



การปลูกผลึก InP บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs ด้วยวิธีการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล

โดย

สมชัย รัตนธรรมพันธ์ D.Eng. (Chula)

และ

ชุมพล อันตรเสน Dr.-Ing. (Toulouse)

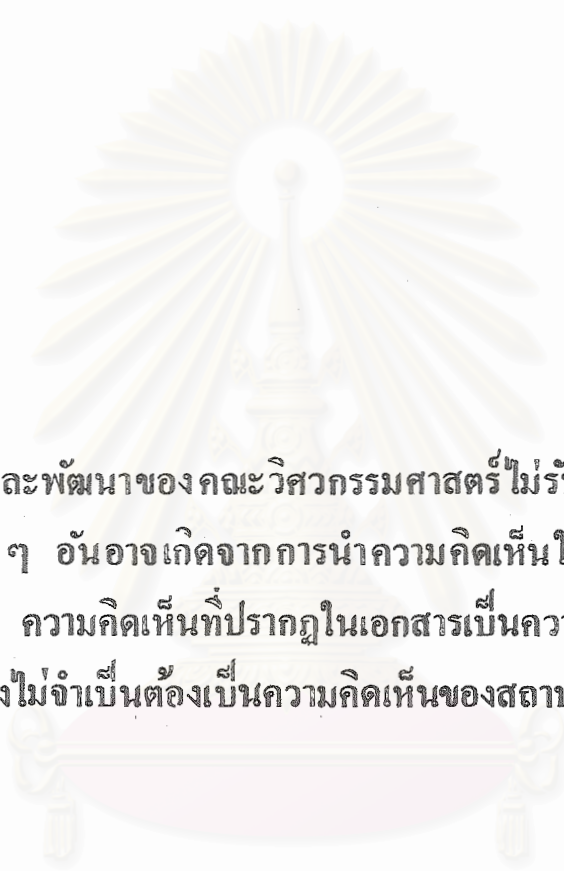
โครงการวิจัยเลขที่ 58G-EE-2543

ทุนงบประมาณแผ่นดิน ปี 2543

จพ
วศ 15
011031

คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
กรุงเทพฯ

ธันวาคม 2544

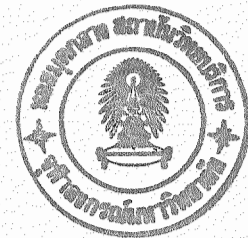


สถาบันวิจัยและพัฒนาของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ไม่รับผิดชอบ
ต่อผลเสียใด ๆ อันอาจเกิดจากการนำความคิดเห็นในเอกสาร
ฉบับนี้ไปใช้ ความคิดเห็นที่ปรากฏในเอกสารเป็นความคิดเห็น
ของผู้เขียนซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นความคิดเห็นของสถาบันฯ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การปลูกผลึก InP บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs ด้วยวิธีการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล



โดย

สมชาย รัตนธรรมพันธ์ D.Eng. (Chula)

และ

ชุมพล อินทรเสน Dr.-Ing.(Toulouse)

โครงการวิจัยเลขที่ 58G-EE-2543

ทุนงบประมาณแผ่นดิน ปี 2543

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพฯ

ธันวาคม 2544

กิตติกรรมประกาศ

ส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสภาวิจัยแห่งชาติ ปีงบประมาณ 2543 ส่วนหนึ่งจากโครงการวิจัย Molecular Beam Epitaxy (MBE) จากสภาวิจัยแห่งชาติ ปีงบประมาณ ปี 2536 และอีกส่วนหนึ่งได้รับการสนับสนุนสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) ในโครงการวิจัย "การปลูกผลึกอินเดียมฟอสไฟด์บนผลึกฐานแกเลียมอาร์เซไนด์ที่มีผิวหน้าในระนาบ (411) A โดยการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุลที่ใช้วัตุดิบในรูปของแข็ง" ภายใต้สัญญาเลขที่ BRG14/2543 สุดท้ายนี้คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธรา ชลปรางค์ ที่ให้การสนับสนุนและคำแนะนำชี้แนะที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการวิจัยนี้ พร้อมทั้งคุณสุภโชค ไทยน้อย คุณขวัญเรือน ไทยน้อย คุณพรชัย ช่างม่วง และคุณสุวิวัฒน์ โสภิตพันธ์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลืองานวิจัยนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เลขหมู่ ^{จก} ๐๕ 15
เลขทะเบียน ๐11031
วัน,เดือน,ปี 18 เม.ย. 45

บทคัดย่อ

ได้ทำการวิจัยการปลูกผลึกอพิแทกซี InP บนแผ่นผลึกฐาน GaAs ด้วยวิธีการปลูกผลึกอพิแทกซี จากล้าโมเลกุล โดยใช้แหล่งจ่ายฟอสฟอรัสจากการสลายตัวของ GaP ที่อยู่ในรูปโพลีคริสตอลไลน์ การตรวจสอบการเรียงตัวของผลึก InP ขณะที่ปลูกด้วยเทคนิค RHEED ซึ่งคุณภาพผลึกที่ได้มีลักษณะเรียบมันเงา โดยอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึกและค่าอัตราส่วน V/III ที่มีผลต่อคุณสมบัติของชั้นผลึกอพิแทกซี InP ชั้นผลึกอพิแทกซี InP ที่ไม่มีการเจือมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและแสดงค่าความหนาแน่นพาหะนำไฟฟ้ามีค่าอยู่ในช่วง 4×10^{16} - 9.5×10^{18} cm^{-3} และค่าความคล่องตัวพาหะอยู่ในช่วง 237-1,761 $\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ จากการวัดด้วยวิธี van der PAUW ที่อุณหภูมิห้อง จากผลที่ได้ในงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าคุณสมบัติของชั้นผลึกอพิแทกซี InP ที่ปลูกได้ขึ้นกับเงื่อนไขต่างๆ ที่ใช้ในการปลูกผลึก



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Abstract

The growth of InP layers on GaAs substrates by molecular beam epitaxy (MBE) using polycrystalline gallium phosphide (GaP) as a phosphorus source was investigated. The surface reconstruction during the growth was monitored by reflection high energy electron diffraction (RHEED), the high quality InP layers on GaAs substrates with specular surface morphology could be obtained. The effects of growth temperatures and V/III ratios on the properties of InP epi-layers were studied. The undoped layers showed n-type conduction behavior with a background carrier concentration of 4×10^{16} - $9.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ and mobility of 237-1,761 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. Both were measured by van der Pauw method at room temperature. These results showed a strong dependence of growth quality on growth conditions such as growth temperatures and P_2/In flux ratios.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	II
บทคัดย่อภาษาไทย.....	III
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญสัญลักษณ์.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐาน.....	4
2.1 การปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล.....	4
2.1.1 ชุดระบบการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล.....	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 Injector 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 กลไกการเกิดผลึกของการปลูกผลึกอพิแทกซีวิธี 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 ปรากฏการณ์การณฮอลล์ (Hall Effect).....	24
2.5.2 วิธีการวัดของ van der PAUW.....	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.3 การวัด van der PAUW ในทางปฏิบัติ.....	28
2.5.3.1 การกำหนดนิยามการวัดหาค่าสภาพต้านทาน.....	28
2.5.3.2 การวัดหาค่าสภาพต้านทาน.....	28
2.5.3.3 การกำหนดนิยามในการวัดหาค่าแรงดันฮอลล์.....	30
2.5.3.4 การวัดหาค่าแรงดันฮอลล์.....	30
บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง.....	33
3.1 การเตรียมแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น.....	33
3.2 การปลูกผลึก Buffer GaAs.....	33
3.3 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก.....	34
3.4 การศึกษาอิทธิพลของค่าอัตราส่วน BEP ของ P_2/In	35
3.5 การวิเคราะห์ผล.....	36
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	37
4.1 การตรวจสอบค่าความหนาของชั้นผลึกอิพิแทกซี InP ที่ปลูกได้.....	37
4.2 RHEED patterns.....	39
4.3 อิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก InP.....	40
4.3.1 Surface Morphology.....	40
4.3.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	41
4.4 อิทธิพลของค่าอัตราส่วน BEP ของ P_2/In	42
4.4.1 Surface Morphology.....	42
4.4.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	43
4.5 การเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลงานของนักวิจัยอื่นๆ.....	44
4.6 คุณสมบัติทางแสง.....	45
บทที่ 5 สรุป.....	47
บทที่ 6 ข้อเสนอแนะ.....	48
เอกสารอ้างอิง.....	49
ผลงานการเผยแพร่ของงานวิจัยนี้.....	53

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	แผนภาพโครงสร้างของ Cracker Cell.....	10
รูปที่ 2.6	ภาพของ As Valve Cracker Cell.....	11
รูปที่ 2.7	ภาพโครงสร้างของ Effusion cell ชนิด Gas injector Cell.....	12
รูปที่ 2.8	แผนภาพอธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลงความเข้มของอิเล็กตรอนในขณะที่ทำการปลูกผลึก...14	
รูปที่ 2.9	แผนภาพความสัมพันธ์ของรูปแบบ RHEED และอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐาน (100) GaAs, InP และ InAs ภายใต้ไอของ Dimer.....	14
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 Zincblende.....	20
รูปที่ 2.13	แผนภาพจำลองการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงที่เกิดจากการรวมตัว.....	23
รูปที่ 2.14	แผนภาพระบบการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์.....	23
รูปที่ 2.15	แผนภาพปรากฏการณ์ฮอลล์.....	24
รูปที่ 2.16	ภาพโครงสร้างของตัวอย่างสำหรับการวัดค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าวิธี van der PAUW.....	26
รูปที่ 2.17	แผนภาพการวัดค่าสภาพต้านทานในวิธีการวัดของ van der PAUW.....	27
รูปที่ 2.18	แผนภาพการวัดค่าแรงดันฮอลล์ในวิธีการวัดของ van der PAUW.....	27
รูปที่ 3.1	ภาพรูปแบบ RHEED แบบ c(2X4) ที่ได้จากแผ่นผลึก GaAs ที่อุณหภูมิ 580°C.....	34
รูปที่ 3.2	โครงสร้างของตัวอย่างที่สร้างในการทดลอง.....	35
รูปที่ 3.3	แผนภาพจำลองกระบวนการทำงานของการตั้งค่าอุณหภูมิและ Shutter ในการทดลองนี้.....	36
รูปที่ 4.1	ภาพภาคตัดขวางของตัวอย่างชั้นผลึกอพิแทกซี InP ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐาน (100) GaAs.....	38
รูปที่ 4.2	รูปแบบ RHEED ที่เกิดขึ้นในขณะที่ปลูกผลึก InP บนแผ่นผลึกฐาน GaAs ที่ได้ขณะเวลาปลูกผลึก.....	40
รูปที่ 4.3	ภาพถ่ายผ่านกล้องจุลทรรศน์ของตัวอย่างจากการปลูกที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยค่าอัตราส่วน BEP ของ P ₂ /In มีค่าเท่ากับ 10.....	41

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นพาหะ ค่าความคล่องตัว และค่าอุณหภูมิในการปลูกผลึก.....	42
รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายผ่านกล้องจุลทรรศน์ของตัวอย่างจากการปลูกที่อุณหภูมิ 450°C โดยมีค่าอัตราส่วน BEP ของ P_2/I_n มีค่าต่างๆ.....	43
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นพาหะ ค่าความคล่องตัว และค่าอัตราส่วน BEP ของ P_2/I_n	44
รูปที่ 4.7 สเปกตรัมของตัวอย่างจากการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 450°C โดยอัตราส่วน BEP ของ P_2/I_n มีค่าเท่ากับ 20.....	46

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	ตารางเปรียบเทียบชนิดของ Effusion Cell และชนิดของลำโมเลกุล ที่ได้จากวัสดุชนิดต่างๆ.....	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.....	20
ตารางที่ 2.5	ค่าแถบพลังงานของตัวอย่างสารประกอบชนิด 3 ธาตุและ 4 ธาตุ.....	21
ตารางที่ 4.1	การเปรียบเทียบผลที่ได้จากงานวิจัยนี้และผลงานของนักวิจัยอื่นๆ.....	45

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญสัญลักษณ์

AlAs	: Aluminium Arsenide
AlP	: Aluminium Phosphide
AlSb	: Aluminium Antimonide
AlInAs	: Aluminium Indium Arsenide
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
MOVPE	: Metal-organic Vapor Phase Epitaxy
μ	: Carrier Mobility
N_d	: Electron Concentration
RHEED	Reflection High Energy Electron Diffraction
UHV	: Ultra-high vacuum

บทที่ 1

บทนำ



InP เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V (III-V Compound Semiconductor) ที่มีความสำคัญอย่างมากและมีบทบาทต่อการพัฒนาการระบบสื่อสารทางแสง (Optical Communication) เนื่องจาก InP เป็นสารกึ่งตัวนำที่ถูกนำมาใช้เป็นแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น (Substrate) ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ โดยเฉพาะแหล่งกำเนิดแสงในย่านช่วงความยาวคลื่น 1.3 และ 1.5 μm [1][2] อันเป็นหัวใจสำคัญของระบบสื่อสารทางแสงความเร็วสูงพิเศษ (Ultra-high Speed) และระยะไกล (Long haul) สารประกอบกึ่งตัวนำที่ใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ในย่านดังกล่าวนี้ ได้แก่ สารประกอบกลุ่ม InGaAsP, AlInGaAs, GaAlSbP, GaAlAsSb และ InGaAs ซึ่งมีค่าคงตัวผลึก (Lattice constant) เข้ากับ (Match) ค่าของ InP นอกจากนี้สารประกอบที่เปล่งแสงในย่านดังกล่าวมีค่าความคล่องตัวของพาหะ (Mobility) สูงกว่าของ GaAs [3][4] ทำให้ InP เป็นแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นสำหรับสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้งานในย่านความถี่สูงพิเศษสำหรับการสื่อสารอีกเช่นกัน [5] ดังนั้นสิ่งประดิษฐ์ที่เกี่ยวข้องกับสารประกอบของ InP จึงได้รับการศึกษาและพัฒนาอย่างมากมา เพื่อรองรับการพัฒนาการของสื่อสารทางแสงในยุคปัจจุบันและอนาคต ดังตัวอย่างเช่น ไดโอดเลเซอร์โครงสร้าง DR [6] สำหรับระบบสื่อสารทางแสงในย่าน 1.5 μm เป็นต้น แต่แผ่นผลึกฐาน InP นั้นมีตลาดเฉพาะในด้านสิ่งประดิษฐ์เปล่งแสงสำหรับระบบสื่อสารเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีขนาดของการบริโภคหรือตลาดที่มีขนาดเล็กมากจึงทำให้มีราคาแพง ดังนั้นสิ่งประดิษฐ์ที่ผลิตจากแผ่นผลึกฐานของ InP จึงราคาแพงตามไปด้วย อันแตกต่างไปจากกรณีของ GaAs ที่มีตลาดกว้างกว่าจึงทำให้สิ่งประดิษฐ์ที่สร้างบนผลึกฐาน InP มีราคาแพงกว่าสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างบนผลึกฐานของ GaAs ถึงแม้ว่าต้นทุนในกระบวนการผลิตนั้นไม่แตกต่างกันมากนัก โดยตลาดของสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างบนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs ครอบคลุมตลาดของไดโอดเลเซอร์ในเครื่องเล่น CD เครื่องเล่น LD เครื่องเล่น DVD ระบบสื่อสารทางแสงระยะสั้นและสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ในอุปกรณ์สื่อสารย่านความถี่สูง ซึ่งมีมูลค่าของตลาดสูงกว่ามากหรือในอีกความหมายหนึ่งก็คือปริมาณการบริโภคแผ่นผลึกฐาน GaAs ที่มีมากกว่าของ InP ทำให้ราคาแผ่นผลึกฐาน GaAs จึงมีราคาถูกกว่า แนวความคิดของการวิจัยของการเตรียมผลึก InP บนแผ่นผลึกฐาน GaAs จึงเกิดขึ้นในปี ค. ศ. 1976 โดยกลุ่มนักวิจัยของ Prof. M. Kimata แห่งมหาวิทยาลัยวาเซดะ (Waseda University) ประเทศญี่ปุ่น [7] ซึ่งประสบความสำเร็จในการปลูกแผ่นผลึกฐาน InP บนผลึกฐานของ GaAs ด้วยวิธีการปลูกผลึกอิมพิแทกซ์จากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy : MBE) แต่การวิจัยดังกล่าวนี้มิได้มีการพัฒนาต่อไป เนื่องจากระบบ MBE ในยุคนั้นมีปัญหาเนื่องจากลำโมเลกุลของ P (Phosphorous) ที่ได้จากการเผา P นั้นมีค่าความดันไอ (Vapor Pressure) สูงมากจึงไม่สามารถควบคุมได้ง่ายและ P ส่วนที่เหลืออยู่ภายในระบบจะกลายสภาพเป็นสารหรือวัสดุที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาในการติดไฟได้ง่ายเมื่อถูกอากาศ [8] รวมถึงวิธีการเผาสารประกอบ InP ให้สลายตัวเพื่อให้

ได้ลำโม่เลกุลของ P [8] [9] ก็ไม่ได้รับความนิยม เนื่องจากสารประกอบ InP ที่เป็นวัสดุคืบที่ใช้มีราคาแพงมาก จนกระทั่งเทคนิคการปลูกผลึกอพิแทกซีจากสถานะไอของสารประกอบอินทรีย์โลหะ (Metal-organic Vapor phase Epiatxy: MOVPE) ได้ถูกพัฒนาขึ้น แนวความคิดของการวิจัยการปลูกผลึก InP บนแผ่นผลึกฐาน GaAs และการสร้างสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างจากสารประกอบที่มีค่าคงตัวผลึกเข้ากับ InP โดยวิธี MOVPE ก็ได้กลับมาได้รับความสนใจอีกครั้ง [10][11][12] แต่เนื่องจากระบบ MOVPE เป็นระบบที่ใช้ก๊าซต่างๆ ที่เป็นอันตราย จึงทำให้การวิจัยในเรื่องดังกล่าวจำกัดอยู่ในเฉพาะกลุ่มของบริษัท ซึ่งมีสถานที่ตั้งของระบบเครื่องมืออยู่ในที่ห่างไกลจากชุมชน เพื่อความปลอดภัยและหลีกเลี่ยงความสูญเสียในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุขึ้น

อย่างไรก็ดีเทคนิคการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโม่เลกุลก็ได้มีการพัฒนาวิธีการสำหรับการปลูกผลึก InP แต่ก็ยังใช้ก๊าซ PH_3 เป็นวัสดุคืบ [13] ซึ่งก๊าซดังกล่าวก็มีอันตรายไม่น้อยกว่าก๊าซในระบบ MOVPE เช่นกัน ต่อมาได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ที่เรียกว่า Cracker Valve Effusion Cell [14] สำหรับการกำเนิดไอของ P_2 ในระบบ MBE โดยการเผาฟอสฟอรัสให้กลายเป็นไอของ P_4 และให้ไอดังกล่าวนี้ผ่านขดลวดที่มีความร้อนสูงและแตกตัวกลายเป็นไอ P_2 แต่เนื่องจากชุดอุปกรณ์ดังกล่าวนี้มีราคาแพงและใช้ฟอสฟอรัสที่เป็นวัสดุอันตราย อีกประการหนึ่งการบำรุงรักษาสามารถทำได้ยากเนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนอย่างมาก เมื่อไม่นานมานี้เทคนิคของการเผาสารประกอบ GaP ใน K-Cell ให้สลายตัวออกเป็น Ga และ P_2 และทำการการกักไอของ Ga ไว้ภายในด้วยกลไกการสมดุลของสารประกอบในสถานะไอ ซึ่งในสภาวะดังกล่าวนี้ปริมาณของ Ga ที่มีจำนวนมากกว่า P_2 ดังนั้นจึงสามารถปล่อยไอของ P_2 ออกมา โดยใช้ Ga-Trapping Cap [15] ที่มีลักษณะพิเศษเป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดเงื่อนไวกกล่าวนี้ ในประมาณต้นปี พ.ศ. 2540 ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้รับความช่วยเหลือทางจาก Dr. Karl Eberl แห่งประเทศเยอรมัน ซึ่งเป็นผู้ประดิษฐ์และพัฒนาอุปกรณ์ดังกล่าวในการติดตั้งชุดอุปกรณ์ดังกล่าวเข้าในระบบ MBE ที่มีอยู่ ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อเป็นการเริ่มต้นการศึกษาเทคนิคการปลูกผลึกอพิแทกซีของสารประกอบกึ่งตัวนำของ InP, GaP และ InGaP และทางคณะผู้วิจัยก็ได้ประสบความสำเร็จในการปลูกผลึกของ GaP บนผลึกฐานเริ่มต้น GaAs ด้วย MBE แต่สารประกอบ GaP นี้มีความสำคัญต่อการพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารทางแสงน้อยกว่าสารประกอบ InP

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโม่เลกุลในการปลูกผลึกอพิแทกซี InP บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น (100) GaAs โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะปลูกผลึกและค่าอัตราส่วน Beam Equivalent Pressure (BEP) ของ P_2/In ที่มีต่อคุณสมบัติของผลึก InP ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐาน(100) GaAs พร้อมทั้งการเปรียบเทียบคุณภาพของผลึกที่ได้นี้และผลึกชนิดเดียวกันที่ได้จากวิธีการปลูกผลึกวิธีการอื่นๆ

โดยเนื้อหาสาระของรายงานฉบับนี้มีดังนี้ ในบทที่ 2 กล่าวถึงความรู้พื้นฐานของการปลูกผลึกอพิแทกซีจากกำมะถัน โดยเป็นรายละเอียดของโครงสร้างชุดระบบการปลูกผลึกอพิแทกซีจากกำมะถัน กลไกการปลูกผลึกอพิแทกซีจากกำมะถัน โครงสร้างและคุณสมบัติของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V วิธีการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์และการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า Van der Pauw ในบทที่ 3 กล่าวถึงรายละเอียดและขั้นตอนการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะปลูกผลึกและค่าอัตราส่วน BEP ของ P_2/I_n ที่มีต่อคุณสมบัติของผลึก InP ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐาน GaAs ในบทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลที่ได้ ในบทที่ 5 เป็นการสรุปของโครงการนี้ และในบทที่ 6 ข้อเสนอแนะจากผลงานวิจัยนี้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2 ความรู้พื้นฐาน

สำหรับในบทนี้เป็นการทบทวนความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้โดยสังเขป ซึ่งมีเนื้อหาสาระเกี่ยวกับเทคนิคการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy : MBE) กลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการปลูกผลึกอพิแทกซ์วิธี MBE ความรู้พื้นฐานของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V โครงสร้างควันตัมเวลล์ และการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence)

2.1 การปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy : MBE)

การปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุลหรือ MBE เป็นเทคนิคการปลูกชั้นผลึกสารประกอบกึ่งตัวนำบนแผ่นผลึกฐาน (Substrate) ที่เป็นผลึกเดี่ยว (Single Crystal) โดยการพ่นลำโมเลกุลของก๊าซหรืออะตอมของธาตุที่เป็นวัตถุดิบลงบนผิวหน้าแผ่นผลึกฐาน ซึ่งเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบของสารประกอบสารกึ่งตัวนำ โมเลกุลเหล่านั้นได้จากการระเหยหรือระเหิด (Evaporation) วัสดุที่มีธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารประกอบ (Constituent species) ภายใต้สภาวะสุญญากาศระดับสูงพิเศษ (Ultra-high Vacuum) ปฏิกิริยาของการเกิดเป็นสารประกอบนี้เกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน ค่าอัตราส่วนของสารประกอบและคุณสมบัติของชั้นผลึกอพิแทกซ์ที่ปลูกได้นั้นขึ้นกับเงื่อนไขและตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการปลูกผลึก ได้แก่ ค่าอัตราส่วนค่าความดันไอของลำโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบ อุณหภูมิแผ่นผลึกฐาน ขณะที่ทำการปลูก ฯลฯ เป็นต้น นอกจากนี้อัตราการปลูกนี้ขึ้นค่าความดันไอขององค์ประกอบที่มีคุณสมบัติการเกาะติด (impinging) ผิวหน้าแผ่นผลึกฐาน สำหรับข้อดีของการปลูกผลึกอพิแทกซ์วิธี MBE ได้แก่ การเตรียมผิวแผ่นผลึกฐานสามารถทำได้ง่าย โดยวิธีการทำความสะอาดด้วยความร้อน (Thermal cleaning) ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ความสามารถในการตรวจสอบ (Monitoring) โครงสร้างผิว (Surface structure) ที่สามารถกระทำได้ตลอดเวลาตั้งแต่ก่อนเริ่มต้นการปลูกผลึกจนถึงสิ้นสุดกระบวนการปลูกผลึก นอกจากนี้การปลูกผลึกอพิแทกซ์วิธี MBE ที่ดำเนินการในระบบสุญญากาศระดับสูงพิเศษ ทำให้ผลึกที่ปลูกได้นั้นมีความบริสุทธิ์สูงกว่าวิธีการอื่นๆ เนื่องจากก๊าซต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อคุณภาพผลึก ได้แก่ H_2O , O_2 , CO และ CO_2 เป็นต้น มีปริมาณที่ต่ำมาก ในสภาวะสุญญากาศระดับสูงพิเศษ จึงให้เราสามารถควบคุมคุณภาพของผลึกได้ตามที่เราต้องการ

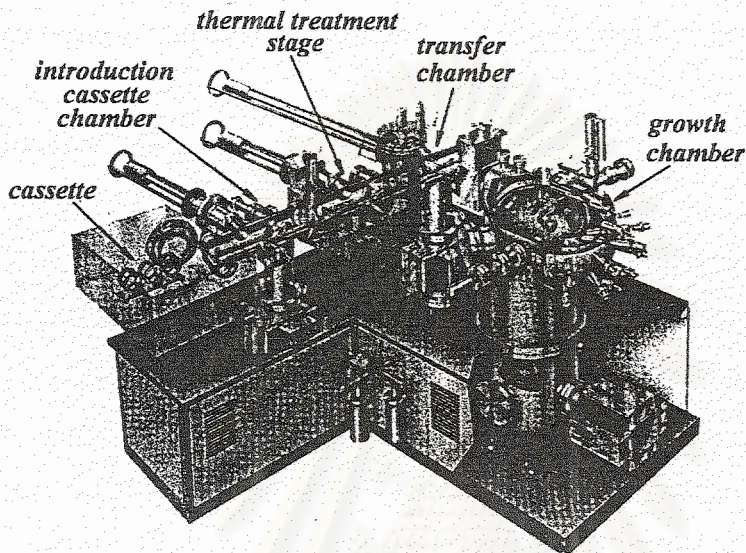
2.1.1 ชุดระบบการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุล

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

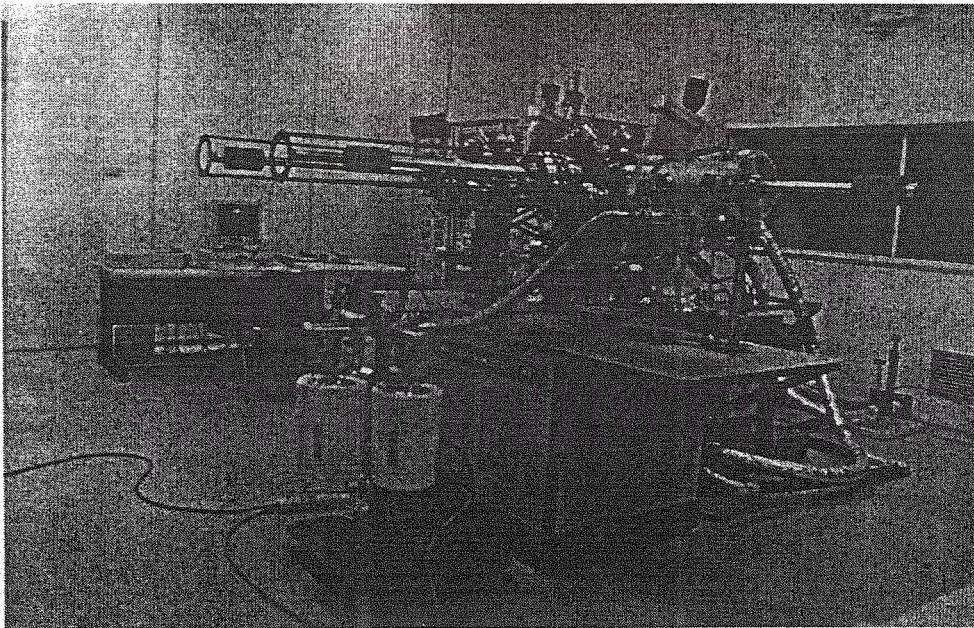
ส่วน Thermal Treatment Stage ส่วน Transfer Buffer Chamber และส่วน Growth Chamber ดังแผนภาพตามรูปที่ 2.1 โมดูลแต่ละส่วนที่ต่อกันนี้มี Gate Valve ต่อขึ้นกลางระหว่างโมดูล โดยจะเปิด Gate Valve ให้ Cassette ที่มี Substrate holder ผ่านเข้าออกจากโมดูลส่วนหนึ่งไปยังโมดูลอีกส่วนหนึ่ง และเพื่อปิดแยกให้โมดูลแต่ละส่วนเป็นอิสระจากกันและให้การรักษาสภาวะสุญญากาศในแต่ละส่วนเป็นอิสระจากกัน 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 เพื่อไล่ความชื้นและขจัดออกไซด์ที่ผิวของแผ่นผลึกฐาน ในส่วนนี้มีปั๊มสุญญากาศจำนวน 2 ชุดคือ Ion Pump และ Ti sublimation Pump ส่วน Transfer buffer chamber เป็นส่วนที่ใช้ในการลำเลียง Substrate Holder เข้าหรือออกจากส่วน Growth Chamber และส่วน Growth Chamber เป็นส่วนที่กระบวนการปลูกผลึกอพิแทกซ์ดำเนินการในโมดูลส่วนนี้ โดยแผนภาพของส่วน Growth Chamber ดังรูปที่ 2.1 ส่วนประกอบต่างๆ มีดังนี้ ส่วน Cyopanel เป็นช่องเปิดสำหรับรับไนโตรเจนเหลวจากภายนอก เพื่อทำหน้าที่หล่อเย็นระบายความร้อนที่เกิดจาก Effusion Cell ให้แก่ Growth chamber นอกจากนี้ไนโตรเจนเหลวยังช่วยทำให้สภาวะสุญญากาศในส่วน Growth Chamber ดีขึ้น เนื่องจากความเย็นของไนโตรเจนเหลวทำให้มวลของบรรยากาศภายในมีความหนาแน่นมากขึ้น ทำให้ระบบปั๊มสุญญากาศสามารถทำงานได้ดียิ่งขึ้น 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 และ Ionization Gauge เป็นอุปกรณ์หลักพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อระบบ MBE โดย RHEED นี้เป็นเครื่องมือในการตรวจสอบโครงสร้างผิว นอกจากนี้ RHEED ยังสามารถใช้ในการควบคุมค่าความหนาของชั้นผลึกที่ปลูกได้จากปรากฏการณ์ RHEED Intensity oscillation ที่เกิดขึ้นในเทคนิค Phase-locked epitaxy หรือ PLE [16] และ Migration Enhanced epitaxy หรือ MEE [17] ที่สามารถควบคุมค่าความหนาได้ในระดับ Monolayer ของผลึกที่ปลูก ส่วน Gas Analyzer หรือ Quadupole Mass Spectrometry เป็นเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบสภาวะบรรยากาศภายใน Growth Chamber และ Ionization Gauge เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดเทียบค่าความดันไอของลำโมเลกุลต่างๆ ที่ใช้ในการปลูกผลึกแต่ละครั้ง เพื่อปรับแต่งเงื่อนไขค่าความดันไอขององค์ประกอบต่างๆ ในการปลูกผลึกแต่ละครั้ง

ให้ได้เงื่อนไขตามที่ต้องการปัจจุบันระบบ MBE ได้มีการพัฒนาโดยสามารถใส่อุปกรณ์อื่นๆ สำหรับใช้ในการวิเคราะห์เข้าไปในระบบ MBE ได้แก่ Ellipsometer ที่ใช้ในการควบคุมค่าความหนา (Thickness) ซึ่งทำให้เกิดความคล่องตัวและความต่อเนื่องในการทำงาน อันช่วยให้สามารถควบคุมการปลูกผลึก การวิเคราะห์โครงสร้างและคุณสมบัติของผลึกที่ปลูกได้อย่างรวดเร็ว ทำให้การดำเนินการสามารถทำได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว



รูปที่ 2.1 ภาพโครงสร้างชุดระบบ MBE ของ RIBER รุ่น 32 P



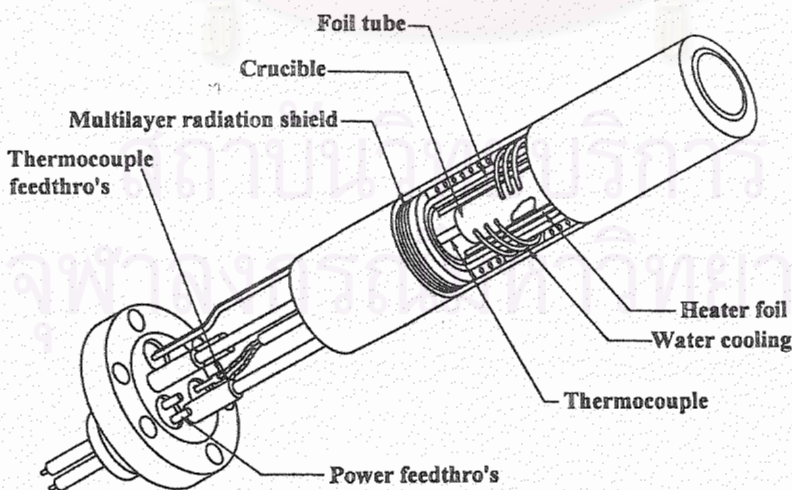
รูปที่ 2.2 ชุดระบบ MBE ที่ติดตั้งที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.2 Effusion Cell

Effusion Cell เป็นอุปกรณ์หลักสำคัญของระบบ MBE ในการผลิตลำโมเลกุลขององค์ประกอบจากวัตถุดิบที่ใช้ในการปลูกผลึก ซึ่งวัตถุดิบนี้เป็นธาตุบริสุทธิ์หรือสารประกอบที่มีธาตุที่เป็นองค์ประกอบก็ได้ และความสำคัญของ Effusion Cell นั้นเป็นกุญแจที่ทำให้การปลูกผลึกวิธี MBE มีข้อดีเด่นที่เหนือกว่าเทคนิคอื่นๆ โดย Effusion Cell แต่ละชนิดนั้นมีความเหมาะสมสำหรับวัสดุแต่ละชนิด ซึ่งในรายงานวิจัยนี้นำเสนอเฉพาะ Effusion Cell ที่เกี่ยวข้องกับการปลูกผลึกอพิแทกซ์ของ 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 แสดงดังในรูปที่ 2.3 วัตถุดิบที่ใช้ถูกบรรจุไว้ในเบ้าหลอม (Crucible) ซึ่งทำจากวัสดุ Pyrolytic boron nitride หรือ PBN โดยเบ้าหลอมนี้ถูกล้อมรอบด้วยขดลวดความร้อน (Heating elements) ขดลวดความร้อนเป็นตัวกำเนิดความร้อนให้แก่เบ้าหลอมจากการผ่านกระแสไฟฟ้าและที่ใต้เบ้าหลอมนี้มีเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ติดตั้งอยู่ เพื่อใช้ในการตรวจสอบอุณหภูมิและในการควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดความร้อนให้ได้ตามความต้องการ โดยอาศัยสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลต่อเข้ากับเครื่องควบคุมแบบ PID ที่ทำหน้าที่ควบคุมแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้ Effusion cell มีอุณหภูมิตามที่กำหนด สำหรับ K-Cell ที่มีขนาดของเบ้าหลอมขนาดใหญ่จำเป็นต้องมีท่อระบายความร้อนอยู่ภายใน เพื่อให้ความร้อนที่เกิดขึ้นไม่ไปรบกวนส่วนอื่นๆ อีกด้วย



รูปที่ 2.3 แผนภาพโครงสร้าง Knudsen Cell

สำหรับการควบคุมปริมาณของจำนวนโมเลกุลที่พ่นออกจาก Knudsen Cell ควบคุมได้จาก อุณหภูมิของขดลวดความร้อนภายใน Knudsen Cell ซึ่งปริมาณของจำนวนโมเลกุลของสารที่พ่นออกจาก Knudsen Cell สามารถคำนวณได้จากสมการ

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

โดย p คือค่าความดันไอของธาตุที่อุณหภูมิกำหนดมีหน่วยเป็นทอร์ (Torr)

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

l คือค่าระยะห่างจากปากของ Knudsen Cell ถึงผิวหน้าของผลึกฐานมีหน่วยเป็น ซม.

M คือค่ามวลโมเลกุลขององค์ประกอบที่เป็นวัตถุดิบมีหน่วยเป็น AMU

T คือค่าอุณหภูมิจากสมบรูณ์ของภาชนะบรรจุใน Knudsen Cell มีหน่วยเป็นเคลวิน (K)

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

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

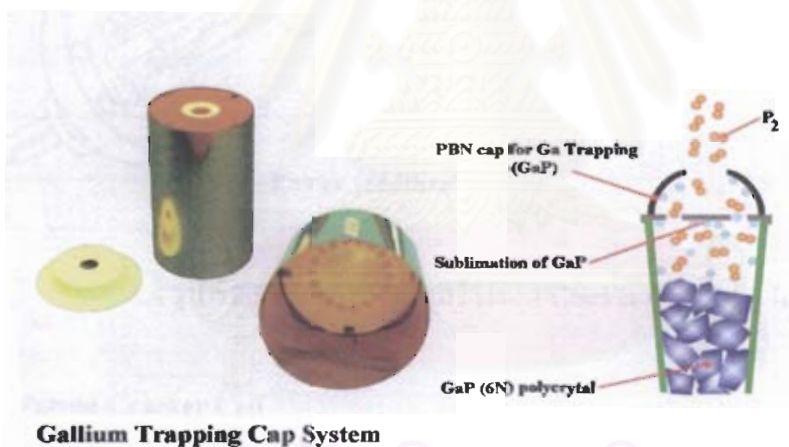
โดย R คืออัตราการเกิดผลึกมีหน่วยเป็น ไมครอน/ชั่วโมง

α คือค่าคงที่ ซึ่งค่าคงที่นี้ขึ้นกับค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกและทิศทางผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน

สารประกอบกลุ่ม III-V กลไกการเกิดผลึกควบคุมโดยอะตอมของธาตุหมู่ III ในสถานะของก๊าซที่ถูกพ่นไปยังผิวหน้าของผลึกแผ่นฐานเป็นหลัก เนื่องจากอะตอมของธาตุหมู่ III มีค่าสัมประสิทธิ์การเกาะติด (Sticky coefficient) สูงกว่าอะตอมของธาตุหมู่ V โดยกลไกการเกิดผลึกขึ้นกับอัตราการพ่นของธาตุ III จาก K-cell ที่เกาะลงบนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน จากนั้นจะจับตัวรวมตัวกับอะตอมของธาตุหมู่ V ในรูปของสารประกอบเรียงตัวกันเป็นผลึกตามโครงสร้างของแผ่นผลึกฐาน ตัวอย่างเช่น In-As ที่ได้จากลำโมเลกุลของ In และ As₄ หรือ As₂ และ Ga-As ที่ได้จากลำโมเลกุลของ Ga และ As₄ หรือ As₂ ทำปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของผลึกแผ่นฐาน แล้วจึงก่อให้เกิดพันธะขึ้นเป็นโครงผลึก โดยกระบวนการเกิดผลึกนี้ขึ้นกับพลังงานกระตุ้นที่ให้แก่โมเลกุลเหล่านั้น ได้แก่ ความร้อนจากอุณหภูมิของผลึกแผ่นฐานและพลังงานจลน์ที่ได้จาก Knudsen cell

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

ได้แก่ Valved Cracker Cell สำหรับสารเหล่านี้ แต่อย่างไรก็ดี Valved Cracker Cell นั้นมีราคาแพงและโครงสร้างซับซ้อน สำหรับสิ่งประดิษฐ์อีกชนิดหนึ่งที่ได้ออกแบบมาสำหรับใช้ร่วมกับ Knudsen cell แบบธรรมดา นี้เพื่อใช้ในการผลิตตำโมเลกุลที่เป็นชนิด Dimer ของ As (As_2) และ P (P_2) ได้แก่ Ga-trapping cap วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการนี้ เป็นสารประกอบ GaAs และ GaP เนื่องจากมีราคาถูกและอุณหภูมิของการสลายตัวมีค่าไม่สูงเกินไป และค่าความแตกต่างของค่าความดันไอของสารประกอบในสภาวะสมดุลที่มีค่าต่ำกว่าไอของ P_2 ที่อุณหภูมิเดียวกัน โคขอุณหภูมินี้มีค่าสูงกว่าค่าอุณหภูมิจุดระเหิดของสารประกอบ Ga-trapping cap นั้นทำหน้าที่กักไอของสารประกอบ GaP ไว้ภายในภาชนะ Crucible ของ Knudsen cell โดย Ga-trapping cap เพื่อรักษาสภาวะสมดุลของไอในสภาวะที่เกิดการสลายตัว (decomposition) ของสารประกอบ สำหรับการสลายตัวของสารประกอบดังกล่าวที่เกิดขึ้นจากพลังงานความร้อนหรือการทำให้สารประกอบอยู่ในสภาวะอุณหภูมิสูง ซึ่งในสภาวะสมดุลนี้สารประกอบ III-V มีจำนวนหรือปริมาณของอะตอมธาตุหมู่ III จำนวนมากกว่าธาตุหมู่ V และในสภาวะอุณหภูมิสูงนี้ธาตุหมู่ V อยู่ในรูปของ Dimer (V_2) เป็นส่วนใหญ่ แต่เนื่องจากค่าความดันไอของโมเลกุล Dimer ของหมู่ V นั้นมีค่าสูงกว่า ทำให้โมเลกุลของ Dimer ที่เกิดขึ้นถูกพ่นออกมาเป็นโมเลกุลหลักเพียงอย่างเดียว โครงสร้างของ Ga-trapping cap ตามรูปที่ 2.4

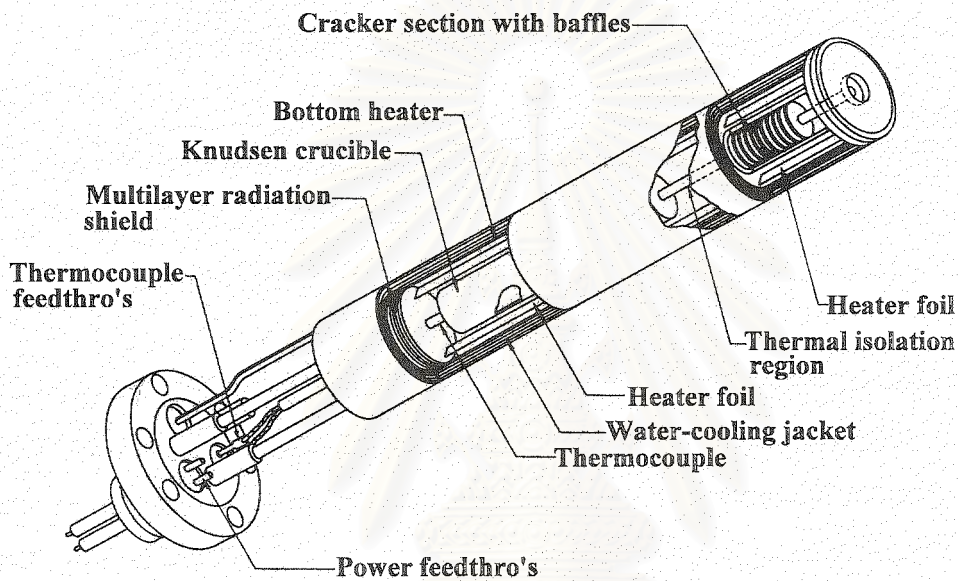


รูปที่ 2.4 ภาพโครงสร้างของ Ga-trapping cap [18]

2.1.2.2 Cracker Cell

Cracker Cell มีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Dissociation Cell เป็น Effusion Cell ที่ออกแบบเพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดตำโมเลกุลของธาตุหมู่ V ชนิด Dimer (V_2) ซึ่งตามปกติตำโมเลกุลของธาตุหมู่ V ที่ได้จาก Effusion Cell ตามปกติเป็นชนิด Tetramer (V_4) (ตัวอย่างเช่น As As_2 เป็นโมเลกุล dimer และ As_4 เป็นโมเลกุล Tetramer) โครงสร้างของ Cracker Cell มีลักษณะคล้ายคลึงกับ Knudsen Cell แต่ Cracker Cell

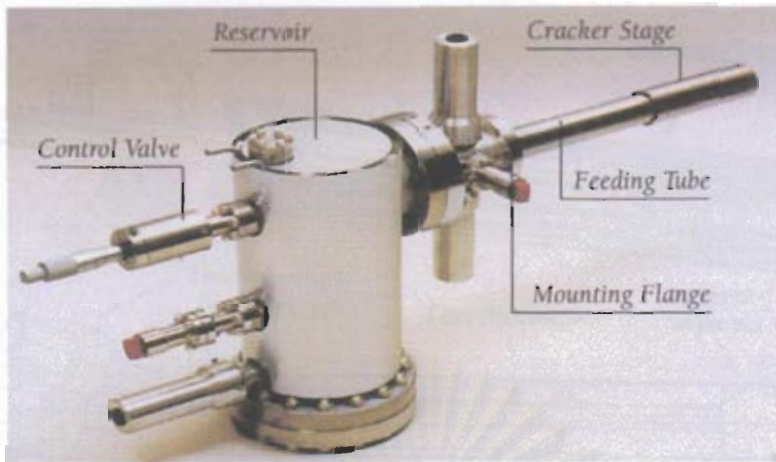
นี้มี Cracking Zone ซึ่งเป็นส่วนของขดลวดความร้อนที่ให้อุณหภูมิสูงในช่วง 800-1000°C เพื่อทำให้โมเลกุล Tetramer แตกตัวเป็นโมเลกุล Dimer และในการออกแบบนั้นข้อควรระวังคือต้องให้ส่วน Cracking Zone อยู่ห่างจาก Crucible หรือ Reservoir ที่บรรจุวัตถุดิบมากเพียงพอ เพื่อมิให้ความร้อนจาก Cracking Zone ซึ่งมีค่าอุณหภูมิสูงรบกวนส่วน Crucible อันมีผลต่อการควบคุมค่าความดันไอได้ ดังนั้น Effusion cell ชนิดนี้จึงมีความยาวกว่า Knudsen Cell และจำเป็นต้องมีส่วนของท่อน้ำหรือส่วนระบายความร้อนในลักษณะอื่นๆ สำหรับทำหน้าที่เป็นระบบระบายความร้อน (Cooling) เพื่อให้การควบคุมอุณหภูมิในส่วน Crucible สามารถทำได้



รูปที่ 2.5 แผนภาพโครงสร้างของ Cracker Cell

2.1.2.3 Valved Cracker Cell

Valved Cracker Cell เป็น Effusion Cell ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดค่าโมเลกุลชนิด Dimer ของธาตุหมู่ V ซึ่ง Valved Cracker Cell มีกลไกของ Nozzle valve ที่ใช้ในการควบคุมค่าความดันไอได้จากตำแหน่งของ Valve รวมถึงความสามารถในการปิดกั้นไอไว้ภายใน Reservoir เพื่อไม่ให้ไอออกมาได้ในสถานะที่เราไม่มีความต้องการ ทำให้มีความคล่องตัวในการกำหนดค่าความดันไอตามเงื่อนไขได้ง่าย และความสามารถในการตัดค่าโมเลกุลได้ดีกว่า Effusion Cell ชนิดอื่นๆ โดยเฉพาะการปลูกผลึกของโครงสร้างเฮเทโร (Heterostructure) ที่มีสารประกอบของธาตุหมู่ V ที่ต่างชนิดกัน ข้อดีของ Valved Cracker Cell คือสามารถใช้วัตถุดิบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งแตกต่างจาก Knudsen Cell และ Cracker Cell ซึ่งวัตถุดิบภายในนั้นถูกทำให้กลายเป็นไอระเหยออกมาตลอดเวลาถึงแม้ว่า Shutter อยู่ในตำแหน่งปิดก็ตาม

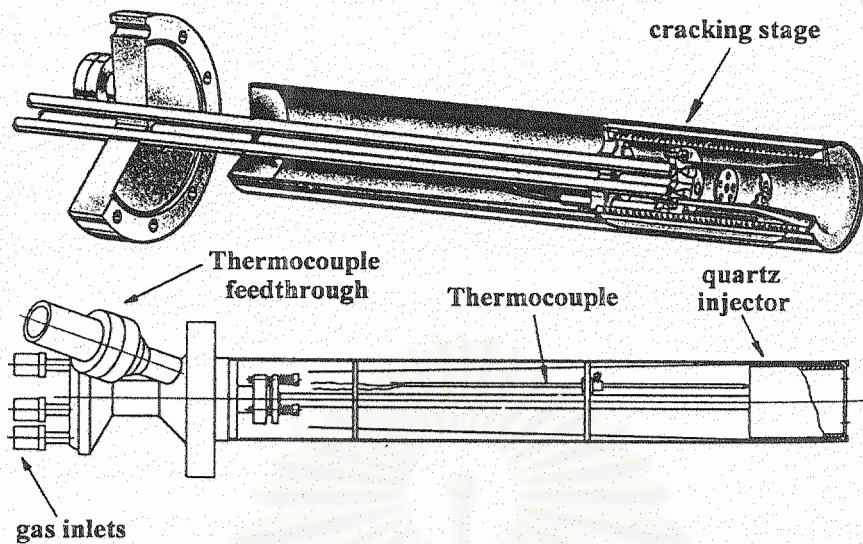


รูปที่ 2.6 ภาพของ As Valve Cracker Cell [19]

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 ต่างกันแต่ขดลวดความร้อนที่ใช้ใช้นั้นมีอุณหภูมิสูงกว่า เพื่อให้ก๊าซที่ไหลผ่านแตกตัวออกเป็นโมเลกุลแบบ Dimer หรือ Tetramer สำหรับโมเลกุลธาตุหมู่ V และอะตอมเดี่ยวสำหรับธาตุหมู่ III ควบคุมได้จากค่าอุณหภูมิในส่วน Cracking Zone สำหรับข้อดีของการใช้ก๊าซเป็นวัตถุดิบคือความต่อเนื่องและความสะดวกในการเติมก๊าซวัตถุดิบ โดยไม่มีความจำเป็นในการทำให้ระบบร่วก่อนการเติมวัตถุดิบเหมือนระบบ MBE ทั่วไป เนื่องจากวัตถุดิบนั้นถูกเก็บไว้ในท่อก๊าซที่ต่อเข้าระบบ MBE ซึ่งสามารถปิดท่อของระบบการป้อนก๊าซที่ต่อเข้าระบบและทำการเปลี่ยนท่อก๊าซได้ โดยไม่กระทบกับสภาวะสุญญากาศของ Growth Chamber แต่อย่างไรก็ตามการใช้ก๊าซเป็นวัตถุดิบนั้นมีความจำเป็นที่ต้องติดตั้งระบบปั๊มสุญญากาศที่มีขนาดกำลังสูงเพียงพอและต้องเป็นปั๊มชนิดที่ทนต่อการกัดกร่อนของก๊าซเหล่านั้น

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 [20]

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 ที่เหนือกว่าวิธีการปลูกผลึกอพิแทกซีวิธีอื่นๆ ในเชิงเทคนิคก็คือสามารถติดตั้งอุปกรณ์วิเคราะห์ต่างๆ เข้ากับระบบได้ ทำให้มีความต่อเนื่องในการตรวจสอบและวิเคราะห์และมีความสะดวก ซึ่งเหมาะสมสำหรับการวิจัยและการผลิตเชิงพาณิชย์ สำหรับในรายงานนี้ขอกล่าวถึงโดยสังเขปเฉพาะอุปกรณ์วิเคราะห์หลักที่เป็นพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับระบบ MBE เท่านั้น

2.1.3.1 Reflection High Energy Electron Diffraction (RHEED)

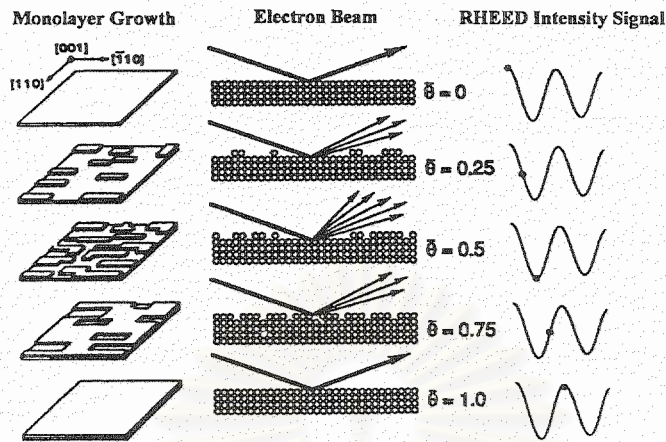
RHEED เป็นเครื่องมือหลักพื้นฐานที่สำคัญชนิดหนึ่งในระบบ MBE ที่ใช้ในการวิเคราะห์และตรวจสอบโครงสร้างผิว (Surface Structure) โดยข้อมูลที่ได้จาก RHEED นี้บ่งบอกรูปแบบของลักษณะโครงสร้างผิวในเชิง Microstructure และความเรียบของผิว (Smoothness) ซึ่งลักษณะรูปแบบ (Pattern) ที่ได้จากรูปแบบ RHEED นี้ขึ้นกับลักษณะการเรียงตัวของอะตอมในโครงร่างผลึกและความเรียบของผิวที่ทำให้ลำอิ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

สำหรับหน้าที่หลักสำคัญของ RHEED ที่สรุปได้มีดังนี้

1. การตรวจสอบผิวหน้าแผ่นผลึกฐาน ในขณะที่ทำความสะอาดด้วยความร้อน (Thermal Cleaning) ก่อนการปลูกผลึก
2. การควบคุมสถานะเริ่มต้นของการปลูกผลึก
3. การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผิวในขณะทำการปลูกผลึก

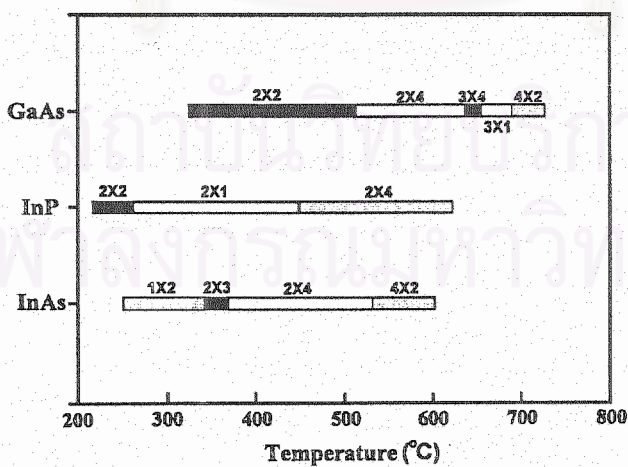
นอกจากนี้ RHEED ยังสามารถใช้ในการสอบเทียบอัตราการปลูกผลึก (Growth Rate Calibration) ได้ เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสง RHEED ในขณะทำการปลูกผลึก ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามรูปที่ 2.8 ตามปกติผิวหน้าของผลึกก่อนการปลูกผลึกมีความเรียบ ทำให้อิเล็กตรอนสามารถสะท้อนผ่านผิวหน้าผลึกที่มีอะตอมเรียงตัวเป็นระเบียบ ซึ่งความเข้มของอิเล็กตรอนที่สะท้อนผ่านไปใ้ในกรณีนี้มีค่าความเข้มสูงสุด แต่เมื่อการปลูกผลึกเริ่มต้นขึ้นการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสง RHEED มีค่าลดลงในขณะที่ทำการปลูกผลึกนี้เกิดจากการกระเจิง (Scattering) ของลำอิเล็กตรอน เนื่องจากผลึกที่เกิดขึ้นนั้นบนผิวหน้าของแผ่นผลึกเกิดการเรียงตัวของก้อนผลึกขนาดเล็ก (Cluster) โดยก้อนผลึกขนาดเล็กที่เกิดขึ้นนั้นมีลักษณะกระจัดกระจายไม่เป็นระเบียบ เป็นผลทำให้ความเข้มของลำอิเล็กตรอนมีค่าลดลง จนกระทั่งพื้นที่ของก้อนผลึกขนาดเล็กเหล่านั้นคลุมผิวหน้าของผลึกมากกว่าครึ่งหนึ่ง ความเข้มแสงของ RHEED จะกลับมามีความเข้มเพิ่มขึ้นอีก จนมีค่าสูงสุดเมื่อผลึกเรียงเต็มผิวหน้าแผ่นผลึกฐาน ซึ่งความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของความเข้มและค่าความหนาของผลึกที่เกิดขึ้นนี้มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบคลื่นรูปไซน์ (Sine) โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มหนึ่งรอบในการเปลี่ยนแปลงความหนาหนึ่งชั้นโมเลกุล (Monolayer) ด้วยเหตุนี้เองทำให้สามารถควบคุมค่าความหนาของชั้นผลึกที่ได้ โดย RHEED เป็นเครื่องมือสำคัญในเทคนิค PLE และ MEE ซึ่งเป็นนิยมใช้ในปัจจุบัน อีกทั้งยังเป็นเทคนิคสำคัญในการสร้างโครงสร้าง Quantum Dot แต่อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้มีขีดจำกัดคือการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มไม่ชัดเจนในการปลูกผลึกของสารประกอบบางชนิดและการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสง RHEED นั้นมี

ลักษณะที่แตกต่างกันไปตามเงื่อนไขในสถานะที่แตกต่างกันอีกด้วย สำหรับรายละเอียดต่างๆ จะขอไม่กล่าวถึงในที่นี้



รูปที่ 2.8 แผนภาพอธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลงความเข้มของอิเล็กตรอนในขณะที่ทำการปลูกผลึก

นอกจากนี้รูปแบบ (Pattern) ของ RHEED ที่ได้ของผลึกแต่ละชนิดสามารถบ่งบอกถึงช่วงค่าอุณหภูมิของผิวหน้าผลึกได้ด้วยดังตัวอย่างในรูปที่ 2.9 ซึ่งปัจจุบันยังนิยมใช้วิธีนี้ในการตรวจสอบอุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานในการปลูกผลึกวิธี MBE และสามารถใช้ได้กับสารประกอบเกือบทุกชนิด โดยเฉพาะสารประกอบกึ่งตัวนำที่ค่าแถบพลังงานมีค่าน้อยมาก อันเป็นข้อดีที่เหนือกว่าวิธีการวัดด้วย Pyrometer ซึ่งไม่สามารถใช้ได้ในกรณีนี้ [21] แต่อย่างไรก็ดีวิธีการนี้มีความคลาดเคลื่อนมากกว่า 10°C และมีความยุ่งยากในการอ่านรูปแบบของ RHEED ในการเทียบอุณหภูมิ โดยขึ้นกับความชำนาญมากของผู้อ่านเป็นอย่างมาก



รูปที่ 2.9 แผนภาพความสัมพันธ์ของรูปแบบ RHEED และอุณหภูมิของแผ่นผลึก (100) GaAs, InP และ InAs ภายใต้ไอของ Dimer [22]



2.1.3.2 Residual Gas Analyzer

Residual Gas Analyzer หรือ Quadrupole Mass Spectrometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของอนุภาคที่เป็นก๊าซภายในส่วน Growth Chamber ซึ่งทำให้เราสามารถรู้สภาพบรรยากาศภายในส่วน Growth Chamber นอกจากนี้ Residual Gas Analyzer ยังสามารถใช้วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ (Composition) ของสารประกอบในขณะที่ทำการปลูกผลึกได้เช่นกัน [23] โดยข้อดีของ Residual Gas Analyzer ที่เหนือกว่าการใช้ Ionization gauge คือ Residual Gas Analyzer มีความละเอียดและความแม่นยำสูงกว่า อีกทั้งไม่มีผลของการเสื่อมของความไว (Sensitivity) เช่นเดียวกับ Ionization gauge เมื่อใช้งานไประยะเวลาหนึ่ง

2.1.3.3 อุปกรณ์อื่นๆ ที่สามารถติดตั้งเข้าไปในระบบ MBE

นอกจาก RHEED, Ionization Gauge และ Residual Gas Analyzer ซึ่งเป็นเครื่องมือหลักพื้นฐานที่ติดตั้งในส่วน Growth Chamber ของระบบ MBE อุปกรณ์อื่นๆ ที่ติดตั้งเพื่อช่วยในการปลูกผลึกสามารถทำได้ อย่างเช่น Pyrometer เพื่อใช้ในการวัดอุณหภูมิผิวหน้าแผ่นผลึกฐาน Ellipsometer เพื่อใช้ในการควบคุมความหนาและอัตราส่วนของสารประกอบได้แม่นยำยิ่งขึ้น ด้วยลักษณะของระบบ MBE ที่เป็น โมดูลที่มีสถานะสุญญากาศระดับพิเศษทำให้สามารถต่อระบบ MBE เข้ากับเครื่องมือวิเคราะห์อื่นๆ ได้แก่ Auger Electron Spectroscopy (AES), X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS), Secondary Ion Microscopic Spectroscopy (SIMS), Scanning Tunnelling Microscope (STM) ได้อีกด้วย จึงทำให้เราสามารถวิเคราะห์คุณสมบัติของผลึกที่ปลูกได้อย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว โดยเฉพาะ STM เป็นเครื่องมือที่มีขีดความสามารถในการวิเคราะห์ที่ช่วยให้เราสามารถเข้าใจกลไกต่างๆ ในระดับขนาดของอะตอม [24] 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-ปิดลำโมเลกุลที่ผ่านสู่วิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน 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 กลไกการเกิดผลึกของการปลูกผลึกอพิแทกซ์วิธี MBE

กลไกการเกิดผลึกของการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุลสำหรับสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V นั้นเกิดจากอะตอมของธาตุหมู่ III เป็นหลัก เนื่องจากความสามารถของการเกาะติดผิวแผ่นผลึกฐานสูง ซึ่งตามปกติแล้วผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานก่อนการปลูกถูกปกคลุมด้วยบรรยากาศของโมเลกุลธาตุหมู่ V เพื่อชดเชยการสูญเสียที่เกิดขึ้นในขณะที่แผ่นผลึกฐานมีค่าอุณหภูมิสูง อันเป็นผลทำให้ผิวหน้าแผ่นผลึกฐานเป็นชั้นของอะตอม V ดังนั้นอะตอมของธาตุหมู่ III จึงเรียงตัวเกาะลงบนชั้นของอะตอม V จนเต็มเป็นชั้นของอะตอม III จากนั้นอะตอมของธาตุหมู่ V ทำปฏิกิริยาเกาะบนอะตอมของธาตุหมู่ III หรือถูกดูดซับ (Adsorp) จากอะตอมของธาตุหมู่ III โดยลักษณะของการเรียงตัวของอะตอมของธาตุหมู่ III และ V นั้นเรียงตัวสลับกันไปตลอดการปลูกผลึก ซึ่งอะตอมของธาตุหมู่ V ได้จากการแตกตัวของโมเลกุลที่อยู่ในรูป

Dimer หรือ Tetramer ทำให้กระบวนการเกิดผลึกเป็นแบบได้สัดส่วนตามโครงสร้าง (Stoichiometric) โดยโมเลกุลส่วนเกินของธาตุหมู่ V จะถูกปล่อยคายออก (Desorp) จากผิวของแผ่นผลึกฐาน แต่อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีความสำคัญสำหรับการปลูกผลึกวิธีนี้ ดังนั้นหากอุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีค่าสูงทำให้เกิดผลดังต่อไปนี้

ก) ในกรณีที่อุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีค่าสูงกว่าจุดระเหิดของธาตุหมู่ V ทำให้เกิดการปล่อยคายอะตอมของธาตุหมู่ V ออกจากผิวแผ่นผลึกฐาน

ข) ในกรณีที่อุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีค่าสูงขึ้นและมีค่าสูงกว่าจุดระเหิดของของธาตุหมู่ III ทำให้เกิดการปล่อยคายอะตอมของธาตุหมู่ III ออกจากผิวแผ่นผลึกฐาน

ตารางที่ 2.3 อุณหภูมิจุดระเหิดของสารประกอบ III-V ชนิดต่างๆ [25]

สารประกอบ	$T_{CS} (^{\circ}C)$	$T_{max(V_4)} (^{\circ}C)$	$T_{max(V_2)} (^{\circ}C)$	J_{V_4}/J_{III}
AIP	>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)

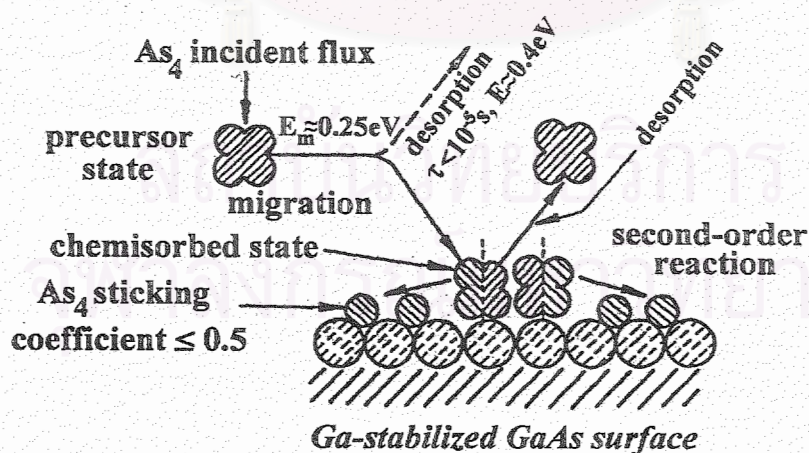
$T_{max}(V_4)$ หมายถึงอุณหภูมิสูงสุดภายบรรยากาศ tetramer โมเลกุลของธาตุหมู่ V

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

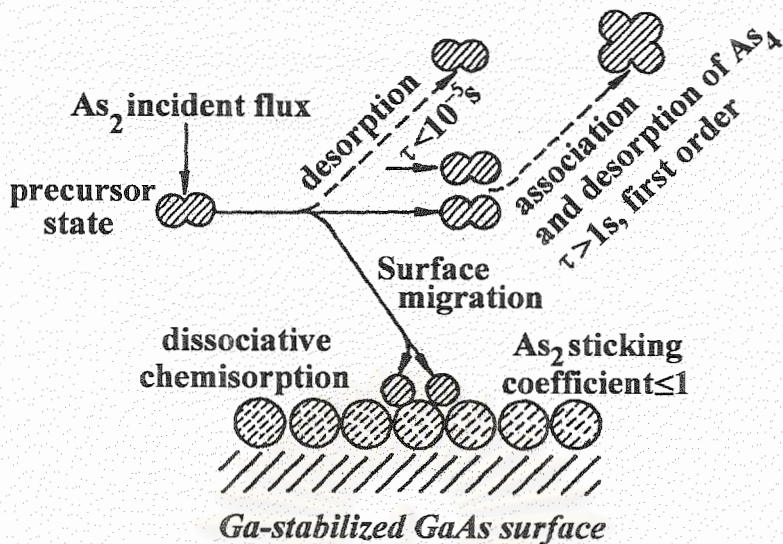
J_{V_4}/J_{III} หมายถึงค่าอัตราส่วน flux ของ V/III ที่เกิดจากการสลาย (Decomposition)

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 ส่วนเกินนั้นจะระเหิดไป ทำให้การเกิดผลึกเป็นแบบ Stoichiometric Growth ตามรูปที่ 2.10 สำหรับกรณี Ga-As₄-(100) GaAs นั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีความซับซ้อนกว่า โดยโมเลกุล As₄ คู่หนึ่งทำปฏิกิริยากับอะตอม Ga ที่อยู่ใกล้เคียง ซึ่งอะตอม Ga ได้เกาะอยู่ที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากโมเลกุล As₄ แต่ละโมเลกุลแตกตัวให้อะตอม As จำนวน 2 อะตอมเกาะลงบนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานด้วยการดูดซับ (adsorp) จากอะตอมของ Ga โดยจำนวนอะตอมของ As ที่เกาะลงบนผิวหน้ามีสัดส่วนเทียบกับจำนวนอะตอมของ 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 เรียงตัวเป็นโครงร่างผลึก และอีกส่วนหนึ่งที่ถูกปล่อยคาย (Desorp) ออกมา ซึ่งเป็นส่วนที่สูญเสียไปและการสูญเสียนี้มีอัตราเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีค่าสูงขึ้น



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



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

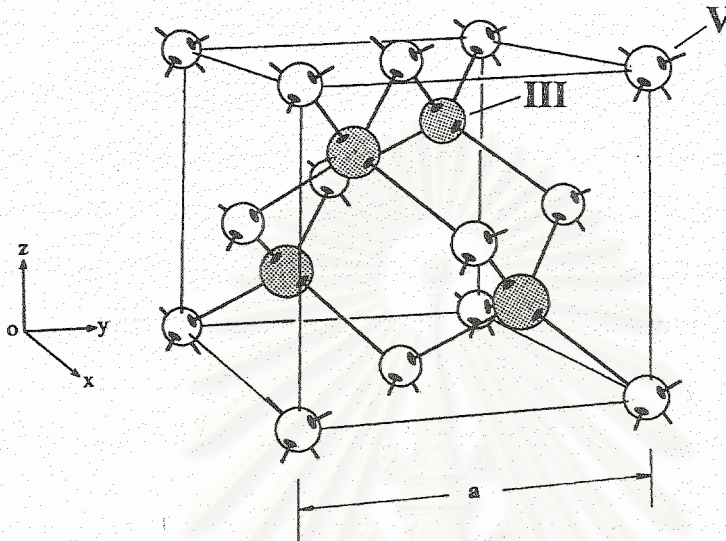
2.3 สารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V

นับตั้งแต่ทศวรรษที่ 50 ได้มีการค้นพบสารประกอบกึ่งตัวนำชนิดสองธาตุ (Binary) ของกลุ่ม III-V และคุณสมบัติต่างๆ ของสารประกอบเหล่านี้มีคุณสมบัติทางกายภาพที่หลากหลายตามชนิดและองค์ประกอบของสารประกอบ 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 ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับโครงผลึกเพชร (Diamond) ของผลึกเพชร ผลึก Si และ ผลึก Ge โดยการเรียงตัวของอะตอมของธาตุหมู่ III และ V เรียงตัวสลับกันเป็นชั้นๆ ไปตามทิศทาง (100) ในโครงผลึก ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอม

ในโครงสร้างนี้เป็นแบบโควาเลนต์ (Covalent bond) และระยะห่างระหว่างอะตอมนั้นขึ้นกับชนิดของอะตอมที่มาประกอบกันเป็นสารประกอบในโครงผลึก ดังนั้นตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่เป็นคุณสมบัติเฉพาะของสารประกอบแต่ละชนิดคือ ค่าคงตัวผลึก (Lattice constant : a) ซึ่งสารประกอบแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.4



รูปที่ 2.12 แผนภาพ โครงสร้างแบบ Zincblende

ตารางที่ 2.4 ตัวแปรทางกายภาพของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V ชนิด 2 ชาติ [26]

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 คุณสมบัติของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V

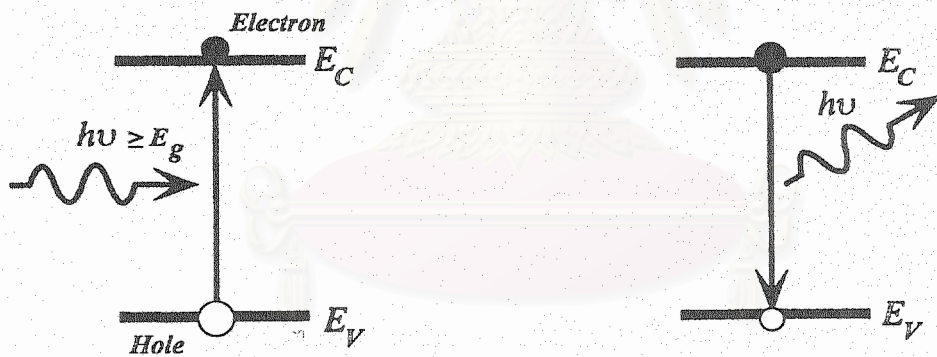
เนื่องจากสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V นั้นมีคุณสมบัติที่หลากหลาย โดยขึ้นกับองค์ประกอบ และสัดส่วนปริมาณของธาตุที่ประกอบกันขึ้นเป็นสารประกอบ ตามปกติแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นส่วนใหญ่ นั้นเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำชนิด 2 ธาตุ (Binary) ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพเฉพาะตัว เนื่องจากตัวแปร ขององค์ประกอบมีจำนวนน้อยที่สุด ดังนั้นในการสร้างแผ่นผลึกฐานจึงนิยมทำจากสารประกอบ 2 ธาตุ แต่ คุณสมบัติที่จำกัดของสารประกอบชนิด 2 ธาตุที่ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในบางกรณี ญุณแจสำคัญก็ กือสารประกอบชนิด 3 ธาตุและ 4 ธาตุได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างหัวเฮเทโร (Heterostructure) โดยมีค่าคง ตัวผลึกเข้าได้กับแผ่นผลึกฐาน เนื่องจากค่าแถบพลังงานหรือค่าดัชนีหักเหที่มีค่าแตกต่างกันไป อันเป็น ผลทำให้มีความสะดวกในการออกแบบสร้างสิ่งประดิษฐ์และสามารถกำหนดวัสดุที่มีความเหมาะสมกับสิ่ง ประดิษฐ์ได้ สำหรับค่าตัวแปรต่างๆ ของสารประกอบกึ่งตัวนำตัวอย่างมีแสดงในตารางที่ 2.4 และ 2.5

ตารางที่ 2.5 ค่าแถบพลังงานของตัวอย่างสารประกอบชนิด 3 ธาตุและ 4 ธาตุ [27]

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

2.4 การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์

การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์เป็นการวัดคุณสมบัติการเปล่งแสงของสารกึ่งตัวนำ โดยการกระตุ้นด้วยแสงที่มีค่าพลังงานโฟตอนไม่น้อยกว่าค่าแถบพลังงาน (Energy Band Gap) ของสารกึ่งตัวนำ ผลของการดูดกลืนแสงทำให้เกิดพาหะส่วนเกิน (Excess carrier) ขึ้น โดยในสภาวะปกติอิเล็กตรอนในแถบพลังงานวาเลนซ์ (Valence Band) ได้รับพลังงานการกระตุ้นนี้หรือได้รับการถ่ายเทพลังงานจากโฟตอน ทำให้ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนเปลี่ยนไปอยู่ในแถบพลังงานคอนดักชัน (Conduction Band) ซึ่งเป็นสภาวะที่มีระดับพลังงานที่สูงกว่าเดิม ผลจากเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนนี้ทำให้เกิดสเตทว่างหรือโฮล (Hole) ซึ่งอิเล็กตรอนที่อยู่ในสเตทใหม่นี้สามารถอยู่ในสภาวะดังกล่าวได้ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง จากนั้นอิเล็กตรอนและโฮลหรือพาหะส่วนเกินที่เกิดขึ้นมาจะรวมตัวกัน (Recombination) ซึ่งการรวมตัวนี้ อิเล็กตรอนคายพลังงานออกมาในรูปของโฟตอนที่มีค่าประมาณค่าแถบพลังงานหรือค่าระดับพลังงานที่เกิดการเปลี่ยนระดับ เมื่อเราวัดสเปกตรัมของแสงที่ได้จากการเปล่งแสงนี้จะทำให้ทราบค่าแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำได้ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานต่างๆ เช่นการเปลี่ยนระดับพลังงานแบบ Band to Impurity level เป็นต้น นอกจากนี้ การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ยังสามารถใช้ในการวัดคุณสมบัติของโครงสร้างคว้นตัมได้เช่นกัน ซึ่งรายละเอียดจะไม่ขอกกล่าวในที่นี้



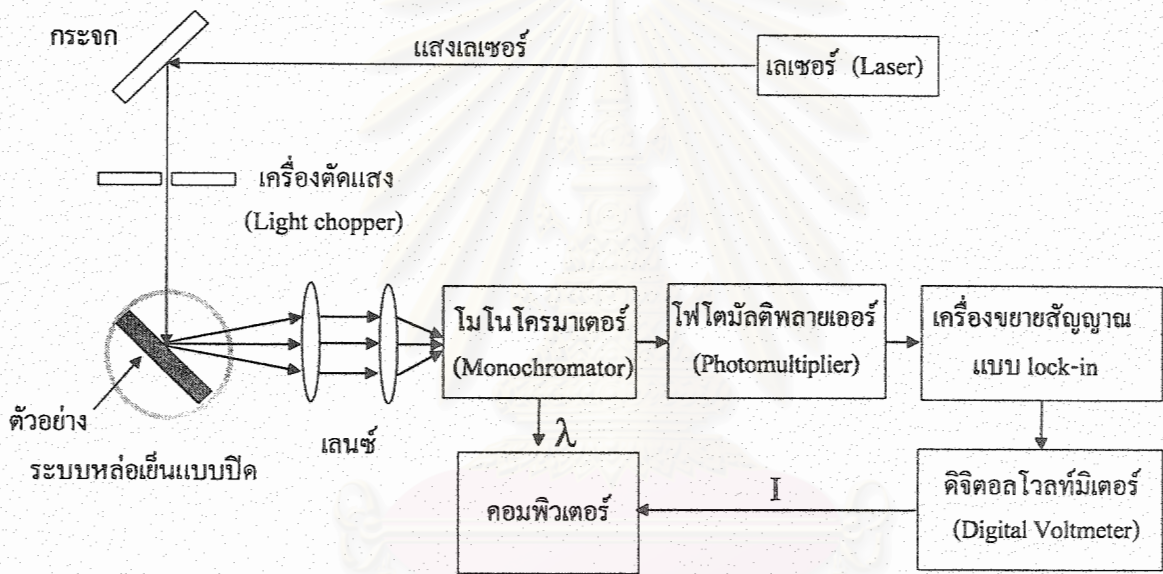
(ก) การดูดกลืนแสง

(ข) การเปล่งแสงที่เกิดจากการรวมตัว

รูปที่ 2.13 แผนภาพจำลองการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงที่เกิดจากการรวมตัว

สำหรับรายละเอียดของระบบการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ มีการจัดระบบตามแผนภาพรูปที่ 2.14 เลเซอร์ชนิด Ar⁺ เป็นแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 488 nm ซึ่งเทียบเท่ากับโฟตอนที่มีค่าพลังงาน 2.54 eV โดยทำหน้าที่กระตุ้นตัวอย่างในการทดลอง ตัวอย่างจะถูกติดตั้งในระบบทำความเย็นชนิดไคโอโรเจนิกแบบวงจรปิด (Closed Circuit Cryogenic System) ซึ่งภายในใช้การหล่อเย็นด้วยฮีเลียมเหลว (Liquid Helium) และอุณหภูมิต่ำที่สุดในการทดลองนี้คือ 10 K แสงที่ได้จากตัวอย่างที่ถูกกระตุ้น

ถูกรวบรวมด้วยเลนส์ 2 ชุด เพื่อให้แสงที่ได้มีค่าความเข้มสูงขึ้นและผ่านเข้าไปยังโมโนโครมาเตอร์ (Monochromator) โมโนโครมาเตอร์จะทำหน้าที่ในการแยกสเปกตรัมของแสงที่ได้จากตัวอย่าง และแสงจะผ่านได้เฉพาะแสงที่มีค่าตามที่โมโนโครมาเตอร์ได้ตั้งค่าไว้ จากนั้นแสงที่ผ่านโมโนโครมาเตอร์ไปยังโฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier : PMT) เพื่อแปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งสัญญาณนี้อยู่ในรูปของกระแสที่มีขนาดสัญญาณเล็กมาก ดังนั้นจึงต้องให้สัญญาณผ่านเครื่องขยายสัญญาณชนิดล็อกอินแอมพลิไฟเออร์ (Lock-in Amplifier) ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ได้จาก PMT และแปลงสัญญาณให้เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้นี้ผ่านมัลติมิเตอร์แบบเชิงเลข (Digital Multimeter : DMM) และส่งข้อมูลเชิงเลข (Digital format) ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อทำการสร้างกราฟสเปกตรัมความสัมพันธ์ระหว่างค่าขนาดสัญญาณแสงที่ได้และค่าความยาวคลื่นหรือค่าพลังงาน โฟตอนของตัวอย่างแต่ละตัวอย่าง



รูปที่ 2.14 แผนภาพระบบการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์

2.5 การวัดของ van der PAUW

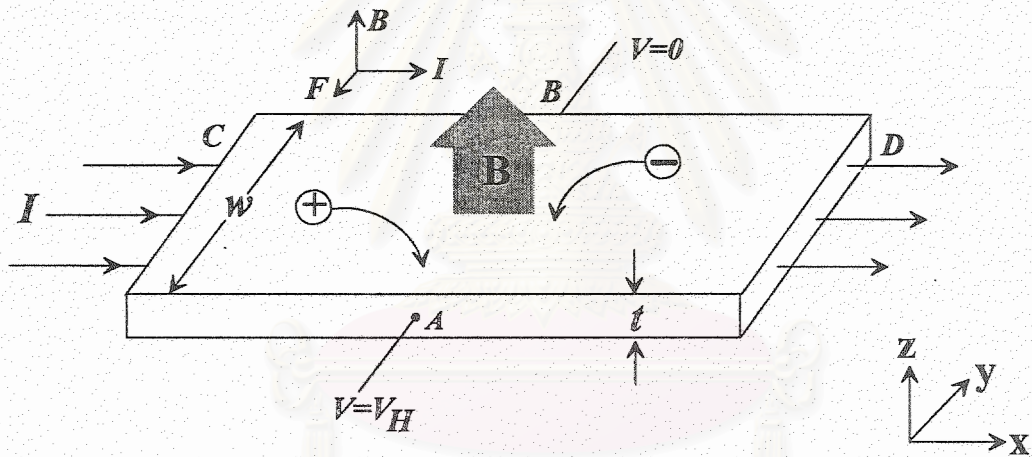
วิธีการวัดของ van der PAUW เป็นวิธีการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่ได้ประยุกต์มาจากปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำและสามารถวัดหาค่าตัวแปรต่างๆ ได้แก่ชนิดของพาหะนำไฟฟ้าส่วนใหญ่ (Majority Charge Carrier) ค่าความหนาแน่นพาหะนำไฟฟ้า (Carrier Concentration) และค่าความคล่องตัวของพาหะนำไฟฟ้า (Carrier Mobility) แต่อย่างไรก็ตามการคำนวณจากการวัดวิธีดังกล่าวนี้จำเป็นต้องรู้ค่าสภาพนำไฟฟ้า (Conductivity) หรือ

ค่าสภาพต้านทาน (Resistivity) ในปัจจุบันวิธีการวัดของ van der PAUW มีความสำคัญอย่างมากต่ออุตสาหกรรมวัสดุและสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำงานเป็นที่ยอมรับให้เป็นวิธีมาตรฐาน เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่ายสะดวกและผลการวัดที่แม่นยำ

2.5.1 ปปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)

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

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



รูปที่ 2.15 แผนภาพปรากฏการณ์ฮอลล์

เนื่องจากแรงกระทำที่มีต่อประจุนำไฟฟ้าในสภาวะสมดุล ทำให้เกิดจากสนามไฟฟ้าในแกน y ตามสมการ

$$E_y = \frac{J_x}{qP_0} B_z \quad (2.4)$$

ในทางปฏิบัติเราสามารถวัดค่าสนามไฟฟ้าจากค่าแรงดันฮอลล์ (Hall Voltage) ที่เกิดขึ้น ในกรณีของพาหะส่วนใหญ่ที่เป็น โฮลตามความสัมพันธ์

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

สำหรับในกรณีที่พหะส่วนใหญ่เป็นอิเล็กตรอน สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นมีทิศทางในทางตรงกันข้าม ซึ่งวิธีการวัดนี้ทำให้เราสามารถรู้ชนิดของพหะประจุนำไฟฟ้าได้ จากสมการข้างต้น เราสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นหรือค่าความเข้มข้นพหะในกรณีของพหะส่วนใหญ่ที่เป็นโฮลได้จาก

$$p_o = \frac{I_x B_z}{qt V_{AB}} \quad (2.6)$$

จากสมการของค่าสภาพต้านทาน (Resistivity)

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

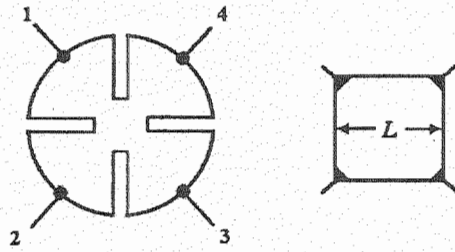
เราสามารถคำนวณหาค่าความคล่องของพหะได้จากค่าสภาพต้านทานตามสมการ

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

ดังนั้นในการวัดเพื่อหาค่าความหนาแน่นของพหะและค่าความคล่องตัวพหะในปรากฏการณ์ฮอลล์ จึงจำเป็นต้องมีการวัดหาค่าความต้านทานรวมอยู่ในการวัดนี้ เพื่อให้เราสามารถคำนวณหาผลได้ตามต้องการ

2.5.2 วิธีการวัดของ van der PUAW

เนื่องจากวิธีการวัดค่าต่างๆ ด้วยปรากฏการณ์ของฮอลล์นั้นมีความยุ่งยากซับซ้อน มีการวัดหาค่าสภาพนำไฟฟ้าหรือสภาพต้านทานเข้ามาเกี่ยวข้อง เพื่อนำค่ามาใช้ในการคำนวณหาค่าความคล่องตัวของพหะและค่าความหนาแน่นของพหะ ดังนั้นวิธีการวัดของ van der PAUW [28] จึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้เป็นการสะดวกและง่ายสำหรับการเตรียมตัวอย่าง โดยการวัดนี้ยังคงใช้พื้นฐานจากปรากฏการณ์ฮอลล์และวัดได้ผลละเอียดครบถ้วนไม่แตกต่างจากวิธีแบบเดิม สำหรับตัวอย่างในวิธีการวัดของ van der PAUW นั้นมีรูปร่างและลักษณะตามรูปที่ 2.16 โดยแบบ Cloverleaf ตามรูปที่ 2.16 (ก) เป็นแบบที่ดีที่สุด แต่มีความยุ่งยากในกระบวนการเตรียมตัว และในการทดลองนี้ใช้แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส ตามรูปที่ 2.16 (ข) เนื่องจากการเตรียมทำได้ง่ายและสะดวกกว่า



(ก) แบบ Cloverleaf

(ข) แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส

รูปที่ 2.16 ภาพโครงสร้างของตัวอย่างสำหรับการวัดค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าวิธี van der PAUW

โดยวิธีการวัดของ van der PAUW สามารถวัดหา Sheet resistant (R_s) จากสมการ

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

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

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

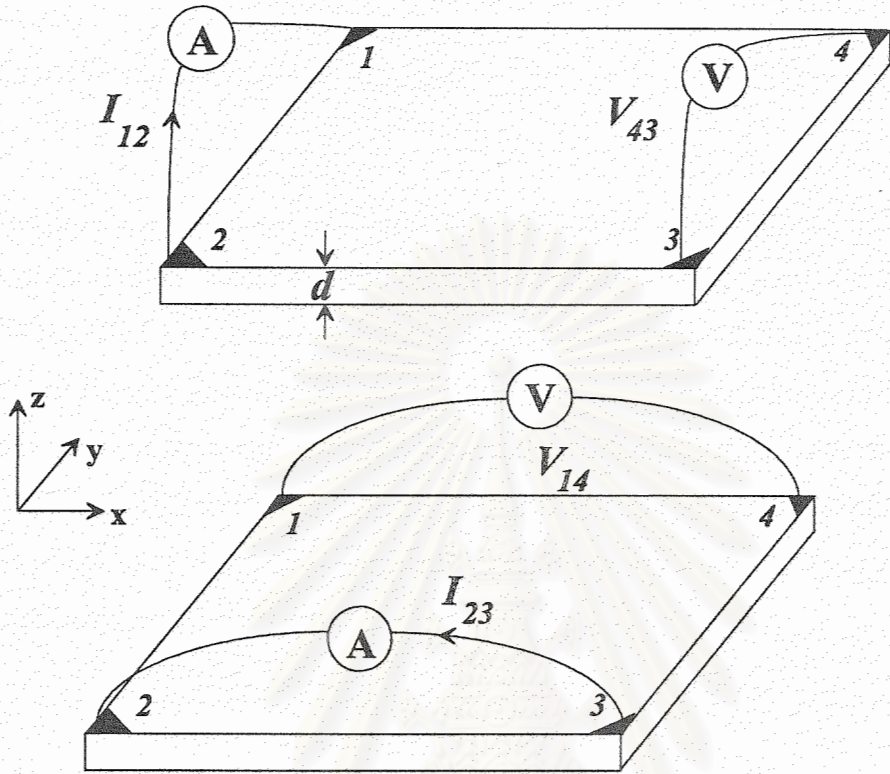
โดยค่า R_s มีความสัมพันธ์กับค่าสภาพต้านทานตามสมการ

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

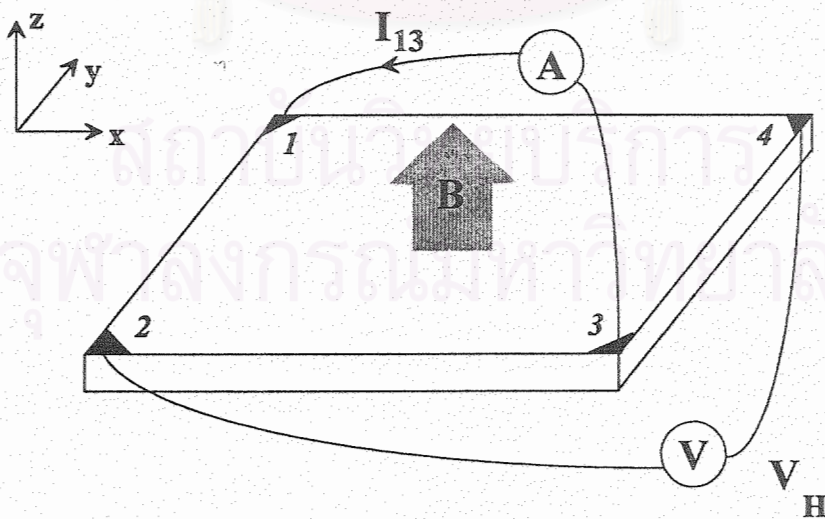
d คือค่าความหนาของตัวอย่าง

สำหรับการวัดค่าแรงดันฮอลล์ในวิธีการวัดของ van der PAUW ซึ่งเป็นค่าที่สำคัญที่นำมาใช้ในการคำนวณหาความหนาแน่นพาหะและค่าความคล่องตัวพาหะ ทำได้ด้วยการป้อนกระแสไฟฟ้าตรงที่

มีค่าคงที่ที่ขั้ว 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 ได้แก่ความไม่เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสในอุดมคติของรูปร่างตัวอย่าง ขนาดของขั้วโลหะมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับขนาดของตัวอย่าง และค่าความต้านทานของขั้วโลหะรวมถึงค่าความต้านทานของหัวรอยโลหะ-สารกึ่งตัวนำที่มีค่าสูง เป็นต้น นอกจากนี้ในขณะที่ทำการวัดนี้จำเป็นต้องป้องกันการเกิดพาหะส่วนเกินเนื่องจากการกระตุ้นด้วยแสงและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวอย่าง ดังนั้นตัวอย่างต้องอยู่ในที่ที่ไม่มีแสงและมีการควบคุมอุณหภูมิ โดยเฉพาะค่ากระแสที่ใช้ในการวัดนี้ต้องไม่มีค่าสูงเกินไปจนทำให้อุณหภูมิของตัวอย่างเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นในการวัดนี้เราจะใช้ค่ากระแสในการวัดให้ที่ค่าน้อยที่สุด 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} และมีหน่วยเป็นโวลต์

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 $R_{I,V}$ 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

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

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

สำหรับการคำนวณหาค่าสภาพต้านทานนั้นเราสามารถคำนวณหาได้จากค่าความต้านทาน 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) จากนั้นเราจะนำค่าที่วัดและคำนวณในขั้นตอนนี้ไปใช้ในการหาค่าความคล่องพาหะต่อไป

2.5.3.3 การกำหนดนิยามในการวัดฮอลล์

ในการวัดฮอลล์นั้นเป็นการวัดค่าแรงดันที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของพาหะประจุนำไฟฟ้าที่เลี้ยวเบนไปภายใต้สนามแม่เหล็ก ซึ่งวิธีการนี้ทำให้เราสามารถรู้ได้ว่าพาหะนำไฟฟ้าส่วนใหญ่เป็นอิเล็กตรอนหรือโฮลและทราบค่าความเข้มข้นพาหะหรือค่าความหนาแน่นของพาหะนำไฟฟ้าได้

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

B คือค่าสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางในแนวแกน z โดยกำหนดให้สนามแม่เหล็กมีค่าเป็นบวกเมื่อมีทิศทางไปตามในแนวแกนทางบวกและมีค่าเป็นลบในกรณีตรงกันข้าม

V_{24P} คือค่าแรงดันฮอลล์ที่วัดได้ระหว่างขั้วที่ 2 และ 4 ภายใต้สนามแม่เหล็กในทิศทางบวกในกรณีที่ที่มีกระแสไฟฟ้า 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

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

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

$$V_E = V_{13P} - V_{31N} \quad (2.16 \text{ c})$$

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

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 สามารถคำนวณได้จากสมการ

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

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 ในการทดลองมีค่าคงที่ (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

สำหรับในบทนี้เป็นขั้นตอนรายละเอียดของกระบวนการทดลองในงานวิจัยนี้ เพื่อทำการศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขต่างๆ ที่มีต่อคุณสมบัติของชั้นผลึกอพิแทกซ์ InP ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐาน (100) GaAs โดยลำโมเลกุลฟอสฟอรัสได้จากการสลายตัว (Decomposition) ของ GaP ที่อยู่ในรูปโพลีคริสตัลไลน์ (Polycrystalline) ตัวแปรที่ได้ศึกษาในการทดลองนี้ได้แก่ ค่าอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึกและค่าอัตราส่วน Beam-equivalent pressure (BEP) ของ P_2/In

3.1 การเตรียมแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น

แผ่นผลึกฐาน (Substrate) เริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองนี้คือแผ่นผลึกเดี่ยว (Single Crystal Wafer) GaAs ที่มีทิศทางของผิวหน้าผลึก (Orientation) อยู่ในระนาบ (100) แผ่นผลึกฐาน GaAs ที่ใช้ในการทดลองนี้มีคุณสมบัติแบบกึ่งฉนวน (Semi-insulator) และมีรูปร่างเป็นวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50.8 มม. โดยตัวอย่างแต่ละตัวอย่างเป็นส่วน 1 ส่วนที่ได้รับการตัดแบ่งแผ่นผลึกเดี่ยว GaAs ข้างต้นออกเป็น 4 ชิ้นตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางให้มีรูปร่าง 1/4 ของวงกลม จากนั้นนำไปล้างด้วย Trichloroethylene เค็ดและ Acetone เค็ดเป็นเวลาไม่น้อยกว่าอย่างละ 5 นาทีตามลำดับและล้างทำความสะอาด (Rinse) ด้วยน้ำ DI (Deionized Water) จนสะอาด หลังจากนั้นแช่ตัวอย่างในสารละลาย $HCl:H_2O$ (1:1 โดยปริมาตร) เป็นเวลานานไม่น้อยกว่า 10 นาที สุดท้ายทำการล้าง (rinse) ด้วยน้ำ DI และเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ จากนั้นนำแผ่นผลึกฐาน GaAs ที่ผ่านการล้างแล้วไปติดตั้งบน Mo Block ด้วย In ที่หลอมเหลวด้วยความร้อน ทั้งไว้จนกระทั่ง Mo Block ที่มีแผ่นผลึกฐาน GaAs ติดอยู่เย็นลง ซึ่งพร้อมจะนำเข้าสู่ระบบ MBE ต่อไป

3.2 การปลูกชั้นผลึก Buffer GaAs

หลังจากนั้นนำ Mo Block ที่มีแผ่นผลึกฐาน GaAs ติดอยู่บรรจุใส่ใน Cassette เพื่อใช้ Cassette เป็นพาหนะลำเรียง Mo Block ภายในระบบ MBE โดยผ่าน Cassette introduction chamber ไปยัง Thermal treatment chamber หรือ Preparation Chamber เพื่อไล่ความชื้นและสิ่งสกปรกที่ผิว (Outgassing) ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ $450^\circ C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการลำเรียง Mo Block ที่มีแผ่นผลึกฐาน GaAs ติดอยู่เข้าสู่ห้องปลูกผลึก (Growth Chamber) ซึ่งก่อนการนำ Mo Block ที่มีแผ่นผลึกฐาน GaAs ติดอยู่เข้าสู่ห้องปลูกผลึก (Growth chamber) นั้นได้มีการปรับตั้งค่าอุณหภูมิของแหล่งจ่าย Ga และ As หรือ Effusion cell ที่บรรจุ Ga และ As (ในการทดลองนี้ Ga มีความบริสุทธิ์ 99.9999% และ As มีความบริสุทธิ์ 99.99999%) ให้

มีค่าความดันไอตามที่ได้กำหนดไว้คือ $P_{Ga} = 2.7 \times 10^{-7}$ torr และ $P_{As_2} = 5.4 \times 10^{-6}$ torr ตามลำดับ จากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิของ Mo block ให้ผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีค่า 580°C จากอุณหภูมิปกติ ในอัตราการ $10^\circ\text{C}/\text{นาท}$ ในขณะที่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานมีค่าตั้งแต่ 300°C ขึ้นไปทำการเปิด Shutter ของ As cell เพื่อป้องกันผิวเสียหาย เนื่องจากสูญเสีย As ของแผ่นผลึก GaAs ที่เกิดจากการสลายตัว (Decomposition) ด้วยความร้อนที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง เมื่ออุณหภูมิของ Mo block มีค่า 580°C ให้ทิ้งไว้เป็นเวลานานประมาณ 30 นาที ซึ่งภาพรูปแบบของ RHEED ที่ได้จากผิวหน้าแผ่นผลึก GaAs นั้นมีรูปแบบของ $c(2 \times 4)$ หลังจากผิวหน้าของแผ่นผลึก GaAs สะอาดปราศจากออกไซด์แล้ว จากนั้นเริ่มทำการปลูกผลึก GaAs โดยการเปิด Shutter ของ Ga cell เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเมื่อสิ้นสุดการปลูกผลึกตามเวลาที่ได้กำหนดไว้ให้ทำการปิด Shutter ของ Ga cell จากนั้นทำการลดอุณหภูมิของ Ga cell ลงไปสู่ค่าอุณหภูมิ 400°C ซึ่งได้ความหนาของชั้นผลึก Buffer GaAs ประมาณ 5000 \AA สุดท้ายทำการลดอุณหภูมิของ Mo block ในอัตราการ $10^\circ\text{C}/\text{นาท}$ จนกระทั่งอุณหภูมิของ Mo block มีค่าอุณหภูมิ 250°C และอุณหภูมิของแหล่งจ่าย As ลงไปสู่ค่าอุณหภูมิ 100°C เป็นอันสิ้นสุดการปลูกชั้นผลึก Buffer GaAs



รูปที่ 3.1 ภาพรูปแบบ RHEED แบบ $c(2 \times 4)$ ที่ได้จากแผ่นผลึก GaAs ที่อุณหภูมิ 580°C

3.3 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก InP

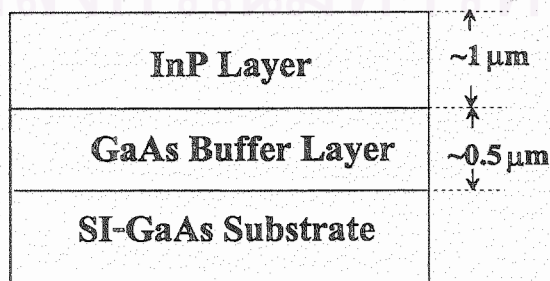
หลังจากสิ้นสุดการปลูกชั้นผลึก Buffer GaAs แล้ว รอให้ค่าความดันบรรยากาศภายในห้องปลูกผลึกมีค่าลดลง เพื่อให้ As_4 มีค่าลดลงจนกระทั่งค่าความดันต่ำกว่า 10^{-9} torr จากค่าความดัน $4-6 \times 10^{-8}$ torr จากนั้นทำการปรับค่าอุณหภูมิของแหล่งจ่าย In และ P ให้ได้ค่าตามที่ได้กำหนดไว้คือ $P_{In} = 1.6 \times 10^{-7}$ torr และ $P_{P_2} = 1.6 \times 10^{-6}$ torr (ในการทดลองนี้ In มีความบริสุทธิ์ 99.9999% และ P_2 ได้จากการสลายตัวของ GaP ที่อยู่ในรูปโพไลคริสตอลไลน์บริสุทธิ์ 99.9999% โดยการเผาใน K-cell ที่มี Ga-trapping cap) ในกรณีนี้

ค่าอัตราส่วน P_p , ต่อ P_{In} มีค่า 10 ซึ่งจะใช้ค่าอัตราส่วนความดัน BEP นี้ตลอดการทดลองและค่าความดัน ไอต่างๆ ตามที่ได้กำหนดไว้ จากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานไปตามค่าที่ต้องการ ได้แก่ 300, 350, 400, 450 และ 500°C โดยค่าอุณหภูมินี้เป็นค่าอุณหภูมิผิวหน้าแผ่นผลึกฐานที่ได้จากการสอบเทียบ (Calibration) รูปแบบของ RHEED และอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปอ์ สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิของ Mo Block จาก 250°C ในอัตราการเพิ่ม 10°C/นาที่ไปยังค่าอุณหภูมิที่กำหนดไว้ข้างต้นนั้น เมื่ออุณหภูมิมีค่าถึง 300°C ต้องทำการเปิด Shutter ของแหล่งจ่าย P_2 เพื่อป้องกันมิให้ผิวหน้าเสียหายเนื่องจากศูนย์เสีย As ด้วยการทำให้แผ่นผลึกฐานอยู่ภายใต้บรรยากาศของ P_2 [29] เมื่ออุณหภูมิมีค่าตามที่กำหนดไว้จากนั้นทิ้งระยะเวลาประมาณ 10-20 นาทีเพื่อให้อุณหภูมิมียุ่ที่ค่าคงที่ จากนั้นทำการเริ่มต้นปลูก InP ด้วยการเปิด Shutter ของ In cell โดยค่าความดันไอ In ที่กำหนดนี้มีค่าอัตราการปลูกผลึก InP มีค่า 0.2 $\mu\text{m}/\text{ชั่วโมง}$ (โดยประมาณ ซึ่งได้จากการคำนวณเทียบกับค่ามาตรฐานในกรณีของ GaAs) สำหรับช่วงเวลาที่ใช้ในการปลูกผลึก 5 ชั่วโมง จะได้ความหนาของชั้นผลึก InP ประมาณ 1 ไมครอน

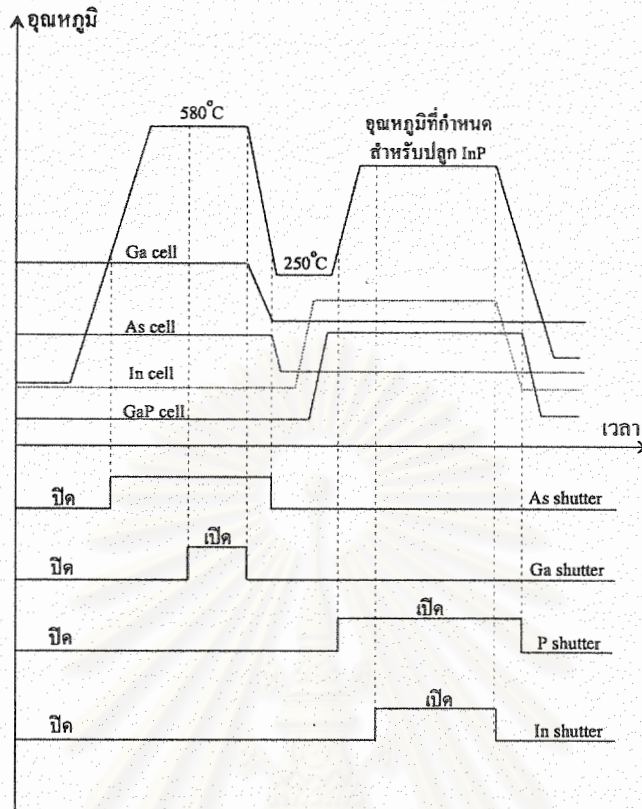
3.4 การศึกษาอิทธิพลค่าอัตราส่วน BEP ของ P_2/In

ในการทดลองนี้เริ่มต้นเช่นเดียวกันกับการศึกษาอิทธิพลของค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก หลังจากที่ผ่านมาการปลูกชั้นผลึก Buffer GaAs แล้ว รอให้บรรยากาศภายในห้องปลูกผลึกมีค่าลดลง เพื่อให้ As_4 อยู่มีค่าความดันลดลงจนกระทั่งต่ำกว่า 10^{-9} torr จากค่า $4-6 \times 10^{-8}$ torr จากนั้นทำการปรับค่าตั้งอุณหภูมิของแหล่งจ่าย In และ P ให้ได้ค่าความดันตามที่ต้องการคือ $P_{In} = 1.6 \times 10^{-7}$ torr สำหรับค่า P_p , ได้แก่ 8×10^{-7} , 1.6×10^{-6} , 3.2×10^{-6} , 4.8×10^{-6} torr ในกรณีนี้ค่าอัตราส่วน P_p , ต่อ P_{In} มีค่า 5, 10, 20, 30 ตามลำดับ ต่อมาทำการเพิ่มอุณหภูมิของ Mo Block จาก 250°C ในอัตราการเพิ่ม 10°C/นาที่ไปยังค่าอุณหภูมิที่กำหนดไว้คือ 450°C จากนั้นทิ้งระยะเวลาประมาณ 10-20 นาทีเพื่อให้อุณหภูมิมียู่ที่ค่าคงที่ จากนั้นทำการเริ่มต้นปลูก InP โดยการเปิด Shutter ของแหล่งจ่าย In โดยค่าความดันไอ In ที่กำหนดนี้มีค่าอัตราการปลูกผลึก InP 0.2 $\mu\text{m}/\text{ชั่วโมง}$ สำหรับช่วงเวลาที่ใช้ในการปลูกผลึก 5 ชั่วโมง

สำหรับตัวอย่างในการทดลองนี้มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของตัวอย่างที่สร้างในการทดลอง



รูปที่ 3.3 แผนภาพจำลองกระบวนการทำงานของการตั้งค่าอุณหภูมิและ Shutter ในการทดลองนี้

3.5 การวิเคราะห์ผล

ตัวอย่างที่ได้จากการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุลถูกนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธี Van der PAUW โดยตัดตัวอย่างออกเป็นชิ้นขนาด $5 \times 5 \text{ mm}^2$ ทำการสร้างผิวสัมผัสโอห์มมิกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 0.5 ม.ม. ที่มุมแต่ละด้าน โดยระยะห่างจากด้านแต่ละด้านประมาณ 0.5 ม.ม. ด้วยโลหะ Au-Ge (Ge 12% โดยน้ำหนัก) / Au โดยมีค่าความหนาอย่างละ 1000 \AA ตามลำดับ ซึ่งฉาบด้วยการระเหยไอในสุญญากาศ (Vacuum Evaporation) จากนั้นทำการอบแอนนัลที่อุณหภูมิ 420°C เป็นเวลา 30 วินาที [30] เพื่อให้ผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำมีคุณสมบัติแบบโอห์มมิก (Ohmic Contact) สำหรับคุณภาพผิวหน้าผลึก (Surface Morphology) ทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ สูดท้ายเป็นการวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ตามวิธีการที่ได้นำเสนอในบทความตามเอกสารอ้างอิง [30] ซึ่งในการทดลองได้ทำการสุ่มตัวอย่างเพียงบางตัวอย่างเพื่อทำการวัดคุณสมบัติทางแสงเท่านั้น โดยผลที่ได้นี้แสดงไว้ในบทที่ 4



บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

สำหรับในบทนี้จะนำเสนอผลการทดลองที่ได้ดำเนินการ ได้แก่ผลจากการศึกษาคุณสมบัติของชั้นผลึกอพิแทกซี InP ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐาน (100) GaAs ด้วยวิธีการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุลที่ใช้ GaP ที่อยู่ในรูปของโพลีคริสตัลไลน์ (Polycrystalline) เป็นตัวจ่ายฟอสฟอรัสและผลการศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขตัวแปรในการปลูกผลึก ได้แก่อุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานขณะปลูกและค่าอัตราส่วน Beam Equivalent Pressure (BEP) ของ P_2/In ที่มีต่อคุณสมบัติของชั้นผลึกอพิแทกซี InP ที่ปลูกได้

4.1 การตรวจสอบค่าความหนาของชั้นอพิแทกซี InP ที่ปลูกได้

ชั้นผลึกอพิแทกซี InP ที่ปลูกได้ในการทดลองนี้ เมื่อทำการวัดค่าความหนาของชั้นผลึกที่ปลูกได้ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนกวาด (Scanning Electron Microscope) มีค่าประมาณ $1.2 \mu\text{m}$ ดังในรูปที่ 4.1 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากค่า BEP ของ In ที่ใช้ในการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าที่ได้จากคำนวณดังแสดงในหัวข้อนี้มีค่า $1.141 \mu\text{m}$ เป็นค่าความผิดพลาดประมาณ +4.9% โดยความผิดพลาดนี้เกิดจากค่าที่ได้จากภาคแสดงผลของ Ionization Gauge Meter ที่เป็นตัวเลขเพียง 2 หลักตัวเลข (Digit) เท่านั้น จากค่าที่ใช้ในการทดลองนี้คือ $1.6 \times 10^{-7} \text{ torr}$ ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนจากการอ่านสูงสุด $\pm 0.1 \times 10^{-7} \text{ torr}$ หรือประมาณ $\pm 3.1\%$ เนื่องจากค่าความไว (Sensitivity) ของ Ionization Gauge ที่เสื่อมสภาพไปตามอายุการใช้งาน ซึ่งค่า BEP ที่วัดได้นั้นมีค่าน้อยกว่าค่าจริงเสมอ [23]

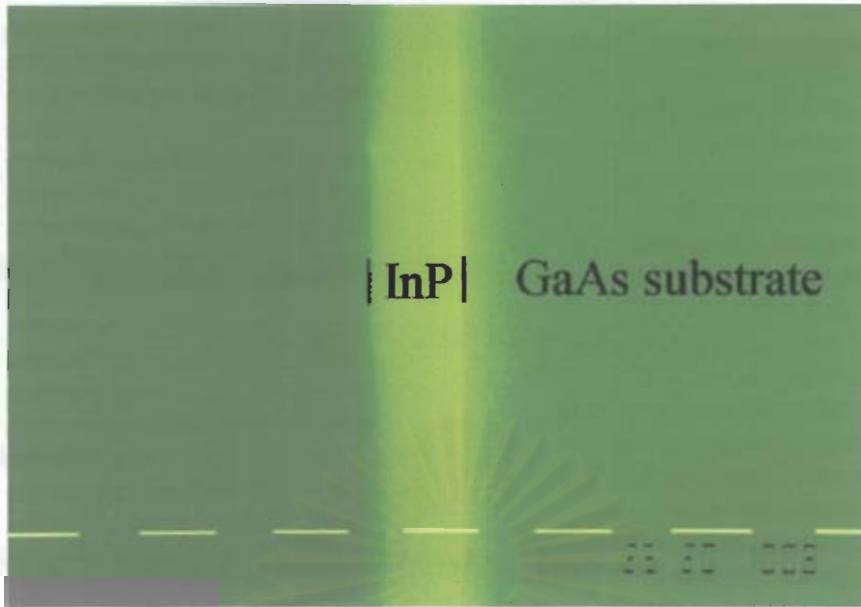
สำหรับการคำนวณหาค่าความหนาของ InP ในการทดลองนี้สามารถคำนวณได้ดังนี้

จากค่า BEP สำหรับ Ga ที่ใช้ในการปลูกผลึก GaAs มีค่า $5.4 \times 10^{-7} \text{ torr}$ ในอัตราการปลูกผลึก $1 \mu\text{m}/\text{ชั่วโมง}$ ที่ได้จากผู้ผลิตเครื่อง MBE [31] ดังนั้นจากสมการ (2.2) เราสามารถคำนวณกลับ เพื่อหาจำนวนอะตอมที่พ่นลงผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน ซึ่งเรากำหนดจากสมการจำนวน Monolayer ที่ปลูกได้ตามสมการ

$$1 \text{ Monolayer}_{\text{GaAs}} = \frac{a_{\text{GaAs}}}{2} = \frac{5.6533}{2} = 2.82665 \text{ \AA}$$
$$R_{\text{GaAs}} = \frac{10000}{3600 \times 2.82665} = 0.9827 \text{ Monolayer/วินาที}$$

ซึ่งค่าอัตราการปลูกข้างต้นสามารถเปรียบได้กับจำนวนอะตอมที่พ่นลงผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน

$$J_{\text{GaAs}} = \frac{2}{(5.6533 \times 10^{-8})^2} \times 0.9827 = 6.1496 \times 10^{14} \text{ อะตอม/ตร. ซม./วินาที}$$



รูปที่ 4.1 ภาพภาคตัดขวางของตัวอย่างชั้นผลึกอิตินแทกซ์ InP ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐาน (100) GaAs เส้นขาวในภาพแทนค่าความยาว 1 μm

เนื่องจากค่า BEP ของ In ที่ใช้ในการทดลองนี้มีเท่ากับ 1.6×10^{-7} torr เพื่อเปรียบเทียบค่า BEP ให้มีค่าเท่ากับค่าเปรียบเทียบของ Ga ได้ตามสมการ

$$\text{BEP ของ Ga} = \text{BEP ของ In} \times \frac{\text{Gauge Sensitivity of Ga}}{\text{Gauge Sensitivity of In}}$$

โดยค่า Gauge Sensitivity ของ Ga และ In มีค่า 1.68 และ 2.44 ตามลำดับ [31] ดังนั้นเราสามารถคำนวณหาค่า BEP สมมูลของ In เทียบกับของ Ga ได้ตามสมการ

$$\begin{aligned} \text{BEP ของ In ที่เปรียบได้กับของ Ga} &= 1.6 \times 10^{-7} \times \frac{1.68}{2.44} \text{ torr} \\ &= 1.1016 \times 10^{-7} \text{ torr} \end{aligned}$$

เมื่อคำนวณหาค่าจำนวนอะตอมของ In ได้ตามสมการ

$$J_{\text{In}} = \frac{1.1016 \times 10^{-7}}{5.4 \times 10^{-7}} \times 6.1496 \times 10^{14} = 1.2545 \times 10^{14} \text{ อะตอม/ตร. ซม./วินาที}$$

สำหรับค่าความหนาแน่นของอะตอมของ InP ที่ผิวมีค่า

$$d_{\text{InP 1 Monolayer}} = \frac{2}{(5.8694 \times 10^{-8})^2} = 5.806 \times 10^{14} \text{ อะตอม/ตร. ซม./วินาที}$$

ดังนั้นอัตราการปลูกผลึกที่เกิดขึ้นของ InP ในกรณีนี้มีค่าตามสมการ

$$R_{\text{InP}} = \frac{J_{\text{InP}}}{d_{\text{InP 1 Monolayer}}} = \frac{1.2545 \times 10^{14}}{5.806 \times 10^{14}} = 0.2161 \text{ Monolayer/วินาที}$$

เมื่อเปลี่ยนค่าอัตราการปลูกผลึกดังกล่าวให้เป็นค่าความหนาได้ตามสมการ

$$R_{\text{InP}} = 0.2161 \times \frac{a_{\text{InP}}}{2} = 0.2161 \times \frac{5.8694}{2} = 0.6341 \text{ \AA/วินาที}$$
$$= 0.6341 \times 3600 = 0.2283 \text{ \mu m/ชั่วโมง}$$

เพราะฉะนั้นค่าความหนาชั้นผลึกอพิแทกซี InP ที่ปลูกในเวลา 5 ชั่วโมงมีค่าความหนา

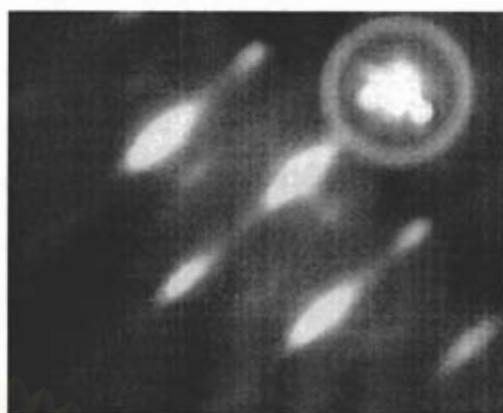
$$D_{\text{InP}} = 0.2283 \times 5 = 1.141 \text{ \mu m}$$

4.2 RHEED patterns

ตัวอย่างรูปแบบ RHEED ที่ได้จากผิวหน้า (Surface) ของผลึกฐานที่อุณหภูมิ 450°C หลังจากผ่านการปลูก Buffer layer ที่เป็น GaAs มีลักษณะรูปแบบ RHEED เป็นแบบ c(4×4) ภายใต้ความดันไอของ P₂ โดยการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบ RHEED ที่ได้จากผิวหน้าขณะปลูกผลึก InP ช่วงเวลาต่างๆ ในระหว่างการปลูกและสิ้นสุดการปลูกผลึก ซึ่งมีลักษณะตามในรูปที่ 4.2 โดยรูปที่ 4.2 (ข) เป็นภาพรูปแบบ RHEED ที่เกิดขึ้นที่เวลา 30 วินาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผิวหน้ามีลักษณะเป็นจุด (Spotty) อันเกิดขึ้นจากการ Nucleation ของผลึก InP มีลักษณะเป็นแบบ 3 มิติ (3 dimension) ซึ่งลักษณะการเกิดผลึกในลักษณะนี้เป็น การเกิดผลึกแบบ Stranski-Krastanov [32] โดยการเกิดผลึกนี้มีลักษณะเป็นก้อน (Cluster) เรียงจนเต็มเป็น ชั้น (Layer) แต่มีลักษณะไม่เรียบอันเป็นผลที่เกิดจากผิวหน้ามีผลึกที่มีลักษณะเป็นก้อนอยู่ เนื่องจากผลึก ที่ปลูก (InP) และแผ่นผลึกฐาน (GaAs) มีค่าคงตัวผลึก (Lattice Constant) แตกต่างกัน ทำให้เกิดความเครียด (Strained) ขึ้นในผลึกใหม่ที่ปลูกขึ้นบริเวณรอยต่อผิว (Interface) แต่หลังจากการปลูกผลึกเป็นเวลา 5 นาที ลักษณะรูปแบบของ RHEED เป็นแบบ c(2×4) ตามรูปที่ 4.2 (ค) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผิวหน้ามี ลักษณะเป็นผิวเรียบอีกครั้ง โดยค่าความหนาของผลึก InP ที่ปลูกได้ขณะนั้นมีค่าความหนาประมาณ 190 Å ซึ่งค่าความหนานี้เป็นค่าความหนาวิกฤติ (Critical Thickness) และค่าที่ได้จากทดลองนี้มีค่าใกล้เคียงกับค่า ที่ได้จากการทดลองของ R.Dropopad et. [29] ที่ได้ทำการทดลองไว้ ซึ่งได้ค่าความหนาวิกฤติประมาณ 64 Monolayer หรือ 188 Å เนื่องจากการเกิดผลึกหลังจากนี้มีลักษณะเกิดเป็นแบบ 2 มิติ (2 dimension) ที่มี ชื่อเรียกว่า Frank-van der Merwe [32] ผลึกที่เกิดขึ้นนั้นมีลักษณะของการเรียงชั้นผลึกเป็นชั้นๆ (Layer to layer growth) ลักษณะผิวหน้ามีความเรียบ (Smooth) ในกรณีนี้ค่าความหนาของผลึก InP ที่ปลูกขึ้นมีค่า ความหนาเกินกว่าค่าความหนาวิกฤติ



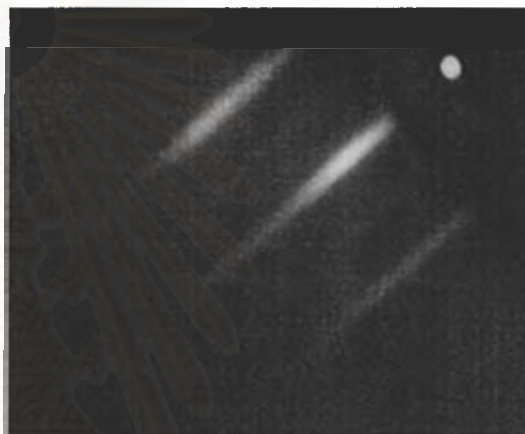
(ก) 0 วินาที



(ข) 30 วินาที



(ค) 5 นาที



(ง) หลังสิ้นสุดการปลูก

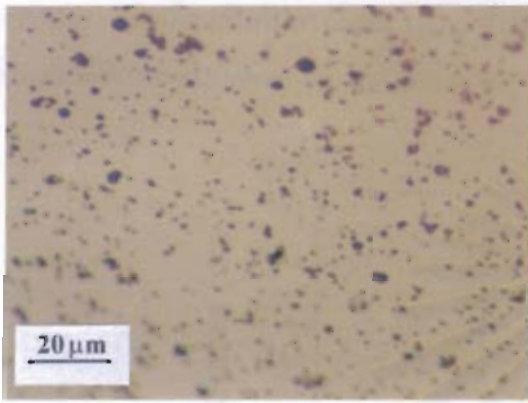
รูปที่ 4.2 รูปแบบ RHEED ที่เกิดขึ้นในขณะที่ปลูกผลึก InP บนแผ่นผลึกฐาน GaAs ในขณะปลูกผลึก อุณหภูมิของการปลูกผลึก 450°C และค่าอัตราส่วน BEP ของ P_2/In มีค่าเท่ากับ 20

4.3 อิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก InP

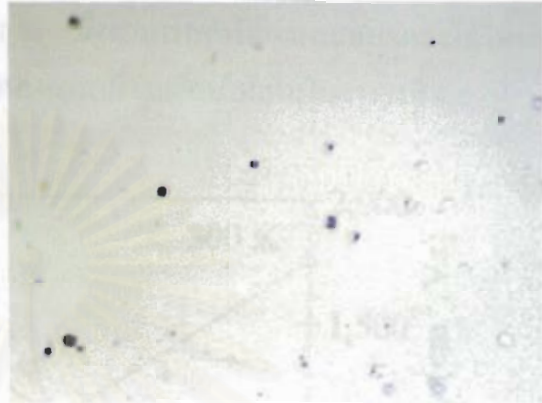
4.3.1 Surface Morphology

สำหรับผิวหน้าของตัวอย่างที่ได้ในกรณีนี้ได้แสดงไว้ตามรูปที่ 4.3 ซึ่งแสดงให้เห็นอิทธิพลของ อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการการปลูกผลึก (Growth Temperature) ที่มีต่อผิวหน้าผลึก ในกรณีการปลูก ผลึกที่อุณหภูมิ 300°C โดยค่าอัตราส่วน BEP ของ P_2/In มีค่าเท่ากับ 10 ผิวหน้าของตัวอย่างนี้มีลักษณะมัน เงาคล้ายกระจก แต่เมื่อสังเกตผ่านกล้องจุลทรรศน์พบว่า มีจุดบกพร่อง (Defect) ที่มีขนาดเล็กจำนวนมากที่ เกิดจากผลของการเกิดผลึกที่ไม่เป็นสัดส่วนหรือ Nonstoimetric Growth [33] ดังในรูปที่ 4.3 (ก) เนื่องจาก ในกรณีนี้เป็นการปลูกผลึกที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้การ Incorporation ของฟอสฟอรัสมีจำนวนมากเกินกว่าปกติ

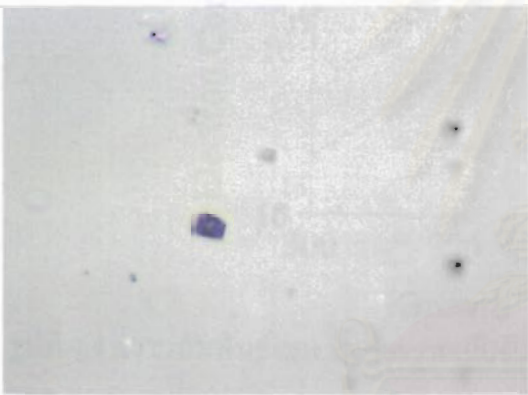
(Incorporation of excess group V element) ส่วนในกรณีการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 400°C มีลักษณะคล้ายกับในกรณีการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 450°C ที่ได้จากการทดลองเพื่อศึกษาผลของค่าอัตราส่วน BEP ของ P_2/In ที่จะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป แต่ในกรณีการปลูกที่อุณหภูมิ 500°C ผิวหน้าผลึกที่ได้มีลักษณะหยาบ (Rough Surface) เช่นเดียวกับกรณีของการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 450°C โดยมีค่าอัตราส่วนของ BEP ของ P_2/In มีค่าเท่ากับ 5 เนื่องจากปริมาณ P_2 ที่ใช้ไม่เพียงพอ (Phosphorus-deficient) [34]



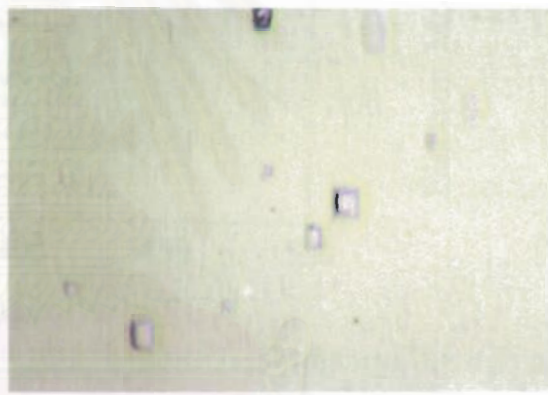
(ก) 300°C



(ข) 400°C



(ค) 450°C



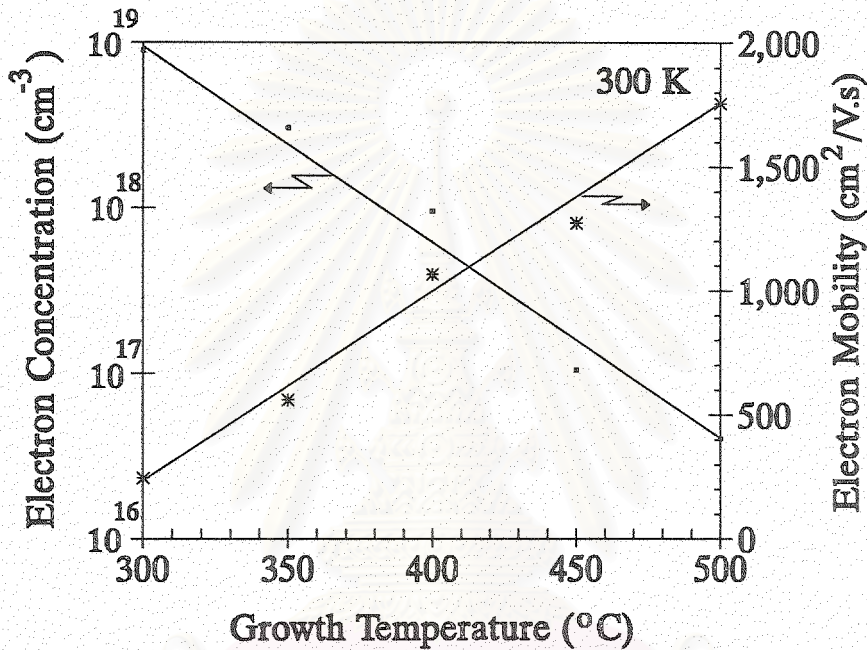
(ง) 500°C

รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายผ่านกล้องจุลทรรศน์ของตัวอย่างจากการปลูกที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยค่าอัตราส่วน BEP ของ P_2/In มีค่าเท่ากับ 10

4.3.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นพาหะ ค่าความคล่องตัวและอุณหภูมิในการปลูกผลึก ดังรูปที่ 4.4 ค่าความเข้มข้นพาหะมีค่าอยู่ในช่วง $4 \times 10^{16} - 9.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ และความคล่องตัวพาหะมีค่าอยู่ในช่วง $237 - 1,761 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ ซึ่งค่าเหล่านี้เป็นค่าที่วัดได้ที่อุณหภูมิห้อง (300 K) โดยค่าความเข้มข้นพาหะมีค่าลดลงและค่าความคล่องตัวพาหะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการปลูกผลึกมีค่าเพิ่มขึ้น ในกรณีของการปลูกผลึกที่อุณหภูมิต่ำจะมีผลของจุดบกพร่องที่เกิดในลักษณะ Stoichiometry-related defect อันเกิดจากการจำนวนอะตอมของฟอสฟอรัสเกิน (excess incorporation of group V) [35] ในขณะที่ทำการปลูกผลึกทำ

ให้ตำแหน่งอะตอมของฟอสฟอรัสของอยู่ในตำแหน่ง Antisite (ฟอสฟอรัสอยู่ในตำแหน่งของอินเดียม) ผลของการอยู่ในตำแหน่ง Antisite ของฟอสฟอรัส ทำให้มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับอะตอมของสารเจือปนแบบผู้ให้ (Donor impurity) และจะมีค่าลดลงทำเมื่ออุณหภูมิในการปลูกผลึกมีค่าสูงขึ้น สำหรับค่าความคล่องตัวพาหะมีค่าต่ำกว่าค่าในกรณีของ InP ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐาน InP ด้วยวิธีการปลูกผลึกอื่นๆ เนื่องจากผลของ Dislocation density ที่เกิดจาก Residual stress ของ Lattice-mismatched ที่เกิดขึ้นจากรอยต่อ InP/GaAs เช่นเดียวกับกับกรณีของ GaAs ที่ปลูกบน Si ซึ่งสามารถทำให้ผลกระทบลดลงได้โดยการปลูกชั้นผลึกอีพิแทกซีให้มีค่าหนาแน่นมากเพียงพอ [36] ดังแสดงการเปรียบเทียบให้เห็นในตารางที่ 4.1



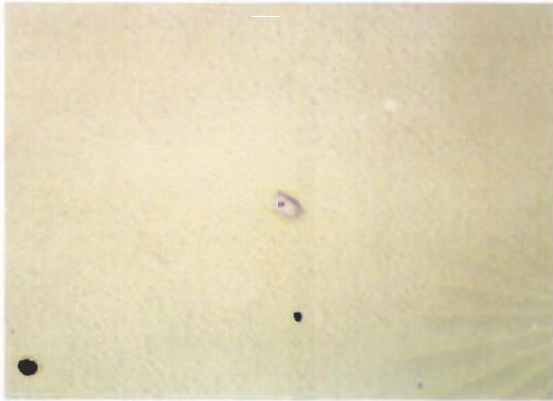
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นพาหะ ค่าความคล่องตัว และค่าอุณหภูมิในการปลูกผลึก

4.4 อิทธิของค่าอัตราส่วน BEP ของ P₂/In

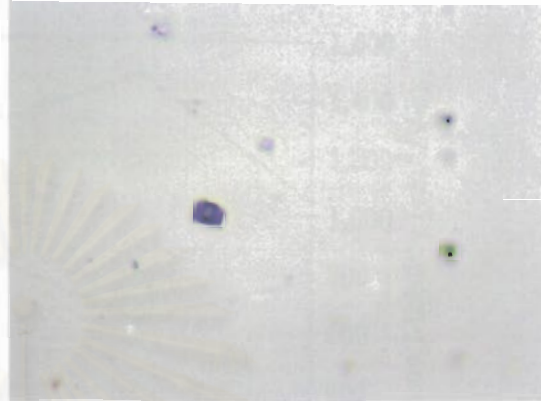
4.4.1 Surface Morphology

สำหรับผิวหน้าของตัวอย่างที่ได้จากการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 450°C และมีค่าอัตราส่วน BEP ของ P₂/In ต่างๆ นั้นได้แสดงไว้ตามรูปที่ 4.5 โดยอิทธิพลของอัตราส่วนค่าความดันไอ P₂/In ที่มีต่อผิวหน้าผลึก (Surface Morphology) แสดงในรูปที่ 4.5 กรณีของตัวอย่างที่ใช้ค่าอัตราส่วน BEP ของ P₂/In มีค่า 5 ผิวหน้าของตัวอย่างมีลักษณะหยาบ (Rough Surface) ซึ่งเกิดจากปริมาณของ P₂ ที่ใช้ในกรณีนี้มีไม่เพียงพอ (Phosphorus-deficient) สำหรับในกรณีของตัวอย่างที่ใช้ค่าอัตราส่วน BEP ของ P₂/In มีค่าเท่ากับ 10, 20 และ 30 ผิวหน้าของตัวอย่างที่ได้มีลักษณะเรียบและมีลักษณะผิวมันเงาคล้ายกระจก (Mirror-like) โดยผิว

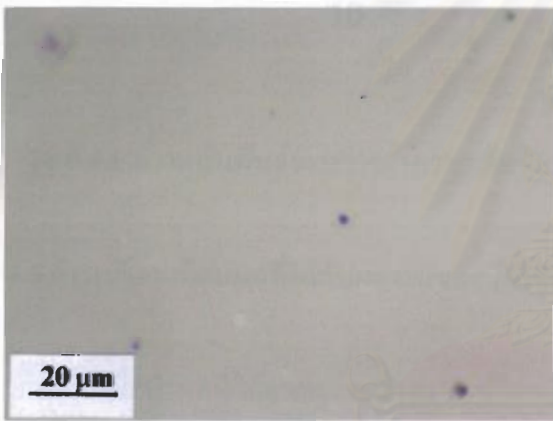
หน้าของตัวอย่างเหล่านี้มีจุดบกพร่อง (Defect) ที่มีลักษณะเป็น Hilllocks-like อันเกิดจากตั้งเจือปนที่เป็นสารประกอบออกไซด์ที่เจือผสมอยู่ในวัสดุที่ใช้ในการปลูกผลึกนี้ (In และ GaP) และผลของเกิดผลึกแบบ Anisotropic growth [8] นอกจากนี้ยังมีผลของการแพรวซึมที่ผิวหน้า ซึ่งขึ้นกับระนาบผิวหน้าของผลึก (Crystal orientation)



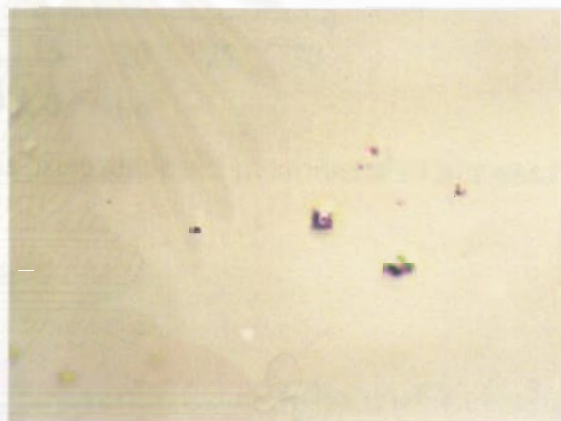
(ก) 5



(ข) 10



(ค) 20



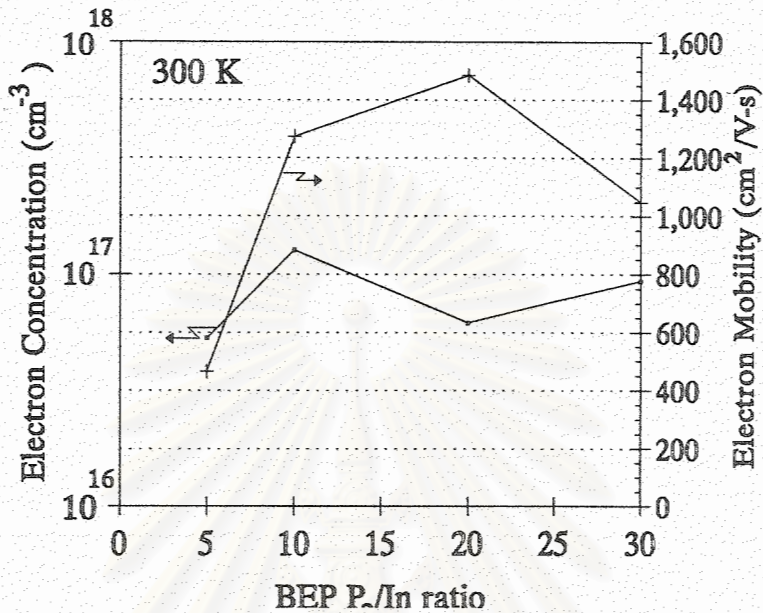
(ง) 30

รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายผ่านกล้องจุลทรรศน์ของตัวอย่างจากการปลูกที่อุณหภูมิ 450°C โดยมีค่าอัตราส่วน BEP ของ P_2/In มีค่าต่างๆ

4.4.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

จากผลการทดลองผลึก InP ที่ได้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) หรือมีพาหะนำไฟฟ้าส่วนใหญ่ของผลึก InP เป็นอิเล็กตรอน โดยอิทธิพลของค่าอัตราส่วน BEP ของ P_2/In ที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของผลึก InP แสดงดังกราฟในรูปที่ 4.6 ค่าความเข้มข้นพาหะมีค่าอยู่ในช่วง $4.66 \times 10^{16} - 1.05 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ และค่าความต้านทานตัวมีอยู่ในช่วง 806-1,487 $\text{cm}^2/\text{V.s}$ ที่อุณหภูมิห้อง โดยค่าความคล่องตัวพาหะมีค่าเพิ่มขึ้นสำหรับค่าอัตราส่วน BEP ของ P_2/In ตั้งแต่ค่า 5 ถึง 20 แต่มีค่าลดลง

เมื่ออัตราส่วน BEP ของ P_2/In มีค่าเท่ากับ 30 ซึ่งในกรณีการลดลงของค่าความคล่องตัวพาหะสำหรับตัวอย่างที่มีปลูกโดยค่าอัตราส่วน BEP ของ P_2/In เนื่องจากเงื่อนไขของการอยู่ในตำแหน่ง antisite ของฟอสฟอรัสที่มีจำนวนมากเกินไป



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นพาหะ ค่าความคล่องตัว และค่าอัตราส่วน BEP ของ P_2/In

4.5 การเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลงานของนักวิจัยอื่นๆ

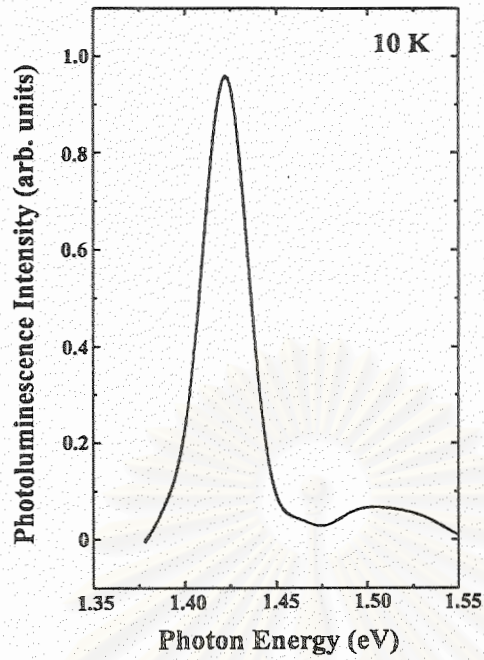
เมื่อนำผลที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลของนักวิจัยอื่นๆ ดังในตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า คุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นผลึกอพิแทกซี InP ที่ได้นั้นมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับผลที่ได้ของนักวิจัยอื่นๆ ในกรณีที่มีค่าความเข้มข้นใกล้เคียงกัน ซึ่งจุดด้อยของงานวิจัยนี้คือค่าความเข้มข้นพาหะนั้นยังมีค่าสูงอยู่ อันเป็นผลทำให้ค่าความคล่องตัวพาหะที่ได้มีค่าต่ำ ซึ่งจะต้องทำการพัฒนาต่อไป โดยจุดที่ต้องแก้ไขคือการลดปริมาณของออกซิเจนที่เจือปนในวัสดุดิบและ CO และ CO₂ ในบรรยากาศ ด้วยการใช้วัสดุที่มีความใหม่และสะอาด นอกจากนี้ต้องรักษาระบบให้สะอาดอยู่เสมอ

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากงานวิจัยนี้และผลงานของนักวิจัยอื่นๆ

Authors	Technique	μ (cm ² /V.s) (300 K)	N_d (cm ⁻³) (300 K)	Thickness (μ m)	โครงสร้าง
งานวิจัยนี้	MBE (GaP Source)	237-1,761	4×10^{16} - 9.5×10^{18}	1.2	InP/GaAs
Yang [9]	MBE (InP Source)	1,000-2,000	5×10^{16} - 1×10^{18}	0.1-0.8	InP/InP
Sandhu [37]	MBE (GaP Source)	4,500	1.2×10^{15}	4	InP/InP
Rudra [38]	CBE	2,000-5,200	1.3×10^{14} - 2×10^{16}	4-5	InP/InP
Ritter[39]	MOMBE	2,700-4,500	1×10^{14} - 3×10^{15}	2	InP/InP
Lee[40]	LP-MOCVD	1,000-4,700	$\geq 3.5 \times 10^{14}$	0.8-1.2	InP/GaAs

4.6 คุณสมบัติทางแสง

รูปที่ 4.7 ภาพสเปกตรัมของตัวอย่างจากการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 450°C โดยอัตราส่วน BEP ของ P₂/In มีค่าเท่ากับ 20 โดยค่าขอดสูงสุดสูงที่ค่า 1.418 eV นั้นได้จากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานต่ำสุดของแถบพลังงานนำไฟฟ้า (Conduction band) ลงในสู่ระดับพลังงานสูงสุดของแถบพลังงานวาเลนซ์ (Valence band) ที่เกิดขึ้นในผลึกอพิแทกซ์ InP สำหรับค่าขอดที่ 1.512 eV นั้นได้จากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานต่ำสุดของแถบพลังงานนำไฟฟ้า (Conduction band) ลงในสู่ระดับพลังงานสูงสุดของแถบพลังงานวาเลนซ์ (Valence band) ที่เกิดขึ้นในแผ่นผลึกฐาน GaAs ส่วนระดับพลังงานอื่นๆ ที่มีค่าต่ำไม่สามารถแสดงให้เห็นในการทดลองนี้ เนื่องจากขีดจำกัดของชุดระบบ PL ที่ใช้ในการทดลองนี้ และกำลังขาออกของเลเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีกำลังต่ำเกินไป (6 mW) จึงทำให้สัญญาณที่ได้นั้นมีขนาดเล็กมากๆ ไม่สามารถทำการเปรียบเทียบตัวอย่างต่างๆ ได้ในการทดลองนี้ นอกจากนี้ในการทดลองนี้สามารถวัดได้เฉพาะกรณีของตัวอย่างที่เปล่งแสงในช่วงความยาวคลื่นที่สั้นกว่า 900 นาโนเมตรเท่านั้น



รูปที่ 4.7 สเปกตรัมของตัวอย่างจากการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 450°C โดยอัตราส่วน BEP ของ P₂/In มีค่าเท่ากับ 20

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุป

ในโครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเงื่อนไขของการปลูกชั้นผลึกอินฟิแทกซ์ InP บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น (100) GaAs ด้วยวิธีการปลูกผลึกอินฟิแทกซ์จากลำโมเลกุล โดยใช้แหล่งจ่ายฟอสฟอรัสจากการสลายตัว (Decomposition) ของ GaP ที่อยู่ในรูปของโพลีคริสตัลไลน์ (Polycrystalline) คุณสมบัติของผลึก InP ที่ได้ขึ้นขึ้นกับเงื่อนไขที่ใช้ในการปลูกผลึก ได้แก่ อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะที่ปลูกผลึกและค่าอัตราส่วนความดัน BEP ของ P_2/In ช่วงค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการปลูกผลึกอยู่ในช่วง $300-500^{\circ}C$ โดยการปลูกผลึกที่ค่าอุณหภูมิสูง สำหรับค่าอัตราส่วนความดัน BEP ของ P_2/In ในช่วง 10-20 จะให้ค่าความคล่องตัวพาหะสูงมีค่าสูง และมีค่าลดลงในกรณีที่ค่าอัตราส่วนความดัน BEP ของ P_2/In ต่ำกว่า 10 คุณสมบัติของผลึก InP บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น (100) GaAs ที่ได้นี้มีพาหะนำไฟฟ้าส่วนใหญ่เป็นอิเล็กตรอนหรือเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) โดยมีค่าความเข้มข้นพาหะ $4 \times 10^{16} - 9.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ และค่าความคล่องตัวพาหะ $237 - 1,761 \text{ cm}^2/\text{V-s}$ ที่อุณหภูมิห้อง นอกจากนี้คุณภาพของผิวผลึก (Surface Morphology) ที่ได้ขึ้นขึ้นกับเงื่อนไขที่ใช้ในการปลูกผลึกเช่นเดียวกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

ข้อเสนอแนะ

สำหรับงานวิจัยนี้ค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบรูปแบบ RHEED ที่จุดเปลี่ยนแปลงต่างๆ ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนมากกว่า 10°C ซึ่งวิธีการที่ดีที่สุดคือการใช้ IR pyrometer แต่เครื่องมือนี้ราคาแพง สำหรับอีกวิธีหนึ่งได้แก่การใช้โลหะหรือวัสดุที่มีค่าจุดหลอมเหลวในช่วงที่เราทำงาน เช่น Al มีจุดหลอมเหลวที่ 660°C หรือ InSb มีจุดหลอมเหลว 525°C ติดไว้บน Block ที่มีแผ่นผลึกฐานติดอยู่ และทำการเปรียบเทียบที่ได้จาก pyrometer และค่าที่ได้จาก Thermocouple เพื่อให้สามารถกำหนดค่าอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น แต่วิธีการนี้ยุ่งยากและไม่เหมาะสำหรับการทำงานในช่วงอุณหภูมิที่กว้างมากได้ หากใช้ในการผลิตเชิงพาณิชย์จำเป็นต้องใช้เครื่องมือนี้ เพื่อให้การผลิตที่สามารถทำซ้ำได้ (repeatability) นอกจากนี้ยังมีความจำเป็นต้องตรวจสอบคุณสมบัติของโครงผลึกด้วย X-ray ซึ่งเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับงานนี้คือ Double Crystal X-ray diffractometer เนื่องจากไม่มีเครื่องมือชนิดนี้ในประเทศไทย และเป็นเครื่องมือหลักของการวิจัยด้านสิ่งประดิษฐ์และวัสดุที่ใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ในระบบสื่อสารทางแสง ที่ใช้ในการคำนวณค่าคงตัวผลึก (Lattice Constant) โดยเฉพาะวัสดุสารประกอบชนิด 3 ธาตุ (Ternary) และชนิด 4 ธาตุ (Quaternary) โดยเครื่องมือสามารถบอกความแตกต่างของค่าคงตัวผลึกของชั้นผลึกที่ประกอบกันเป็นโครงสร้างสิ่งประดิษฐ์นี้ ดังนั้นถ้ามีความพร้อมของอุปกรณ์การวิจัยทางด้านวัสดุอิเล็กทรอนิกส์จะมีความคล่องตัวมากขึ้น ผลของการวิจัยนี้จะสามารถทำการวิจัยสารประกอบอื่นๆ เช่น GaSbAs, InGaAlAs, และ GaPSb เพื่อนำมาใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์ชนิดอื่นๆ ต่อไป คณะผู้วิจัยหวังไว้ว่าในโครงการวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวกับงานวิจัยจะได้รับการสนับสนุนและส่งเสริมต่อไปในอนาคต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง (Reference)

1. Yasuharu SUEMATSU, Shigehisa ARAI, "Integrated Optics Approach for Advanced Semiconductor Lasers", Proceeding of The IEEE , Vol. 75, No.11, pp.1472-1487, 1987.
2. Yasuharu SUEMATSU, Shigehisa ARAI, and Fumio KOYAMA, "Dynamic-Single-Mode Lasers", Optica ACTA, Vol. 32, Nos. 9/10, pp. 1157-1173, 1985.
3. S. HIRAYAMA, T. FUJII, S. MUTO, T. INATA, Y. NAKATA, Y. SUGIYAMA and S. SASA, "MBE Growth of InGaAs-InAlGaAs Heterostructures for Applications to High Speed Devices", Journal of Crystal Growth, Vol.81 , pp.349-358, 1987.
4. M. Allovon, M. Quilec, "Interest in AlGaInAs on InP for Optoelectronic Application", J. IEE Proceeding, Vol. 139, No.2, pp. 148-152, 1992 .
5. Paul Greiling, "Milliwave and digital application of InP-based MBE grown HEMTs and HBTs", J. Crystal Growth, Vol. 175/176, pp. 8-12, 1997.
6. J. I .Shim, K.Komori, S.Arai, I.Arima, Y.Suematsu, and R.Somchai, "Lasing Characteristics of 1.5 mm GaInAsP-InP SCH-BIG-DR Lasers", IEEE J. Quantum Electron., Vol.27, No.6, pp.1736, 1991.
7. Yuichi MATSUSHIMA, Yuichi HIROFUJI, Shun-ichi GONDA, Seiji MUKAI and Morihiko KIMATA, "Molecular Beam Epitaxy Growth of InP", Jpn. J. Appl. Phys. , Vol. 15, No.12, pp.2321-2325, 1976 .
8. C. R. Stanley, R.F.C. Farrow, and P.W. Sullivan, Chapter 9, "MBE of InP and Other P-Containing", The Technology and Physics of Molecular Beam Epitaxy, Edited by E.H.C. Parker, Plenum Press, 1985.
9. Bing Xiong Yang and Hideo Hasegawa, "Molecular Beam Epitaxy and Migration-Enhanced Epitaxial Growth of InP Using InP Polycrystalline InP as Phosphorus source", Jpn, J. Appl. Phys, Vol. 32, pp. 704-710, 1993.
10. H. Uesugi, E. Omura, and H. Namizaki, "Low Threshold Current 1.3 μm InGaAsP Lasers Grown on GaAs Substrates", Third Optoelectronic Conference (OEC' 90), Chiba, JAPAN, pp. 210-211, 1990.

11. E. J. Roan and K. Y. Cheng, " Long-wavelength (1.3 μm) luminescence in InGaAs Strained Quantum Well Structures Grown on GaAs", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 59, No.21, pp. 2688-2690, 1991.
12. Y. Okuno, K. Uomi, M.Aoki, T. Taniwatari, M. Suzuki, and M. Kondow, "Anti-phase direct bonding and its application to fabrication of InP-based 1.55 μm wavelength lasers on GaAs substrates", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.66 , No.4, pp. 451-453, 1995.
13. W. T. Tsang, "From Chemical Vapor Epitaxy to Chemical Beam Epitaxy", *Journal of Crystal Growth*, Vol. 95, pp. 121-131, 1989.
14. "MBE Growth of GaAs/GaInP Heterostructures Using Solid As and P", *EPI Application Note*, April, 1993.
15. 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, pp.356-358, 1994.
16. Tsunenori SAKAMOTO, Hideo FUNABASHI, Kimihiro OHTA, Tadashi NAKAGAWA, Naoyuki J. KAWAI and Takeshi KOJIMA, "Phase-Locked epitaxy using RHEED Intensity Oscillation", *Jpn. J. Appl. Phys.* , Vol. 23, No.9, pp.L657-L659, 1984 .
17. 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 .
18. MBE Components & Accessories, Valved Arsenic Cracker Cells, RIBER, February 1999.
19. M.A. Herman and H. Sitter, "Molecular Beam Epitaxy : Fundamentals and Current Status", *Spring-Verlag Berlin Heidelberg*, 1989. pp.96.
20. 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.
21. B. Junno, S. Jeppesen, M.S. Miller, L. Samuelson, "A comparison of RHEED reconstruction phases on (100) InAs, GaAs and InP", *J. Crystal Growth*, Vol. 164, pp. 66-70, 1996.
22. F. G. Celii, Y. C. Kao and H. Y. Liu, "In situ composition monitoring of InGaAs/InP using quadrupole mass spectrometry", *J. Vac. Sci. Technol.* Vol. A 14, No. 6, pp. 3202-3207, 1996.

24. K.B. Ozanyan, P. J. Parbrook, M. Hopkinson, and C.R. Whitehouse, "In situ monitoring of the surface reconstructions on InP(001) prepared by molecular beam epitaxy", *J. Appl. Phys.*, Vol. 82, No.1, pp.474-476, 1997.
25. GaInAsP Alloy Semiconductors Edited by T. P. Pearsal Wiley & Sons, 1982.
26. Data in Science and Technology, Editor in Chief : R. Poerschke, Semiconductors Group IV Elements and III-V Compounds Editor : O. Madelung, Springer-Verlag, 1991.
27. InP-Based Materials and Devices, Edited by Osamu WADA and Hideki HASEKAWA, John Wiley & Sons, Inc. 1999.
28. L. J. van der PAUW, "A Method of Measureing The Resistivity and Hall Coefficient on Lamellage of Arbitrary Shape", *Philips Technical Review*, Vol. 20, pp. 220-224, 1958.
29. R. Droopad, K. Y. Choi, K. Shiralagi, R. A. Puechner, G. N. Maracas, "Gas source Molecular Beam Epitaxy Growth and Characterization of InP on GaAs", *Proceeding 4th International Conference Indium Phosphide and Related Materials*, 1992, pp.93-96.
30. S.C. Binari, J.B. Boos, "AuGe/Au ohmic contacts to n-type InP by Hot-Plate Alloying", *Electronics Letters*, Vol.25, No.18, pp.1208-1209, 1989.
31. RIBER MBE 32 Operator's Guide, Instuactional Manual, 1991, pp. 81-84
32. Kazuo Nakajima, Toru Ujihara, Satoru Miyashita, Gen Sazaki, "Thickness dependence of stable structure of the Stranski-Krastanov mode in the GaPSb/GaP system", *Journal of Crystal Growth*, Vol. 209, pp.637-647, 2000.
33. D.P. Docter, J.P. Ibbetson, Y. Gao, "New results for nonstoichiometric InP grown by low temperature MBE", *Proceeding 10th International Coference on Indium Phosphine and Related Materials*, 11-15 May 1998, Tsukuba, Japan, pp. 53-56, 1998.
34. H. Kunzel, J. Bottcher, P. Harde, R. Maessen, "MBE growth of high-quality InP for InGaAs/InP heterostructure using incongruent evaporation of GaP", *Journal of Crystal Growth*, Vol. 175-176, 1997, pp.940-944.
35. P. A. Postigo, M. L. Doter, P. Hueras, D. Golamyo and F. Briones, "Electrical and optical properties of undoped InP grown at low temperatures by atomic layer molecular beam epitaxy", *J. Appl. Phys.*, Vol. 77, No.1, pp.402-404, 1995.

36. T. Ohori, H. Suehiro, K. Kasai, J. Komeno, "Warp Reduction of High-Electron Mobility-Transistor on Si Wafer by In-Doped Selectively Doped Heterostructure and Strained-Layer Superlattice Buffer Layer", Jpn. Appl. Phys., Vol. 33, No.8, 1994, pp.4499-4505.

37. Adarsh Sandhu and Mohamed Missous, "Properties of High Quality InP Epilayers Grown by Solid Source Molecular Beam Epitaxy using Polycrystalline GaP as a Phosphorous Source", Jpn, J. Appl. Phys, Vol. 35, pp. 2108-2109, 1996.

38. A. Rudra, J.F. Carlin, L. Pavesi, F. Piazza, M. Proctor and M. Ilegems, "High Purity InP Grown by Chemical Beam Epitaxy", Journal of Electronic Materials, Vol.20, No.12, 1991, pp. 1087-1090.

39. D. Ritter, M. Keidler, H. Heinecke, "Growth of InP using TBP and DTBP in metalorganic molecular beam epitaxy", Journal of Crystal Growth, Vol. 188, 1998, pp.152-158.

40. M. K. Lee, D.S. Wu, and H.H. Tung, "Heteroepitaxial Growth of InP on GaAs by low-pressure metalorganic chemical vapor deposition", J. Appl. Phys., Vol.62, No.8, 1987, pp.3209-3211.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลงานที่ได้เผยแพร่ของงานวิจัยนี้



1. Somchai RATANATHAMMAPHAN, Supachok THAINOI, Pornchai CHANGMOANG, Suwat SOPITPAN and Choopol ANTARASENA, "Molecular Beam Epitaxy growth of InP on GaAs substrates using GaP decomposition source", 11th International conference Molecular Beam Epitaxy, Beijing, China, September 11-15, 2000, pp 428-429,
2. Somchai RATANATHAMMAPHAN, Supachok THAINOI, Pornchai CHANGMOANG, Suwat SOPITPAN and Choopol ANTARASENA, "Molecular Beam Epitaxy growth of InP layers on GaAs substrates using GaP decomposition source", Journal of Grystal Growth, Vol.227-228, 2001, pp.260-265.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



**Eleventh International Conference
on Molecular Beam Epitaxy**

Beijing, China



ABSTRACT BOOK

Molecular Beam Epitaxy growth of InP on GaAs substrates using GaP decomposition source

Somchai RATANATHAMMAPHAN, Supachok THAINOI, Pornchai CHANGMOANG,
Suwat SOPITPAN and Choopol ANTARASENA

Department of Electrical Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, 10330, Thailand

Tel : 662-218-6522, Fax : 662-251-8991, E-mail : rsomchai@chula.ac.th

The growth of InP on GaAs substrates has been widely studied with a view to developing the optoelectronic integrated circuits (OEICs). GaAs substrate would be desirable for the integration of InP based photonic devices. GaAs device processing technology is well-established and is a key to low cost devices. In the past, there have been some attempts to grow InP on GaAs. Metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD) [1] and gas source molecular beam epitaxy [2] were the key growth technologies providing heterostructures. Both techniques use toxic gases. In this work, we present the initial results on the use GaP source for the growth of InP on GaAs by a conventional molecular beam epitaxy system.

The growth was carried out in a conventional solid source molecular beam epitaxial system utilizing elemental Ga, In, As and GaP ingots or chunks. The P₂ beam was generated by decomposition of GaP source from a conventional effusion cell with a scavenger at the orifice [3]. Semi-insulating GaAs (100) substrates, quarter wafers were used for growth. These were prepared by solvent degreasing and chemical etching, mounted onto Mo holders using In solder. The holders containing the substrates were outgassed at 250°C for 1 hour to remove any contamination in the preparation chamber before being transferred into the growth chamber. The native oxide from GaAs surface was then removed by heating at 600°C in the presence of As₄ flux. After oxide desorption, a 5000 Å GaAs buffer layer was grown at 580°C. The substrate temperature was then ramped up to 250°C and the As₄ cell was cooled down to 100°C. A period of 1-2 hour was allowed in order to reduce the As background in the growth chamber, until the pressure was lower than 10⁻⁹ torr. The GaP source was ramped to the setting temperature for each condition. The substrate temperature was ramped up to 300 °C then the P₂ beam was switched on. The growth of the InP was initiated after the substrate temperature was ramped to the desired value. All the InP layers were determined by low temperature photoluminescence and Van der Pauw measurements. The In beam pressure (BEP) was 1.6x10⁻⁷ torr. This pressure gives a growth of 0.2 μm/hour. Some results are shown in this abstract. The effects of BEP P₂/In ratio on electrical properties and of InP layer on GaAs are shown in Fig.1. The photoluminescence and the RHEED pattern during growth are shown in Figs. 2 and 3 respectively.

In the conference, the detailed results on the effects of substrate temperature, the BEP P₂/In ratio and InP epi-layer thickness on the properties of InP on GaAs will be presented.

Reference

1. M. K. Lee, D. S. Wu, and H. H. Wang, "Heteroepitaxy growth of InP on GaAs by low-pressure metalorganic chemical vapor deposition", *J. Appl. Phys.*, Vol.62, No. 8, 1987, pp.3209-3211.
2. R. Droopad, K. Y. Choi, K. T. Shiralagi, R. A. Puechner, G. N. Maracas, "Gas source molecular beam epitaxy growth and characterization of InP on GaAs", 4th international conference of Indium phosphide and Related Materials, 1992, pp.93-96.
3. Tomoya Shitara, and Karl Eberl, "Electrical 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.

This work is supported by the Faculty of Engineering, Chulalongkorn University and the Thailand Research Fund (TRF).

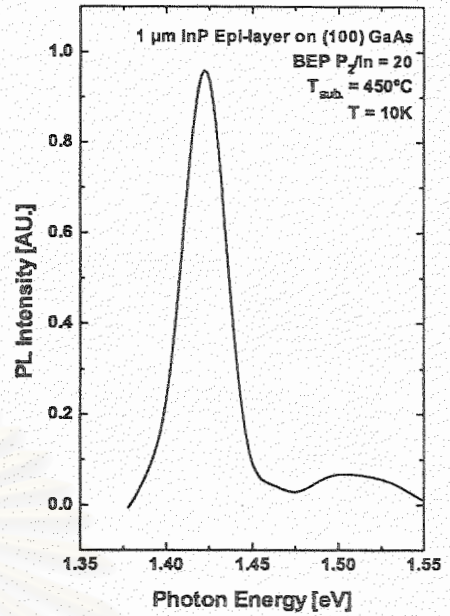
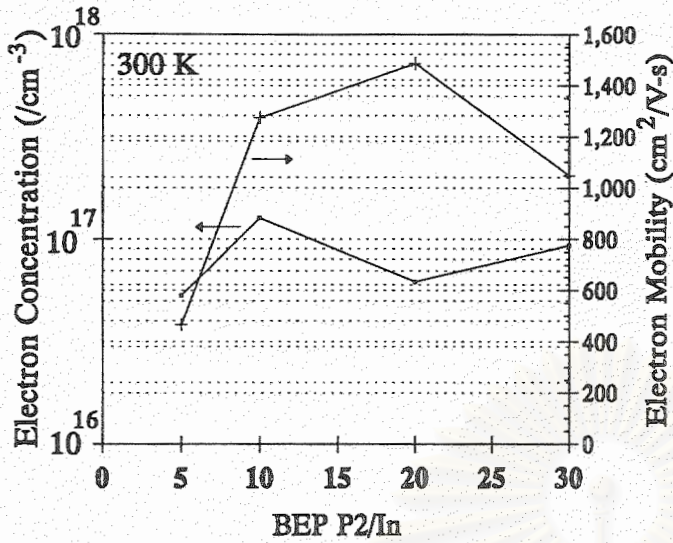


Fig. 1. Dependence of carrier concentration and mobility in 1 μm InP epi-layer on (100) GaAs substrates on the BEP P₂/In ratio. (T_g=450°C).

Fig. 2. Photoluminescence spectra at 10 K from 1 μm InP epi-layer on (100) GaAs substrates. (T_g =450°C, BEP P₂/In ratio =20)

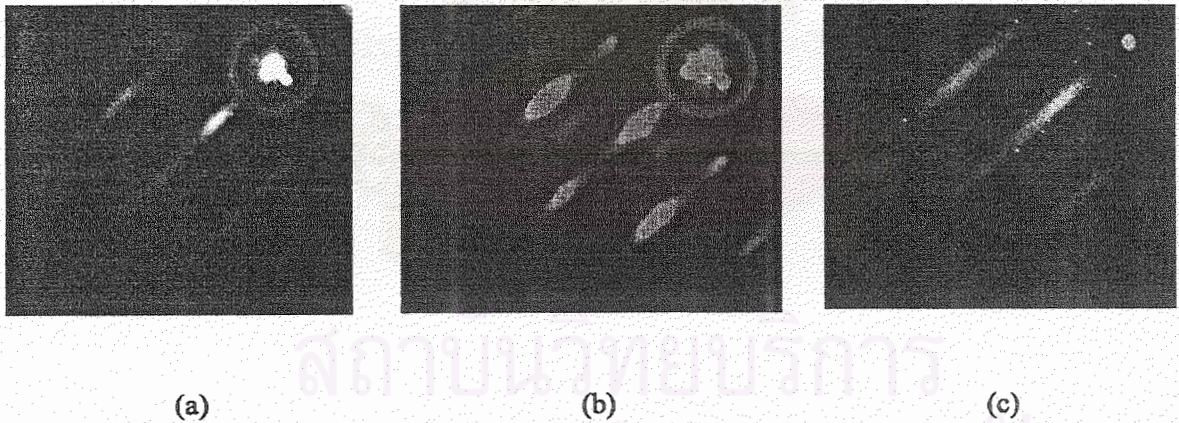


Fig. 3. RHEED patterns taken during the growth of InP layer on GaAs showing the surface reconstruction after the deposition time of (a) 0 sec, (b) 30 sec (c) after growth (5 hours) of 1 μm InP. (The growth condition is BEP P₂/In ratio = 20, T_g = 450°C).

Reprinted from

JOURNAL OF **CRYSTAL
GROWTH**

Journal of Crystal Growth 227-228 (2001) 260-265

Molecular beam epitaxy growth of InP layers on GaAs
substrates using GaP decomposition source

Somchai Ratanathammaphan*, Supachok Thainoi, Pornchai Changmoang,
Suwat Sopitpan, Choopol Antarasena

Department of Electrical Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ELSEVIER



ELSEVIER

Journal of Crystal Growth 227–228 (2001) 260–265

JOURNAL OF **CRYSTAL
GROWTH**

www.elsevier.nl/locate/jcrysgro

Molecular beam epitaxy growth of InP layers on GaAs substrates using GaP decomposition source

Somchai Ratanathammaphan*, Supachok Thainoi, Pornchai Changmoang,
Suwat Sopotpan, Choopol Antarasena

Department of Electrical Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

Abstract

The growth of InP layers on GaAs substrates by molecular beam epitaxy (MBE) using gallium phosphide (GaP) as a phosphorus source was investigated. The surface reconstruction during the growth was monitored by reflection high energy electron diffraction (RHEED), the high-quality InP layers on GaAs substrates with specular surface morphology could be obtained. The effects of growth temperatures and V/III ratios on the properties of InP epi-layers were studied. The undoped layers showed n-type conduction behavior with a background carrier concentration of 4×10^{16} – $9.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ and mobility of 237 – $1761 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, both at room temperature, as measured by van der Pauw method. Our results showed a strong dependence of growth quality on growth conditions such as growth temperatures and P_2/In flux ratios. © 2001 Elsevier Science B.V. All rights reserved.

PACS: 73.61.Ey

Keywords: A1. Characterization; A1. Reflection high energy electron diffraction; A3. Molecular beam epitaxy; B1. Phosphides; B2. Semiconducting gallium arsenide; B2. Semiconducting gallium compounds; B2. Semiconducting indium phosphide; B2. Semiconducting materials

1. Introduction

The fabrication of III–V compound on highly mismatched substrates has been widely investigated as a key technology to developing the optoelectronic integrated circuits (OEICs). High speed devices have been fabricated on GaAs substrates and InP-based optoelectronic devices have been realized at the 1.3 and 1.55 μm wavelengths for ultrahigh speed and long haul optical fiber communication applications. There-

fore, it would be advantageous to combine these two technologies on a single substrate in order to realize OEICs. To minimize the substrate cost, a heteroepitaxial technology that merges InP on GaAs substrates for OEICs is desirable. Due to advanced GaAs processing technology, GaAs ICs can be formed directly on high quality and large diameter GaAs substrates.

Conventionally, the phosphorus source used for the growth of phosphorus-based compound semiconductors is either phosphine (PH_3) in metal organic chemical vapor deposition (MOCVD), gas source molecular beam epitaxy (GSMBE), and chemical beam epitaxy (CBE) or solid red phosphorus, in solid source molecular beam epitaxy.

*Corresponding author. Tel.: +662-218-6522; fax: +662-251-8991.

E-mail address: rsomchai@chula.ac.th (R. Somchai).

However, PH_3 is not ideal, because it is toxic: the accumulation of white phosphorus is flammable and is therefore a safety hazard. In the case of red phosphorus, it has to be cracked at a high temperature to produce a P_2 flux using cracker effusion cells, giving rise to complicated and expensive growth process. All of these techniques require extremely demanding pumping capability. Therefore, it is difficult to apply in normal MBE systems. Recently, the decomposition of GaP source technique has been developed where P_2 beam can be obtained [1,2]. The Ga-free phosphorus beam from GaP source can be generated using a conventional effusion cell and a Ga-trapping cap [2]. The merits of this method is to produce a pure beam of dimer (P_2) or high ratio of P_2/P_4 which effectively eliminates white phosphorus formation, simplifies operation, and reduces the equipment cost.

In this work, the growth of InP layers on GaAs substrates grown by solid source MBE using GaP decomposition source has been demonstrated. Surface reconstruction during growth was monitored by reflection high energy electron diffraction (RHEED). The effects of growth temperatures and P_2/In flux ratios on the properties of InP layers on GaAs substrates were also investigated.

2. Experimental procedure

The growth was carried out in a conventional solid source molecular beam epitaxial system utilizing high-purity elemental Ga, In, As and GaP ingots or chunks. The P_2 beam was generated by decomposing of GaP source from a conventional effusion cell with a scavenger at the orifice [2]. Semi-insulating GaAs (100) substrates, quarter wafers, were used for growth. These were prepared by solvent degreasing and chemical etching, after which they were mounted onto Mo holders using In solder. The holders containing the substrates were outgassed at 250°C for 1 h to remove any contamination in the preparation chamber before being transferred into the growth chamber. Native oxide from the surface of GaAs was then removed by heating at 600°C in the presence of As_4 flux. After oxide desorption, a

5000 Å GaAs buffer layer was grown at 580°C. The Ga beam equilibrium pressure (BEP) was 2.7×10^{-7} Torr. The growth rate of GaAs buffer layer was $0.5 \mu\text{m h}^{-1}$. The BEP As_4/Ga ratio is approximately 20. The pressure background during the growth of GaAs buffer layer was between $4\text{--}6 \times 10^{-8}$ Torr. The substrate temperature was then ramped down to 250°C and the As_4 cell was cooled down to 100°C. A period of 1–2 h was allowed in order to reduce the As background in the growth chamber, until the background pressure was lower than 10^{-9} Torr. The GaP source was ramped up to the setting temperature for each condition. The substrate temperature was ramped up to 300°C, then the P_2 beam was switched on. The growth of the InP started after the substrate temperature was raised to the desired value. The surface reconstruction during the growth was examined by reflection high energy electron diffraction (RHEED). The surface morphology of the epi-layers was examined using optical microscope. All the InP layers were determined by low-temperature photoluminescence and van der Pauw measurements with Au–Ge/Au alloyed ohmic contacts [3]. The In beam equilibrium pressure (BEP) was 1.6×10^{-7} Torr. This pressure gave a growth rate of $0.2 \mu\text{m h}^{-1}$. The thickness of the InP layers was maintained at about 1 μm .

3. Results and discussion

The (100) GaAs surface at 450°C exhibited the familiar $c(4 \times 4)$ RHEED reconstruction which remained when the substrate was heated to 450°C, even with a flux of P_2 incident on the surface. Fig. 1 shows the RHEED patterns taken along [011] azimuth of the equivalent of 0, 30 s, 5 min growth durations and after a 1 μm growth (5 h) of InP layer on the (100) GaAs substrate which at 450°C. After InP deposition for 30 s, the RHEED pattern became spotty indicating growth of 3 dimension (3D) island nucleation (Fig. 1(b)). These observations suggest a Stanski–Kranstanov growth mode during this period since the growth of InP has started. Fig. 1(c) shows the RHEED pattern becomes a clear $c(2 \times 4)$ after the growth

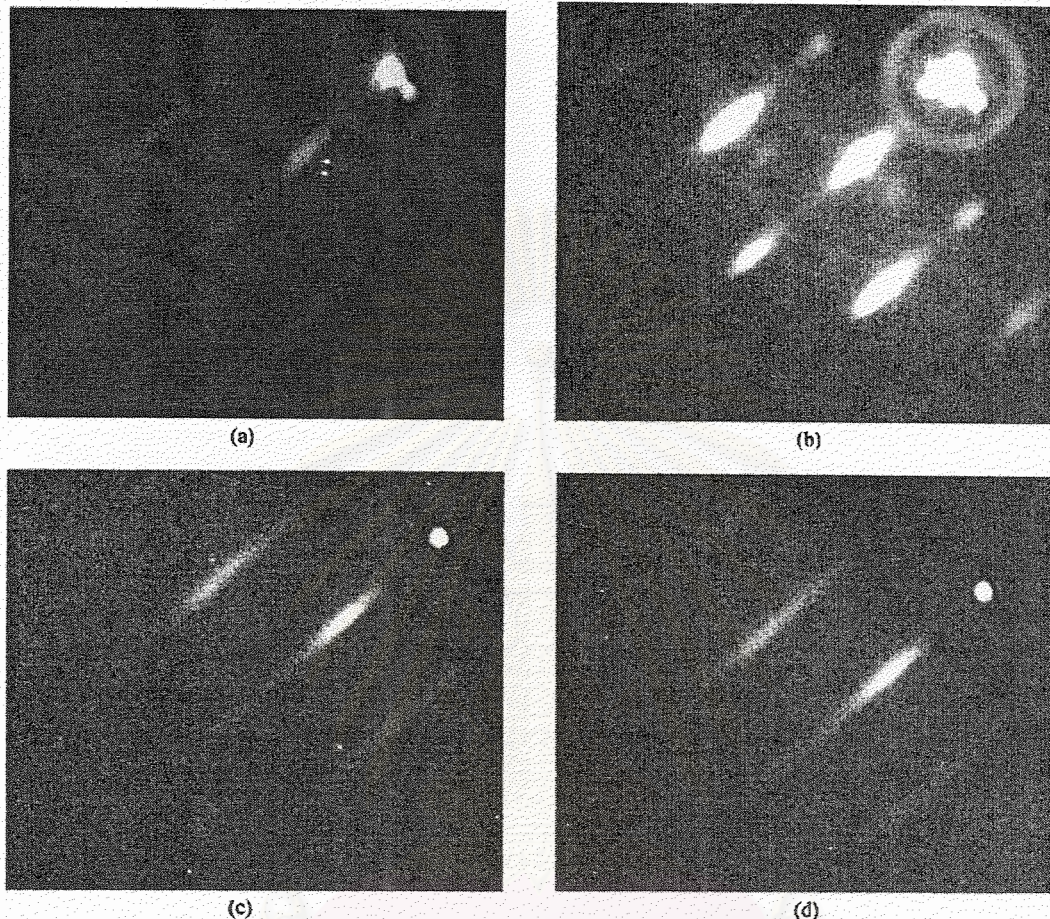


Fig. 1. RHEED patterns taken during the growth of InP layer on GaAs showing the surface reconstruction after the deposition time of (a) 0 s, (b) 30 s, (c) 5 min, and the after growth.

of 5 min which indicate that smooth and specular InP layers were grown on GaAs substrates.

The surface morphology of the samples are respectively shown in Figs. 2 and 3 as functions of P_2/In ratio and growth temperature. The surface morphology is improved when the P_2 pressure is increased as seen in Fig. 2. Fig. 2(a) shows the rough surface morphology of the sample which was grown at 450°C with BEP P_2/In ratio of 5. The surface morphology of this sample is surfboard-shaped-like defects which were caused by the effect of phosphorus-deficient growth. The surface of the sample grown at 450°C with BEP P_2/In ratios of 10, 20, and 30 are smooth and mirror-like as

shown in Figs. 2(b)–(d). The hillocks-like defects are caused by impurity which arises from the oxide within the effusion cells and the anisotropic growth. These influence the growth direction of defects which may result from the effect of crystal orientation dependent surface diffusion. Fig. 3(a) shows the surface morphology of the sample grown at 300°C with BEP P_2/In ratio of 10. The surface is smooth and mirror-like with high density of point defects due to nonstoichiometric growth at low temperature which causes incorporation of excess group V materials. Fig. 3(b) shows that the surface morphology is similar to the morphology of the previous samples which were

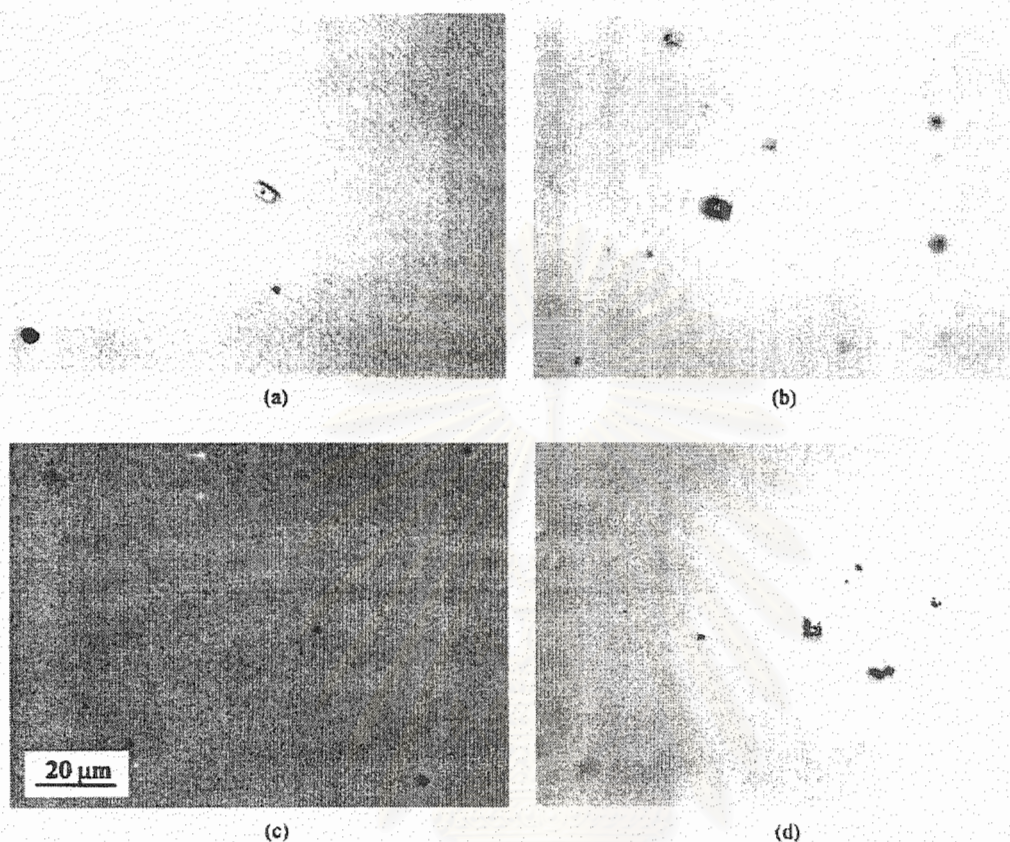


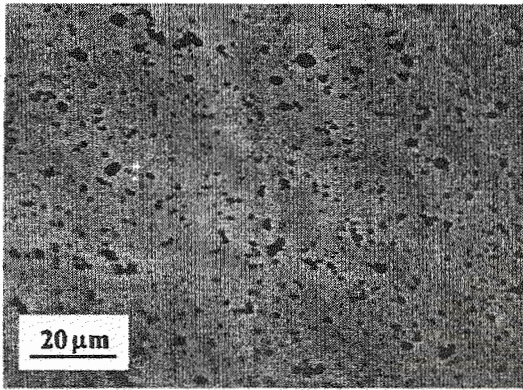
Fig. 2. Optical micrographs of samples grown at various BEP P_2/In ratios with growth temperature of 450°C: (a) 5, (b) 10, (c) 20, and (d) 30.

grown at 450°C with BEP P_2/In ratios of 10, 20, and 30. Fig. 3(c) shows the rough surface morphology or surfboard-shaped-like defects which have a larger size than the sample that was grown at 450°C with BEP P_2/In ratio of 10. The result also indicates the effect of phosphorus-deficient growth due to the loss of phosphorus at high growth temperature.

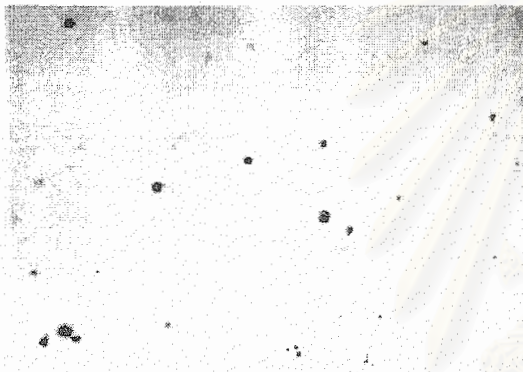
All unintentionally doped samples shows n-type conduction. Fig. 4(a) shows the dependence of the electrical properties of the growth sample on the BEP P_2/In ratio. The residual carrier concentration ranges from 4.66×10^{16} to $1.05 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ and the mobility is in the range of 806–1487 $\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ at room temperature. The mobility increases with the increase of the BEP P_2/In ratio from 5 to 20 and it decreases with the

increase of BEP P_2/In ratio up to 30. The lower mobility of sample grown with BEP P_2/In ratio of 30 suggests an effect of group V antisite which dominates the electrical properties [4]. The dependence of carrier concentration on the BEP P_2/In ratio is unclear at present from this result.

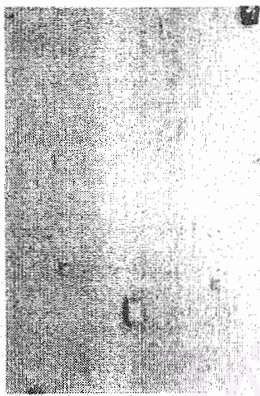
Fig. 4(b) shows the dependence of residual carrier concentration on growth temperature. The carrier concentration ranges from 4×10^{16} to $9.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ and the mobility is in the range of 237–1761 $\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ at room temperature. The residual carrier concentration decreases and the mobility increases with increase in growth temperature. The dependence of carrier concentration on growth temperature indicates that the dominant carriers are due to stoichiometry-related defects where phosphorus atoms are incorporated



(a)

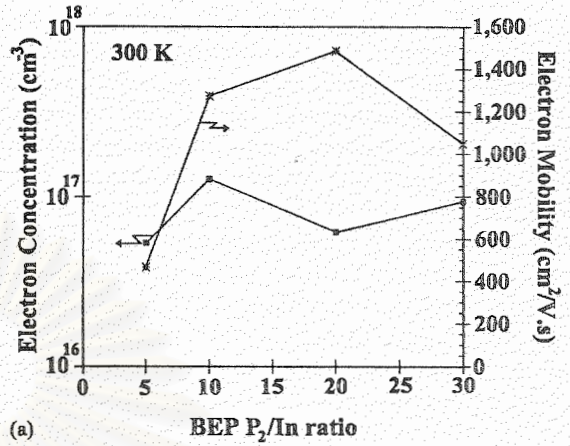


(b)

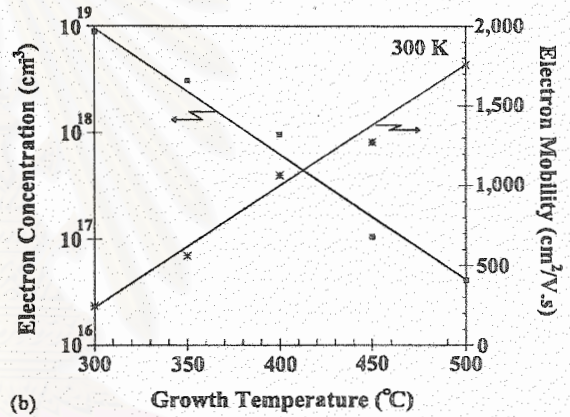


(c)

Fig. 3. Optical micrographs of samples grown at various growth temperatures with BEP P_2/In ratio of 10: (a) 300°C, (b) 400°C, and (c) 500°C.



(a)



(b)

Fig. 4. Dependence of carrier concentration and mobility on (a) BEP P_2/In ratio with growth temperature of 450°C and (b) growth temperature with BEP P_2/In ratio of 10.

as antisite defects and act as donors. The lower growth temperature increases excess incorporation of group V materials. In our results, the residual carrier concentration is higher than that from previous results of growing InP on InP. MBE using GaP decomposition source, the carrier concentration was $1.2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ [2] and MBE using valved cracking cell, the carrier concentration was 2.9×10^{15} – $4.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ [5]. The lower mobility, compared to other techniques of growing InP on InP, is caused by the effect of dislocation density or the residual stress of the lattice-mismatched InP/GaAs on mobility, as is the case of HEMT on Si [6].

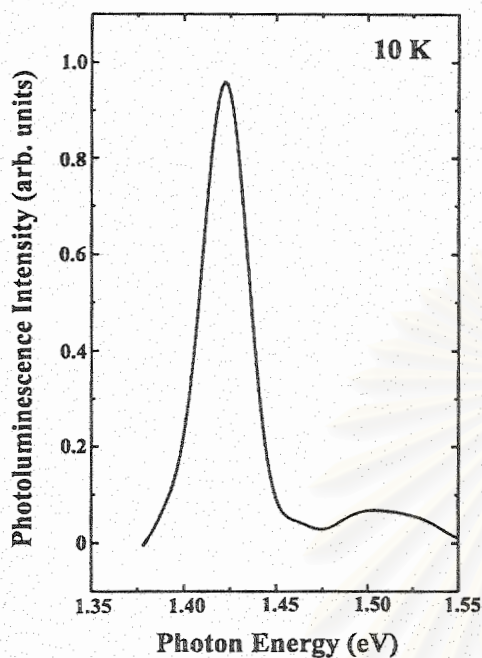


Fig. 5. PL spectrum of sample grown at $T_s = 450^\circ\text{C}$ and BEP P_2/In ratio = 20.

Fig. 5 shows the PL spectrum at 10 K obtained from sample which was grown at 450°C with BEP P_2/In ratio of 20. The band to band transition of InP epi-layer is observed at 1.418 eV. The peak at 1.512 eV is the emission of band to band transition of GaAs substrate. The other lower energy transition cannot be detected due to limitations of our PL system.

4. Conclusions

We have presented the properties of high-quality InP layers on GaAs substrates grown by

solid source molecular beam epitaxy using GaP decomposition source. The dependence of electrical properties on substrate temperature and P_2/In ratio was investigated. Growth at high temperature brings about a lower residual carrier concentration and higher mobility. Our results also show that growth at BEP P_2/In ratio in the range of 10–20 results in higher mobility. Unintentionally doped layers are all n-type with carrier concentration of 4×10^{16} – $9.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ and mobility of 237 – $1761 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ at room temperature, depending on the growth conditions. In addition, the surface morphology of epi-layers also depends on the growth conditions.

Acknowledgements

The present work is financially supported by the Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, the Thailand Research Fund (TRF), and the National Research Council of Thailand (NCRT). The authors would like to thank Professor Somsak Panyakeow, Assn. Prof. Tara Cholaprance for fruitful discussions and comments.

References

- [1] A. Sandhu, M. Missous, *Jpn. J. Appl. Phys.* 35 (1996) 2108.
- [2] T. Shitara, K. Eberl, *Appl. Phys. Lett.* (1994) 356.
- [3] S.C. Bainari, J.B. Boos, *Electron Lett.* (1989) 1207.
- [4] D.P. Docter, J.P. Ibbetson, Y. Gao, *Proceedings of the 10th Conference on Indium and Related Materials*, 1998, p. 53.
- [5] J.N. Baillargeon, A.Y. Cho, R.J. Fischer, *Proceedings of the Sixth Conference on Indium and Related Materials*, 1994, p. 148.
- [6] T. Ohori, H. Suehiro, K. Kasai, J. Komeno, *Jpn. J. Appl. Phys.* (1994) 4499.





สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย