\Gamma) = 0.37+1.91x+0.74x^2$	$E_g(\Gamma) = 0.78,\ x = 0.5$
สารประกอบ 4 ธาตุ		
$Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$	$E_g(\Gamma) = 1.35+0.668x-1.068y+0.758x^2$ $+0.078y^2-0.069xy-0.322x^2y+0.03xy^2$ $E_g(\Gamma) = 1.35-0.775y+0.149x^2$	$x = 0.47y$ $E_g(\Gamma) = 13.5-0.775y+0.149y^2$
$Al_xGa_yIn_{1-x-y}As$	$E_g(\Gamma) = 0.36+2.093x+0.629y+0.577x^2$ $+0.436y^2+1.013xy-2.0xy(1-x-y)$	$(In_{0.52}Al_{0.48})_z(In_{0.53}Ga_{0.47})_{1-z}As$ $x = 0.48z,\ 0.983x+y = 0.468$ $E_g(\Gamma) = 0.76+0.49z+0.20z^2$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4 การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์

การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์เป็นการวัดคุณสมบัติการเปล่งแสงของสารกึ่งตัวนำจากการกระตุ้นด้วยแสงที่มีค่าพลังงานโฟตอนไม่น้อยกว่าค่าแถบพลังงาน (Energy band gap) ของสารกึ่งตัวนำ จากผลของการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดพาหะส่วนเกิน (Excess carrier) ขึ้น โดยในสภาวะปกติอิเล็กตรอนในแถบพลังงานวาเลนซ์ (Valence band) เมื่อได้รับพลังงานกระตุ้นนี้หรือได้รับการถ่ายเทพลังงานจากโฟตอน ทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานไปสู่แถบนำไฟฟ้า (Conduction band) ซึ่งเป็นสเตทที่มีระดับพลังงานที่สูงกว่าเดิม ผลจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนนี้ทำให้เกิดสเตทว่างหรือโฮล (Hole) ขึ้นในแถบวาเลนซ์ ซึ่งอิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่าปกตินี้สามารถอยู่ในสภาวะดังกล่าวได้ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง จากนั้นอิเล็กตรอนและโฮลหรือพาหะส่วนเกินที่เกิดขึ้นจะรวมตัวกัน (Recombination) ซึ่งการรวมตัวนี้อิเล็กตรอนคายพลังงานออกมาในรูปของโฟตอนที่มีค่าประมาณค่าแถบพลังงานหรือค่าระดับพลังงานที่เกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อเราทำการวัดสเปกตรัมของแสงที่ได้จากการเปล่งแสงนี้จะทำให้เราทราบค่าแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำได้ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานต่างๆ เช่นการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานแบบ Band-to-impurity level เป็นต้น นอกจากนี้การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ยังสามารถใช้ในการวัดคุณสมบัติของโครงสร้างควอนตัมได้ด้วยเช่นเดียวกัน ซึ่งรายละเอียดจะไม่ขอกล่าวถึงในที่นี้

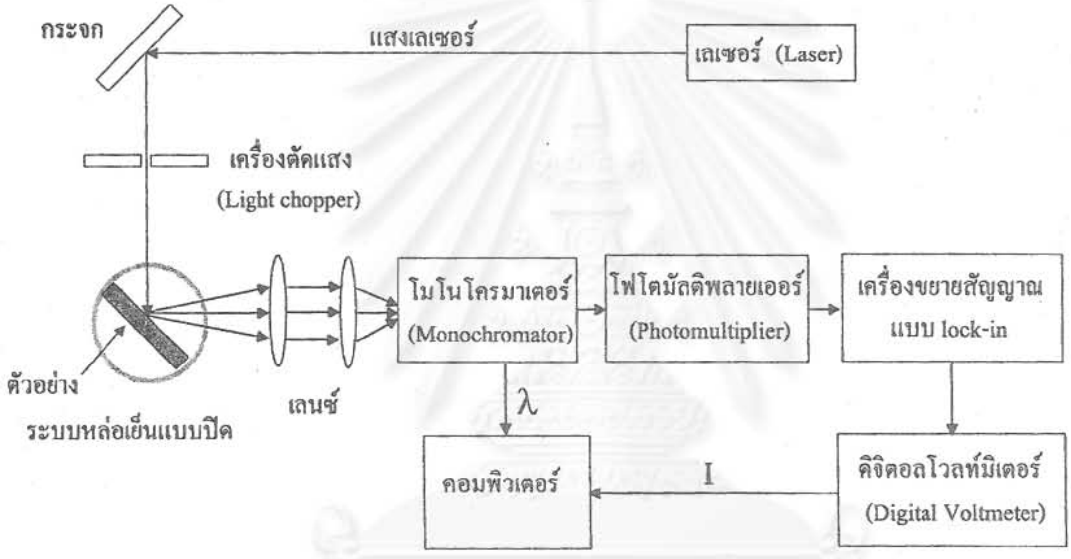


(ก) การดูดกลืนแสง (ข) การเปล่งแสงที่เกิดจากการรวมตัว

รูปที่ 2.13 แผนภาพจำลองการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงที่เกิดจากการรวมตัว

สำหรับรายละเอียดของระบบการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ในงานวิจัยนี้มีการจัดระบบตามแผนภาพดังในรูปที่ 2.14 เลเซอร์ชนิด Ar^+ เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีค่าความยาวคลื่น 488 nm ซึ่งเทียบเท่ากับโฟตอนที่มีค่าพลังงาน 2.54 eV โดยทำหน้าที่กระตุ้นตัวอย่างในการทดลอง ตัวอย่างจะถูกติดไว้ในระบบทำความเย็นชนิดไครโอเจนนิกแบบวงจรปิด (Closed circuit cryogenic system) ซึ่งภายในใช้การหล่อเย็นด้วยฮีเลียมเหลว (Liquid Helium) และอุณหภูมิต่ำที่สุดในการทดลองนี้คือ 10 K แสงที่ได้จากตัวอย่างถูกรวมรวมด้วยเลนซ์จำนวน 2 ชุด เพื่อให้แสงที่ได้ผ่านเข้าไปยังโมโนโครมาเตอร์ (Monochromator) มีค่าความเข้มสูงขึ้น

โมโนโครมาเตอร์ทำหน้าที่ในการแยกสเปกตรัมของแสงที่ได้จากตัวอย่าง และแสงที่ผ่านโมโนโครมาเตอร์ได้เฉพาะแสงที่มีค่าความยาวคลื่นตามที่โมโนโครมาเตอร์ได้ตั้งค่าไว้ จากนั้นแสงที่ผ่านโมโนโครมาเตอร์ เข้าสู่โฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier : PMT) เพื่อแปลงสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งสัญญาณนี้อยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้าที่มีขนาดสัญญาณเล็กมาก ดังนั้นจึงต้องให้สัญญาณผ่านเครื่องขยายสัญญาณชนิดลอกอินแอมปริไฟเออร์ (Lock-in Amplifier) ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ได้จาก PMT และแปลงสัญญาณให้เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้นี้ผ่านมัลติมิเตอร์แบบเชิงเลข (Digital Multimeter : DMM) และส่งข้อมูลเชิงเลข (Digital format) ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อทำการสร้างกราฟสเปกตรัมความสัมพันธ์ระหว่างค่าขนาดสัญญาณแสงที่ได้และค่าความยาวคลื่นหรือค่าพลังงานโฟตอนของตัวอย่างแต่ละตัวอย่าง



รูปที่ 2.14 แผนภาพระบบการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์

2.5 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าวิธี van der PAUW

วิธีการวัดของ van der PAUW เป็นวิธีการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่ได้ประยุกต์มาจากปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำและสามารถวัดหาค่าตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ชนิดของพาหะนำไฟฟ้าส่วนใหญ่ (Majority charge carrier) ค่าความหนาแน่นพาหะนำไฟฟ้า (Carrier concentration) และค่าความคล่องตัวของพาหะนำไฟฟ้า (Carrier mobility) แต่อย่างไรก็ตามการคำนวณจากการวัดวิธีดังกล่าวนี้จำเป็นที่เราจะต้องรู้ค่าสภาพนำไฟฟ้า (Conductivity) หรือค่าสภาพต้านทาน (Resisitivity) ในปัจจุบันวิธีการวัดของ van der PAUW มีความสำคัญอย่างมากต่ออุตสาหกรรมวัสดุและสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำจนเป็นที่ยอมรับให้เป็นวิธีมาตรฐาน เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่ายสะดวกและผลการวัดที่แม่นยำ

2.5.1 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)

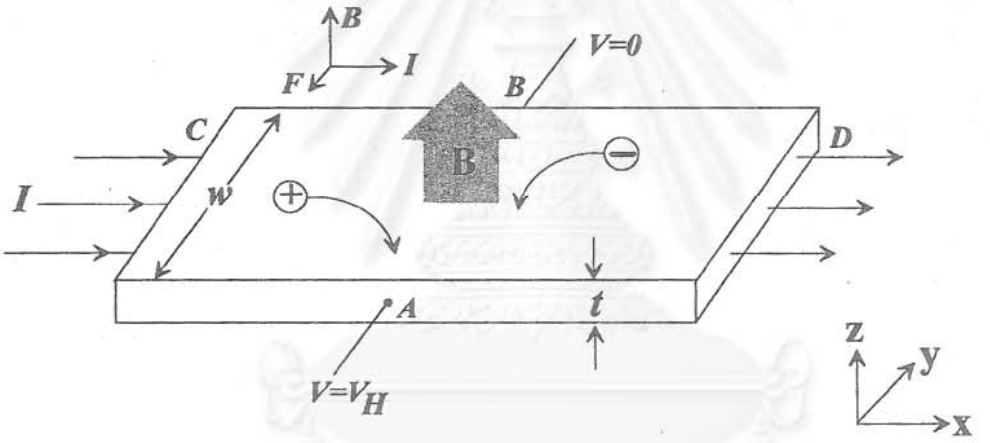
ปรากฏการณ์ฮอลล์ได้ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1879 โดย Edwin H. Hall ซึ่งพบการเกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแสและสนามแม่เหล็กในแผ่นโลหะบางตามรูปที่ 2.15 ซึ่งต่อมาได้มีการอธิบายปรากฏการณ์นี้ด้วยแบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับแรงของลอเรนท์ซ (Lorentz force) โดยแรงของสนามแม่เหล็กที่กระทำต่อประจุนำไฟฟ้ามีค่า

$$F_y = V_x X B_z \tag{2.3}$$

โดย F_y คือแรงกระทำในแนวแกน y ที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็ก

V_x คือค่าความเร็วของอิเล็กตรอนในแนวแกน x

B_z คือค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน z



รูปที่ 2.15 แผนภาพปรากฏการณ์ฮอลล์

เนื่องจากแรงกระทำที่มีต่อประจุนำไฟฟ้าในสภาวะสมดุล ทำให้เกิดจากสนามไฟฟ้าในแกน y ตามสมการ

$$E_y = \frac{J_x}{qp_0} B_z \tag{2.4}$$

โดย E_y คือค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแนวแกน y

J_x คือค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในแนวแกน x

q คือค่าคงตัวประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

p_0 คือค่าความเข้มข้นประจุไฟฟ้าบวก

ในทางปฏิบัติเราสามารถวัดค่าสนามไฟฟ้าจากค่าแรงดันฮอลล์ (Hall voltage) ที่เกิดขึ้น ในกรณีของพาหะส่วนใหญ่ที่เป็นโฮลตามความสมพันธ์

$$E_y = \frac{V_{AB}}{w} = \frac{I_x}{wt}\frac{1}{qp_o}B_z \tag{2.5}$$

โดย V_{AB} คือค่าแรงดันฮอลล์ที่เกิดขึ้น

w คือค่าความกว้างของชิ้นตัวอย่าง

I_x คือค่ากระแสไฟฟ้า

t คือค่าความหนาของชิ้นตัวอย่าง

สำหรับในกรณีที่พาหะส่วนใหญ่เป็นอิเล็กตรอน สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นมีทิศทางในทางตรงกันข้าม ซึ่งวิธีการวัดนี้ทำให้เราสามารถรู้ชนิดของพาหะประจุนำไฟฟ้าได้ จากสมการข้างต้น เราสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นหรือค่าความเข้มข้นพาหะในกรณีของพาหะส่วนใหญ่ที่เป็นโฮลได้จาก

$$p_o = \frac{I_x B_z}{qtV_{AB}} \tag{2.6}$$

จากสมการของค่าสภาพต้านทาน (Resistivity)

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

โดย V_{CD} คือค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแนวแกน x ที่วัดระหว่างจุด C และ D

เราสามารถคำนวณหาค่าความคล่องของพาหะได้จากค่าสภาพต้านทานตามสมการ

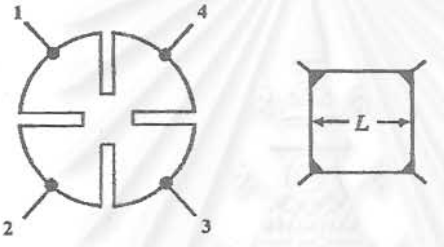
$$\mu = \frac{1}{\rho q p_o} \tag{2.8}$$

ดังนั้นในการวัดเพื่อหาค่าความหนาแน่นของพาหะและค่าความคล่องตัวพาหะในปรากฏการณ์ฮอลล์ จึงจำเป็นต้องมีการวัดหาค่าความต้านทานรวมอยู่ในการวัดนี้ เพื่อทำให้เราสามารถคำนวณหาผลได้ตามต้องการ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5.2 วิธีการวัดของ van der PUAW

เนื่องจากวิธีการวัดค่าต่างๆ ด้วยปรากฏการณ์ของฮอลล์นั้นมีความยุ่งยากซับซ้อน มีการวัดหาค่าสภาพนำไฟฟ้าหรือสภาพต้านทานเข้ามาเกี่ยวข้อง เพื่อนำค่ามาใช้ในการคำนวณหาค่าความคล่องตัวของพาหะและค่าความหนาแน่นของพาหะ ดังนั้นวิธีการวัดของ van der PAUW [24] จึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้เป็นการสะดวกและง่ายสำหรับการเตรียมตัวอย่าง โดยการวัดนี้ยังคงใช้พื้นฐานจากปรากฏการณ์ฮอลล์และวัดได้ผลละเอียดครบถ้วนไม่แตกต่างจากวิธีแบบเดิม สำหรับตัวอย่างในวิธีการวัดของ van der PAUW นั้นมีรูปร่างและลักษณะตามรูปที่ 2.16 โดยแบบ Cloverleaf ตามรูปที่ 2.16 (ก) เป็นแบบที่ดีที่สุด แต่มีความยุ่งยากในกระบวนการเตรียมตัวอย่าง และในการทดลองนี้ใช้แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส ตามรูปที่ 2.16 (ข) เนื่องจากการเตรียมทำได้ง่ายและสะดวกกว่า



(ก) แบบ Cloverleaf (ข) แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส

รูปที่ 2.16 ภาพโครงสร้างของตัวอย่างสำหรับการวัดหาค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าวิธี van der PAUW

โดยวิธีการวัดของ van der PAUW สามารถวัดหา Sheet resistant (R_s) จากสมการ

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

ซึ่งค่า R_A และ R_B นั้นเป็นค่าความต้านทานที่วัดตามรูปที่ 2.17 โดยการป้อนกระแสไฟฟ้าตรงที่มีค่าคงที่ที่ขั้ว 1 ไหลผ่านตัวอย่างออกที่ขั้ว 2 และทำการวัดค่าแรงดันที่ขั้ว 3 และ 4 ในทำนองเดียวกันทำการป้อนกระแสไฟฟ้าตรงที่มีค่าคงที่ที่ขั้ว 2 ไหลผ่านตัวอย่างออกที่ขั้ว 3 และทำการวัดค่าแรงดันที่ขั้ว 1 และ 4 จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่า R_A และ R_B ตามสมการ

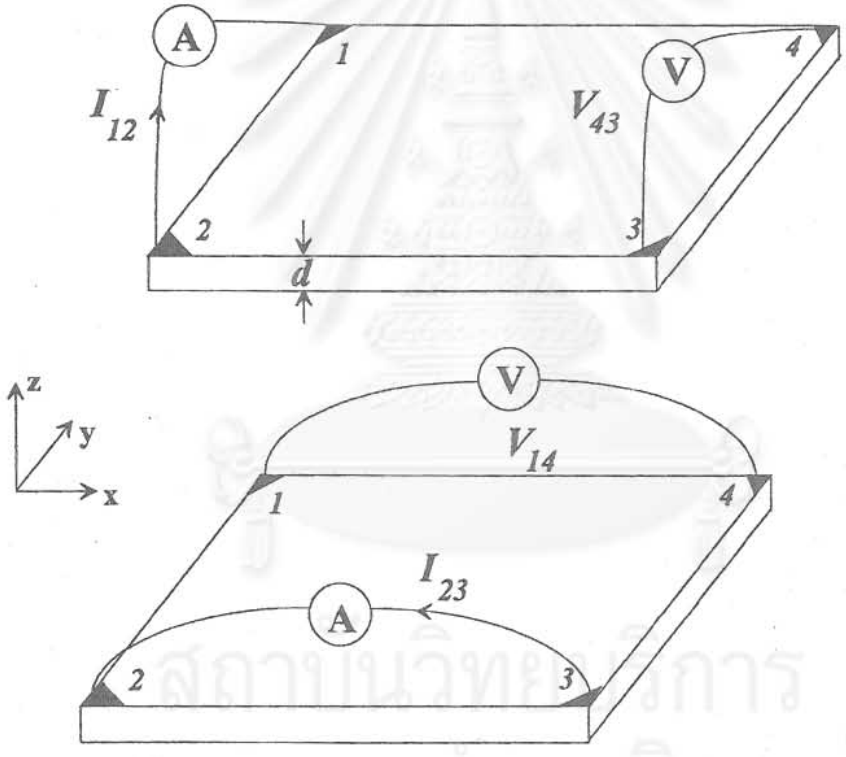
$$R_A = \frac{V_{43}}{I_{12}} \quad \text{และ} \quad R_B = \frac{V_{14}}{I_{23}} \qquad (2.10)$$

โดยค่า R_s มีความสัมพันธ์กับค่าสภาพต้านทานตามสมการ

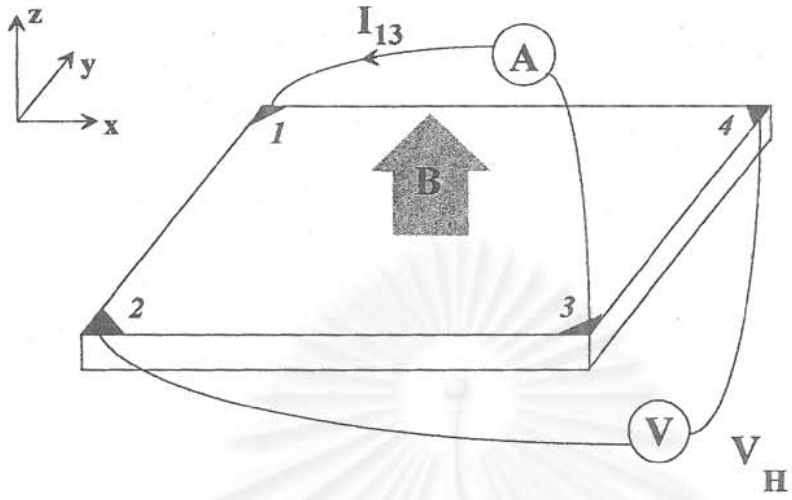
$$\rho = R_s d \tag{2.11}$$

โดย d คือค่าความหนาของตัวอย่าง

สำหรับการวัดหาค่าแรงดันฮอลล์ในวิธีการวัดของ van der PAUW ซึ่งเป็นค่าสำคัญที่นำมาใช้ในการคำนวณหาค่าความหนาแน่นพาหะและค่าความคล่องตัวพาหะ ทำได้ด้วยการป้อนกระแสไฟฟ้าตรงที่มีค่าคงที่ที่ขั้ว 1 ไหลผ่านตัวอย่างออกที่ขั้ว 3 และทำการวัดค่าแรงดันที่ขั้ว 2 และ 4 โดยตัวอย่างอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กตามรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.17 แผนภาพการวัดหาค่าสภาพต้านทานในวิธีการวัดของ van der PAUW



รูปที่ 2.18 แผนภาพการวัดหาค่าแรงดันฮอลล์ในวิธีการวัดของ van der PAUW

จากค่าแรงดันฮอลล์ที่วัดได้นี้ เราสามารถนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นของพาหะและค่าความคล่องตัวของพาหะได้ ซึ่งวิธีการคำนวณจะได้กล่าวถึงต่อไป

2.5.3 การวัด van der PAUW ในทางปฏิบัติ

แบบจำลองของ van der PAUW ที่ได้กล่าวมานั้นเป็นแบบจำลองในอุดมคติ ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นมีผลกระทบจากตัวแปรอื่นๆ ได้แก่ความไม่เป็นสี่เหลี่ยมจตุรัสในอุดมคติของรูปร่างตัวอย่าง ขนาดของขั้วโลหะมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับขนาดของตัวอย่าง และค่าความต้านทานของขั้วโลหะรวมถึงค่าความต้านทานของหัวต่อโลหะ-สารกึ่งตัวนำที่มีค่าสูง เป็นต้น นอกจากนี้ในขณะที่ทำการวัดนี้จำเป็นที่ต้องป้องกันการเกิดพาหะส่วนเกินเนื่องจากการกระตุ้นด้วยแสงและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวอย่าง ดังนั้นตัวอย่างต้องอยู่ในที่ไม่มีแสงและมีการควบคุมอุณหภูมิ โดยเฉพาะค่ากระแสที่ใช้ในการวัดนี้ต้องไม่มีค่าสูงเกินไปจนทำให้อุณหภูมิของตัวอย่างเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นในการวัดนี้เราจะใช้ค่ากระแสในการวัดให้มีค่าน้อยที่สุด (ค่ากระแสนี้ขึ้นกับชนิดของวัสดุตัวอย่าง รูปร่าง และสภาพการระบายความร้อนของระบบการวัด ฯลฯ) ดังนั้นเพื่อการวัดให้ได้ค่าที่ถูกต้องสูงสุด

2.5.3.1 การกำหนดนิยามในการวัดค่าสภาพต้านทาน

จากรูปร่างของตัวอย่างนั้นมีขั้วโลหะนำไฟฟ้าอยู่ 4 ขั้ว ซึ่งกำกับหมายเลข 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา เรากำหนดให้

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

V_{12} เป็นค่าแรงดันที่วัดได้ที่ระหว่างขั้ว 1 และ 2 ในทำนองเดียวกันสำหรับ V_{32}, V_{34}, V_{41}, V_{21}, V_{14}, V_{43}, V_{32} และมีหน่วยเป็นโวลท์

2.5.3.2 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 $R_{I,V}$ เป็นค่าความต้านทานที่ได้จากการป้อนกระแสที่คู่ขั้ว I และแรงดันที่วัดได้ที่คู่ขั้ว V ตามสมการ

$$R_{21,34} = \frac{V_{34}}{I_{21}}, R_{12,43} = \frac{V_{43}}{I_{12}} \tag{2.12 a}$$

$$R_{32,41} = \frac{V_{41}}{I_{32}}, R_{23,14} = \frac{V_{14}}{I_{23}} \tag{2.12 b}$$

$$R_{43,12} = \frac{V_{12}}{I_{43}}, R_{34,21} = \frac{V_{21}}{I_{34}} \tag{2.12 c}$$

$$R_{14,23} = \frac{V_{23}}{I_{14}}, R_{41,32} = \frac{V_{32}}{I_{41}} \tag{2.12 d}$$

จากการผลการวัดนี้เราสามารถตรวจสอบได้ว่า

$$R_{21,34} \approx R_{12,43} \tag{2.13 a}$$

$$R_{32,41} \approx R_{23,14} \tag{2.13 b}$$

$$R_{43,12} \approx R_{34,21} \tag{2.13 c}$$

$$R_{14,23} \approx R_{41,32} \tag{2.13 d}$$

สำหรับในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลง อันเนื่องจากความไม่คงที่ของกระแสหรือความแปรปรวนของอุณหภูมิ เราสามารถตรวจสอบได้จากสมการข้างต้น ซึ่งความแตกต่างของค่าในแต่ละสมการไม่ควรเกิน 3% ในทำนองเดียวกันเราจะได้

$$R_{21,34} + R_{12,43} \approx R_{43,12} + R_{34,21} \tag{2.14 a}$$

$$R_{32,41} + R_{23,14} \approx R_{14,23} + R_{41,32} \tag{2.14 b}$$

สำหรับการคำนวณหาค่าสภาพต้านทานนั้นเราสามารถคำนวณหาได้จากค่าความต้านทาน 2 ค่าที่ได้จากการวัดดังนี้

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

$$R_B = \frac{(R_{32,41} + R_{23,14} + R_{14,23} + R_{41,32})}{4} \tag{2.15 a}$$

จากค่า R_A, R_B เราสามารถคำนวณหาค่า Sheet resistance (R_s) และค่าสภาพต้านทาน (ρ) ได้จากสมการ (2.9) ในกรณีที่เรารู้ค่าความหนาของตัวอย่างจากสมการ (2.11) จากนั้นเราจะนำค่าที่วัดและคำนวณในขั้นตอนนี้ไปใช้ในการหาค่าความคล่องพาหะต่อไป

2.5.3.3 การกำหนดนิยามในการวัดฮอลล์

ในการวัดฮอลล์นั้นเป็นการวัดค่าแรงดันที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของพาหะประจุนำไฟฟ้าที่เลี้ยวเบนไปภายใต้สนามแม่เหล็ก ซึ่งวิธีการนี้ทำให้เราสามารถรู้ได้ว่าพาหะนำไฟฟ้าส่วนใหญ่นั้นเป็นอิเล็กตรอนหรือโฮลและทราบค่าความเข้มข้นพาหะหรือค่าความหนาแน่นของพาหะนำไฟฟ้าได้

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

B คือค่าสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางในแนวแกน z โดยกำหนดให้สนามแม่เหล็กมีค่าเป็นบวกเมื่อมีทิศทางไปตามในแนวแกนทางบวกและมีค่าเป็นลบในกรณีตรงกันข้าม

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

2.5.3.4 การวัดหาค่าแรงดันฮอลล์

สำหรับในการวัดฮอลล์นั้นสามารถทำได้โดยการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว 1 ให้ไหลผ่านตัวอย่างออกที่ขั้ว 3 โดยตัวอย่างอยู่ภายในสนามแม่เหล็ก B ที่มีทิศทางในทางบวก ค่าแรงดันฮอลล์ที่วัดได้ในที่นี้คือ V_{24P} และวัดในกรณีที่มีการกลับทิศทางการไหลของกระแสเป็น 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

$$V_C = V_{24P} - V_{24N} \tag{2.16 a}$$

$$V_D = V_{42P} - V_{42N} \tag{2.16 b}$$

$$V_E = V_{13P} - V_{31N} \tag{2.16 c}$$

$$V_F = V_{31P} - V_{31N} \tag{2.16 d}$$

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

$$P_s = \frac{8\times10^{-8} IB}{q(V_C+V_D+V_E+V_F)} \quad (\text{cm}^{-2}) \tag{2.17}$$

ในกรณีที่ผลบวกมีค่าเป็นบวก หรือ

$$n_S = \left| \frac{8\times10^{-8} IB}{q(V_C+V_D+V_E+V_F)} \right| \quad (\text{cm}^{-2}) \tag{2.18}$$

โดย B คือค่าสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็นเกาส์ (Gauss : G)

I คือค่ากระแสไฟฟ้ากระแสตรงมีหน่วยเป็นแอมแปร์ (Ampere : A)

ค่า B และ I ในการทดลองมีค่าคงที่ (Constant) ตลอดในการวัดแต่ละครั้ง

ค่าความหนาแน่นพาหะนำไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$n = \frac{n_s}{d} \tag{2.19}$$

$$p = \frac{p_s}{d} \tag{2.20}$$

ในทำนองเดียวกันค่าคล่องตัวพาหะนำไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\mu = \frac{1}{qn_sR_s} \tag{2.21}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

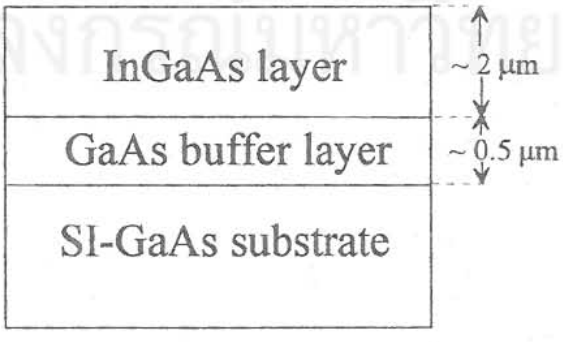
บทที่ 3

การออกแบบการทดลอง

สำหรับในบทนี้เป็นรายละเอียดและขั้นตอนของกระบวนการทดลองในงานวิจัยนี้ เพื่อทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรหรือเงื่อนไขต่างๆ ในการปลูกผลึกที่มีผลต่อคุณสมบัติของชั้นผลึกอิพิแทกซี InGaAs ($E_g \approx 0.75$ eV) ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐาน GaAs ตัวแปรที่ได้ศึกษาในการทดลองนี้ ได้แก่ ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก และค่าอัตราส่วนความไอสมมูล (Beam-equivalent pressure : BEP) ของ As_4/(In+Ga)

3.1 การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างในการทดลองนี้มีโครงสร้างดังในรูปที่ 3.1 โดยตัวอย่างแต่ละชิ้นมีขนาดรูปร่างเป็น $\frac{1}{4}$ของแผ่นผลึกรูปวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว และแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นในการทดลองเป็น GaAs (100) ชนิดกึ่งฉนวน (Semi-insulator) แผ่นผลึกฐานเริ่มต้นถูกนำไปติดลง Mo Block ด้วย In หลอมละลาย จากนั้นนำ Mo Block ที่ติดแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs เข้าสู่ระบบ MBE โดยเริ่มต้นทำการ Outgassing ที่ 400 °C เป็นเวลานานประมาณ 1 ชั่วโมงภายใต้สภาวะสุญญากาศ (10^{-9} Torr) กระบวนการในขั้นนี้กระทำภายใน Preparation chamber หรือ Pre-heated chamber เพื่อทำความสะอาดผิวของแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นด้วยความร้อนภายใต้สภาวะสุญญากาศ ต่อจากนั้นทำการลำเลียง Mo Block ที่ติดแผ่นผลึกฐาน GaAs เข้าส่ Growth chamber สำหรับกระบวนการภายใน Growth chamber ในลำดับแรกทำการขจัด Oxide ที่ผิวแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs ที่อุณหภูมิ 600 °C ภายใต้บรรยากาศ As_4 จนผิวสะอาด ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ RHEED pattern ที่ปรากฏขึ้นเป็นแบบ c(2×4) จากนั้นทำการปลูกชั้น Buffer ผลึก GaAs หนา 5000 Å ที่อุณหภูมิ 580 °C ด้วยค่าอัตราการปลูก 0.5 μm/ชั่วโมง และค่าอัตราส่วน As_4/Ga มีค่าประมาณ 20 ลำดับต่อไปทำการปลูกผลึก InGaAs ตามเงื่อนไขตามในตารางที่ 3.1 โดยเวลาที่ใช้ในการปลูกผลึก InGaAs เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

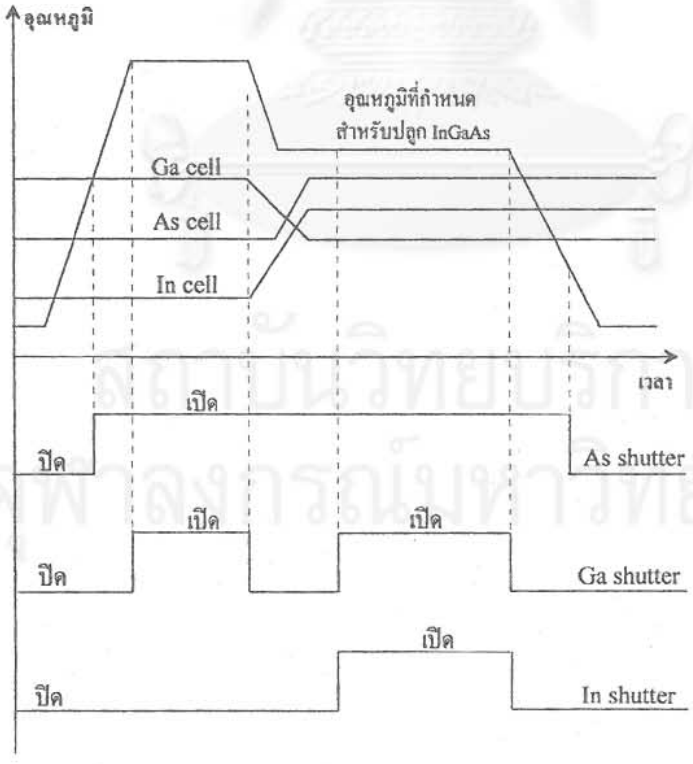


รูปที่ 3.1 แผนภาพโครงสร้างของตัวอย่างที่สร้างขึ้นในการทดลอง

ตารางที่ 3.1 รายละอียดของเงื่อนไขที่ใช้ในการปลูกผลึก InGaAs ($E_g \approx 0.75$ eV) บนแผ่นผลึกฐาน GaAs

Growth temperature (°C)	BEP As_4 ($X10^{-6}$ Torr)				
440	4.6	6.3	6.6	9	9.9
460	1	5.2	6.6	8.1	13.7
480	4.7	6.6	10.4	15	-----

หลังจากปลูกชั้น GaAs buffer เสร็จสิ้นลงแล้ว ทำการลดอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานลงไปตามค่าที่กำหนดไว้สำหรับการปลูกผลึก InGaAs ในขณะเดียวกันทำการปรับค่าอุณหภูมิของแหล่งจ่าย In, Ga และ As_4 ให้ได้ค่าตามที่ได้กำหนดไว้ โดยค่าความไอดันของแหล่งจ่าย In และ Ga มีค่า $P_{In} = 1.9\times10^{-7}$ Torr และ $P_{Ga} = 1.1\times10^{-7}$ Torr ตามลำดับ และค่าความดันไอของแหล่งจ่าย In และ Ga ใช้ค่านี้ตลอดการทดลอง สำหรับค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก InGaAs และค่าความดันไอของ As_4 ตามในตารางที่ 3.1 โดยแผนภาพจำลองกระบวนการปลูกผลึกในการทดลองนี้ในการตั้งค่าอุณหภูมิของแหล่งจ่าย In, Ga และ As_4 รวมถึงกระบวนการเปิดปิด Shutter ในการทดลองนี้ดังในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนภาพจำลองกระบวนการทำงานของการตั้งค่าอุณหภูมิและ Shutter ในการวิจัยนี้

3.2 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

ตัวอย่างที่ได้จากการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุลถูกนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธี van de PAUW ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.4.3 โดยตัดตัวอย่างออกเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมจตุรัสขนาด 5×5 mm^2 ทำการสร้างขั้วโลหะชนิดผิวสัมผัสโอห์มมิกด้วยการฉาบโลหะ In ที่มุมขอบของตัวอย่างทั้งสี่มุม ขนาดประมาณ 0.5×0.5 mm^2 และหนาประมาณ 1000 Å ซึ่งฉาบด้วยการระเหยไอโลหะในสุญญากาศ (Vaccum evaporation) จากนั้นทำการ Anneal ที่อุณหภูมิที่ 450 °C เป็นเวลา 1 นาที [25] เพื่อผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำมีคุณสมบัติเป็นโอห์มมิก (Ohmic contact) หรือเชิงเส้น โดยเงื่อนไขที่ใช้ในการวัดมีค่าไฟฟ้ากระแสตรง 1 mA และสนามแม่เหล็ก 0.3 Tesla สำหรับคุณภาพผิวหน้าผลึก (Surface morphology) ทำการตรวจสอบด้วย Atomic force microscope (AFM) สำหรับค่าคงตัวผลึกของผลึกที่ได้จากการวัดด้วย X-ray diffraction (XRD) ด้วยการเปรียบเทียบผลที่ได้จากผลึก InP ที่ปลูกบนแผ่นผลึก GaAs สำหรับค่าความหนาของชั้นผลึก InGaAs ได้มีการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning electron microscope) โดยผลที่ได้นี้แสดงไว้ในบทที่ 4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
บทการทดลองและการวิเคราะห์ผล

สำหรับในบทนี้นำเสนอผลการทดลองที่ได้ดำเนินการในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ผลการศึกษาคุณสมบัติของชั้นผลึกอิพิแทกซี InGaAs ($E_g \approx 0.75$ eV) ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs (100) ด้วยวิธีการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุล และผลการทดลองที่ได้แสดงถึงอิทธิพลของตัวแปรที่ใช้ในการปลูกผลึก ได้แก่ ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึกและค่าความดันไอ Beam Equivalent Pressure (BEP) ของ As_4 ที่มีต่อคุณสมบัติของชั้นผลึก InGaAs ที่ปลูกได้

4.1 การตรวจสอบค่าความหนาของชั้นผลึก InGaAs ที่ได้

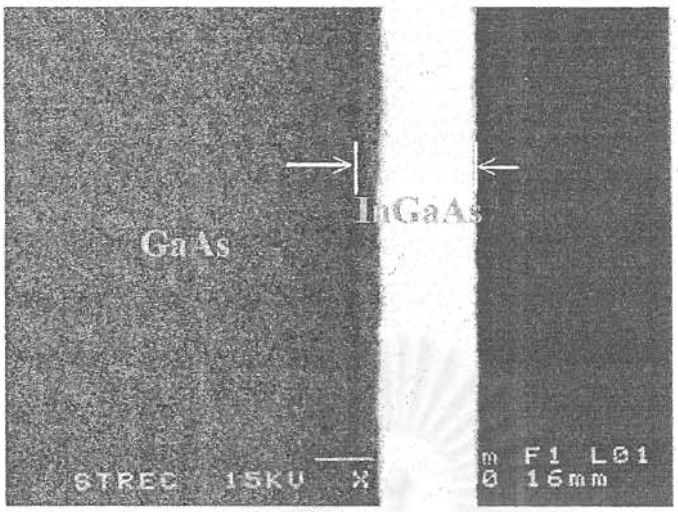
ชั้นผลึกอิพิแทกซี InGaAs ที่ปลูกได้ในการทดลองนี้ เมื่อทำการตรวจสอบค่าความหนาของชั้นผลึกที่ปลูกได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกวาด (Scanning Electron Microscope) มีค่าความหนาประมาณ 2.1 μm ดังในรูปที่ 4.1 เมื่อเปรียบเทียบค่าที่คำนวณจากค่า BEP ของ In และ Ga ที่ใช้ในการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าที่ได้จากคำนวณดังแสดงในหัวข้อนี้มีค่า 1.976 μm ค่าที่ได้มีความผิดพลาดประมาณ 5.9 % โดยค่าความผิดพลาดนี้เกิดจากค่าที่อ่านได้จาก Ionization gauge meter ที่อ่านได้เป็นค่าตัวเลขเพียง 2 หลัก (Digit) เท่านั้น จากค่าที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 1.1×10^{-7} Torr และ 1.9×10^{-7} Torr สำหรับ Ga และ In ตามลำดับ ซึ่งค่าความผิดพลาดจากการอ่านสูงสุด 0.1×10^{-7} Torr หรือประมาณ 14.4 % เนื่องจากค่าความไว (Sensitivity) ของ Ionization guage ที่เสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน ซึ่งค่า BEP ที่วัดได้นั้นมีค่าน้อยกว่าค่าจริงเสมอ [26]

สำหรับการคำนวณค่าความหนาของ InGaAs ในการทดลองนี้สามารถคำนวณได้ดังนี้

จากค่า BEP ของ Ga ที่ใช้ในการปลูกผลึก GaAs มีค่า 5.4×10^{-7} Torr โดยเทียบเท่ากับอัตราการปลูกผลึก 1 μm/ชั่วโมง ซึ่งได้จากผู้ผลิตเครื่อง MBE [27] ดังนั้นจากสมการ (2.2) เราสามารถคำนวณกลับ เพื่อหาจำนวนอะตอมที่พ่นลงบนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน ซึ่งเราสามารถคำนวณจากสมการจำนวน Monolayer ที่ปลูกได้ตามสมการ

$$1\ Monlayer_{GaAs} = \frac{a_{GaAs}}{2} = \frac{5.6533}{2} = 2.82665\ \text{Å} \tag{4.1}$$

$$R_{GaAs} = \frac{10000}{3600 \times 2.82665} = 0.9827\ \text{Monolayer/วินาที} \tag{4.2}$$



รูปที่ 4.1 ภาพภาคตัดขวางของตัวอย่างชั้นผลึกอิพิแทกซี InGaAs ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐาน (100) GaAs เส้นขีดขาวแนวนอนในรูปแทนค่าความยาว 1 ไมครอน

ซึ่งค่าอัตราการปลูกข้างต้นสามารถเปรียบได้กับค่าความหนาแน่นอะตอมที่พ่นลงบนผิวหน้าแผ่นผลึกฐาน

$$J_{Ga} = \frac{2}{(5.6533\times10^{-8})^2}\times0.9827 = 6.1496\times10^{14} \text{ อะตอม/ตร.ซม/วินาที} \qquad (4.3)$$

เนื่องจากค่า BEP ของ Ga และ In ที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่า 1.1×10^{-7} Torr และ 1.9×10^{-7} Torr ตามลำดับ เพื่อทำการเปรียบเทียบค่า BEP ของ In ให้มีค่าเท่ากับค่าเปรียบเทียบของ Ga ได้ตามสมการ

$$\text{BEP ของ In ที่เปรียบเท่า BEP ของ Ga} = \text{BEP ของ In} \times \frac{\textit{Gauge Sensitivity of Ga}}{\textit{Gauge Sensivity of In}} \qquad (4.4)$$

โดยค่า Guage sensitivity ของ Ga และ In มีค่า 1.68 และ 2.44 ตามลำดับ ดังนั้นเราสามารถคำนวณหาค่า BEP สมมูลของ In เทียบเท่า Ga ได้ตามสมการ

$$\text{BEP ของ In ที่เปรียบได้กับของ Ga} = 1.9\times10^{-7}\times\frac{1.68}{2.44} \text{ Torr}$$

$$= 1.2848\times10^{-7} \text{ Torr} \qquad (4.5)$$

ดังนั้นค่าความหนาแน่นอะตอมของ Ga และ In ทั้งหมดที่พ่นลงบนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานได้ตามสมการ

$$J_{InGa} = \frac{1.2848\times10^{-7}+1.1\times10^{-7}}{5.4\times10^{-7}} \times 6.1496 \times 10^{14} = 2.7158 \times 10^{14} \text{ อะตอม/ตร.ซม/วินาที} \quad (4.6)$$

สำหรับค่าความหนาแน่นของอะตอมของ Ga และ In ที่ผิวในระนาบ (100) มีค่า

$$Surface\ density_{\ InGaAs\ 1\ Monolayer} = \frac{2}{(5.8686\times10^{-8})^2} = 5.807 \times 10^{14} \text{ อะตอม/ตร.ซม/วินาที} \quad (4.7)$$

ดังนั้นค่าอัตราการปลูกผลึกที่เกิดขึ้นของ InGaAs ในกรณีมีค่าตามสมการ

$$R_{InGaAs} = \frac{J_{InGa}}{Surface\ density_{1\ Monolayer}} = \frac{2.7158\times10^{14}}{5.807\times10^{14}} = 0.4677 \text{ Monolayer/วินาที} \quad (4.8)$$

เมื่อคำนวณหาค่าความหนาของผลึกที่ปลูกจากค่าอัตราการปลูกผลึกดังกล่าวข้างต้นได้ตามสมการ

$$R_{InGaAs} = 0.4677 \times \frac{a_{InGaAs}}{2} = 0.4677 \times \frac{5.8686}{2} = 1.3723 \text{ Å/วินาที}$$
$$= 1.3723 \times 3600 = 0.494 \text{ μm/ชั่วโมง} \quad (4.9)$$

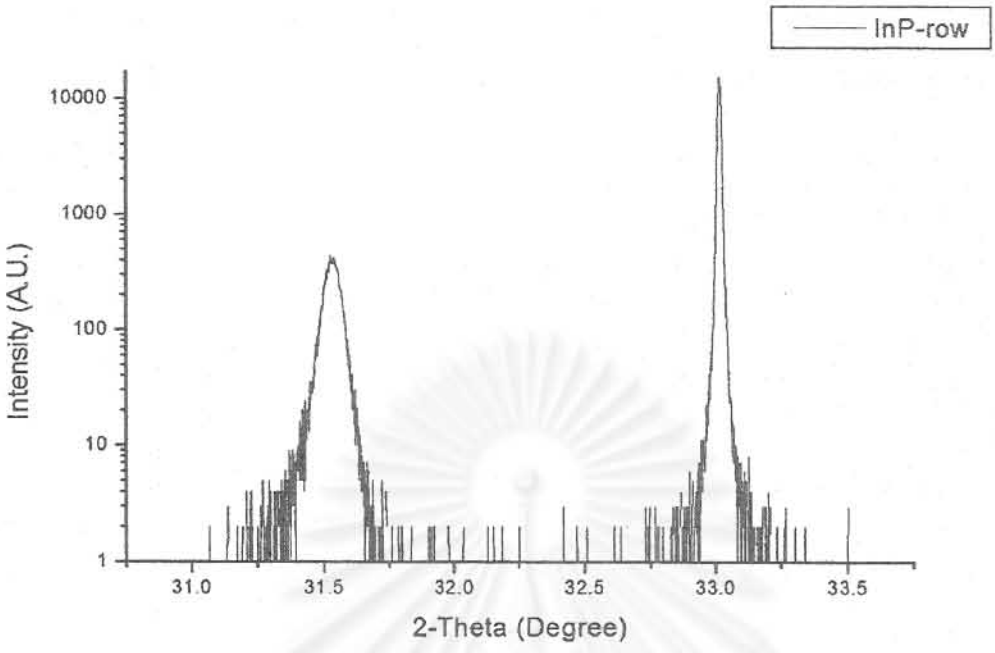
เพราะฉะนั้นค่าความหนาชั้นผลึกอิพิแทกซี InGaAs ที่ปลูกในเวลา 4 ชั่วโมงมีค่าความหนา

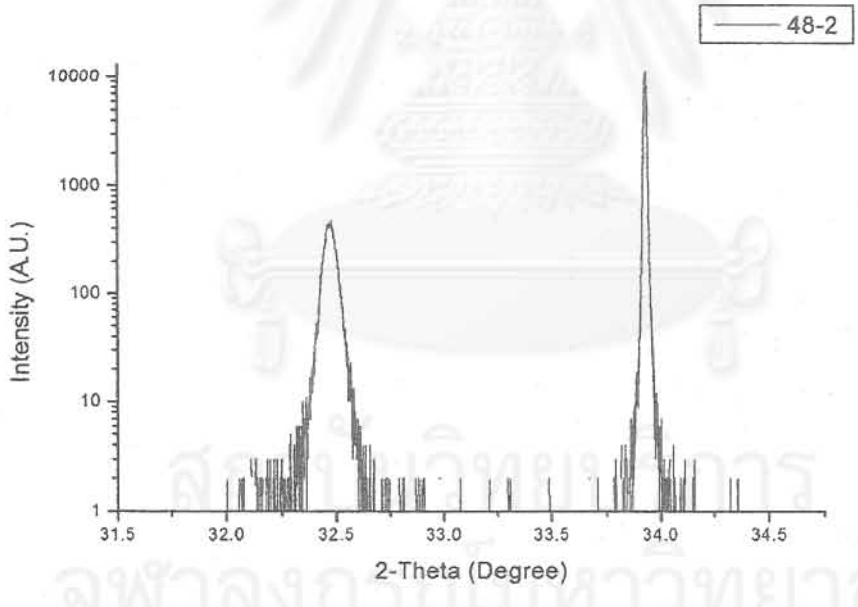
$$d_{InGaAs} = 0.494\times4 = 1.976 \text{ μm} \quad (4.10)$$

จากรูปที่ 4.1 ค่าความหนาที่ได้จากการปลูกมีค่าความหนาประมาณ 2.1 μm ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยความผิดพลาดประมาณ 5% อันเกิดจากค่าผิดพลาดของค่าความดันไอที่อ่านได้จาก Ion gauge meter

4.2 ผลการวัดผลด้วย X-RAY

สำหรับผลการวิเคราะห์ผลตัวอย่างที่ได้ด้วยการใช้การวัดด้วย XRD นั้น โดยตัวอย่างของผลการวัดด้วย XRD จากรูปที่ 4.2 ซึ่งค่าสัดส่วนของ In ในผลึก InGaAs ที่กำหนดให้มีค่าประมาณ 0.53 โดยค่าคงตัวผลึก (Lattice constant) ของ InGaAs ในกรณีนี้มีค่าคงตัวผลึกใกล้เคียงกับค่าของ InP ด้วยการเปรียบเทียบผลของตัวอย่าง InP ที่ปลูกบนแผ่นผลึก GaAs จากผลการวัด XRD ที่ได้นั้นมียอด (Peak) ปรากฏให้เห็น 2 ค่า ดังในรูปที่ 4.2 (ก) ค่ายอดที่ 31.6 องศานั้นเป็นค่าที่ได้ผลึก InP และค่ายอดที่ 33 องศาเป็นค่าที่ได้จากผลึกฐาน GaAs โดยค่า Δθ สำหรับ InP บน GaAs มีค่าประมาณ 1.4 องศา สำหรับชั้นผลึก InGaAs





(ก) InP on GaAs

(ข) InGaAs on GaAs ตัวอย่าง 48-2

รูปที่ 4.2 ตัวอย่างสเปกตรัมของผลการวัด XRD ที่ได้จากตัวอย่าง (ก) InP บน GaAs และ (ข) InGaAs บน GaAs (T_s = 460 °C, As_4 = 5.3 ×10^{-6} Torr)

ตารางที่ 4.1 ค่า Δθ ที่ได้จากการวัด XRD ของชั้นผลึก InGaAs ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐาน GaAs

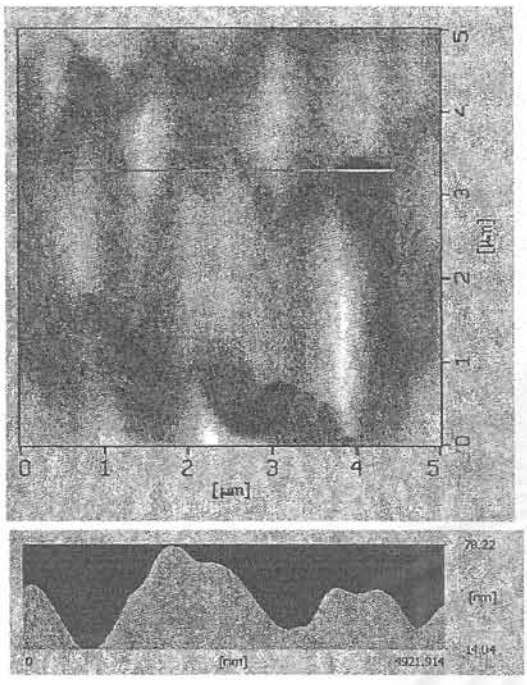
Growth temperature (°C)	Δθ (Degree) (BEP As_4 ($\times 10^{-6}$ Torr))				
440	1.53 (5.3)	1.45 (6.6)	1.40 (8.1)	1.51 (11)	1.49 (13.7)
460	1.494 (5.3)	1.469 (6.6)	1.507 (8.1)	1.511 (11)	1.452 (13.7)
480	1.43 (5.3)	1.46 (6.6)	1.38 (8.1)	1.42 (11)	1.41 (13.7)

และผลการวัด XRD ซึ่งแสดงค่า Δθ ระหว่างผลต่างของค่ายอดที่เปรียบกับ GaAs ในตารางที่ 4.2 ซึ่งค่าองศาผลต่างจากค่ายอดที่ได้จากการวัดด้วย XRD

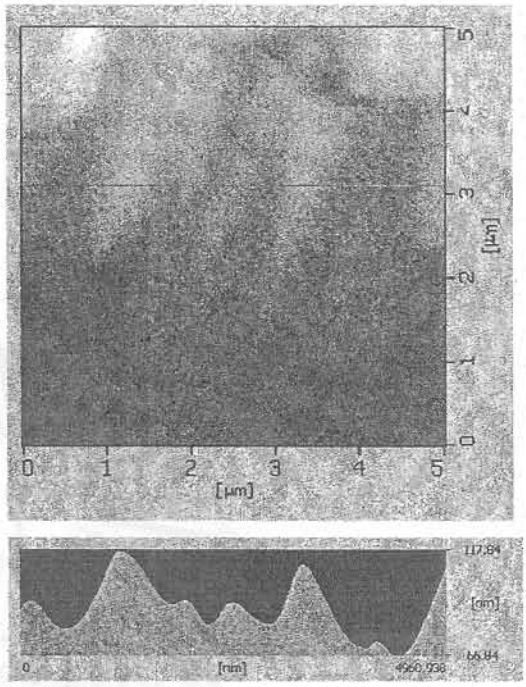
ข้อสังเกตุจากผล XRD ที่ได้นั้นตัวอย่างที่ปลูกที่อุณหภูมิ 480 °C ค่า Δθ ที่ได้มีค่าน้อยกว่า เนื่องจากผลของ In Segragation ที่ทำให้ In Incorperation ในชั้นผลึก InGaAs มีค่าสัดส่วน In ลดลง ที่เกิดจากค่าอุณหภูมิผิวหน้าขณะทำการปลูกผลึก InGaAs มีค่าสูงขึ้นกว่า 480 °C อันเนื่องมาจากคุณสมบัติเชิงความร้อนของชั้นผลึก InGaAs ที่เป็นต้นเหตุให้ค่าอุณหภูมิผิวหน้ามีค่าสูงขึ้น [28] ซึ่งในกรณีนี้หากเราต้องการให้ค่าสัดส่วน In มีค่าเท่าเดิมสามารถทำได้ด้วยการเพิ่มค่าความดันไอของ In cell โดยผลจาก Δθ ที่ได้จากการ XRD นี้บอกค่าความแตกต่างของค่าตัวผลึกที่แตกต่างไปจากไปค่าคงตัวผลึกของ InP บนแผ่นผลึกฐานเพียงเล็กน้อยเท่านั้น สำหรับค่าอุณหภูมิขณะทำการปลูกผลึก และค่าความดันไอ As_4 ไม่มีผลต่อค่าคงตัวของ InGaAs นอกจากค่าอัตราส่วนความดันไอของ In และ Ga เท่านั้น

4.3 ผลการวัด Surface mophology ด้วย AFM

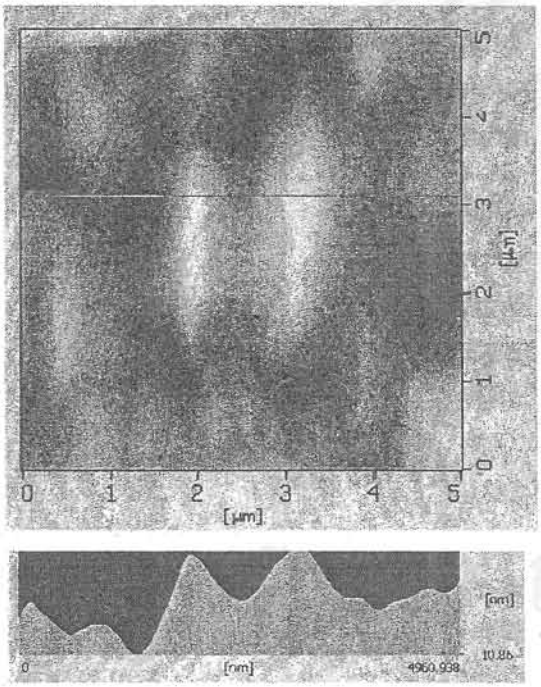
สำหรับผลการวัด Surface morphology ด้วย AFM ของตัวอย่างที่ได้ในการทดลองนี้สามารถสรุปได้ดังในรูปที่ 4.4 ภายในพื้นที่ 5×5 μm^2 ซึ่งผิวที่ได้นั้นมีค่า RMS (Root mean square) ของผิวที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับค่าระดับศูนย์ที่กำหนดจากค่าตำแหน่งที่ต่ำที่สุดของผิวจากภาพ AFM ซึ่งในแต่ละอุณหภูมิขณะปลูกผลึกนั้นมีค่าช่วง BEP As_4 ที่เหมาะสมนั้นดังในรูปที่ 4.4 โดยภาพตัวอย่าง Surface morphology ดังในรูปที่ 4.3 ซึ่งจากผลตามรูปที่ 4.4 การปลูกผลึกอิพิแทกซี InGaAs ที่อุณหภูมิสูง คุณภาพของผิวหน้าที่ได้มีคุณภาพดีที่สุด ในการทดลองปลูกผลึกที่ 480 °C ได้ค่า Surface roughness ต่ำที่สุดคือ



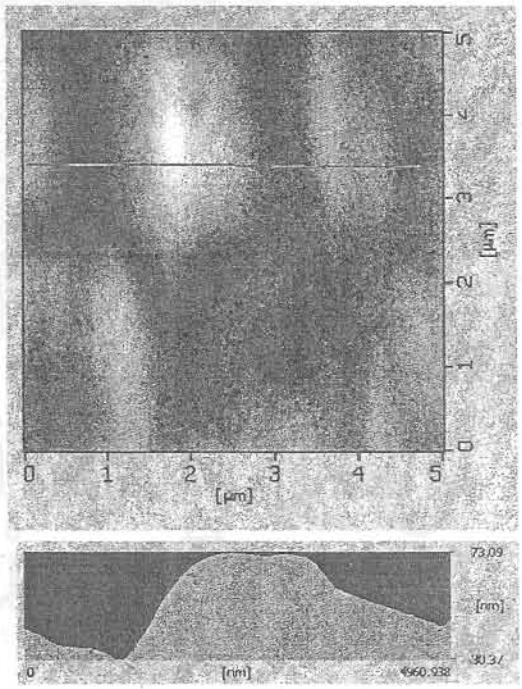
(ก) 48-2 (T_s = 460 °C, As_4 = 6.6X10^{-6} Torr)



(ข) 48-3 (T_s = 480 °C, As_4 = 6.6X10^{-6} Torr)

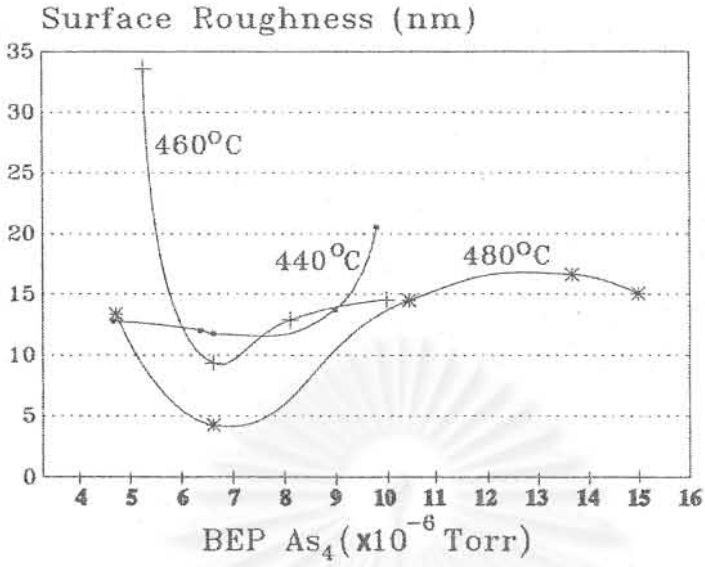


(ค) 48-4 (T_s = 480 °C As_4 = 1.04X10^{-5} Torr)



(ง) 48-5 (T_s = 460 °C As_4 = 1.04X10^{-5} Torr)

รูปที่ 4.3 ภาพ AFM ขนาด 5X5 μm^2 ของตัวอย่างบางตัวอย่าง
และภาพแสดงภาคตัดขวางของผิวตามแนวเส้นหนาของในแต่ละภาพ



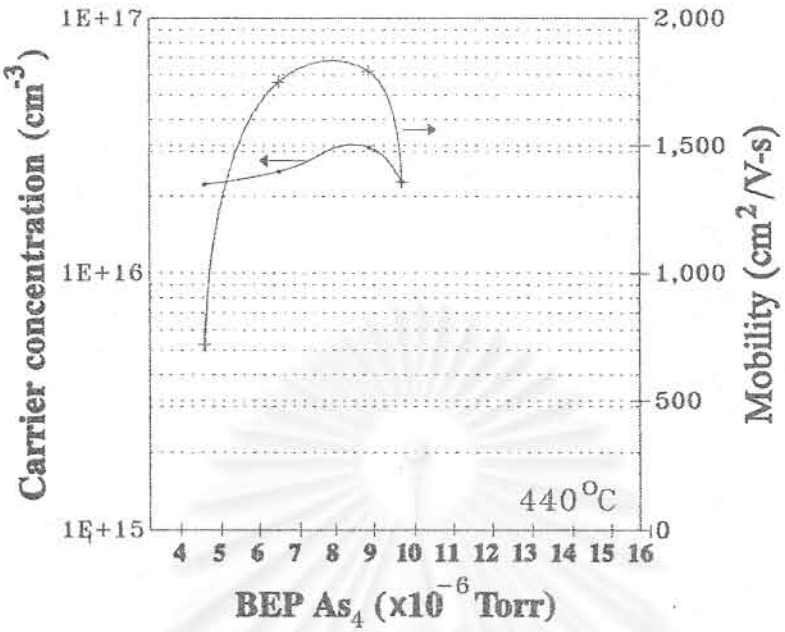
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Surface roughness และค่า BEP As_4

4 nm และช่วงค่าความดันไอ BEP As_4 มีค่าอยู่ในช่วง 6×10^{-6}-8×10^{-6} Torr เนื่องจากการปลูกผลึกที่อุณหภูมิสูงนั้น As_4 นั้นได้สัดส่วนในของแข็งที่เหมาะสม แต่ในกรณีที่อุณหภูมิต่ำลงมาที่ 440 °C และ 460 °C ค่า Surface roughness มีค่าสูงขึ้น โดยเฉพาะการปลูกผลึกที่ 440 °C คุณภาพผิวมีแนวโน้มที่ Surface roughness มีค่าสูงขึ้น เมื่อค่าความดันไอ BEP As_4 มีค่าสูงขึ้น อันเนื่องมาจากผลของ As_4 ที่มีผลต่อคุณภาพผิวหน้าในลักษณะของ Cluster ของ As ส่วนเกินเกิดที่ผิวของผลึก สำหรับในกรณีที่ทำการปลูกผลึกที่อุณหภูมิสูงขึ้นผลนี้จะลดลง แต่อย่างไรก็ตามในการปลูกผลึกที่ค่าอุณหภูมิสูงขึ้นนั้นจากมีผลทำให้ค่าสัดส่วนของ In และ Ga เปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่ต้องการ สำหรับค่า RMS ของ Surface roughness นี้ได้จากค่าที่คำนวณจากโปรแกรมของเครื่อง AFM

จากผลการวัดคุณภาพผิวหน้าด้วย AFM เงื่อนไขที่ได้คุณภาพผิวดีที่สุดคืออุณหภูมิการปลูกผลึกที่ 480 °C และมีค่าความดัน BEP ของ As_4 ในช่วง 6×10^{-6}-8×10^{-6} Torr โดยมีค่า Surface roughness ของผิวผลึกที่ได้อยู่ในช่วง 4-5 nm

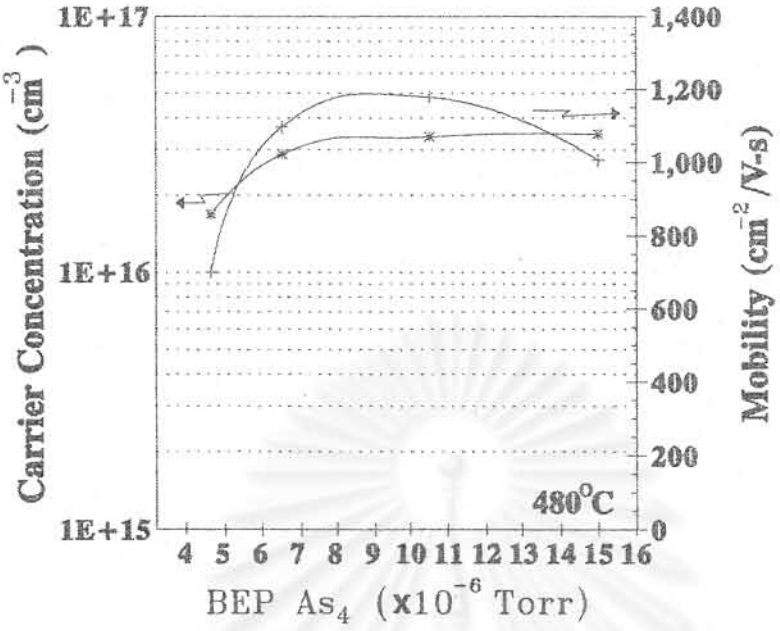
4.4 ผลการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธี van der PAUW

ผลการทดลองวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธี van der PAUW ของชั้นผลึกอิพิแทกซี InGaAs ที่ปลูกแผ่นผลึกฐาน (100) GaAs ที่ได้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) หรือมีพาหะนำไฟฟ้าส่วนใหญ่เป็นอิเล็กตรอน โดยอิทธิพลของค่าความดันไอ As_4 ที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นผลึกอิพิแทกซี InGaAs ดังกราฟในรูปที่ 4.5 รูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 ตามลำดับ ค่าความเข้มข้นพาหะมี



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นพาหะ ค่าความคล่องตัวและค่าความดันไอ As_4 ภายใต้เงื่อนไขการปลูกผลึกที่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐาน 440 °C

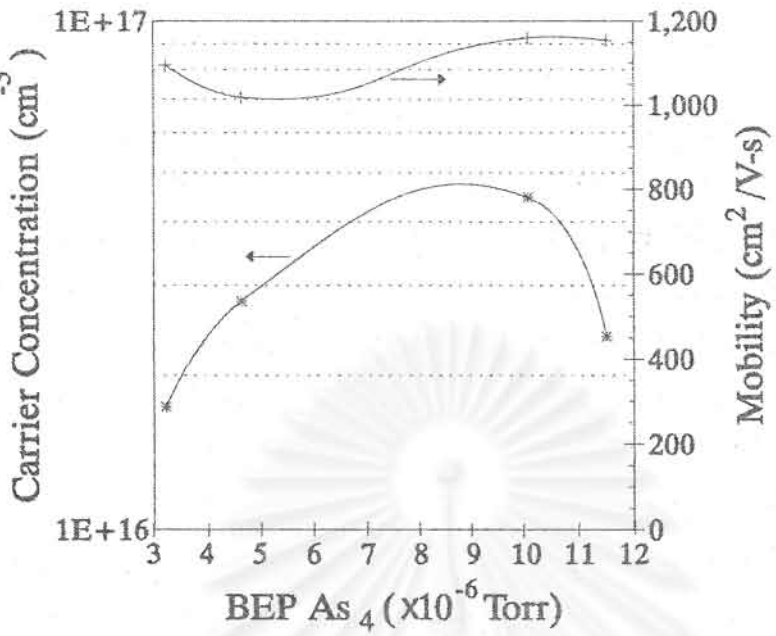
ค่าอยู่ในช่วง 2.2×10^{16}- 3.12×10^{16} cm^{-3} และค่าความคล่องตัวมีค่าอยู่ในช่วง 708-1,792 $cm^2/V.s$ ที่อุณหภูมิห้อง โดยอิทธิพลของอุณหภูมิขณะทำการปลูกผลึกมีผลดังนี้ ที่อุณหภูมิขณะทำการปลูกผลึกที่ 440 °C นั้น ค่าความเข้มข้นพาหะมีค่าอยู่ในช่วง 2.2×10^{16}- 3.12×10^{16} cm^{-3} และค่าความคล่องตัวมีค่าอยู่ในช่วง 708-1,792 cm^2/V-s โดยอิทธิพลของค่าความไอ As_4 มีผลต่อค่าความคล่องพาหะในกรณีนี้อย่างเด่นชัด ซึ่งปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้จาก As Incoperation ในเนื้อผลึกหรือการแทรกเรียงตัวของอะตอม As ในโครงผลึก ที่อุณหภูมิขณะทำการปลูกผลึก 440 °C นี้มีค่าความดันไอ As_4 มีผลทำให้ค่าความคล่องพาหะลดลงอย่างรวดเร็วในการกรณีที่ค่าความดันไอ As_4 ต่ำกว่า 6×10^{-6} Torr อันเนื่องมาจากผลของค่าความดันไอ As_4 ที่มีค่าต่ำทำให้เนื้อผลึกมีตำแหน่งขาดหายไปของ As อันทำให้เกิดจุดบกพร่องขึ้น (Defect) ขึ้นภายในเนื้อผลึก โดยจุดบกพร่องนี้ทำให้เกิดจากกระเจิง (Scattering) ขึ้น อันเป็นสาเหตุทำให้ค่าความคล่องตัวมีค่าลดลง สำหรับกรณีที่ค่าความดันไอ As_4 กว่า 9×10^{-6} Torr อะตอม As ส่วนเกินนั้นเกิดจากการแทรกตัวในตำแหน่งที่ไม่ใช่ตำแหน่งของอะตอมในโครงผลึก ทำให้อะตอม As ที่อยู่ผิดตำแแหน่งนี้ทำให้เกิดจากกระเจิงอันเนื่องมาจากการอยู่ผิดตำแหน่งของ As ในโครงผลึก จากผลการทดลองในเงื่อนไขค่าความดันไอ As_4 ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 6×10^{-6}-9×10^{-6} Torr สำหรับการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 440 °C ซึ่งได้ค่าความคล่องตัวพาหะสูงสุดในกรณีนี้



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นพาหะ ค่าความคล่องตัวและค่าความดันไอ As_4 ภายใต้เงื่อนไขการปลูกผลึกที่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐาน 460 °C

สำหรับในกรณีที่อุณหภูมิขณะทำการปลูกผลึก 460 °C นั้นมีลักษณะคล้ายกับกรณีของอุณหภูมิขณะทำการปลูกผลึก 440 °C สำหรับค่าความเข้มข้นพาหะมีค่าอยู่ในช่วง 1.73×10^{16}- 4.48×10^{16} cm^{-3} แต่ค่าความคล่องตัวมีค่าอยู่ในช่วง 1,018-1,160 $cm^2/V.s$ ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งค่าความคล่องตัวพาหะในกรณีนี้มีความแตกต่างกันไม่มากนัก โดยค่าความดันไอ As_4 ที่เหมาะสมมีค่าอยู่ในช่วง 1×10^{-5}-1.2×10^{-5} Torr ซึ่งค่าความคล่องพาหะที่ได้มีค่าต่ำกว่ากรณีของอุณหภูมิขณะทำการปลูกผลึก 440 °C จึงแม้ว่าค่าอุณหภูมิขณะทำการปลูกผลึกมีค่าสูงขึ้นก็ตาม แต่จำนวนจุดบกพร่องจากอะตอมในโครงผลึกขาดหายไปหรืออยู่ผิดตำแหน่งไม่ได้ลดลงตาม และค่าความคล่องตัวพาหะในกรณีมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อค่าความดันไอ As_4 มีเพิ่มขึ้น

สำหรับในกรณีที่อุณหภูมิขณะทำการปลูกผลึก 480 °C นั้นมีลักษณะคล้ายกับกรณีของอุณหภูมิขณะทำการปลูกผลึก 440 °C ค่าความเข้มข้นพาหะมีค่าอยู่ในช่วง 1.67×10^{16}- 3.45×10^{16} cm^{-3} และค่าความคล่องตัวมีค่าอยู่ในช่วง 700-1,179 $cm^2/V.s$ ที่อุณหภูมิห้อง โดยค่าความดันไอ As_4 ที่เหมาะสมมีค่าอยู่ในช่วง 7×10^{-6}-1.1×10^{-5} Torr โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นพาหะมีค่าสูงขึ้นเมื่อค่าความดันไอ As_4 มีค่าเพิ่มขึ้นสำหรับค่าความดันไอ As_4 ที่ต่ำกว่า 7×10^{-6} Torr และมีค่าความคล่องตัวไม่เปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัดเมื่อค่าความดันไอมีค่า As_4 มีค่าสูงกว่า 7×10^{-6} Torr สำหรับอิทธิพลของค่าความดันไอที่มีต่อค่าความคล่องตัวนั้น โดยค่าความคล่องพาหะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความดันไอ As_4 ค่าต่ำกว่า 7×10^{-6} Torr ซึ่งค่าความคล่องตัวพาหะมีค่าต่ำเมื่อค่าความดันไอ As_4 มีค่าต่ำ และมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อค่าความดันไอมี



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นพาหะ ค่าความคล่องตัวและค่าความดันไอ As_4 ภายใต้เงื่อนไขการปลูกผลึกที่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐาน 480 °C

ค่า As_4 มีค่าสูงกว่า 7×10^{-6} Torr โดยค่าความคล่องตัวพาหะมีลักษณะอิ่มตัวเมื่อค่าความดันไอมีค่าสูงขึ้น เนื่องจาก As_4 สามารถแทรกเรียงในผลึกได้ดีที่อุณหภูมิสูง สำหรับอะตอม As ส่วนเกินในกรณีไม่มีผลต่อค่าความคล่องตัวพาหะ เนื่องจากการระเหิดของ As ที่อุณหภูมิสูงกว่ากรณีของอุณหภูมิขณะทำการปลูกผลึก 440 °C เนื่องจากผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ As Incoperation ในเงื่อนไขนี้มีค่าสูงขึ้นสำหรับในกรณีนี้ และค่าความเข้มข้นพาหะในกรณีมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อค่าความดันไอ As_4 มีเพิ่มขึ้น

จากผลการทดลองนี้เงื่อนไขการปลูกผลึก InGaAs บน GaAs ที่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐาน 440-480 °C นั้นสามารถสรุปได้ดังในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าความเข้มข้นพาหะและค่าความคล่องตัวพาหะของตัวอย่างจากการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 440-480 °C

Growth Temperature (°C)	ค่าความเข้มข้นพาหะ (cm^{-3})	ค่าความคล่องตัวพาหะ ($cm^2/V.s$)
440	2.2×10^{16} - 3.12×10^{16}	708-1,792
460	1.73×10^{16} - 4.48×10^{16}	1,018-1,160
480	1.67×10^{16} - 3.45×10^{16}	700-1,179

4.5 ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์

ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์จากตัวอย่างที่ได้สร้างขึ้นนี้ไม่มีตัวอย่างใดที่สามารถวัดผลได้ อันเนื่องมาจากผลของความบกพร่อง (Defect) ในเนื้อผลึกที่ลดทอนคุณสมบัติการเปล่งแสงของ InGaAs รวมถึงการรวมตัวแบบ Auger ที่เกิดขึ้นใน InGaAs วิธีการปรับปรุงคุณภาพคุณสมบัติการเปล่งแสงของ InGaAs บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs สามารถทำได้หลายวิธี เพื่อลดความบกพร่องในเนื้อผลึก ได้แก่ การใช้ Buffer มีคุณลักษณะ Graded GaAs-InGaAs การใช้ $In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Ga_{0.48}As$ superlattice เป็นชั้น Buffer และการใช้ InP เป็นชั้น Buffer เป็นต้น โดยชั้น buffer ต่างๆ เหล่านี้ทำหน้าที่ในการลดความเครียดในชั้น InGaAs และทำเกิดความบกพร่องในชั้นผลึก InGaAs ลดลง หรือมีความบกพร่องน้อยกว่ากรณีที่ปลูก InGaAs ลงบน GaAs โดยตรง [29] นอกจากนี้สารประกอบ InGaAs ($E_g \approx 0.75$ eV) หรือ $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ มีผลของ Auger recombition ที่ทำให้ประสิทธิภาพการเปล่งแสง [30] โดยการรวมตัวแบบ Auger recombination เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเล็ก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5
สรุป

ในโครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเงื่อนไขในการปลูกผลึกชั้นอิพิแทกซี InGaAs ($E_g \approx 0.75$ eV) บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs (100) ด้วยวิธีการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุล โดยคุณสมบัติของชั้นผลึกอิพิแทกซี InGaAs ($E_g \approx 0.75$ eV) ที่ได้นี้ขึ้นกับเงื่อนไขหรือตัวแปรที่ใช้ในการปลูกผลึก ได้แก่ ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึกและค่าอัตราส่วนความดันไอ BEP ของ As_4/(Ga+In) ช่วงค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการปลูกผลึก InGaAs ($E_g \approx 0.75$ eV) อยู่ในช่วง 440-480 °C โดยค่าความดัน BEP ของ As_4 ในช่วง 7×10^{-6}-1×10^{-5} Torr สำหรับค่าอัตราการปลูกผลึก 0.5 μm/ชั่วโมง ซึ่งค่าความดันไอของ Ga และ In มีค่า 1.1×10^{-6}และ 1.9×10^{-5} Torr ตามลำดับ จากการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบด้วย X-RAY Diffraction ค่าคงตัวผลึกของ InGaAs ($E_g \approx 0.75$ eV) มีค่าใกล้เคียงกับค่าคงตัวผลึกของ InP นอกจากนี้สำหรับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นผลึกอิพิแทกซี InGaAs ($E_g \approx 0.75$ eV) บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น (100) GaAs ที่ได้สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

(ก) พาหะนำไฟฟ้าส่วนใหญ่เป็นอิเล็กตรอนหรือเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type)

(ข) คุณสมบัติของผิวหน้าผลึก (Surface mophology) ที่ได้ขึ้นกับเงื่อนไขที่ใช้ในการปลูกผลึกด้วยเช่นเดียวกัน โดยขึ้นกับอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึกและค่าความดันไอ As_4 ที่ใช้ในการปลูกผลึก สำหรับในการทดลองนี้เงื่อนไขที่ให้คุณสมบัติของผิวหน้าผลึกดีที่สุดคือการปลูกผลึกที่อุณภูมิ 480 °C และใช้ค่าความดันไอ As_4 ในช่วง 6×10^{-6}-8×10^{-6} Torr โดยค่า Surface roughness ที่ได้มีค่าประมาณ 4 nm.

(ค) ค่าความเข้มข้นพาหะมีค่าอยู่ในช่วง 1.68×10^{16}-4.48×10^{16} cm^{-3} และมีค่าความคล่องตัวพาหะอยู่ในช่วง 700-1,791 cm^2/V-s ที่อุณหภูมิห้อง สำหรับในกรณีเงื่อนไขที่ให้ค่าความคล่องพาหะสูงสุดคือการปลูกผลึกที่อุณภูมิ 440 °C และใช้ค่าความดันไอ As_4 ในช่วง 7×10^{-6}-9×10^{-6} Torr โดยค่าความคล่องตัวพาหะสูงสุดคือ 1,791 cm^2/V-s

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6
ข้อเสนอแนะ

สำหรับงานวิจัยนี้ค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบจากรูปแบบของ RHEED ที่จุดเปลี่ยนแปลงต่างๆ บนผิวหน้าของ GaAs (100) ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนมากกว่า 10 °C ซึ่งวิธีการที่ดีที่สุดคือการใช้ IR Pyrometer แต่เครื่องมือนี้มีราคาแพง สำหรับอีกวิธีการหนึ่ง ได้แก่ การใช้โลหะหรือวัสดุที่มีค่าจุดหลอมเหลวในช่วงที่เราทำงาน เช่น Al มีค่าจุดหลอมเหลว 660°C หรือ InSb มีค่าจุดหลอมเหลว 525°C ติดลงบนแผ่นผลึกฐานที่ติดไว้บน Mo Block และทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จาก IR Pyrometer หรือค่าที่ได้จาก Thermocouple เพื่อให้สามารถกำหนดค่าอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น แต่วิธีการนี้ยุ่งยากและไม่เหมาะสำหรับการงานในช่วงอุณหภูมิที่กว้างมากได้ หากใช้ในการผลิตเชิงพาณิชย์จำเป็นต้องใช้เครื่องมือ IR Pyrometer นี้ เพื่อให้การผลิตสามารถทำซ้ำได้ (Repeatability) นอกจากนี้ยังมีความจำเป็นต้องตรวจสอบคุณสมบัติของโครงผลึกด้วย X-ray ซึ่งเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับงานนี้คือ Double Crystal X-ray Diffractrometer เนื่องจากไม่มีเครื่องมือชนิดนี้ในประเทศไทย และเป็นเครื่องมือหลักของการวิจัยด้านสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ และวัสดุที่ใช้ในการประดิษฐ์สิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ยังสามารถใช้วิเคราะห์ค่าคงตัวผลึก (Lattice constant) ค่าความหนาของชั้นผลึก โดยเฉพาะวัสดุสารประกอบชนิด 3 ธาตุ (Ternary) และชนิด 4 ธาตุ (Quaternary) โดยเครื่องมือ X-ray นี้สามารถบอกค่าความแตกต่างของค่าคงตัวผลึกของชั้นผลึกที่ประกอบกันขึ้นเป็นโครงสร้างสิ่งประดิษฐ์ ดังนั้นถ้ามีความพร้อมของอุปกรณ์การวิจัยทางด้านวัสดุอิเล็กทรอนิกส์จะทำให้มีความคล่องตัวมากขึ้น ผลของการวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทำการวิจัยสารประกอบอื่นๆ เช่น GaSbAs InGaAlAs และ GaPSb เพื่อนำมาใช้ในการประดิษฐ์สิ่งประดิษฐ์ชนิดอื่นๆ ต่อไป โดยการใช้ InGaAs เป็นชั้น Buffer ก่อนทำการปลูกผลึกหลักที่เราต้องการปลูก คณะผู้วิจัยหวังไว้ว่าในโครงการอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยจะได้การสนับสนุนและส่งเสริมต่อไปในอนาคต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง (Reference)

1. Handbook of Semiconductor Lasers and Photonic Integrated Circuits, Edited by Y. Suematsu and A. R. Adams, Chapman & Hall, 1994.
2. Principle and Application of Optical Communication, Max Ming-Kang Liu, IRWIN, 1996.
3. InP Materials and Devices : Physics and Technology, Edited by Osamu Wada and Hideki Hasegawa, John Wiley and Sons, Inc., 1999.
4. Physical Properties of III-V Semiconductor Compounds, Sadao Adachi, John Wiley & Sons, Inc., 1992.
5. Nakagawa S., Hall E., Almuneau G., Kim J. K., Buell D.A., Kroemer H., Coldren L. A., "1.55 μm InP-lattice-matched VCSELs with AlGaAsSb-AlAsSb DBRs", IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 7, No. 2, 2001, pp.224-230.
6. Yejin Zhang, Weiyou Chen, Aijun Wang, Heng Jiang, Caixia, and Shiyong Liu, "Design of the Active Structure of High-Performance 1.55 μm $In_{1-x-y}Ga_yAl_xAs$ Strained MQW Lasers", IEEE Journal of Quantum Electron., Vol.37, No. 7, 2001, pp. 923-927.
7. J. Minch, S. H. Park, T. Keating, and S. L. Chuang, "Theory and Experiment of $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$ and $In_{1-x-y}Ga_yAl_xAs$ Long-Wavelength Strained Quantum-well Lasers", IEEE Journal of Quantum Electron., Vol.35, No. 5, 1999, pp. 771-782.
8. Salem A. F., Brennan K. F., "Theoretical study of the response of InGaAs metal-semiconductor-metal photodetectors",IEEE Journal of Quantum Electron., Vol.31, No. 5, 1995, pp. 944-953.
9. D. Strittmatter A., Kollakski S., Droge, E. Bottcher, E. H. Bimberg, "High speed high efficiency resonant-cavity enchanced InGaAs MSM photodetectors", Electronics Letters, Vol. 32, Issue 31, 1996, pp. 1231-1232.
10. Lamarre P., McTaggart R., Pulley M., Huang J., Jackson G., Ohmic contacts with difference metal structures for lattice matched InP based heterostructures", Conference Proceedings Fifth International Conference and Related Materials, 1993, pp. 333-336.
11. John R. Arthur, "Molecular beam epitaxy", Surface Science, Vol. 500, 2002, pp. 189-217.
12. 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, 1984, pp. L657-L659.
13. Yoshiji HORIKOSHI, Minoru KAWASHIMA, and HIROSHI YAMAGUCHI, "Migration-Enhanced Epitaxy of GaAs and AlGaAs", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 27, No. 2, 1986, pp. 169-179.

14. Tomoya Shitara and Karl Eberl, "Electronic properties of InGaP grown by solid-source molecular beam epitaxy with a GaP decomposition source", Appl. Phys. Lett., Vol. 65 No. 3, 1994, pp. 356-358.
15. MBE Components & Accessories, Valved Arsenic Cracker Cells, RIBER, Febuary 1999.
16. M. A. Herman and H. Sitter, "Molecular Beam Epitaxy : Fundamentals and Current Status", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1989, pp. 96.
17. A. S. Bracker, M. J. Yang, B. R. Bennett, J. C. Culberton, W. J. Moore, Surface reconstruction phase for InAs, AlSb and GaSb", Journal of Crystal Growth, vol. 220, 2000, pp. 384-392.
18. 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, 1996, pp. 66-70.
19. F. G. Celiim Y. C. Kao, and H. Y. Liu, "In situ composition of InGaAs/InP using quadrupole mass spectrometry", J. Vac. Sci Technol., Vol. A 14, No. 6, 1996, pp.3202-3207.
20. K. B. Ozanyan, P. J. Parbrook, M. Hopkinson, and C. R. Whitehouse, "In situ monitoring of the surface reconstruction on InP (100) prepared by molecular beam epitaxy", J. Appl. Phys., Vol. 82, No. 1, 1997, pp. 474-476.
21. GaInAsP Alloy Semiconductor, Edited by T. P. Pearsal Wiley & Sons, 1982, pp. 92.
22. Data in Science and Technology, Edited in Chief : R. Poershke, Semiconductor Group IV Elements and III-V Compound, Editor : O Madalung, Springer-Verlag, 1991.
23. InP-Based Materials and Devices, Edited by Osamu WADA and Hideki HASEKAWA, John Wiley & Sons, Inc., 1999.
24. L. J. Van der PAUW, "A Method of Measuring The Resistivity and Hal Coefficient on Lamellage of Arbitary Shape", Phillips Technical Review, Vol. 20, 1958, pp. 220-224.
25. Yoshikazu Takeda, Akio Sasaki, Yujiro Imamura, and Toshinori Takagi, "Electron mobility and energy gap of $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ on InP substrate", Journal of Applied Physics, vol. 47, No. 12, 1976, pp.5405-5408.
26. F. G. Celli, Y. C. Kao and H.U. Liu, "In situ composition monitoring of InGaAs/InP using quadrupole mass spectrometry", J. Vac. Sci. Technol., Vol. 17 A, No. 6, 1996, pp. 3202-3207.
27. RIBER MBE 32 Opertor's Guide, Instruction Manual, 1991, pp. 81-84.
28. J. A. Roth, D. H. Chow, G. L. Olson, P. D. Brewer, W. S. Williamson, B. Johs, "Real-time control of the MBE growth of InGaAs on InP", J of Crystal Growth, vol. 201/202, 1999, pp. 31-35.
29. Y. F. Chen, J. L. Shen, and I. M. Chang, S. Z. Chand and S. C. Lee, "Photoluminescence study of highly mismatched $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ epilayers grown on InP-coated GaAs substrates", J Appl. Phys., vol. 77, No.3, 1995, pp. 1040-1042.

30. Theory of optical processes in semiconductors : Bulk and Microstuctures, P.K. BASU, Oxford university press, 1997.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย