จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทุนวิจัย
กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานผลวิจัย

การปลูกผลึก InP ที่มีการเจือปน Si บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น (100) GaAs ด้วยวิธีการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุลที่ใช้ GaP เป็นตัวจ่ายฟอสฟอรัส

โดย

สมชัย รัตนธรรมพันธ์ D.Eng. (Chula)

และ

ชุมพล อันตรเสน Dr.-Ing. (Toulouse)

กันยายน 2550

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

ส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช ปี 2545 ส่วนหนึ่งจสก โครงการวิจัย Molecular Beam epitaxy จากสภาวิจัยแห่งชาติ ปีงบประมาณ 2536 และส่วนหนึ่งจากการสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) ในโครงการวิจัย "การปลูกผลึกอินเดียมฟอสไฟด์บนแผ่นผลึกฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่มีผิวหน้าในระนาบ (411) A" ภายใต้สัญญาเลขที่ BRG14/25438 คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญูแก้ว ที่ได้ให้การสนับสนุนและคำแนะนำชี้แนะที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการวิจัยนี้ พร้อมทั้งคุณศุภโชค ไทยน้อย คุณขวัญเรือน ไทยน้อย คุณพรชัย ช่างม่วง ที่ให้ความช่วยเหลือในการวิจัยนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชื่อโครงการวิจัย	การปลูกผลึก InP ที่มีการเจือปน Si บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น (100) GaAs ด้วยวิธีการปลูกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุลที่ใช้ GaP เป็นตัวแหล่งจ่ายฟอสฟอรัส
ชื่อผู้วิจัย	รศ.ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์ และ รศ.ดร.ชุมพล อันตรเสน
เดือนและปีที่ทำวิจัยเสร็จ	กันยายน พ. ศ.2550

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการวิจัยการปลูกผลึกอิพิแทกซี InP ที่การเจือปน Si บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น (100) GaAs ด้วยวิธีการปลูกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุล โดยใช้แหล่งจ่ายฟอสฟอรัสจากการสลายตัวของ GaP ที่อยู่ในรูปโพลีคริสตอลไลน์ ซึ่งคุณภาพผิวหน้าของผลึกที่ได้มีลักษณะเรียบมันเงา โดยอิทธิพลของอุณหภูมิแหล่งจ่าย Si ที่ใช้ในการปลูกผลึกมีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นผลึกอิพิแทกซี InP ชั้นผลึกอิพิแทกซี InP ที่มีการเจือปน Si มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและแสดงค่าความเข้มข้นพาหะนำไฟฟ้ามีค่าอยู่ในช่วง $1X10^{17}$-$8.5X10^{18}$ cm^{-3} และมีค่าความคล่องตัวพาหะอยู่ในช่วง 298-1,987 $cm^2/V\text{-}s$ จากการวัดด้วยวิธี van der PAUW ที่อุณหภูมิห้อง จากผลที่ได้ในงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าคุณสมบัติของชั้นผลึกอิพิแทกซี InP ที่มีการเจือปนขึ้นกับปริมาณของ Si ที่เจือปนในขณะที่ทำการปลูกผลึก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Project Title	The growth of Si-doped InP on (100) GaAs substrates by molecular beam epitaxy using a GaP decomposition source
Name of the Investigators	Assoc. Prof. Somchai RATANATHAMMAPHAN and Assoc. Prof. Choompol ANTARASENA
Year	2007

Abstract

In this work, the growth of Si-doped InP epi-layers on (100) GaAs substrates by molecular beam epitaxy (MBE) using polycrystalline gallium phosphide (GaP) as a phosphorus source was investigated. The high quality Si-doped InP epi-layers on (100) GaAs substrates with specular surface morphology could be obtained. The effect of Si doping concentration on the properties of InP epi-layers were studied. The Si-doped InP epilayers showed n-type conduction behavior with carrier concentration of $1X10^{17}$-$8.5X10^{18}$ cm^{-3} and mobility of 298-1,987 cm^2/V-s. Both were measured by van der PAUW method at room temperature. The results showed a strong dependence of growth quality of Si doping conditions.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ.....II

บทคัดย่อภาษาไทย.....III

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....IV

สารบัญ.....V

สารบัญรูป.....VII

สารบัญตาราง.....VIII

สารบัญสัญญลักษณ์.....IX

บทที่ 1 บทนำ.....1

บทที่ 2 ความรู้พื้นฐาน.....4

2.1 การปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุล.....4

2.1.1 ชุดระบบการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุล.....4

2.1.2 Effusion Cell.....7

2.1.2.1 Knudsen Cell.....7

2.1.2.2 Cracker Cell.....9

2.1.2.3 Valved Cracker Cell.....10

2.1.2.4 Gas Injection Cell.....11

2.1.3 อุปกรณ์วิเคราะห์.....12

2.1.3.1 Reflection High Energy Electron Diffraction (RHEED).....13

2.1.3.2 Residual Gas Analyzer.....15

2.1.3.3 อุปกรณ์อื่นๆ ที่สามารถติดตั้งเข้าในระบบ MBE.....15

2.2 กลไกการเกิดผลึกของการปลูกผลึกอิพิแทกซีวิธี MBE.....16

2.3 สารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V.....19

2.3.1 โครงสร้างของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V.....19

2.3.2 คุณสมบัติของสารประกอบกึ่วตัวนำกลุ่ม III-V.....21

2.4 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าวิธี van der PAUW.....22

2.4.1 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect).....22

2.4.2 วิธีการวัดของ van der PAUW.....23

หน้า

2.4.3 การวัด van der PAUW ในทางปฏิบัติ....26
2.4.3.1 การกำหนดนิยามการวัดค่าสภาพความต้านทาน....26
2.4.3.2 การวัดหาค่าสภาพต้านทาน....26
2.4.3.3 การกำหนดนิยามในการวัดหาค่าแรงดันฮอลล์....27
2.4.3.4 การวัดหาค่าแรงดันฮอลล์....28
บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง....29
3.1 การเตรียมแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น....29
3.2 การปลูกชั้นผลึก Buffer GaAs....29
3.3 การศึกษาอิทธิพลอุณหภูมิแหล่งจ่าย Si ที่มีต่อผลึกอิพิแทกซี InP....31
3.4 การวิเคราะห์ผล....32
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์....33
4.1 Surface Morphology....33
4.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า....33
4.3 การเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลงานของนักวิจัยอื่นๆ....35
บทที่ 5 สรุป....37
บทที่ 6 ข้อเสนอแนะ....38
เอกสารอ้างอิง....39

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

หน้า

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

รูปที่ 2.2 ชุดระบบ MBE ที่ติดตั้งที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย....6

รูปที่ 2.3 แผนภาพโครงสร้าง Knudsen Cell....7

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

รูปที่ 2.5 ภาพของโครงสร้าง Cracker Cell....10

รูปที่ 2.6 ภาพของ Arsenic Valve Cracker Cell....11

รูปที่ 2.7 ภาพโครงสร้างของ Effusion Cell ชนิด Gas Injector Cell....12

รูปที่ 2.8 แผนภาพอธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลงความเข้มของอิเล็กตรอนในขณะทำการปลูกผลึก....14

รูปที่ 2.9 แผนภาพความสัมพันธ์ของรูปแบบ RHEED และอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐาน (100) GaAs, InP และ InAs ภายใต้ไอของ Dimer....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 แผนภาพปรากฏการฮอลล์....22

รูปที่ 2.14 ภาพโครงสร้างของตัวอย่างสำหรับการวัดหาค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าวิธี van der PAUW....23

รูปที่ 2.15 แผนภาพการวัดหาค่าสภาพต้านทานในวิธี van der PAUW....25

รูปที่ 2.16 แผนภาพการวัดหาค่าแรงดันฮอลล์ในวิธีการวัด van der PAUW....25

รูปที่ 3.1 ภาพรูปแบบ RHEED แบบ c(2×4) ที่ได้จากแผ่นผลึก GaAs ที่อุณหภูมิ 580°C....30

รูปที่ 3.2 โครงสร้างของตัวอย่างที่สร้างในการทดลอง....30

รูปที่ 3.3 แผนภาพจำลองกระบวนการทำงานของการตั้งค่าอุณหภูมิและ Shutter ในการทดลองนี้....31

รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายผ่านกล้องจุลทรรศน์ของตัวอย่างจากการปลูกที่อุณหภูมิแหล่งจ่าย Si ต่างๆ ด้วยอุณหภูมิขณะทำการปลูกผลึก 500°C ค่าอัตราส่วน BEP ของ P_2/In มีค่าเท่ากับ 20....34

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นพาหะ ค่าความคล่องตัว และค่าอุณหภูมิของแหล่งจ่าย Si....35

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบชนิดของ Effusion Cell และชนิดของลำโมเลกุล ที่ได้จากวัตถุดิบชนิดต่างๆ 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 36

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญสัญญลักษณ์

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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

InP เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V (III-V Compound Semiconductor) ที่มีความสำคัญอย่างมากและมีบทบาทต่อการพัฒนาการของระบบสื่อสารทางแสง (Optical Communication) เนื่องจาก InP เป็นสารกึ่งตัวนำที่ถูกนำมาใช้เป็นผลึกฐานเริ่มต้น (Substrate) ของการสร้างสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ โดยเฉพาะแหล่งกำเนิดแสงและตัวตรวจรับแสงในย่านความยาวคลื่น 1.3 และ 1.5 μm [1-2] ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของระบบสื่อสารทางแสงความเร็วสูงพิเศษ (Ultra-high Speed) และระยะไกล (Long hual) นอกจากนี้ InP ยังเป็นแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นสำหรับสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้งานในย่านความถี่สูงอีกด้วย เนื่องจากสารประกอบกึ่งตัวนำที่มีค่าคงตัวผลึก (Lattice constant) เข้ากับ (Match) ของผลึก InP ได้แก่ สารประกอบของกลุ่ม InGaAsP, AlInGaAs และ InGaAs มีคุณสมบัติทางแสงในย่านดังกล่าวนี้และมีค่าความคล่องตัวพาหะสูง โดยสารประกอบกลุ่มนี้มีค่าความคล่องตัวของพาหะ (Mobility) สูงกว่าของ GaAs [3] ดังนั้นสิ่งประดิษฐ์ที่เกี่ยวกับสารประกอบของ InP จึงได้รับการศึกษาและพัฒนาไปอย่างแพร่หลาย เพื่อรองรับการพัฒนาของระบบการสื่อสารทางแสงในยุคปัจจุบัน ดังตัวอย่างเช่น ไดโอดเลเซอร์โครงสร้าง DR [4] สำหรับระบบสื่อสารทางแสงในย่าน 1.5 μm เป็นต้น แต่เนื่องจากผลึกของ InP นั้นมีตลาดเฉพาะในด้านสิ่งประดิษฐ์ทางแสงสำหรับระบบสื่อสารทางแสงเป็นส่วนใหญ่เท่านั้น จึงทำให้ราคาแผ่นผลึกฐาน InP มีราคาแพง ซึ่งแตกต่างไปจากกรณีของสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างบนแผ่นผลึกฐาน GaAs ที่มีตลาดกว้างกว่า ดังนั้นสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างบนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น InP มีราคาแพงกว่าสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างบนแผ่นผลึกฐาน GaAs ถึงแม้ว่าต้นทุนในการผลิตไม่แตกต่างๆ กันมากนัก โดยตลาดของสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างบนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs ครอบคลุมตลาดของไดโอดเลเซอร์ในเครื่องเล่น CD เครื่องเล่น LD เครื่องเล่น DVD เครื่องพิมพ์ ระบบสื่อสารทางแสงระยะสั้นและสิ่งประดิษฐ์อิเล็กตรอนในอุปกรณ์สื่อสารย่านความถี่สูงซึ่งมีมูลค่าส่วนแบ่งในตลาดที่สูงกว่ามากหรือในอีกความหมายหนึ่งก็คือปริมาณการบริโภคแผ่นผลึก GaAs ที่มีมากกว่าของ InP จึงทำให้ราคาแผ่นผลึกฐาน GaAs จึงมีราคาถูกกว่าแนวความคิดของการวิจัยของการเตรียมแผ่นผลึกฐาน InP บนแผ่นผลึกฐานของ GaAs จึงเกิดขึ้นในราวปี ค.ศ.1976 โดยกลุ่มของ Prof. M. Kimata แห่งมหาวิทยาลัยวาเซดา (Waseda University) ประเทศญี่ปุ่น [5] ซึ่งประสบความสำเร็จในการปลูกผลึก InP บนแผ่นผลึกฐานของ GaAs ด้วยวิธีการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy : MBE) แต่การวิจัยดังกล่าวนี้มิได้มีการพัฒนาต่อไป เนื่องจากขีดจำกัดของเทคโนโลยี MBE ในยุคนั้นสาเหตุจากลำโมเลกุลของ P (Phosphorous) ที่ได้จากการเผา P นั้นมีค่าความดันของไอ (Vapor Pressure) สูงมากจึงไม่สามารถควบคุมได้ง่ายและ P ส่วนที่เหลืออยู่ภายในระบบจะกลายสภาพเป็นสารหรือวัสดุที่ไวต่อการเกิดปฏิกริยาในการติดไฟได้ง่ายเมื่อถูกอากาศ [6] รวมถึงวิธีการเผาสารประกอบ InP ให้สลายตัวเพื่อให้ได้ลำโมเลกุลของ P ก็ไม่ได้รับความนิยม เนื่องจากสารประกอบ InP ที่เป็นวัสดุดิบที่ใช้มีราคาแพงมากและไม่สามารถควบคุมคุณภาพของผลึกที่ปลูกได้ [7] จนกระทั่งเทคนิคการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากสถานะ

ไอของสารประกอบอินทรย์โลหะได้ถูกพัฒนาขึ้น (Metal-organic Vapor phase Epiatxy: MOVPE) แนวความคิดของการวิจัยการปลูกผลึก InP บนผลึกฐานของ GaAs และการสร้างสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างจากสารประกอบที่มีค่าคงตัวผลึกเข้ากับ InP โดยวิธี MOVPE ก็ได้กลับมาได้รับความสนใจอีกครั้ง [8-10] แต่เนื่องจากระบบ MOVPE เป็นระบบที่ใช้ก๊าซต่างๆ ที่เป็นอันตราย จึงทำให้การวิจัยในเรื่องดังกล่าวจะอยู่ในเฉพาะกลุ่มของบริษัทฯ ซึ่งมีสถานที่ตั้งของระบบเครื่องมืออยู่ในที่ห่างไกลจากชุมชน เพื่อความปลอดภัยและหลีกเลี่ยงความสูญเสียในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุขึ้น

อย่างไรก็ดีเทคนิคการปลูกผลึก InP ด้ววิธีการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุลก็ได้มีการพัฒนาวิธีการสำหรับการปลูก InP แต่ก็ยังใช้ก๊าซ PH_3 เป็นวัตถุดิบ [11] ซึ่งก๊าซดังกล่าวก็มีอันตรายไม่น้อยกว่าก๊าซในระบบ MOVPE เช่นกัน ต่อมาได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ที่เรียกว่า Cracker Valve Effusion Cell [12] สำหรับการกำเนิดไอของ P_2 ในระบบ MBE โดยการเผาฟอสฟอรัสให้กลายเป็นไอของ P_4 และให้ไอดังกล่าวนี้ผ่านขดลวดที่มีความร้อนสูงและแตกตัวกลายเป็นไอ P_2 แต่เนื่องจากชุดอุปกรณ์ดังกล่าวนี้มีราคาแพง การบำรุงรักษาสามารถทำได้ยาก ปัญหาอีกประการหนึ่งของ Cracker Valve Effusion Cell คือค่าอัตราส่วนของ P_2/P_4 มีค่าต่ำ ทำให้คุณภาพของผลึกสารประกอบ P ยังมีข้อจำกัดอยู่ ดังนั้นทำให้อุปกรณ์ดังกล่าวนี้มีความซับซ้อนอย่างมาก แต่เมื่อไม่นานมานี้ได้มีเทคนิคของการเผาสารประกอบ GaP ใน K-Cell ให้สลายตัวออกเป็น Ga และ P_2 และทำการการกักไอของ Ga ไว้ภายในและทำปฏิกริยากับ P_2 เป็นสารละลายที่อยู่ในของสภาวะก๊าซที่สมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ภายใน K-Cell โดยมีไอ P_2 ส่วนเกินที่เกิดขึ้นและถูกปล่อยออกมา ซึ่งกลไกเกิดขึ้นได้โดยมี Ga-Trapping Cap [13] ที่มีลักษณะพิเศษเป็นอุปกรณ์ให้เกิดเงื่อนไขกล่าวนี้ ในประมาณต้นปี พ.ศ. 2540 ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ความช่วยเหลือทางจาก Dr. K. Eberl แห่งประเทศเยอรมัน ซึ่งเป็นผู้ประดิษฐ์และพัฒนาสิ่งประดิษฐ์ Ga-trapping cap ดังกล่าวในการติดตั้งชุดอุปกรณ์ดังกล่าวเข้าในระบบ MBE ที่มีอยู่ ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อเป็นการเริ่มต้นในการศึกษาเทคนิกการปลูกผลึกอิพิแทกซีของสารประกอบกึ่งตัวนำของ InP, GaP และ InGaP และทางคณะผู้วิจัยก็ได้ประสบความสำเร็จในการปลูกผลึกของ GaP บนผลึกฐานเริ่มต้น GaAs ด้วย MBE แต่สารประกอบ GaP นี้มีความสำคัญต่อการพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารทางแสงน้อยกว่าสารประกอบ InP และที่ผ่านมาห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้ทำการวิจัยเทคนิกการปลูกผลึกอิพิแทกซีของ InP บนแผ่นผลึกฐาน GaAs ด้วยวิธีการปลูกผลึกอิทิแทกซี MBE [14]

จากงานวิจัยที่ได้ดำเนินผ่านมา คณะผู้วิจัยประสพความสำเร็จในการปลูกผลึก InP ที่ไม่มีการเจือสารบนแผ่นผลึกฐาน (100) GaAs แต่ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์นั้นความสามารถในการควบคุมคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของผลึกของชั้นผลึกโครงสร้างมีความจำเป็นอย่างยิ่ง จึงจำเป็นต้องพัฒนาเทคนิการเจือสาร ซึ่ง Si เป็นสารเจือปนแบบผู้ให้ (Donor Impurity) สำหรับสารประกอบกึ่งตัวนำ III-V ในการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุล (MBE) เนื่องจาก Si มีข้อดีหลายประการคือคุณสมบัติการแพร่ซึมที่มีค่าต่ำ การสะสมที่

ผิวต่ำ (Surface Segregation) เป็นธาตุเฉื่อยและไม่เป็นพิษ ดังนั้น Si จึงเป็นสารเจือปนสำหรับการปลูกผลึกวิธี MBE ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย

ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงดำริที่จะริเริ่มการพัฒนาเทคนิคการปลูกผลึก InP ที่มีการเจือปน Si บนผลึกฐานเริ่มต้น GaAs ด้วยวิธีปลูกผลึก MBE เพื่อให้เกิดความต่อเนื่องจากงานวิจัยที่ได้ดำเนินการอยู่และสร้างองค์ความรู้และเทคโนโลยีทางวัสดุ อันเป็นหัวใจสำคัญของการพัฒนาเทคนิคการสร้างสิ่งประดิษฐ์เปล่งแสงและตัวตรวจรับแสงในย่านความยาวคลื่น 1.3 และ 1.5 μm ต่อไป ซึ่งคณะผู้วิจัยมีประสบการณ์ในการวิเคราะห์ ออกแบบ และสร้างไดโอดเลซอร์ในย่าน 1.5 μm มาแล้ว โดยงานวิจัยที่ได้ทำผ่านมานั้นเป็นการวิจัยในกรณีที่ผลึกฐานเริ่มต้นและโครงสร้างของผลึกในสิ่งประดิษฐ์มีค่าคงตัวไม่แตกต่างกัน (ดูผลงานในส่วนที่ 2 ในหัวข้อผลงานในอดีตของหัวหน้าโครงการ) และความสำคัญของโครงงานนี้คือการสร้างเทคโนโลยีทางวัสดุขึ้นภายในประเทศไทยและองค์ความรู้นี้ทางคณะผู้วิจัยสามารถถ่ายทอดแก่สาธารณะผ่านระบบการศึกษาต่อไป ซึ่งจะสร้างและฝึกฝนให้ได้บุคลากรที่มีความรู้ในด้านนี้ที่มีความสามารถรองรับเทคโนโลยีการสื่อสารทางแสงผ่านเส้นใยนำแสงซึ่งปัจจุบันมีความสำคัญต่อระบบอินเตอร์เน็ต ระบบเครือข่ายความเร็วสูง ระบบโทรศัพท์ระหว่างประเทศและระบบทางด่วนข้อมูลอย่างมาก

สำหรับรายงานวิจัยนี้มีเนื้อหาสาระดังนี้ ในบทที่ 2 กล่าวถึงความรู้พื้นฐานของการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุล ได้แก่ รายละเอียดของโครงสร้างชุดระบบการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุล กลไกการเกิดผลึกในการปลูกผลึกอิพิแทกซีจำลำโมเลกุล โครงสร้างและคุณสมบัติเชิงไฟฟ้าของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V การวัดคุณสมบัติเชิงไฟฟ้าวิธี van de PAUW ในบทที่ 3 กล่าวถึงรายละเอียดและขั้นตอนการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแหล่งจ่าย Si ที่มีต่อคุณสมบัติของผลึก InP ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐาน GaAs ในบทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ ในบทที่ 5 เป็นการสรุปผลการทดลอง และในบทที่ 6 ข้อเสนอแนะจากงานวิจัยนี้และแนวทางในการพัฒนาเพื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปใช้งานต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
ความรู้พื้นฐาน

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

2.1 การปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมกุล (Molecular Beam Epitaxy : MBE)

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

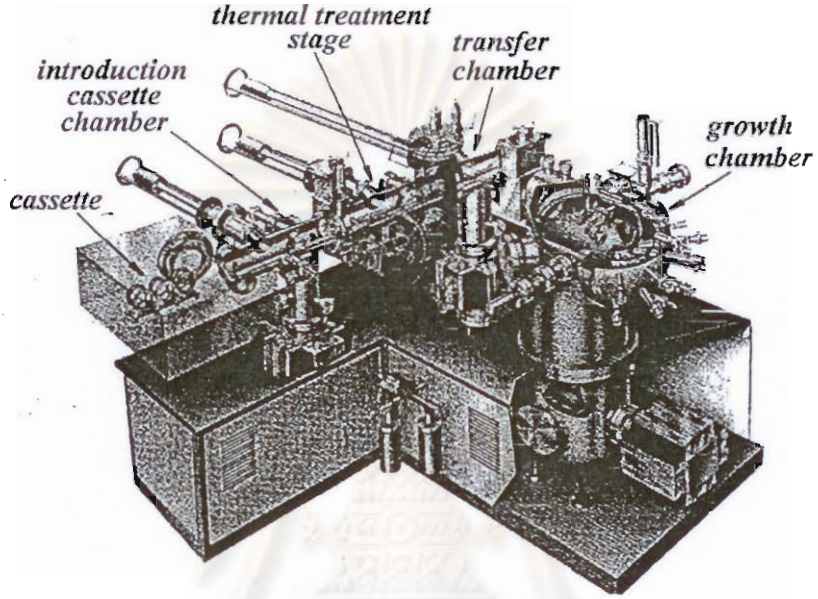
2.1.1 ชุดระบบการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุล

ชุดระบบการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุลที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชุดระบบ MBE ของบริษัท RIBER รุ่น 32 P ซึ่งมีลักษณะเป็น โมดูล (Module) โดยประกอบด้วยส่วน Introduction Chamber ส่วน

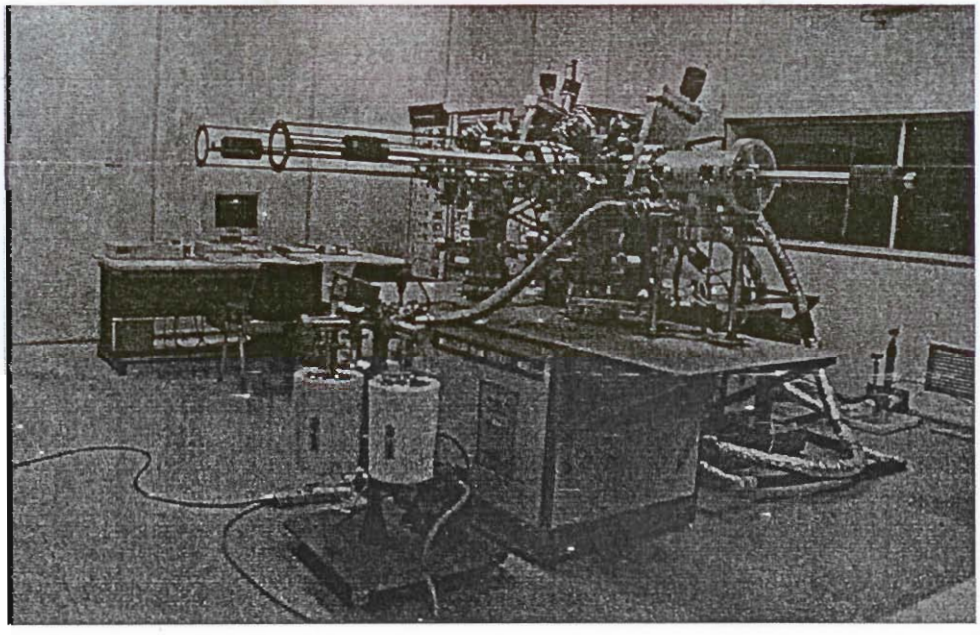
Thermal Treatment Stage ส่วน Transfer Buffer Chamber และส่วน Growth Chamber ดังแผนภาพตามรูปที่ 2.1 โมดูลแต่ละส่วนที่ต่อกันนี้มี Gate Valve ต่อขั้นกลางระหว่างโมดูล โดยจะเปิด Gate Valve ให้ Cassette ที่เป็น Carrier ในการบรรทุก Substrate holder ผ่านเข้าออกจากโมดูลส่วนหนึ่งไปยังโมดูลอีกส่วนหนึ่ง และเพื่อปิดแยกให้โมดูลแต่ละส่วนเป็นอิสระจากกันและให้การรักษาสภาวะสุญญาก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

นอกจากนี้ในส่วน Growth chamber ยังมีอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ชุด Reflection High Energy Electron Diffraction หรือ RHEED, Gas Analyzer หรือ Quadupole Mass Spectrometry และ Ionization Gauge เป็นอุปกรณ์หลักพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อระบบ MBE โดย RHEED นี้เป็นเครื่องมือในการตรวจสอบโครงสร้างผิว นอกจากนี้ RHEED ยังสามารถใช้ในการควบคุมค่าความหนาของชั้นผลึกที่ปลูกได้จากปรากฏการณ์ RHEED intensity oscillation ที่เกิดขึ้นในเทคนิค Phase-locked epitaxy หรือ PLE [15] และ Migration enhanced epiatxy หรือ MEE [16] ที่สามารถควบคุมค่าความหนาได้ในระดับ Monolayer ของผลึกที่ปลูก ส่วน Gas analyzer เป็นเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบสภาวะบรรยากาศภายใน Growth chamber และ Ionization gauge เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดเทียบค่าความดันไอของลำโมเลกุลต่างๆ ที่ใช้ในการปลูกผลึกแต่ละครั้ง เพื่อปรับแต่งเงื่อนไขค่าความดันไอขององค์ประกอบต่างๆ ในการปลูกผลึกแต่ละครั้งให้

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



รูปที่ 2.1 ภาพโครงสร้างชุดระบบ MBE ของ RIBER รุ่น 32 P



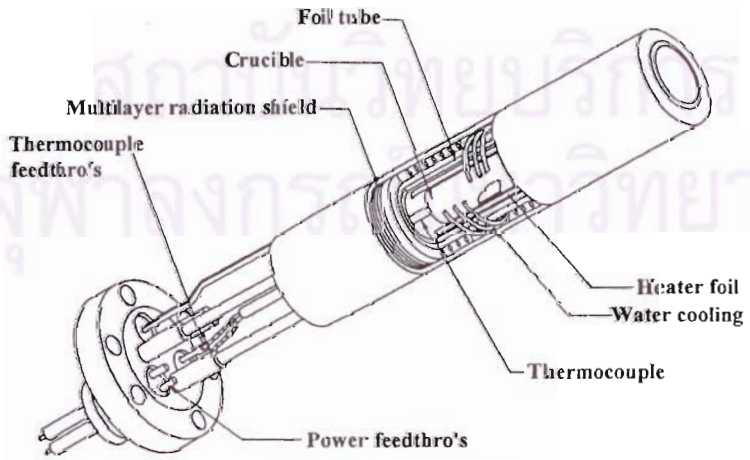
รูปที่ 2.2 ชุดระบบ MBE ที่ติดตั้งในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.2 Effusion Cell

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

2.1.2.1 Knudsen Cell

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



รูปที่ 2.3 แผนภาพโครงสร้าง Knudsen Cell

สำหรับการควบคุมปริมาณของจำนวนโมเลกุลที่พ่นออกจาก Knudsen Cell ควบคุมได้จากอุณหภูมิของขดลวดความร้อนภายใน Knudsen Cell ซึ่งปริมาณของจำนวนโมเลกุลของสารที่พ่นออกจาก Knudsen Cell สามารถคำนวณได้จากสมการ

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

โดย p คือค่าความดันไอของธาตุที่อุณหภูมิกำหนดมีหน่วยเป็นทอรร์ (Torr)

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

l คือค่าระยะห่างจากปากช่องเปิดของ Knudsen Cell ถึงผิวหน้าของผลึกฐานมีหน่วยเป็น ซม.

M คือค่ามวลโมเลกุลขององค์ประกอบที่เป็นวัตถุดิบมีหน่วยเป็น AMU

T คือค่าอุณหภูมิองศาสมบูรณ์ของภาชนะบรรจุใน Knuden Cell มีหน่วยเป็นเคลวิน (K)

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

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

โดย R คืออัตราการเกิดผลึกมีหน่วยเป็น ไมครอน/ชั่วโมง

α คือค่าคงที่ ซึ่งค่าคงที่นี้ขึ้นกับค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกและทิศทางผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน

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

อย่างไรก็ตาม Knudsen cell นั้นมีข้อจำกัดสำหรับสารหรือธาตุบางชนิด เนื่องจากไม่เหมาะสมสำหรับในการผลิตลำโมเลกุลของสารหรือธาตุที่มีค่าความดันไอสูงได้ ตัวอย่างเช่น P, S, Se เป็นต้น เนื่องจากการควบคุมค่าความดันไอทำได้ยาก ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนา Knudsen Cell ที่มีคุณสมบัติพิเศษ

ได้แก่ Valved Cracker Cell สำหรับสารเหล่านี้ แต่อย่างไรก็ดี Valved Cracker Cell นั้นมีราคาแพงและโครงสร้างซับซ้อน สำหรับสิ่งประดิษฐ์อีกชนิดหนึ่งที่ได้ออกแบบมาเพื่อใช้ร่วมกับ Knudsen cell แบบธรรมดานี้ เพื่อใช้ในการผลิตลำโมเลกุลชนิด Dimer ของ As (As_2) และ P (P_2) ได้แก่ Ga-trapping cap วัตถุดิบที่ใช้ในการนี้เป็นสารประกอบ GaAs และ GaP เนื่องจากมีราคาถูกและอุณหภูมิของการสลายตัวมีค่าไม่สูงเกินไป และค่าความแตกต่างของค่าความดันไอของสารประกอบในสภาวะสมดุลที่มีค่าต่ำกว่าไอของ P_2 ที่อุณหภูมิเดียวกัน โดยอุณหภูมินี้มีค่าสูงกว่าค่าอุณหภูมิจุดเกิดของสารประกอบ Ga-trapping cap นั้นทำหน้าที่กักไอของสารประกอบ GaP ไว้ภายในภาชนะหรือ Crucible ของ Knudsen cell โดย Ga-trapping cap ช่วยในการรักษาสภาวะสมดุลของไอในสภาวะที่เกิดกลไกการสลายตัว (Decomposition) ของสารประกอบ สำหรับการสลายตัวของสารประกอบดังกล่าวนี้เกิดขึ้นจากพลังงานความร้อนหรือการทำให้สารประกอบอยู่ในสภาวะอุณหภูมิสูง ซึ่งในสภาวะสมดุลนี้สารประกอบกลุ่ม III-V มีจำนวนหรือปริมาณของอะตอมธาตุหมู่ III จำนวนมากกว่าธาตุหมู่ V และในสภาวะอุณหภูมิสูงนี้ธาตุหมู่ V อยู่ในรูปของ Dimer (V_2) เป็นส่วนใหญ่ แต่เนื่องจากค่าความดันไอของโมเลกุล Dimer ของหมู่ V นั้นมีค่าสูงกว่าทำให้โมเลกุลของ Dimer ที่เกิดขึ้นถูกพ่นออกมาเป็นโมเลกุลหลักเพียงอย่างเดียว โครงสร้างของ Ga-trapping cap ตามรูปที่ 2.4

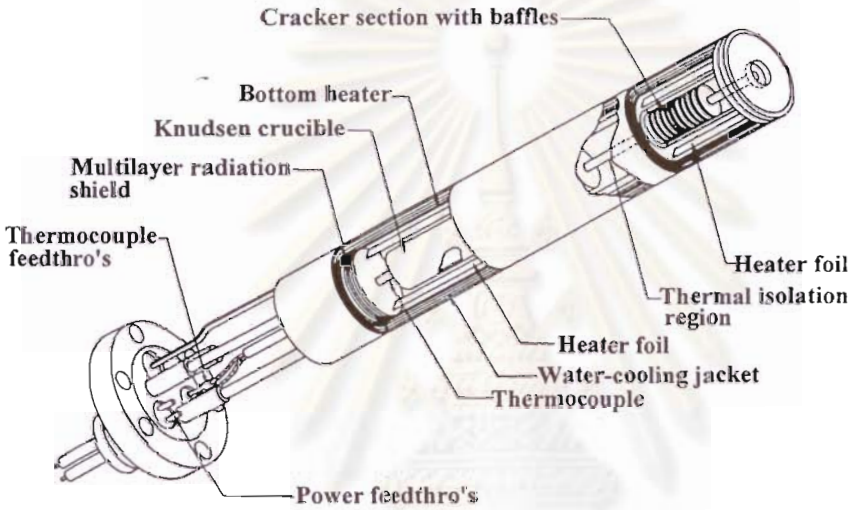
Gallium Trapping Cap System

รูปที่ 2.4 ภาพโครงสร้างของ Ga-trapping cap [17]

2.1.2.2 Cracker Cell

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

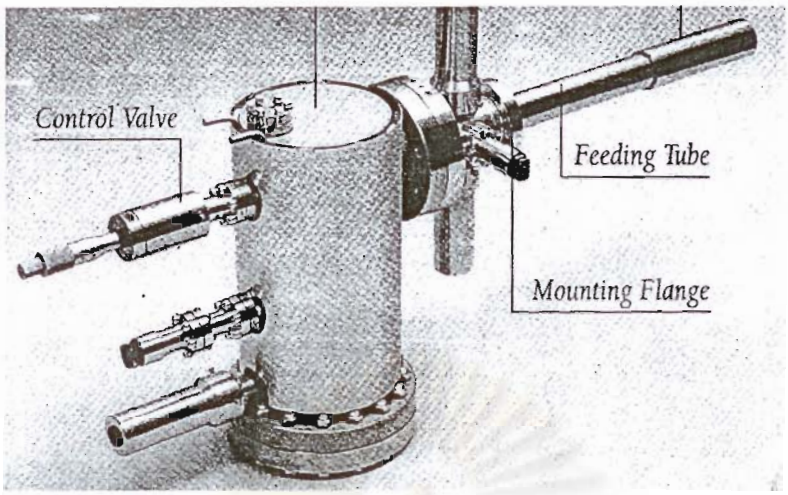
เป็นโมเลกุล Tetramer) โครงสร้างของ Cracker Cell มีลักษณะคล้ายคลึงกับ Knudsen Cell แต่ Cracker Cell นั้นมี Cracking Zone ซึ่งเป็นส่วนของขดลวดความร้อนที่ให้อุณหภูมิสูงในช่วง 800-1000°C เพื่อทำให้โมเลกุล Tetramer แตกตัวเป็นโมเลกุล Dimer และในการออกแบบนั้นมีข้อควรระวังคือต้องให้ส่วน Cracking zone อยู่ห่างจาก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



รูปที่ 2.5 แผนภาพโครงสร้างของ Cracker Cell

2.1.2.3 Valved Cracker Cell

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

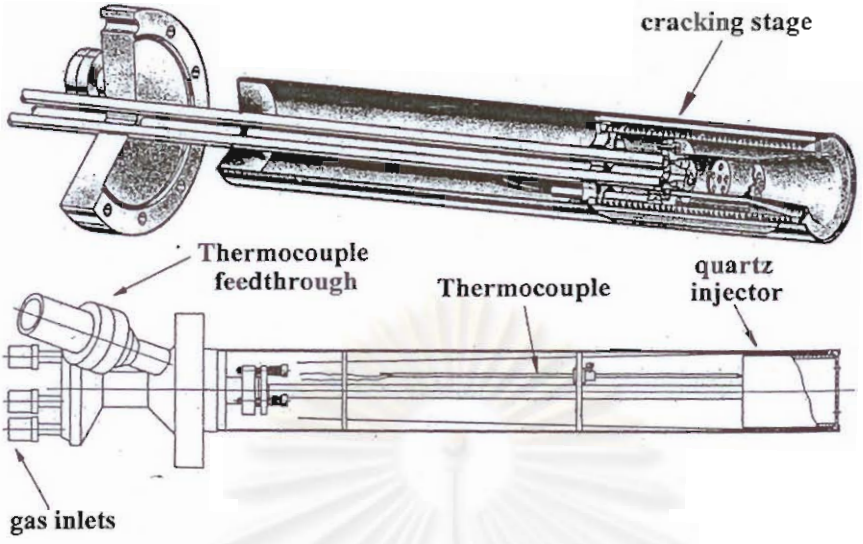


รูปที่ 2.6 ภาพของ Arsenic Valve Cracker Cell [18]

2.1.2.4 Gas Injector Cell

Gas Injector Cell เป็น Effusion Cell ที่ใช้ก๊าซเป็นวัตถุดิบ ซึ่งอยู่ในรูปของ Hydride สำหรับแหล่งจ่ายธาตุหมู่ V เช่น PH_3, AsH_3 และ Organic compound สำหรับแหล่งจ่ายธาตุหมู่ III ตัวอย่างได้แก่ TMGa และ TMIn เป็นต้น โดยโครงสร้างของ Gas injector cell มีลักษณะคล้ายคลึงกับ Knuden cell ต่างกันแต่ขดลวดความร้อนที่ใช้นั้นมีอุณหภูมิสูงกว่า เพื่อให้ก๊าซที่ไหลผ่านแตกตัวออกเป็นโมเลกุลแบบ Dimer หรือ Tetramer สำหรับโมเลกุลธาตุหมู่ V และอะตอมเดียวสำหรับธาตุหมู่ III นั้นสามารถควบคุมได้จากค่าอุณหภูมิในส่วน Cracking zone สำหรับข้อดีของการใช้ก๊าซเป็นวัตถุดิบคือความต่อเนื่องและความสะดวกในการเติมก๊าซวัตถุดิบ โดยไม่มีความจำเป็นในการทำให้ระบบรั่วก่อนการเติมวัตถุดิบเหมือนระบบ MBE ทั่วๆ ไป เนื่องจากวัตถุดิบนั้นถูกเก็บไว้ในท่อก๊าซที่ต่อเข้าระบบ MBE ซึ่งสามารถปิดท่อของระบบการป้อนก๊าซที่ต่อเข้าระบบและทำการเปลี่ยนท่อก๊าซได้ โดยไม่มีผลกระทบต่อสภาวะสุญญากาศของ Growth chamber แต่อย่างไรก็ตามการใช้ก๊าซเป็นวัตถุดิบนั้นมีความจำเป็นที่ต้องติดตั้งระบบปั๊มปั๊สุญญากาศที่มีขนาดกำลังสูงเพียงพอและต้องเป็นปั๊มปั๊ชนิดที่ดงทนต่อการกัดกร่อนของก๊าซเหล่านั้น

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 [19]

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบชนิด Effusion Cell และชนิดของลำโมเลกุลที่ได้จากวัตถุดิบชนิดต่างๆ

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

2.1.3.1 Reflection High Energy Electron Diffraction (RHEED)

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

สำหรับหน้าที่หลักสำคัญของ RHEED ที่สรุปได้มีดังนี้

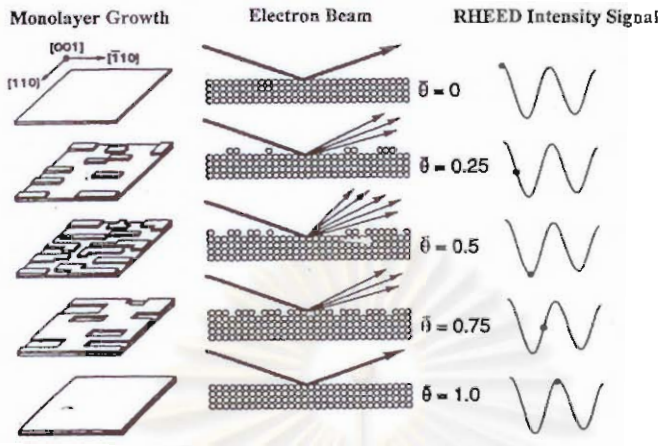
1.การตรวจสอบผิวหน้าแผ่นผลึกฐานในขณะที่ทำความสะอาดด้วยความร้อน (Thermal Cleaning) ก่อนการปลูกผลึก

2. การควบคุมสภาวะเริ่มต้นของการปลูกผลึก

3. การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผิวในขณะที่ทำการปลูกผลึก

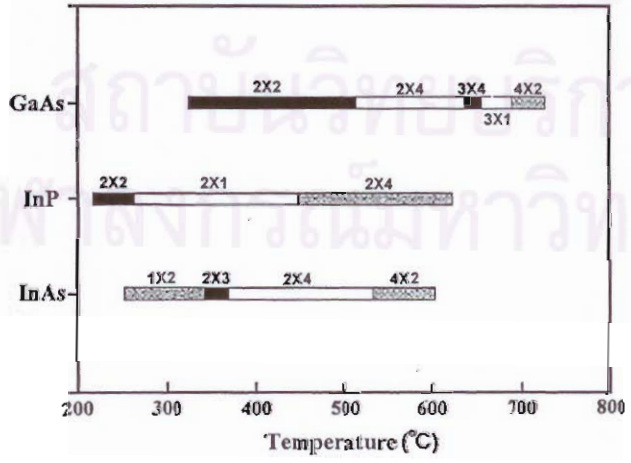
นอกจากนี้ RHEED ยังสามารถใช้ในการสอบเทียบค่าอัตราการปลูกผลึก (Growth Rate Calibration) ได้ เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสง RHEED ในขณะที่ทำการปลูกผลึก ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามรูปที่ 2.8 ตามปกติผิวหน้าของผลึกก่อนการปลูกผลึกมีความเรียบ ทำให้อิเล็กตรอนสามารถสะท้อนผ่านผิวหน้าผลึกที่มีอะตอมเรียงตัวเป็นระเบียบ ซึ่งความเข้มของอิเล็กตรอนที่สะท้อนผ่านไปในกรณีนี้มีค่าความเข้มสูงสุด แต่เมื่อการปลูกผลึกเริ่มต้นขึ้นการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสง RHEED มีค่าลดลงในขณะที่ทำการปลูกผลึกนี้เกิดจากการกระเจิง (Scattering) ของลำอิเล็กตรอน อันเนื่องจากผลึกที่เกิดขึ้นนั้นบนผิวหน้าของแผ่นผลึกเกิดการเรียงตัวของก้อนผลึกขนาดเล็ก (Cluster) โดยก้อนผลึกขนาดเล็กที่เกิดขึ้นนั้นมีลักษณะกระจัดกระจายไม่เป็นระเบียบ อันเป็นผลทำให้ความเข้มของลำอิเล็กตรอนมีค่าลดลง จนกระทั่งพื้นที่ของก้อนผลึกขนาดเล็กเหล่านั้นครอบผิวหน้าของผลึกมากกว่าครึ่งหนึ่ง ความเข้มแสงของ RHEED จะกลับมามีความเข้มเพิ่มขึ้นอีก จนมีค่าสูงสุดเมื่อผลึกเรียงเต็มผิวหน้าแผ่นผลึกฐาน ซึ่งความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของความเข้มและค่าความหนาของผลึกที่เกิดขึ้นนี้มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบคลื่นรูปไซน์ (Sine) โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มหนึ่งรอบในการเปลี่ยนแปลงความหนาหนึ่งชั้นโมเลกุล (Monolayer) ด้วยเหตุนี้เองทำให้สามารถควบคุมค่าความหนาของชั้นผลึกที่ได้ในระดับชั้นโมเลกุล โดย RHEED เป็นเครื่องมือสำคัญในเทคนิค PLE และ MEE ซึ่งเป็นนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน อีกทั้งยังเป็นเทคนิคสำคัญในการสร้างโครงสร้าง Quantum Dot แต่อย่างไรก็ดีเทคนิคนี้มีขีดจำกัดคือการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสงไม่ชัดเจนในการปลูกผลึกของสารประกอบบางชนิดและ

การเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสง RHEED นั้นมีลักษณะที่แตกต่างกันไปตามเงื่อนไขในสภาวะที่แตกต่างกันอีกด้วย สำหรับรายละเอียดต่างๆ จะขอไม่กล่าวถึงในที่นี้



รูปที่ 2.8 แผนภาพอธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลงความเข้มของอิเล็กตรอนในขณะทำการปลูกผลึก

นอกจากนี้รูปแบบ (Pattern) ของ RHEED ที่ได้ของผลึกแต่ละชนิดสามารถบ่งบอกถึงช่วงค่าอุณหภูมิของผิวหน้าผลึกได้ด้วยดังตัวอย่างในรูปที่ 2.9 ซึ่งปัจจุบันยังนิยมใช้วิธีนี้ในการตรวจสอบอุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานในการปลูกผลึกวิธี MBE และสามารถใช้ได้กับสารประกอบเกือบทุกชนิด โดยเฉพาะสารประกอบกึ่งตัวนำที่ค่าแถบพลังงานมีค่าน้อยมาก อันเป็นข้อดีที่เหนือกว่าวิธีการวัดด้วย Pyrometer ซึ่งไม่สามารถใช้ได้ในกรณีนี้ [20] แต่อย่างไรก็ดีวิธีการนี้มีความคลาดเคลื่อนมากกว่า 10°C และมีความยุ่งยากในการอ่านรูปแบบของ RHEED ในการวัดเทียบอุณหภูมิ โดยขึ้นกับความชำนาญมากของผู้อ่านเป็นอย่างมาก



รูปที่ 2.9 แผนภาพความสัมพันธ์ของรูปแบบ RHEED และอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐาน (100) GaAs, InP และ InAs ภายใต้ไอของ Dimer [21]

2.1.3.2 Residual Gas Analyzer

Residual Gas Analyzer หรือ Quadupole Mass Spectrometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของอนุภาคที่เป็นก๊าซภายในส่วน Growth Chamber ซึ่งทำให้เราสามารถรู้สภาพบรรยากาศภายในส่วน Growth Chamber นอกจากนี้ Residual Gas Analyzer ยังสามารถใช้วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ (Composition) ของสารประกอบในขณะที่ทำการปลูกผลึกได้เช่นกัน [22] โดยข้อดีของ Residual Gas Analyzer ที่เหนือกว่าการใช้ Ionization gauge คือ Residual Gas Analyzer มีความละเอียดและความแม่นยำสูงกว่า อีกทั้งไม่มีผลของการเสื่อมของความไว (Sensitivity) เช่นเดียวกับ Ionization gauge เมื่อใช้งานไประยะเวลาหนึ่ง

2.1.3.3 อุปกรณ์อื่นๆ ที่สามารถติดตั้งเข้าในระบบ MBE

นอกจาก RHEED, Ionization Gauge และ Residual Gas Analyzer ซึ่งเป็นเครื่องมือหลักพื้นฐานที่ติดตั้งในส่วน Growth Chamber ของระบบ MBE อุปกรณ์อื่นๆ ที่ติดตั้งเพื่อช่วยในการปลูกผลึกสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น Pyrometer เพื่อใช้ในการวัดอุณหภูมิผิวหน้าแผ่นผลึกฐาน Ellipsometor เพื่อใช้ในการควบคุมค่าความหนาและค่าอัตราส่วนของสารประกอบได้แม่นยำยิ่งขึ้น ด้วยลักษณะของระบบ MBE ที่เป็นโมดูลที่มีสภาวะสุญญากาศระดับพิเศษทำให้สามารถต่อระบบ MBE เข้ากับเครื่องมือวิเคราะห์อื่นๆ ได้แก่ Auger Electron Spectroscopy (AES), X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS), Secondary Ion Microscopic Spectroscopy (SIMS), Scanning Tunnelling Microscope (STM) ได้อีกด้วย จึงทำให้เราสามารถวิเคราะห์สมบัติของผลึกที่ปลูกได้อย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว โดยเฉพาะ STM เป็นเครื่องมือที่มีขีดความสามารถในการวิเคราะห์ที่ช่วยให้เราสามารถเข้าใจกลไกต่างๆ ในระดับขนาดของอะตอม [23] 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-ปิดลำโมเลกุลที่พุ่งสู่ผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน เพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการปลูกผลึก
Beam and Growth Monitors	RHEED Quadupole mass spectrometer Ionization gauge	วิเคราะห์ข้อมูลโครงสร้างผิว ข้อมูลค่าความดันไอของลำโมเลกุล และค่าอัตราส่วน
Process Environment	Multichamber UHV system	ระบบ Multichamber ช่วยให้สามารถลดปริมาณของ residual gas ที่ active (ได้แก่ O_2, CO_2, H_2O, C_2O) ทำให้สามารถปลูกผลึกที่มีความบริสุทธิ์สูง

2.2 กลไกการเกิดผลึกของการปลูกผลึกอิพิแทกซีวิธี MBE

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

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

ก) ในกรณีที่อุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีค่าสูงกว่าจุดระเหิดของธาตุหมู่ V ทำให้เกิดการปล่อยคายอะตอมของธาตุหมู่ V ออกจากผิวแผ่นผลึกฐาน

ข) ในกรณีที่อุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีค่าสูงขึ้นและมีค่าสูงกว่าจุดระเหิดของของธาตุหมู่ III ทำให้เกิดการปล่อยคายอะตอมของธาตุหมู่ III ออกจากผิวแผ่นผลึกฐาน

ตารางที่ 2.3 อุณหภูมิจุดระเหิดของสารประกอบ III-V ชนิดต่างๆ [24]

สารประกอบ	T_{CS}(°C)	$T_{max(V4)}$(°C)	$T_{max(V2)}$(°C)	J_{V4}/J_{III}
AlP	>700	640	700	~1.0/1
GaP	670	490	750	~1.0/1
InP	363	>450	>500	~3.0/1
AlAs	>750	630	750	~1.5/1
GaAs	~620	480	>760	~1.0/1
InAs	~370	~450	~550	~5.0/1

T_{CS} หมายถึงอุณหภูมิของการระเหิด (Congruent Sublimation Temperature)

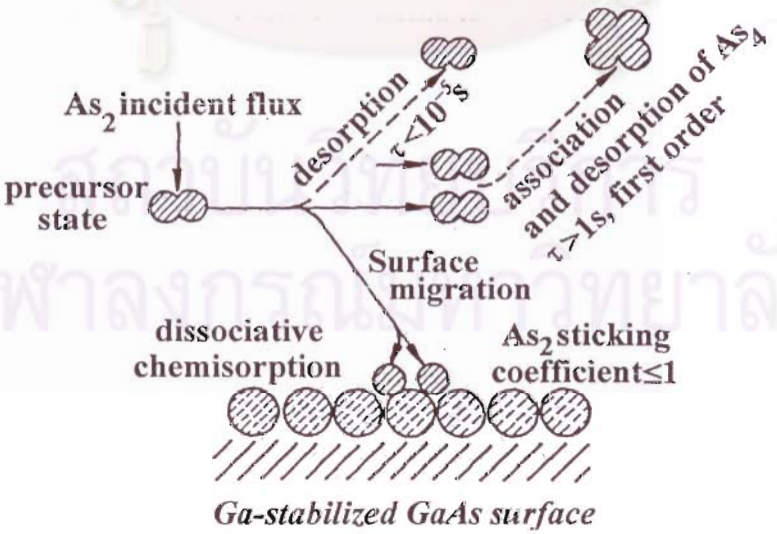
$T_{max}(V_4)$ หมายถึงอุณหภูมิสูงสุดภายใต้บรรยากาศ tetramer โมเลกุลของธาตุหมู่ V

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

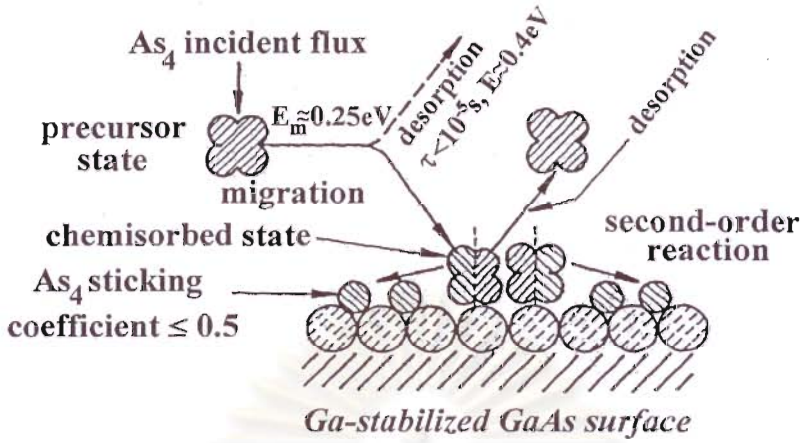
J_{V4}/J_{III} หมายถึงค่าอัตราส่วน flux ของ V/III ที่เกิดจากการสลาย (Decomposition)

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

การอธิบายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุลนั้นเราสามารถใช้แบบจำลองตามรูปที่ 2.10 และ 2.11 อันเป็นตัวอย่างของ GaAs ซึ่งปฏิกิริยานั้นสามารถเกิดขึ้นได้ 2 กรณีคือกรณีของ Ga-As_2-(100) GaAs และกรณีของ Ga-As_4-(100) GaAs สำหรับในกรณี Ga-As_2-(100) GaAs ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเริ่มต้นจากอะตอมของ Ga เกาะติดบนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานเรียงตัวเป็นชั้น (layer) จากนั้นโมเลกุล As_2 ทำปฏิกิริยากับอะตอมของ Ga โดยแตกตัวเป็นอะตอม As และเกาะตัวบนชั้นอะตอม Ga สำหรับอัตราการเกาะของโมเลกุล As_2 ที่ผิวหน้าแผ่นผลึกฐานขึ้นกับค่า Flux ของ Ga สำหรับโมเลกุล As_2 ส่วนเกินนั้นจะระเหิดไปในรูปของโมเลกุล As_2 และ As_4 ทำให้การเกิดผลึกเป็นแบบ Stoichiometric Growth ดังในรูปที่ 2.10 สำหรับกรณี Ga-As_4-(100) GaAs นั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีความซับซ้อนกว่าโดยโมเลกุล As_4 คู่หนึ่งทำปฏิกิริยากับอะตอม Ga ที่อยู่ใกล้เคียง ซึ่งอะตอม Ga ได้เกาะอยู่ที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากโมเลกุล As_4 แต่ละโมเลกุลแตกตัวให้อะตอม As จำนวน 2 อะตอมเกาะลงบนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานด้วยการดูดซับ (adsorp) จากอะตอมของ Ga โดยจำนวนอะตอมของ As ที่เกาะลงบนผิวหน้ามีสัดส่วนเทียบกับจำนวนอะตอมของ Ga ที่เกาะที่ผิวหน้า ส่วนอะตอม As ส่วนที่เหลือจำนวน 4 อะตอมนั้นจะรวมตัวกันเป็นโมเลกุล As_4 และถูกปล่อยคาย (Desorp) ออกจากผิวไป ดังนั้นในกรณีนี้จึงมีความจำเป็นที่ต้องให้ค่าความหนาแน่นของโมเลกุล As_4 หรือ Flux ของ As_4 (J_{As4}) มีค่ามากกว่าค่าความหนาแน่นของโมเลกุล Ga หรือ Flux ของ Ga (J_{Ga}) เพื่อให้จำนวนโมเลกุล As_4 มีจำนวนมากเพียงพอสำหรับปฏิกิริยาที่มีส่วนที่เกาะเรียงตัวในผลึกและส่วนที่ปล่อยคายออก ในขณะที่ทำการปลูกผลึกนั้นอะตอมของ As สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนหนึ่งที่เกาะลงบนผิว (Adsorp) ของอะตอม Ga เรียงตัวเป็นโครงผลึก และอีกส่วนหนึ่งที่ถูกปล่อยคาย (Desorp) ออกมา ซึ่งเป็นส่วนที่สูญเสียไปและการสูญเสียนี้มีอัตราเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีค่าสูงขึ้น



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



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

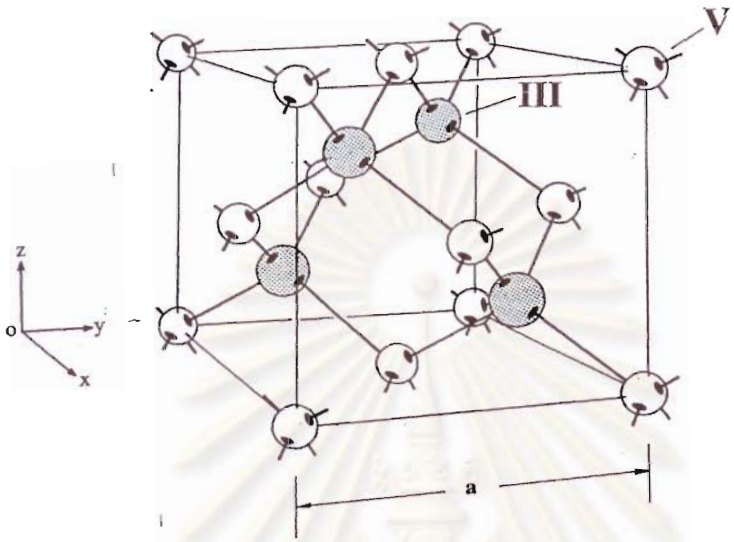
2.3 สารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V

นับตั้งแต่ทศวรรษที่ 50 ได้มีการค้นพบสารประกอบกึ่งตัวนำชนิดสองธาตุ (Binary) ของกลุ่ม III-V และคุณสมบัติต่างๆ ของสารประกอบเหล่านี้มีสมบัติทางกายภาพที่หลากหลายตามชนิดและองค์ประกอบของสารประกอบ นับตั้งแต่ค่าแถบพลังงาน (Band Energy Gap) ในช่วง 0.18-2.42 eV ค่าดัชนีหักเห ฯลฯ เป็นต้น ต่อมาในทศวรรษที่ 60 ได้มีการพัฒนาวิธีการเตรียมของสารประกอบเหล่านี้เพื่อประยุกต์ใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ และเทคนิคการปลูกผลึกต่างๆ ได้เริ่มต้นขึ้นในช่วงนี้ การปลูกผลึกอิพิแทกซีในยุคนี้ส่วนใหญ่นั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อการสร้างสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ 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) ได้แก่ ผลึกเพชร ผลึก Si และ ผลึก Ge โดยการเรียงตัวของอะตอมของธาตุหมู่ III และ V เรียงตัวสลับกันเป็นชั้นๆ ไปตามทิศทาง (100) ในโครงผลึก ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมในโครงสร้างนี้เป็นแบบโควาเลนท์ (Covalent bond) และระยะห่างระหว่างอะตอมนั้น

ขึ้นกับชนิดของอะตอมที่มาประกอบกันเป็นสารประกอบในโครงผลึก ดังนั้นตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่เป็นคุณสมบัติเฉพาะของสารประกอบแต่ละชนิดคือ ค่าคงตัวผลึก (Lattice constant : a) ซึ่งสารประกอบแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.4



รูปที่ 2.12 แผนภาพโครงสร้างแบบ Zincblende

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

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

2.3.2 คุณสมบัติของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V

เนื่องจากสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V นั้นมีคุณสมบัติที่หลากหลาย โดยขึ้นกับองค์ประกอบและสัดส่วนปริมาณของธาตุที่ประกอบกันขึ้นเป็นสารประกอบ ตามปกติแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นส่วนใหญ่นั้นเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำชนิด 2 ธาตุ (Binary) ซึ่งมีสมบัติทางกายภาพเฉพาะตัว เนื่องจากตัวแปรขององค์ประกอบมีจำนวนน้อยที่สุด ดังนั้นในการสร้างแผ่นผลึกฐานจึงนิยมทำจากสารประกอบ 2 ธาตุ แต่สมบัติที่จำกัดของสารประกอบชนิด 2 ธาตุที่ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในบางกรณี กุญแจสำคัญคือสารประกอบชนิด 3 ธาตุและ 4 ธาตุได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างหัวต่อเฮเทโร (Heterojunction) โดยมีค่าคงตัวผลึกเข้าได้กับแผ่นผลึกฐาน เนื่องจากค่าแถบพลังงานหรือค่าดัชนีหักเหที่มีค่าแตกต่างกันไป อันเป็นผลทำให้มีความสะดวกในการออกแบบสร้างสิ่งประดิษฐ์และสามารถกำหนดวัสดุที่มีความเหมาะสมกับสิ่งประดิษฐ์ได้ สำหรับค่าตัวแปรต่างๆ ของสารประกอบกึ่งตัวนำตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 2.4 และ 2.5

ตารางที่ 2.5 ค่าแถบพลังงานของตัวอย่างสารประกอบชนิด 3 ธาตุและ 4 ธาตุ [23]

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

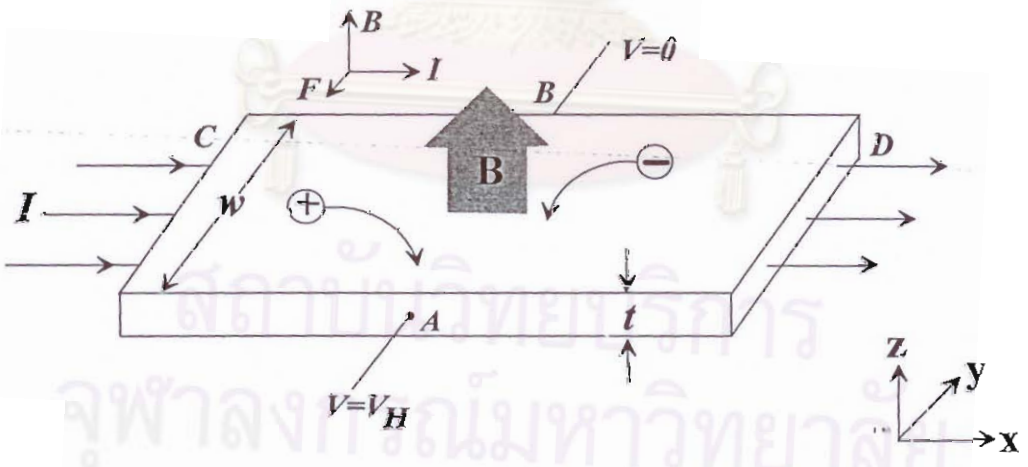
2.4 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าวิธี van der PAUW

วิธีการวัดของ van der PAUW เป็นวิธีการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่ได้ประยุกต์มาจากปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำและสามารถวัดหาค่าตัวแปรต่างๆ ได้แก่ชนิดของพาหะนำไฟฟ้าส่วนใหญ่ (Majority Charge Carrier) ค่าความหนาแน่นพาหะนำไฟฟ้า (Carrier Concentration) และค่าความคล่องตัวของพาหะนำไฟฟ้า (Carrier Mobility) แต่อย่างไรก็ตามการคำนวณจากการวัดวิธีดังกล่าวนี้จำเป็นที่เราจะต้องรู้ค่าสภาพนำไฟฟ้า (Conductivity) หรือค่าสภาพต้านทาน (Resisitivity) ในปัจจุบันวิธีการวัดของ van der PAUW มีความสำคัญอย่างมากต่ออุตสาหกรรมวัสดุและสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำจนเป็นที่ยอมรับให้เป็นวิธีมาตรฐาน เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่ายสะดวกและผลการวัดที่แม่นยำ

2.4.1 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)

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

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



รูปที่ 2.13 แผนภาพปรากฏการณ์ฮอลล์

เนื่องจากแรงกระทำที่มีต่อประจุนำไฟฟ้าในสภาวะสมดุล ทำให้เกิดจากสนามไฟฟ้าในแกน y ตามสมการ

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

ในทางปฏิบัติเราสามารถวัดค่าสนามไฟฟ้าจากค่าแรงดันฮอลล์ (Hall Voltage) ที่เกิดขึ้น ในกรณีของพาหะส่วนใหญ่ที่เป็นโฮลตามความสมพันธ์

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

สำหรับในกรณีที่พาหะส่วนใหญ่เป็นอิเล็กตรอน สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นมีทิศทางในทางตรงกันข้าม ซึ่งวิธีการวัดนี้ทำให้เราสามารถรู้ชนิดของพาหะประจุนำไฟฟ้าได้ จากสมการข้างต้น เราสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นหรือค่าความเข้มข้นพาหะในกรณีของพาหะส่วนใหญ่ที่เป็นโฮลได้จาก

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

จากสมการของค่าสภาพต้านทาน (Resistivity)

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

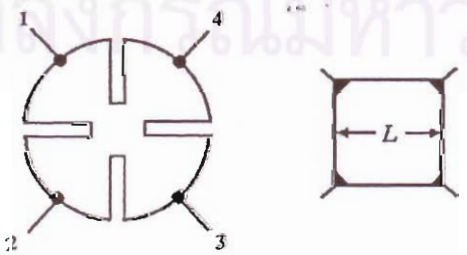
เราสามารถคำนวณหาค่าความคล่องของพาหะได้จากค่าสภาพต้านทานตามสมการ

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

ดังนั้นในการวัดเพื่อหาค่าความหนาแน่นของพาหะและค่าความคล่องตัวพาหะในปราการณ์ฮอลล์ จึงจำเป็นต้องมีการวัดหาค่าความต้านทานรวมอยู่ในการวัดนี้ เพื่อทำให้เราสามารถคำนวณหาผลได้ตามต้องการ

2.4.2 วิธีการวัดของ van der PUAW

เนื่องจากวิธีการวัดค่าต่างๆ ด้วยปรากฏการณ์ของฮอลล์นั้นมีความยุ่งยากซับซ้อน มีการวัดหาค่าสภาพนำไฟฟ้าหรือสภาพต้านทานเข้ามาเกี่ยวข้อง เพื่อนำค่ามาใช้ในการคำนวณหาค่าความคล่องตัวของพาหะและค่าความหนาแน่นของพาหะ ดังนั้นวิธีการวัดของ van der PAUW [27] จึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้เป็นการสะดวกและง่ายสำหรับการเตรียมตัวอย่าง โดยการวัดนี้ยังคงใช้พื้นฐานจากปรากฏการณ์ฮอลล์และวัดได้ผลละเอียดครบถ้วนไม่แตกต่างจากวิธีแบบเดิม สำหรับตัวอย่างในวิธีการวัดของ van der PAUW นั้นมีรูปร่างและลักษณะตามรูปที่ 2.14 โดยแบบ Cloverleaf ตามรูปที่ 2.14 (ก) เป็นแบบที่ดีที่สุด แต่มีความยุ่งยากในกระบวนการเตรียมตัว และในการทดลองนี้ใช้แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส ตามรูปที่ 2.14 (ข) เนื่องจากการเตรียมทำได้ง่ายและสะดวกกว่า



(ก) แบบ Cloverleaf (ข) แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส

รูปที่ 2.14 ภาพโครงสร้างของตัวอย่างสำหรับการวัดหาค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าวิธี van der PAUW

โดยวิธีการวัดของ van der PAUW สามารถวัดหา Sheet resistant (R_s) จากสมการ

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

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

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

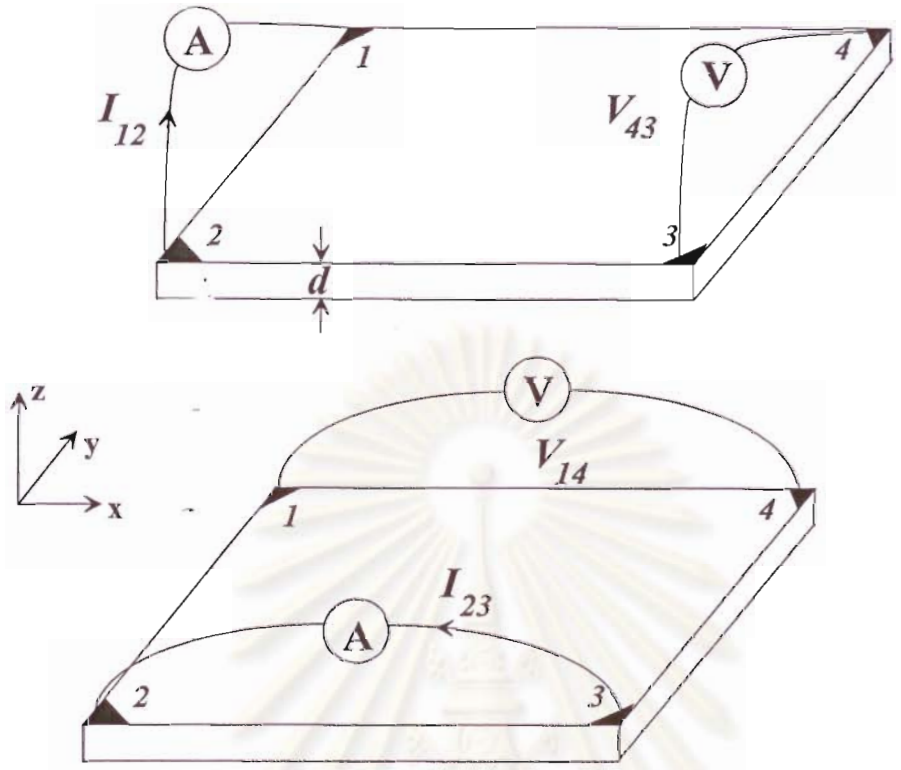
โดยค่า R_s มีความสัมพันธ์กับค่าสภาพต้านทานตามสมการ

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

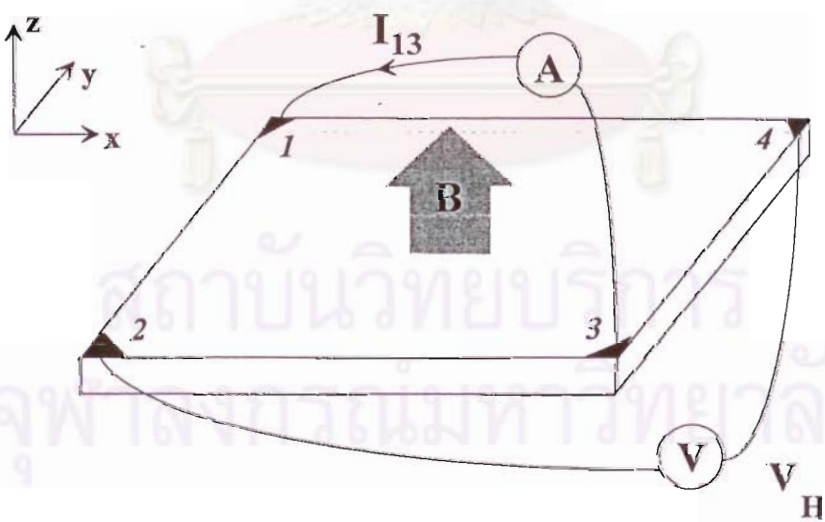
d คือค่าความหนาของตัวอย่าง

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

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.15 แผนภาพการวัดหาค่าสภาพต้านทานในวิธีการวัดของ van der PAUW



รูปที่ 2.16 แผนภาพการวัดหาค่าแรงดันฮอลล์ในวิธีการวัดของ van der PAUW

จากค่าแรงดันฮอลล์ที่วัดได้นี้ เราสามารถนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นของพาหะและค่าความคล่องตัวของพาหะได้ ซึ่งวิธีการคำนวณจะได้กล่าวถึงต่อไป

2.4.3 การวัด van der PAUW ในทางปฏิบัติ

แบบจำลองของ van der PAUW ที่ได้กล่าวมานั้นเป็นแบบจำลองในอุดมคติ ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นมีผลกระทบจากตัวแปรอื่นๆ ได้แก่ความไม่เป็นสี่เหลี่ยมจตุรัสในอุดมคติของรูปร่างตัวอย่าง ขนาดของขั้วโลหะมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับขนาดของตัวอย่าง และค่าความต้านทานของขั้วโลหะรวมถึงค่าความต้านทานของหัวรอยโลหะ-สารกึ่งตัวนำที่มีค่าสูง เป็นต้น นอกจากนี้ในขณะที่ทำการวัดนี้จำเป็นที่ต้องป้องกันการเกิดพาหะส่วนเกินเนื่องจากการกระตุ้นด้วยแสงและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมของตัวอย่าง ดังนั้นตัวอย่างต้องอยู่ในที่ไม่มีแสงและมีการควบคุมอุณหภูมิ โดยเฉพาะค่ากระแสที่ใช้ในการวัดนี้ต้องไม่มีค่าสูงเกินไปจนทำให้อุณหภูมิของตัวอย่างเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นในการวัดนี้เราจะใช้ค่ากระแสในการวัดให้ทีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นเพื่อการวัดให้ได้ค่าที่ถูกต้องสูงสุด

2.4.3.1 การกำหนดนิยามในการวัดค่าสภาพต้านทาน

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

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

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

2.4.3.2 การวัดหาค่าสภาพต้านทาน

สำหรับในการวัดนั้นทำการป้อนกระแส I_{21} และวัดค่าแรงดัน V_{34} และทำการกลับทิศทางกระแส I_{12} และวัดค่าแรงดัน V_{43} จากนั้นทำการวัดในทำนองเดียวกันกับ 6 ค่าที่เหลือคือ V_{41}, V_{14}, V_{12}, V_{21}, V_{13} และ V_{32} จากนั้นนำค่าที่วัดได้ทั้ง 8 ค่ามาคำนวณหาค่าความต้านทาน เพื่อให้จำแนกค่าความต้านทานได้ง่ายขึ้น เรากำหนดให้ $R_{I,V}$ เป็นค่าความต้านทานที่ได้จากการป้อนกระแสที่คู่ขั้ว I และแรงดันที่วัดได้ที่คู่ขั้ว V ตามสมการ

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

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

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

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

จากการผลการวัดนี้เราสามารถตรวจสอบได้ว่า

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

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

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

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

สำหรับในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลง อันเนื่องจากความไม่คงที่ของกระแสหรือความแปรปรวนของอุณหภูมิ เราสามารถตรวจสอบได้จากสมการข้างต้น ซึ่งความแตกต่างของค่าในแต่ละสมการไม่ควรเกิน 3% ในทำนองเดียวกันเราจะได้

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

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

สำหรับการคำนวณหาค่าสภาพต้านทานนั้นเราสามารถคำนวณหาได้จากค่าความต้านทาน 2 ค่าที่ได้จากการวัดดังนี้

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

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

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

2.4.3.3 การกำหนดนิยามในการวัดหาค่าแรงดันฮอลล์

ในการวัดฮอลล์นั้นเป็นการวัดค่าแรงดันที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของพาหะประจุนำไฟฟ้าที่เลี้ยวเบนไปภายใต้สนามแม่เหล็ก ซึ่งวิธีการนี้ทำให้เราสามารถรู้ได้ว่าพาหะนำไฟฟ้าส่วนใหญ่นั้นเป็นอิเล็กตรอนหรือโฮลและทราบค่าความเข้มข้นพาหะหรือค่าความหนาแน่นของพาหะนำไฟฟ้าได้

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

B คือค่าสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางในแนวแกน z โดยกำหนดให้สนามแม่เหล็กมีค่าเป็นบวกเมื่อมีทิศทางไปตามในแนวแกนทางบวกและมีค่าเป็นลบในกรณีตรงกันข้าม

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

2.4.3.4 การวัดหาค่าแรงดันฮอลล์

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

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

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

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

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

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

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

สำหรับค่า Sheet carrier density สามารถคำนวณหาได้จากสมการ

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

ในกรณีที่ผลบวกมีค่าเป็นบวก หรือ

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

โดย B คือค่าสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็นเกาส์ (Gauss : G)

I คือค่ากระแสไฟฟ้ากระแสตรงมีหน่วยเป็นแอมแปร์ (Ampere : A)

ค่า B และ I ในการทดลองมีค่าคงที่ (Constant) ตลอดในการวัดแต่ละครั้ง

ค่าความหนาแน่นพาหะนำไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการ

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

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

ในทำนองเดียวกันค่าคล่องตัวพาหะนำไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\mu = \frac{1}{q n_s R_s} \tag{2.21}$$

บทที่ 3

การออกแบบการทดลอง

สำหรับในบทนี้เป็นขั้นตอนรายละเอียดของกระบวนการทดลองในงานวิจัยนี้ เพื่อทำการศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขของแหล่งจ่าย Si ที่มีต่อคุณสมบัติของชั้นผลึกอิพิแทกซี InP ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐาน (100) GaAs โดยลำโมเลกุลฟอสฟอรัสได้จากการสลายตัว (Decomposition) ของ GaP ที่อยู่ในรูปโพลีคริสตอลไลน์ (Polycrystalline) ตัวแปรที่ได้ศึกษาในการทดลองนี้ได้แก่ ค่าอุณหภูมิแหล่งจ่าย Si โดยค่าอุณหภูมิขณะทำการปลูกผลึกมีค่า 500°C และค่าอัตราส่วน Beam-equivalent pressure (BEP) ของ P_2/In มีค่า 20 เท่า

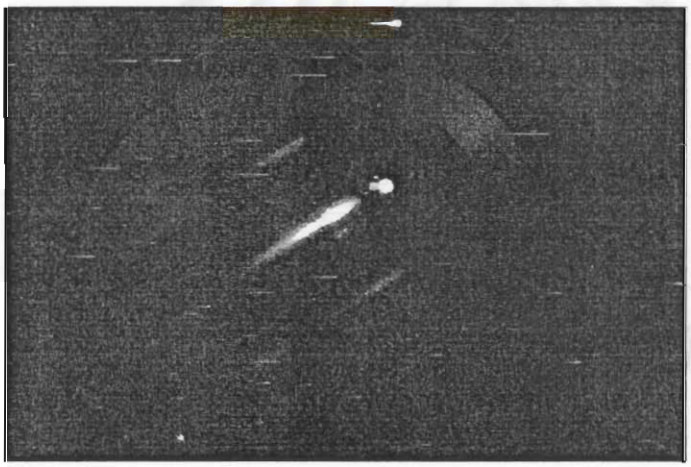
3.1 การเตรียมแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น

แผ่นผลึกฐาน (Substrate) เริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองนี้คือแผ่นผลึกเดี่ยว (Single Crystal Wafer) GaAs ที่มีทิศทางของผิวหน้าผลึก (Orientation) อยู่ในทิศทาง (100) แผ่นผลึกฐาน GaAs ที่ใช้ในการทดลองนี้มีคุณสมบัติแบบกึ่งฉนวน (Semi-insulator) และมีรูปร่างเป็นวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50.8 ม.ม. สำหรับ (100) โดยตัวอย่างแต่ละตัวอย่างเป็นชิ้นส่วน 1 ส่วนที่ได้การตัดแบ่งแผ่นผลึกเดี่ยว GaAs ข้างต้นออกเป็น 4 ชิ้นตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางให้มีรูปร่าง 1/4 ของวงกลม จากนั้นนำไปล้างด้วย Trichloroethylence เดือดและ Acetone เดือดเป็นเวลาไม่น้อยกว่าอย่างละ 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 ที่ผ่านการล้างแล้วไปติดลงบน Mo Block ด้วย In ที่หลอมเหลวด้วยความร้อน ทิ้งไว้จนกระทั่ง Mo Block ที่มีแผ่นผลึกฐาน GaAs ติดอยู่เย็นลง ซึ่งพร้อมจะนำเข้าสู่ระบบ MBE ต่อไป

3.2 การปลูกชั้นผลึก Buffer GaAs

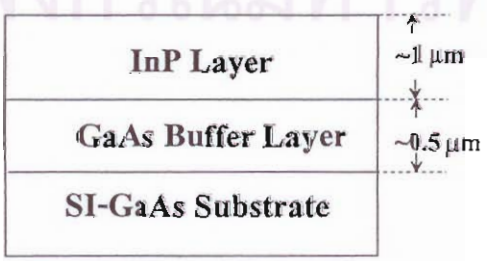
หลังจากนั้นนำ Mo Block ที่มีแผ่นผลึกฐาน GaAs ติดอยู่บรรจุใส่ใน Cassette เพื่อใช้ Cassette เป็นพาหนะลำเรียง Mo Block ภายในระบบ MBE โดยผ่าน Cassette introduction chamber ไปยัง Thermal treatment chamber หรือ Preparation Chamaber เพื่อไล่ความชื้นและสิ่งสกปรกที่ผิว (Outgassing) ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการลำเลียง Mo Block ที่มีแผ่นผลึกฐาน GaAs ติดอยู่เข้าสู่ห้องปลูกผลึก (Growth Chamber) ซึ่งก่อนการนำ Mo Block ที่มีแผ่นผลึกฐาน GaAs ติดอยู่เข้าสู่ห้องปลูกผลึก (Growth chamber) นั้นได้มีการปรับตั้งค่าอุณหภูมิของแหล่งจ่าย Ga และ As หรือ Effusion

cell ที่บรรจุ Ga และ As (ในการทดลองนี้ Ga มีความบริสุทธิ์ 99.9999% และ As มีความบริสุทธิ์ 99.99999%) ให้มีค่าความดันไอตามที่ได้กำหนดไว้คือ อ $P_{Ga} = 2.7X10^{-7}$ torr และ $P_{As_2} = 5.4X10^{-6}$ torr ตามลำดับ จากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิของ Mo block ให้ผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีค่า 580°C จากอุณหภูมิปกติ ในอัตราการ 10°C/นาที ในขณะที่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานมีค่าตั้งแต่ 300°C ขึ้นไปทำการเปิด Shutter ของ As cell เพื่อป้องกันผิวเสียหาย เนื่องจากสูญเสีย As ของแผ่นผลึก GaAs ที่เกิดจากการสลายตัว (Decompositon) ด้วยความร้อนที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง เมื่ออุณหภูมิของ Mo block มีค่า 580°C ให้ทิ้งไว้เป็นเวลานานประมาณ 30 นาที ซึ่งภาพรูปแบบของ RHEED ที่ได้จากผิวหน้าแผ่นผลึก GaAs นั้นมีรูปแบบของ c(2X4) 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 Å สุดท้ายทำการลดอุณหภูมิของ Mo block ในอัตราการ 10°C/นาที จนกระทั่งอุณหภูมิของ Mo block มีค่าอุณหภูมิ 250°C และอุณหภูมิของแหล่งจ่าย As ลงไปสู่ค่าอุณหภูมิ 100°C เป็นอันสิ้นสุดการปลูกชั้นผลึก Buffer GaAs

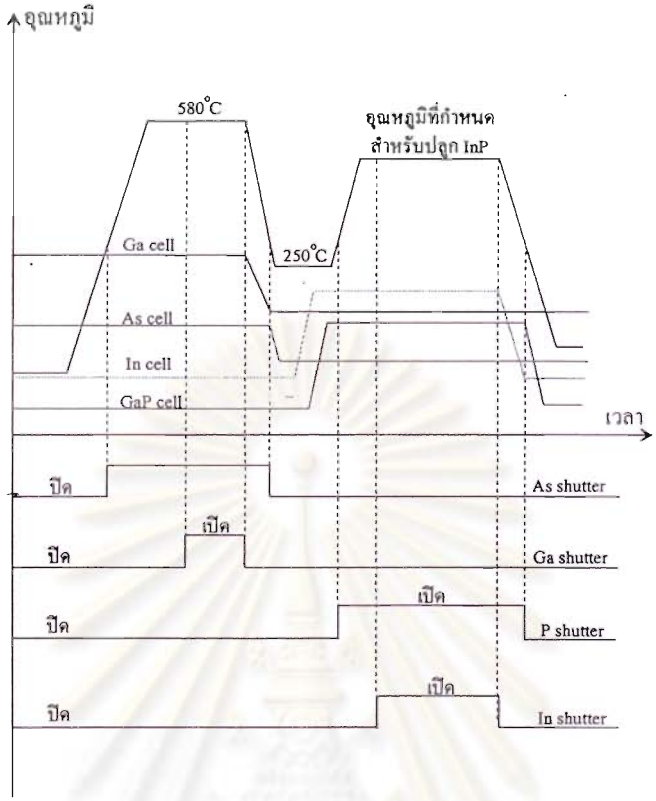


รูปที่ 3.1 ภาพรูปแบบ RHEED แบบ c(2X4) ที่ได้จากแผ่นผลึก GaAs ที่อุณหภูมิ 580°C

สำหรับตัวอย่างในการทดลองนี้มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของตัวอย่างที่สร้างในการทดลอง



รูปที่ 3.3 แผนภาพจำลองกระบวนการทำงานของการตั้งค่าอุณหภูมิและ Shutter ในการทดลองนี้

3.3 การศึกษาอิทธิพลอุณหภูมิแหล่งจ่าย Si ที่มีต่อผลึกอิพิแทกซี InP

ในการทดลองหลังจากที่ผ่านการปลูกชั้นผลึก Buffer GaAs แล้ว รอให้บรรยากาศภายในห้องปลูกผลึกมีค่าลดลง เพื่อให้ As_4 อยู่มีค่าความดันลดลงจนกระทั่งต่ำกว่า 10^{-9} torr จากค่า $4\text{-}6X10^{-8}$ torr จากนั้นทำการปรับค่าตั้งอุณหภูมิของแหล่งจ่าย In และ P ให้ได้ค่าความดันตามที่ต้องการคือ $P_{In} = 4X10^{-7}$ torr สำหรับค่า P_{P_2} ได้แก่ $8X10^{-6}$ torr ในกรณีนี้ค่าอัตราส่วน P_{P_2} ต่อ P_{In} มีค่า 20 และอุณหภูมิแหล่งจ่าย Si มีค่า 860, 900, และ 940 ตามลำดับ ต่อมาทำการเพิ่มอุณหภูมิของ Mo Block จาก 250°C ในอัตราการเพิ่ม 10°C/นาทีไปยังค่าอุณหภูมิที่กำหนดไว้คือ 500°C จากนั้นทิ้งระยะเวลาประมาณ 10-20 นาทีเพื่อให้อุณหภูมิคงที่ จากนั้นทำการเริ่มต้นปลูก InP โดยการเปิด Shutter ของแหล่งจ่าย In และ Si พร้อมกัน โดยค่าความดันไอ In ที่กำหนดนี้มีค่าอัตราการปลูกผลึก InP 0.5 μm/ชั่วโมง สำหรับช่วงเวลาที่ใช้ในการปลูกผลึก 4 ชั่วโมงและตัวอย่างที่ไม่มีการเจือ Si ได้ประดิษฐ์ด้วยวิธีการเดียวกันเพื่อเปรียบเทียบ

3.4 การวิเคราะห์ผล

ตัวอย่างที่ได้จากการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุลถูกนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธี Van der PAUW โดยตัดตัวอย่างออกเป็นชิ้นขนาน 5X5 mm^2 ทำการสร้างผิวสัมผัสโอห์มมิกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 0.5 ม.ม. ที่มุมแต่ละด้าน โดยระยะห่างจากด้านแต่ละด้านประมาณ 0.5 ม.ม. ด้วยโลหะ Au-Ge (Ge 12% โดยน้ำหนัก) /Au โดยมีค่าความหนาอย่างละ 1000 Å ตามลำดับ ซึ่งฉาบด้วยการระเหยไอในสุญญากาศ (Vacuum Evaporation) จากนั้นทำการอบแอนนีลที่อุณหภูมิ 420°C เป็นเวลา 30 วินาที [28] เพื่อให้ผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำมีคุณสมบัติแบบโอห์มมิก (Ohmic Contact) สำหรับคุณภาพผิวหน้าผลึก (Surface Morphology) ทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ สุดท้ายเป็นการวัดโฟโตลูมิเนสเซนต์ตามวิธีการที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 ซึ่งในการทดลองได้ทำการสุ่มตัวอย่างเพียงบางตัวอย่างเพื่อทำการวัดคุณสมบัติทางแสงเท่านั้น โดยผลที่ได้นี้แสดงไว้ในบทที่ 4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
ผลการทดลองและการวิเคราะห์

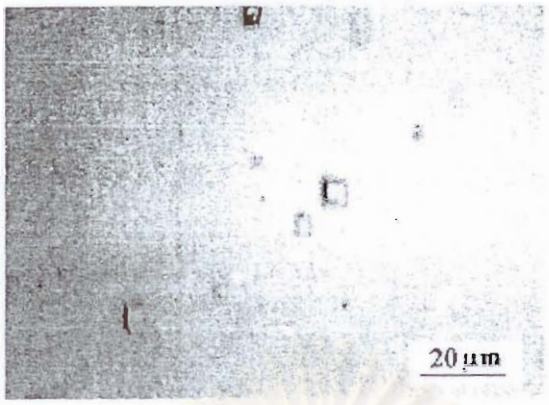
สำหรับในบทนี้จะนำเสนอผลการทดลองที่ได้ดำเนินการ ได้แก่ผลจากการศึกษาคุณสมบัติของชั้นผลึกอิพิแทกซี InP ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐาน (100) GaAs ด้วยวิธีการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุลที่ใช้ GaP ที่อยู่ในรูปของโพลีคริสตัลไลน์ (Polycrystalline) เป็นตัวจ่ายฟอสฟอรัสและผลการศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขตัวแปรในการปลูกผลึก ได้แก่ ค่าอุณหภูมิแหล่งจ่าย Si โดยค่าอุณหภูมิขณะทำการปลูกผลึกมีค่า 500°C และค่าอัตราส่วน Beam-equivalent pressure (BEP) ของ P_2/In มีค่า 20 เท่า

4.1 Surface Morphology

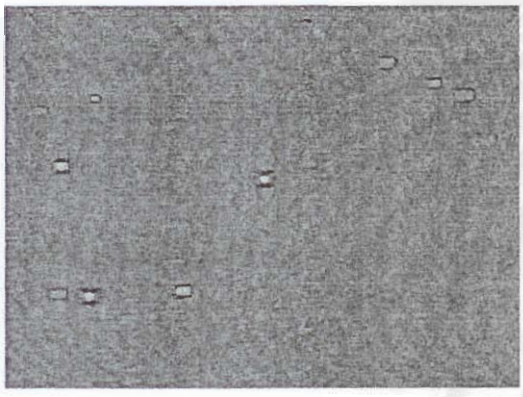
สำหรับผิวหน้าของตัวอย่างที่ได้ในกรณีนี้ได้แสดงไว้ตามรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงให้เห็นอิทธิพลของแหล่งจ่าย Si ที่มีต่อผิวหน้าผลึก ในกรณีการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 500°C โดยค่าอัตราส่วน BEP ของ P_2/In มีค่าเท่ากับ 20 ผิวหน้าของตัวอย่างนี้มีลักษณะมันเงาคล้ายกระจก แต่เมื่อสังเกตุผ่านกล้องจุลทรรศน์พบว่ามีจุดบกพร่อง (Defect) ที่มีขนาดเล็กจำนวนมากที่เกิดจากผลของการเจือ Si ดังในรูปที่ 4.1 (ข) - 4.1 (จ) อันเนื่องจากในกรณีนี้ขนาดของ Si ที่แทรกตัวโครงสร้างมีขนาดเล็กกว่า Lattice constant ของ InP และปริมาณการเจือที่มีมากขึ้นทำให้การเกิดจุดบกพร่องที่สังเกตุได้ที่ผิวของผลึกอิพิแทกซี หากเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่การเจือ Si (รูปที่ 4.1 (ก)) ซึ่งปรมาณของจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นมีจำนวนเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของ Si ที่เจือมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับดังในรูปที่ 4.1 (ข) - 4.1 (จ) ซึ่งลักษณะของจุดบกพร่องมีลักษณะเป็นผลึก Cluster ที่มีขนาดใหญ่รูปสี่เหลี่ยมที่มีขนาดความกว้างความยาวประมาณ 1-10 μm และมีค่าความสูงประมาณ 0.1-2 μm โดยจุดบกพร่องดังกล่าวเกิดขึ้นตามธรรมชาติ และในบางครั้งจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นหลุมที่รูปทรงในลักษณะเดียวกัน

4.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นพาหะ ค่าความคล่องตัวและอุณหภูมิในการปลูกผลึกดังรูปที่ 4.2 ค่าความเข้มข้นพาหะมีค่าอยู่ในช่วง 1×10^{17}-8.5×10^{18} cm^{-3} และความคล่องตัวพาหะมีค่าอยู่ในช่วง 298-1,987 $cm^2/V.s$ ซึ่งค่าเหล่านี้เป็นค่าที่วัดได้ที่อุณหภูมิห้อง (300 K) โดยค่าความเข้มข้นพาหะมีค่าเพิ่มขึ้นและค่าความคล่องตัวพาหะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิแหล่งจ่าย Si มีค่าเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากปริมาณของ Si ที่เจือปนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิแหล่งจ่าย Si มีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับการลดลงของค่าความคล่องตัวพาหะนั้นเป็นจากการกระเจิงของพาหะ (Impurity Scattering) [29]

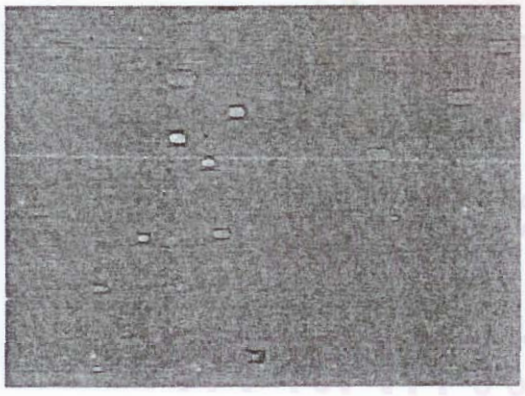


(ก) Non-doped

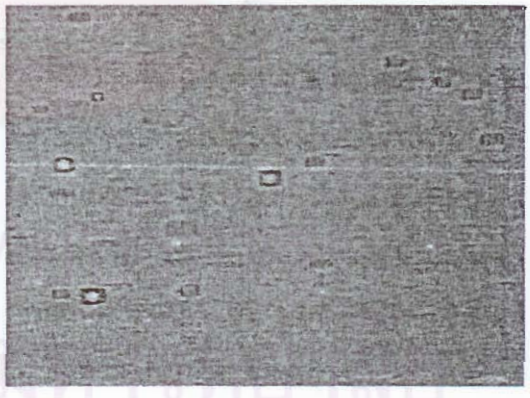


(ข) $T_{si} = 860^{o}C$

(ค) $T_{si} = 860^{o}C$

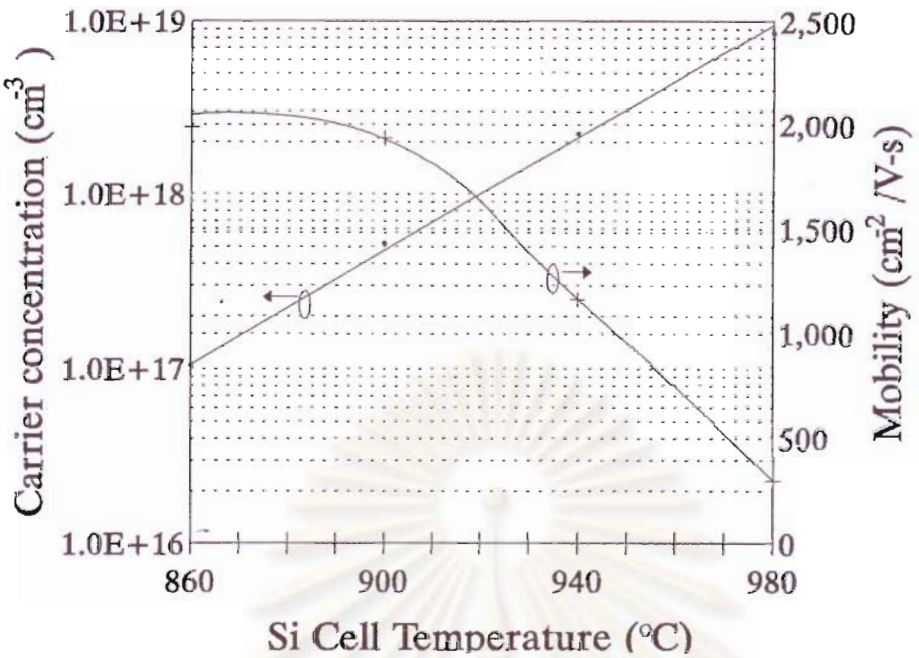


(ง) $T_{si} = 940^{o}C$



(จ) $T_{si} = 980^{o}C$

รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายผ่านกล้องจุลทรรศน์ของตัวอย่างจากการปลูกที่อุณหภูมิแหล่งจ่าย Si ต่างๆ ด้วยอุณหภูมิขณะทำการปลูกผลึก 500°C ค่าอัตราส่วน BEP ของ P_2/In มีค่าเท่ากับ 20



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นพาหะ ค่าความคล่องตัว และค่าอุณหภูมิแหล่งจ่าย Si

4.3 การเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลงานของนักวิจัยอื่นๆ

เมื่อนำผลที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลของนักวิจัยอื่นๆ ดังในตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นผลึกอิพิแทกซี InP ที่ได้นั้นมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับผลที่ได้ของนักวิจัยอื่นๆ ในกรณีที่มีค่าความเข้มข้นใกล้เคียงกัน ซึ่งจุดด้อยของงานวิจัยนี้คือค่าความเข้มข้นพาหะนั้นยังมีค่าสูงอยู่ อันเป็นผลทำให้ค่าความคล่องตัวพาหะที่ได้มีค่าต่ำ ซึ่งจะต้องทำการพัฒนาต่อไป โดยจุดที่ต้องแก้ไขคือการลดปริมาณของออกซิเจนที่เจือปนในวัตถุดิบและ CO และ CO_2 ในบรรยากาศ โดยเฉพาะแหล่งจ่ายฟอสฟอรัสจาก GaP ด้วยการใช้วัตถุที่มีความใหม่และสะอาด นอกจากนี้ต้องรักษาระบบให้สะอาดอยู่เสมอ นอกจากนี้การลดผลจากความเครียดที่เกิดขึ้นในผลึก InP ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐาน GaAs นั้นสามารถทำได้ด้วยการ Buffer layer ที่มีค่าคงตัวผลึกใกล้เคียงกับค่าของ InP [30]

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากงานวิจัยนี้และผลงานของนักวิจัยอื่นๆ

Authors	Technique	μ (cm2/V.s) (300 K)	N_d (cm^{-3}) (300 K)	Thickness (μm)	โครงสร้าง
งานวิจัยนี้	MBE (GaP Source)	298-1,987	$1X10^{17}$-$8.5X10^{18}$	2	InP/GaAs
Kawamura[31]	MBE (P Source)	1,000-3,000	$2X10^{17}$-$4.5X10^{19}$	1.5-2	InP/InP
H.Q. Zheng [32]	MBE (InP Source)	1,000-3,000	$5X10^{16}$-$1X10^{18}$	1-2	InP/InP
Steven [33]	GSMBE MOMBE	200-3,000	$1X10^{18}$-$6.8X10^{19}$	0.5	InP/InP

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5
สรุป

ในโครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการเจือ Si ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นผลึกอิพิแทกซี InP ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐาน GaAs ด้วยวิธีการปลูกผลึกอิพิแทกซีจากลำโมเลกุล โดยใช้แหล่งจากฟอสฟอรัสจากการสลายตัว (Decomposition) ของ GaP ที่อยู่ในรูปของโพลีคริสตอลไลน์ (Polycrystalline) คุณสมบัติของชั้นอิพิแทกซี InP ที่การเจือ Si ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐาน GaAs ที่ได้นี้ขึ้นกับปริมาณของ Si ที่เจือในขณะที่ทำการปลูกผลึก และคุณสมบัติของชั้นอิพิแทกซี InP ที่การเจือ Si ที่ปลูกบนแผ่นผลึกฐาน GaAs มีพาหะนำไฟฟ้าส่วนใหญ่เป็นอิเล็กตรอนหรือเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type) โดยมีค่าความเข้มข้นพาหะ 1×10^{17}-8.5×10^{18} cm^{-3} และมีค่าความคล่องตัวพาหะ 298-1,987 $cm^2/V\text{-}s$ ที่อุณหภูมิห้อง สำหรับค่าความเข้มข้นพาหะที่ได้นี้ขึ้นกับค่าอุณหภูมของแหล่งจ่าย Si

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6
ข้อเสนอแนะ

สำหรับงานวิจัยนี้ค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบจากรูปแบบของ RHEED ที่จุดเปลี่ยนแปลงต่างๆ บนผิวหน้าของ GaAs (100) ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนมากกว่า 10°C ซึ่งวิธีการที่ดีที่สุดคือการใช้ IR Pyrometer แต่เครื่องมือนี้มีราคาแพง สำหรับอีกวิธีการหนึ่ง ได้แก่ การใช้โลหะหรือวัสดุที่มีค่าจุดหลอมเหลวในช่วงที่เราทำงาน เช่น Al มีค่าจุดหลอมเหลว 660°C หรือ InSb มีค่าจุดหลอมเหลว 525°C บนแผ่นผลึกฐานที่ติดไว้บน Mo Block และทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จาก IR Pyrometer และค่าที่ได้จาก Thermocouple เพื่อให้สามารถกำหนดค่าอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น แต่วิธีการนี้ยุ่งยากและไม่เหมาะสำหรับการงานในช่วงอุณหภูมิที่กว้างมากได้ หากใช้ในการผลิตเชิงพาณิชย์จำเป็นต้องใช้เครื่องมือนี้ เพื่อให้การผลิตสามารถทำซ้ำได้ (Repeatability) นอกจากนี้ยังมีความจำเป็นต้องตรวจสอบคุณสมบัติของโครงผลึกด้วย X-ray ซึ่งเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับงานนี้คือ Double Crystal X-ray Diffractrometer เนื่องจากไม่มีเครื่องมือชนิดนี้ในประเทศไทย และเป็นเครื่องมือหลักของการวิจัยด้านสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำและวัสดุที่ใช้ในการประดิษฐ์สิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ยังสามารถใช้วิเคราะห์ค่าคงตัวผลึก (Lattice constant) ค่าความหนาของชั้นผลึก โดยเฉพาะวัสดุสารประกอบชนิด 3 ธาตุ (Ternary) และชนิด 4 ธาตุ (Quaternary) โดยเครื่องมือ X-ray นี้สามารถบอกค่าความแตกต่างของค่าคงตัวผลึกของชั้นผลึกที่ประกอบกันขึ้นเป็นโครงสร้างสิ่งประดิษฐ์ ดังนั้นถ้ามีความพร้อมของอุปกรณ์การวิจัยทางด้านวัสดุอิเล็กทรอนิกส์จะทำให้มีความคล่องตัวมากขึ้น ผลของการวิจัยนี้สามารถทำการวิจัยสารประกอบอื่นๆ เช่น GaSbAs InGaAlAs และ GaPSb เพื่อนำมาใช้ในการประดิษฐ์สิ่งประดิษฐ์ชนิดอื่นๆ ต่อไป คณะผู้วิจัยหวังไว้ว่าในโครงการอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยจะได้การสนับสนุนและส่งเสริมต่อไปในอนาคต

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.

[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", J. Crystal Growth, Vol.81 , pp.349-358, 1987.

[4] J.I. Shim, K. Komori, S. Arai, I. Arima, Y. Suematsu, and **R. Somchai**, "Lasing Characteristics of 1.5 μm GaInAsP-InP SCH-BIG-DR Lasers", IEEE J. Quantum Electron., Vol.27, No.6, pp.1736, 1991.

[5] Yuichi MATSUSHIMA, Yuichi HIROFUJI, Shun-ichi GONDA, Seiji MUKAI and Morihiko KIMATA, "Molecular Beam Epitaxy Growth of InP", JPN. J. Appl. Phy. , Vol. 15, No.12, pp.2321-2325, 1976 .

[6] C. R. Stanley, R.F.C. Farrow, and P.W. Sullivan, Chater 9, "MBE of InP and Other P-Containing", The Technology and Physics of Molecular Beam Epitaxy, Edited by E.H.C. Paker, Plenum Press, 1985.

[7] H. Uesugi, E. Omura, and H. Namizaki, "Low Threshold Current 1.3 mm InGaAsP Lasers Grown on GaAs Subtrates", Third Optoelectronic Conference (OEC' 90), Chiba, JAPAN, pp. 210-211, 1990.

[8] E. J. Roan and K. Y. Cheng, " Long-wavelength (1.3 mm) luminescence in InGaAs Strained Quantum Well Structures Grown on GaAs", Appl. Phys. Lett., Vol. 59, No.21, pp. 2688-2690, 1991.

[9] Y. Okuno, K. Uomi, M.Aoki, T. Taniwatari, M. Suzuki, and M. Kondow, "Anti-phase direc bonding and its application to fabriaction of InP-based 1.55 mm wavelength lasers on GaAs substrates", Appl. Phys. Lett., Vol.66 , No.4, pp. 451-453, 1995.

[10] W. T. Tsang, "From Chemical Vapor Epitaxy to Chemical Beam Epitaxy", J. Crystal Growth, Vol. 95, pp. 121-131, 1989.

[11] C. R. Stanley, R. F. C. Farrow, and P. W. Sulliwan, Chapter 9, "MBE of InP and Other P-Contenning Compounds", The Technology and Physics of Molecular Beam Epitaxy, Edited by E. H. C. Parker, Plenum Press, 1985.

[12] "MBE Growth of GaAs/GaInP Heterostructures Using Solid As and P", EPI Application Note, April, 1993.

[13] 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

[14] **Somchai RATANATHAMMAPHAN**, Supachok THAINOI, Pornchai CHANGMOANG, Suwat SOPITPAN and Choompol ANTARASENA, "Molecular Beam Epitaxy growth of InP on GaAs substrates using GaP decomposition source", Proceeding of 11 th International Conference Molecular Beam Epitaxy, Beijing, China, September 10-15, 2000.

[15] Tsunenori SAKAMOTO, Hideo FUNABASHI, Kimihiro OHTA, Tadashi NAKAGAWA, Naoyuki KAWAI, and Takeshi KOJIMA, "Phase-Locked epitaxy using RHEED Intensity Oscillation", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 23, No. 9, 1984, pp. L657-L659.

[16] Yoshiji HORIKOSHI, Minoru KAWASHIMA, and HIROSHI YAMAGUCHI, "Migration-Enhanced Epitaxy of GaAs and AlGaAs", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 27, No. 2, 1986, pp. 169-179.

[17] Dr. Eberl MBE-Komponenten GmbH, 1997.

[18] MBE Components & Accessories, Valved Arsenic Cracker Cells, RIBER, Febuary 1999.

[19] M. A. Herman and H. Sitter, "Molecular Beam Epitaxy : Fundamentals and Current Status", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1989, pp. 96.

[20] A. S. Bracker, M. J. Yang, B. R. Bennett, J. C. Culberton, W. J. Moore, "Surface reconstruction phase for InAs, AlSb and GaSb", Journal of Crystal Growth, vol. 220, 2000, pp. 384-392.

[21] B. Junno, S. Jeppesen, M.S. Miller, L. Samuelson, "A comparison of RHEED reconstruction phase on (100) InAs, GaAs and InP,Journal of Crystal Growth, vol. 164, 1996, pp. 66-70.

[22] F. G. Celiim Y. C. Kao, and H. Y. Liu, "In situ composition of InGaAs/InP using quadrupole mass spectrometry", J. Vac. Sci Technol., Vol. A 14, No. 6, 1996, pp.3202-3207.

[23] K. B. Ozanyan, P. J. Parbrook, M. Hopkinson, and C. R. Whitehouse, "In situ monitoring of the surface reconstruction on InP (100) prepared by molecular beam epitaxy", J. Appl. Phys., Vol. 82, No. 1, 1997, pp. 474-476.

[24] GaInAsP Alloy Semiconductor, Edited by T. P. Pearsal Wiley & Sons, 1982, pp. 92.

[25] Data in Science and Technology, Edited in Chief : R. Poershke, Semiconductor Group IV Elements and III-V Compound, Editor : O Madalung, Springer-Verlag, 1991.

[26] InP-Based Materials and Devices, Edited by Osamu WADA and Hideki HASEKAWA, John Wiley & Sons, Inc., 1999.

[27] L. J. Van der PAUW, "A Method of Measuring The Resistivity and Hal Coefficient on Lamellage of Arbitary Shape", Phillips Technical Review, Vol. 20, 1958, pp. 220-224.

[28] S. C. Binari, J. B. Boos, "AuGe/Au ohmic contacts to n-type InP by Hot-Plate Alloying", Electronics Letters, vol. 25, No. 18, 1989, pp. 1208-1209.

[29] Ben. G. Streetman and Sanjay Kumar Banerjee, Solid state electronic devices, Pearson International, 2009, pp. 99-101.

[30] Y. F. Chen, J. L. Shen, and I. M. Chang, S. Z. Chand and S. C. Lee, "Photoluminescence study of highly mismatched $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ epilayers grown on InP-coated GaAs substrates", J Appl. Phys., vol. 77, No.3, 1995, pp. 1040-1042.

[31] Y. Kawamura and H. Asahi, "Silicon doping in InP grown by molecular beam epitaxy, Appl. Phys. Lett.. Vol. 43, No. 8, 1983, pp. 780-782.

[32] H. Q. Zheng, K. Radahashrishnan, S. F. Yoon, and G. I. Ng., "Electrical and Optical Properties of Si-doped InP grown by solid source molecalur beam epitaxy using valved phosphorus cracker cell", J. of Appl. Phys., Vol. 87, No. 11, 2000, pp. 7988-7993.

[33] Steven L. Jackson, Michael T. Fresina, Judith E. Baker, and Gregory E. Stillman, "High-efficiency Silicon doping of InP and In0.53Ga0.47As in gas source and metalorganic molecular beam epitaxy using tetrabromide", Appl. Phys. Lett., Vol. 64, No. 21, 1994, pp. 2867-2869.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย