



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทุนวิจัย

กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานวิจัย

การวิเคราะห์โครงสร้างควันตัมเวลด์ที่มีความเครียด
ของ InGaAs-GaAs ที่ปลูกโดยวิธี MBE
ด้วยวิธีโฟโตลูมิเนสเซนซ์

โดย

สมชัย รัตนธรรมพันธ์

ชุมพล อันตรเสน

ธันวาคม 2544

จท
วท 15
011293

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ทุนวิจัย
กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานผลการวิจัย

การวิเคราะห์โครงสร้างควันตัมเวลล์ที่มีความเครียดของ InGaAs-GaAs
ที่ปลูกโดยวิธี MBE ด้วยวิธีโฟโตลูมิเนสเซนซ์

โดย

สมชัย รัตนธรรมพันธ์

และ

ชุมพล อังตรเสน

ธันวาคม พ.ศ. 2544

20 ส.ค. 2546

I200666925

กิตติกรรมประกาศ

ส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนวิจัยรัชดาภิเษกสมโภช ปีการเงิน 2541 (ครั้งที่ 5) และส่วนหนึ่งการโครงการวิจัยทุนงบประมาณแผ่นดิน ปี 2539 และ ปี 2540 ในโครงการวิจัย "เลเซอร์ไดโอดควันตัมเวลล์" โครงการวิจัยเลขที่ 46G-EE-2539 และ 53G-EE-2540 สุดท้ายนี้คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธรา ชลปรางค์ ที่ให้การสนับสนุนและคำแนะนำชี้แนะที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการวิจัยนี้ พร้อมทั้งคุณสุภโชค ไทน้อย คุณขวัญเรือน ไทน้อย คุณพรชัย ช่างม่วง คุณสุวัฒน์ โสภิตพันธ์ คุณณัฐชัย สร้อยมาลีที่ได้ให้ความช่วยเหลืองานวิจัยนี้ นอกจากนี้ Dr. Ian Harrison และ Mr. David Lackinson แห่ง Department of Electrical Engineering, Univeristy Park, Nottingham ประเทศอังกฤษที่ได้ช่วยเหลือในการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิต่ำ

เลขหมึก จพ
๑๕/5
เลขทะเบียน ๐๑๒๙๓
วัน.เดือน.ปี 10 ก.ย. 45

Project Title Photoluminescence investigation of strain layer Single Quantum Well
InGaAs-GaAs Grown by MBE

Name of the Investigators Assist. Prof. Dr. Somchai RATANATHAMMAPHAN
Assoc. Prof. Dr. Choopol ANTARASENA

Year 2001

Abstract

An experimental study on molecular beam epitaxy growth of strain quantum well InGaAs-GaAs have been performed. The investigations were conducted by photoluminescence technique to study the effects, i.e. growth temperature, BEP ratio of V/III or As₄/(In+Ga), Indium content, and well thickness on the luminescence characteristics of strain quantum well InGaAs-GaAs. The results gathered from the photoluminescence data reveal the optimum growth temperature in the range of 480-520°C. The segregation effect of In atom at high substrate temperature over 520°C decrease the In content in the well layers. The optimum BEP ratio of V/III or As₄/(In+Ga) is 17. The wavelength of the luminescence is in the range of 870-950 nm at 10 K and 920-1000 nm at room temperature and, in addition, the photoluminescence peak wavelength shifts to longer while increasing the well thickness and/or In content in the InGaAs well layer.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	II
บทคัดย่อภาษาไทย.....	III
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
สารบัญสัญลักษณ์.....	V
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐาน.....	3
2.1 การปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุล.....	3
2.1.1 ชุดระบบการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุล.....	3
2.1.2 Effusion cell.....	6
2.1.2.1 Knudsen cell.....	6
2.1.2.2 Cracker cell.....	8
2.1.2.3 Valved cracker cell.....	9
2.1.2.4 Gas injector cell.....	10
2.1.3 อุปกรณ์วิเคราะห์.....	11
2.1.3.1 Reflection high energy diffraction electron (RHEED).....	12
2.1.3.2 Residual gas analyzer.....	14
2.1.3.3 อุปกรณ์อื่นๆ ที่สามารถติดตั้งเข้าในระบบ MBE.....	14
2.2 กลไกการเกิดผลึกของการปลูกผลึกอพิแทกซ์วิธี MBE.....	15
2.3 สารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V.....	18
2.3.1 โครงสร้างของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V.....	18
2.3.2 คุณสมบัติของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V.....	20
2.4 ครันตัมเวลด์.....	21
2.5 ครันตัมเวลด์ที่มีความเครียด.....	23
2.6 การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์.....	25

บทที่ 3	การออกแบบการทดลอง.....	28
	3.1 การเตรียมแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น.....	28
	3.2 การเตรียมการในห้องปลูกผลึกก่อนการปลูกผลึก.....	29
	3.3 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก.....	29
	3.4 การศึกษาอิทธิพลของค่าความหนาของชั้นเวลล์.....	30
	3.5 การศึกษาอิทธิพลของค่าสัดส่วนอะตอม In ในชั้นเวลล์ InGaAs.....	32
	3.6 การศึกษาอิทธิพลของค่าอัตราส่วน BEP ของ V/III.....	35
บทที่ 4	ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	36
	4.1 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก.....	36
	4.2 การศึกษาอิทธิพลค่าความหนาของชั้นเวลล์.....	37
	4.3 การศึกษาอิทธิพลค่าสัดส่วนอะตอม In ในชั้นเวลล์ InGaAs.....	38
	4.4 การศึกษาอิทธิพลของค่าอัตราส่วน BEP ของ V/III.....	40
บทที่ 5	สรุป.....	42
บทที่ 6	ข้อเสนอแนะ.....	43
	เอกสารอ้างอิง.....	44

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	ตารางเปรียบเทียบชนิดของ Effusion Cell และชนิดของลำโมเลกุล ที่ได้จากวัสดุชนิดต่างๆ.....	11
ตารางที่ 2.2	รายการส่วนประกอบพื้นฐานใน Growth Chamber ของระบบ MBE.....	15
ตารางที่ 2.3	อุณหภูมิจุดระเหิดของสารประกอบ III-V ชนิดต่างๆ.....	16
ตารางที่ 2.4	ตัวแปรกายภาพของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V ชนิด 2 ธาตุ.....	19
ตารางที่ 2.5	ค่าแถบพลังงานของตัวอย่างสารประกอบชนิด 3 ธาตุและ 4 ธาตุ.....	20
ตารางที่ 2.6	ค่ามวลประสิทธิผลของอิเล็กตรอนใน $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ บน GaAs และ $\text{In}_{0.53+x}\text{Ga}_{0.47-x}\text{As}$ บน InP.....	25
ตารางที่ 3.1	ค่าความดัน BEP ของ Ga และอัตราการเกิดผลึกสำหรับ GaAs และ InGaAs.....	33

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	ภาพโครงสร้างชุดระบบ MBE ของ RIBER รุ่น 32 P.....	5
รูปที่ 2.2	ชุดระบบ MBE ที่ติดตั้งที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	5
รูปที่ 2.3	แผนภาพโครงสร้าง Knudsen cell.....	6
รูปที่ 2.4	ภาพโครงสร้างของ Ga-trapping cap.....	8
รูปที่ 2.5	แผนภาพโครงสร้างของ Cracker cell.....	9
รูปที่ 2.6	ภาพของ As Valve Cracker cell.....	10
รูปที่ 2.7	ภาพโครงสร้างของ Effusion cell ชนิด Gas injector cell.....	11
รูปที่ 2.8	แผนภาพอธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลงความเข้มของอิเล็กตรอนในขณะที่ทำการปลูกผลึก...13	
รูปที่ 2.9	แผนภาพความสัมพันธ์ของรูปแบบ RHEED และอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐาน (100) GaAs, InP และ InAs ภายใต้ไอของ Dimer.....	13
รูปที่ 2.10	ปฏิกิริยาของการเกิดผลึก GaAs ในกรณี Ga-As ₂ -(100) GaAs.....	17
รูปที่ 2.11	ปฏิกิริยาของการเกิดผลึก GaAs ในกรณี Ga-As ₄ -(100) GaAs.....	18
รูปที่ 2.12	แผนภาพโครงสร้างแบบ Zincblende.....	19
รูปที่ 2.13	แผนภาพโครงสร้างควันตัมเวลล์.....	21
รูปที่ 2.14	แผนภาพโครงสร้างควันตัมเวลล์แบบต่างๆ ที่แบ่งตามโครงสร้างหัวต่อเฮเทโร.....	23
รูปที่ 2.15	แผนภาพโครงสร้างและแถบพลังงานของโครงสร้างควันตัมเวลล์ที่มีความเครียด.....	24
รูปที่ 2.16	แผนภาพจำลองการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงที่เกิดจากการรวมตัว.....	26
รูปที่ 2.17	แผนภาพระบบการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์.....	27
รูปที่ 3.1	รูปแบบของ RHEED จากผิวหน้าแผ่นผลึก GaAs สะอาดที่อุณหภูมิ 580°C.....	29
รูปที่ 3.2	แผนภาพโครงสร้างตัวอย่างที่สร้างขึ้นในเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐาน ขณะปลูกผลึก.....	30
รูปที่ 3.3	แผนภาพโครงสร้างตัวอย่างที่สร้างขึ้นในเพื่อศึกษาอิทธิพลของความกว้าง ของในเวลล์.....	31
รูปที่ 3.4	แผนภาพโครงสร้างตัวอย่างที่สร้างขึ้นในเพื่อศึกษาอิทธิพลของอิทธิพล ค่าสัดส่วนอะตอม In ในชั้นเวลล์ InGaAs.....	33
รูปที่ 3.5	แผนภาพจำลองเวลาเปิด/ปิด Shutter ของ In และ Ga ในการทดลอง เพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าสัดส่วนอะตอม In ในชั้นเวลล์ InGaAs.....	34

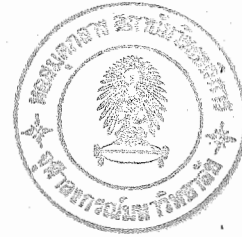
รูปที่ 4.1	สเปกตรัมจากการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ในการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ แผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก จากการวัดที่อุณหภูมิ 10 K.....	36
รูปที่ 4.2	สเปกตรัมจากการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ในการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ แผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก จากการวัดที่อุณหภูมิห้อง.....	37
รูปที่ 4.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งยอดยาวคลื่นและค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐาน ขณะปลูกผลึก.....	37
รูปที่ 4.4	สเปกตรัมจากการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ในการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลค่าความหนา ของชั้นเวลล์ จากการวัดที่อุณหภูมิ 13 K และที่อุณหภูมิห้อง.....	38
รูปที่ 4.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ายอดความยาวคลื่นและค่าความกว้างของชั้นเวลล์.....	39
รูปที่ 4.6	สเปกตรัมจากการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ในการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลค่าสัดส่วน อะตอม In ในชั้นเวลล์ InGaAs จากการวัดที่อุณหภูมิประมาณ 10 K.....	40
รูปที่ 4.7	สเปกตรัมจากการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ในการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลค่าสัดส่วนอะตอม In ในชั้นเวลล์ InGaAs จากตัวอย่างที่สร้างด้วยการแปรเปลี่ยนค่าอัตราส่วนเวลา ในการเปิด/ปิดชัตเตอร์ของ In และ Ga จากการวัดที่อุณหภูมิประมาณ 12 K.....	41
รูปที่ 4.8	สเปกตรัมจากการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ในการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลค่าอัตราส่วน BEP ของ $As_4/(Ga+In)$ จากการวัดที่อุณหภูมิประมาณ 10 K.....	42

สารบัญสัญลักษณ์

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

บทที่ 1

บทนำ



สารประกอบ InGaAs เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V ชนิดหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญอย่างต่อสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์และออปโตอิเล็กทรอนิกส์ในยุคปัจจุบัน เนื่องจากสารประกอบนี้สามารถปรับค่าสัดส่วนของ In และ Ga เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น คุณสมบัติการเปล่งแสงในช่วงย่านความยาวคลื่น 0.88-3.5 μm ค่าคงตัวผลึก (Lattice Constant) สามารถแปรเปลี่ยนได้ในช่วง 5.653 Å (GaAs) -6.058 Å (InAs) และค่าความคล่องตัวของพาหะนำไฟฟ้า (Mobility) ของอิเล็กตรอนสามารถแปรเปลี่ยนได้ในช่วง 8,000 -15,000 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ สารประกอบดังกล่าวนี้สามารถปลูกลงบนผลึกฐานต่างๆ เช่น GaAs, InP, และ InAs ได้ โดยมีค่าคงตัวผลึกที่เข้ากันได้ (Matching) ด้วยการเลือกค่าปริมาณของ In ที่ให้ค่าคงตัวผลึกที่เหมาะสมกับผลึกฐาน ห้องปฏิบัติการวิจัยในประเทศต่างๆ ได้ทำการศึกษาวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับสารประกอบชนิดนี้อย่างกว้างขวาง และนำเอาคุณสมบัติที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นมาประยุกต์ใช้สร้างสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์และออปโตอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ซึ่งเทคนิคที่ใช้ในการเตรียมผลึกสารประกอบนี้สามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่ เทคนิคการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากสถานะไอของสารอินทรีย์โลหะ (Metal-organic Vapor Phase Epitaxy : MOVPE) และเทคนิคการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy : MBE) โดยเทคนิคของ MBE จะได้รับความสนใจอย่างมากสำหรับการสร้างสิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้างดังกล่าวเป็นองค์ประกอบ เนื่องจากเทคนิค MBE มีข้อดีในการสร้างรอยต่อระหว่างผลึก (Interface) ที่มีคุณภาพที่ดีกว่าเทคนิค MOVPE [1]

การประยุกต์ใช้งานสารประกอบกึ่งตัวนำ InGaAs ที่สำคัญอันหนึ่งก็คือ โครงสร้างควันตัมเวลล์แบบที่มีความเครียด (Strain Layer Quantum Well : SLQW) ของ InGaAs-GaAs ซึ่งเป็นโครงสร้างของชั้นผลึกบางๆ ของ InGaAs ที่อยู่ถูกหนึบประกบด้วยผลึกของ GaAs และสารกึ่งตัวนำทั้งสองนี้มีค่าคงตัวผลึกที่แตกต่างกัน โดยผลของความแตกต่างของค่าตัวผลึกนี้ทำให้เกิดความเครียดขึ้นในชั้นของผลึก InGaAs อันเป็นผลให้โครงสร้างแถบช่องว่างพลังงาน (Energy Band Structure) ของ InGaAs มีลักษณะที่แตกต่างไปจากในสภาวะปกติ ซึ่งลักษณะแถบพลังงานของ InGaAs ที่มีความความเครียดนี้มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงที่ดีกว่าผลึกปกติคือค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนมีความเร็วสูงและคุณสมบัติทางแสงในการเปล่งแสง (luminescence) มีลักษณะที่เด่นและแตกต่างไปจากกรณีของโครงสร้างที่ไม่มี ความเครียด ซึ่งลักษณะดังกล่าวมีเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการสร้างไดโอดเลเซอร์ที่มีคุณสมบัติพิเศษและประสิทธิภาพสูง[2] โครงสร้าง SLQW ของ InGaAs-GaAs นี้ยังสามารถเปล่งแสงในช่วงความยาวคลื่น 0.9-1.0 μm จึงถูกนำไปประยุกต์ใช้ในโครงสร้างของไดโอดเลเซอร์ที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงในช่วงความยาวคลื่น 0.96-0.98 μm เพื่อ

ใช้ในการกระตุ้น (Pumping) เส้นใยแก้วนำแสงที่เจือด้วย Er (Er-doped fiber optic) หรือตัวขยายสัญญาณแบบไฟเบอร์ที่มีการเจือด้วย Er (Erbium-doped fiber amplifier : EDFA) ที่ใช้ในระบบสื่อสารทางแสงระยะไกล (long-haul)[3] ข้อดีอีกประการหนึ่งคือ ไดโอดเลเซอร์ที่มีโครงสร้าง SLQW ของ InGaAs-GaAs มีค่ากระแสเริ่มต้นของการเปล่งแสงเลเซอร์ (Threshold current) ที่มีต่ำมาก [4] [5] สำหรับวิธีการควบคุมค่าความยาวคลื่นในการเปล่งแสงของโครงสร้างนี้สามารถกำหนดได้จากปริมาณของ In และขนาดความหนาของชั้น InGaAs ดังนั้นการควบคุมตัวแปรทั้งสองจะสามารถทำได้อย่างแม่นยำนั้น จำเป็นต้องมีความเข้าใจในอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการสร้างที่มีต่อคุณสมบัติของโครงสร้างอย่างชัดเจน

สำหรับในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการสร้างโครงสร้างควันตัมเวลต์ของ InGaAs/GaAs ด้วยวิธีการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล ซึ่งเนื้อหาสาระของรายงานนี้มีดังต่อไปนี้ ในบทที่ 2 กล่าวถึงความรู้พื้นฐานของวิธีการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล สารประกอบกลุ่ม III-V โครงสร้างควันตัมเวลต์และความรู้พื้นฐานการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ในบทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบการทดลอง ในบทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล และในบทที่ 5 เป็นบทสรุปของงานวิจัยนี้



บทที่ 2 ความรู้พื้นฐาน

สำหรับในบทนี้เป็นการทบทวนความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้โดยสังเขป ซึ่งมีเนื้อหาสาระเกี่ยวกับเทคนิคการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy : MBE) กลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการปลูกผลึกอพิแทกซ์วิธี MBE ความรู้พื้นฐานของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V โครงสร้างควันตัมเวลด์ 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 ขณะทำการปลูก 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 มีปริมาณที่ต่ำมากๆ ในสภาวะสุญญากาศระดับสูงพิเศษ จึงให้เราสามารถควบคุมคุณภาพของผลึกได้ตามที่เราต้องการ

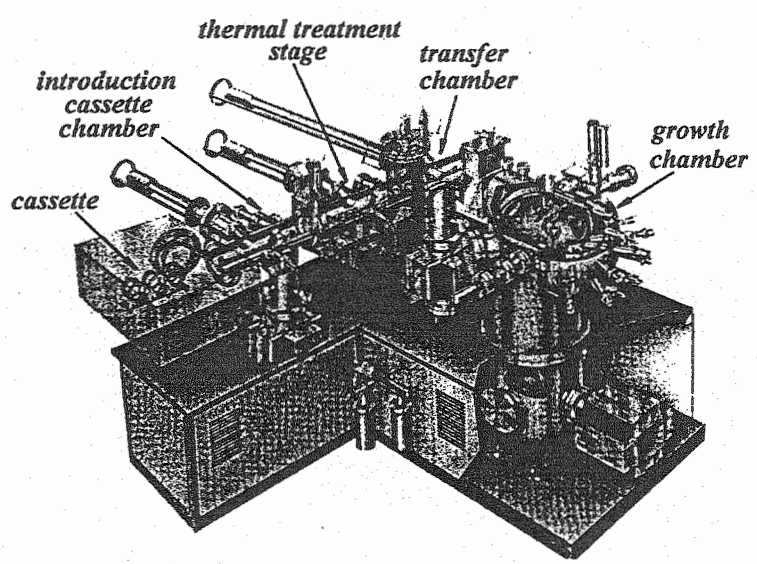
2.1.1 ชุดระบบการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุล

ชุดระบบการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุลที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชุดระบบ MBE ของบริษัท RIBER รุ่น 32 P ซึ่งมีลักษณะเป็น โมดูล (Module) โดยประกอบด้วยส่วน Cassette introduction chamber

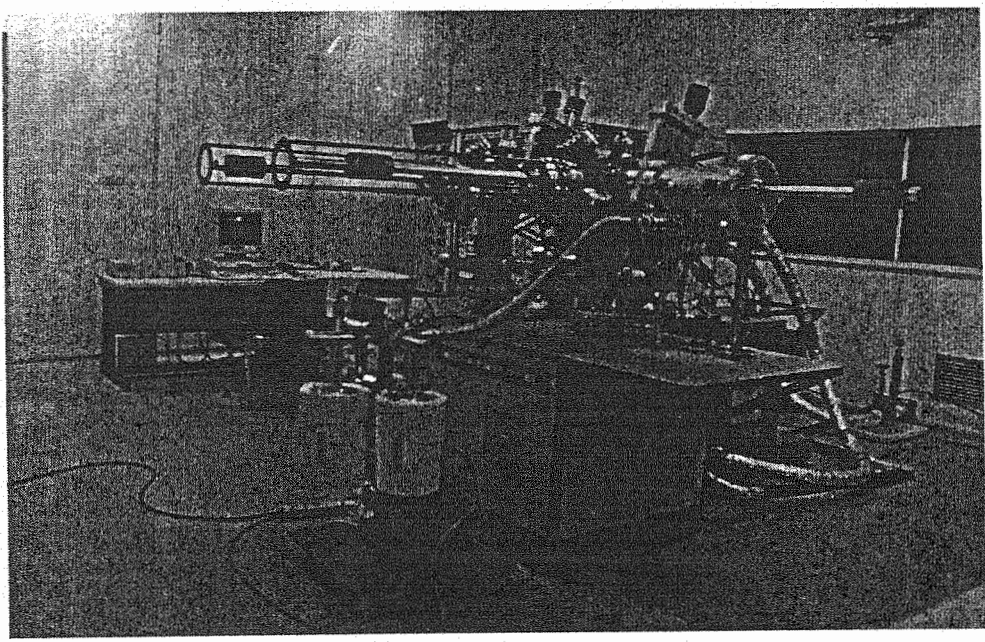
ส่วน Thermal treatment stage ส่วน Transfer buffer chamber และส่วน Growth chamber ดังแผนภาพตามรูปที่ 2.1 โมดูลแต่ละส่วนที่ต่อกันนี้มี Gate valve คอยกั้นกลางระหว่างโมดูล โดยจะเปิด Gate valve ให้ Cassette ที่มี Substrate holder ผ่านเข้าออกจากโมดูลส่วนหนึ่งไปยังโมดูลอีกส่วนหนึ่ง และเพื่อปิดแยกให้โมดูลแต่ละส่วนเป็นอิสระจากกัน นอกจากนี้ให้การรักษาภาวะสุญญากาศในแต่ละส่วนเป็นอิสระจากกัน 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 คีจึ้น 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, Residual Gas Analyzer และ Ionization gauge เป็นอุปกรณ์หลักพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อระบบ MBE โดย RHEED นี้เป็นเครื่องมือในการตรวจสอบโครงสร้างผิว นอกจากนี้ RHEED ยังสามารถใช้ในการควบคุมค่าความหนาของชั้นผลึกที่ปลูกได้จากปรากฏการณ์ RHEED Intensity oscillation ที่เกิดขึ้นในเทคนิค Phase-locked epitaxy หรือ PLE [6] และ Migration enhanced epitaxy หรือ MEE [7] ที่สามารถควบคุมค่าความหนาได้ในระดับ Monolayer ของผลึกที่ปลูก ส่วน Residual gas analyzer หรือ Quadrupole mass spectrometry เป็นเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบสภาวะบรรยากาศภายใน Growth chamber และ Ionization gauge เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดเทียบค่าความดันไอของลำโมเลกุลต่างๆ ที่ใช้ในการปลูกผลึกแต่ละครั้ง เพื่อปรับแต่งเงื่อนไขค่าความดันไอขององค์ประกอบต่างๆ ในการ

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



รูปที่ 2.1 ภาพโครงสร้างชุดระบบ MBE ของ RIBER รุ่น 32 P



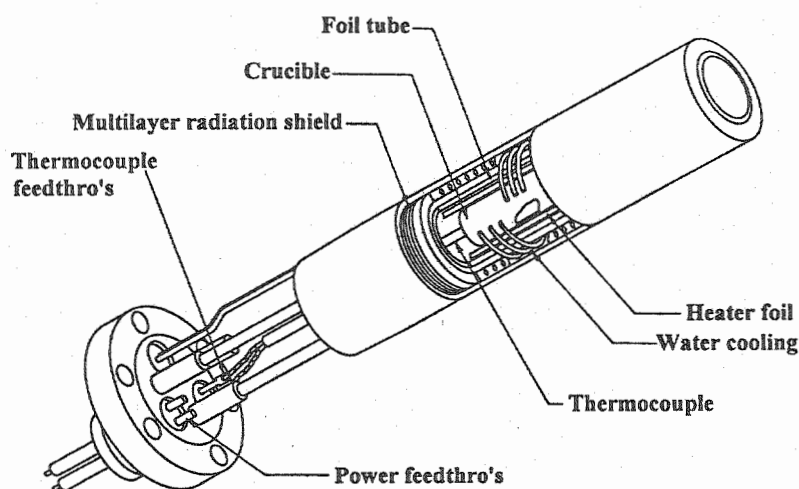
รูปที่ 2.2 ชุดระบบ MBE ที่ติดตั้งที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.2 Effusion cell

Effusion cell เป็นอุปกรณ์หลักสำคัญของระบบ MBE ในการผลิตลำโมเลกุลขององค์ประกอบ จากวัตถุดิบที่ใช้ในการปลูกผลึก ซึ่งวัตถุดิบนี้เป็นธาตุบริสุทธิ์หรือสารประกอบที่มีธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ก็ได้ และความสำคัญของ Effusion cell นั้นเป็นกุญแจที่ทำให้การปลูกผลึกวิธี MBE มีข้อดีเด่นที่เหนือกว่าเทคนิคอื่นๆ โดย Effusion cell แต่ละชนิดนั้นมีความเหมาะสมสำหรับวัสดุแต่ละชนิด ซึ่งในรายงานวิจัยนี้นำเสนอเฉพาะ Effusion cell ที่เกี่ยวข้องกับการปลูกผลึกอิติทเทกซ์ของ 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 เพื่อใช้ในการตรวจสอบอุณหภูมิและในการควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดความร้อนให้ได้อุณหภูมิตามต้องการ โดยอาศัยสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลต่อเข้ากับเครื่องควบคุมแบบ PID ที่ทำหน้าที่ควบคุมแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้ Effusion cell มีอุณหภูมิตามที่กำหนด สำหรับ K-cell ที่มีขนาดของเบ้าหลอมขนาดใหญ่จำเป็นต้องมีท่อระบายความร้อนอยู่ภายใน เพื่อให้ความร้อนที่เกิดขึ้นไม่ไปรบกวนส่วนอื่นๆ อีกด้วย



รูปที่ 2.3 แผนภาพโครงสร้าง Knudsen cell

สำหรับการควบคุมปริมาณของจำนวนโมเลกุลที่พุ่งออกจาก Knudsen cell ควบคุมได้จากอุณหภูมิของขดลวดความร้อนภายใน Knudsen cell ซึ่งปริมาณของจำนวนโมเลกุลของสารที่พุ่งออกจาก 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

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

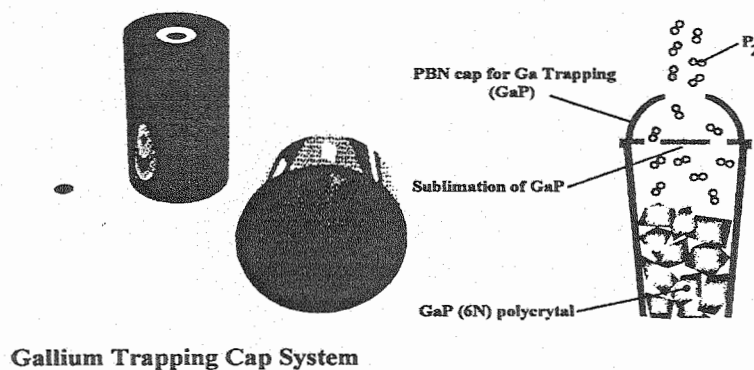
โดย R คืออัตราการเกิดผลึกมีหน่วยเป็น ไมครอน/ชั่วโมง

α คือค่าคงที่ ซึ่งค่าคงที่นี้ขึ้นกับค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกและทิศทางผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน

กลไกการเกิดผลึกของสารประกอบกลุ่ม III-V ถูกควบคุมโดยอะตอมของธาตุหมู่ III ในสถานะก๊าซที่ถูกพ่นไปยังผิวหน้าของผลึกแผ่นฐาน (Substrate) เป็นหลัก 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 Effusion cell ที่มีคุณสมบัติพิเศษ

ได้แก่ Valved cracker cell สำหรับสารเหล่านี้ แต่อย่างไรก็ดี Valved cracker cell นั้นมีราคาแพงและโครงสร้างซับซ้อน สำหรับสิ่งประดิษฐ์อีกชนิดหนึ่งที่ได้ออกแบบมาสำหรับใช้ร่วมกับ Knudsen cell แบบธรรมดา นี้ เพื่อใช้ในการผลิตตำโมเลกุลที่เป็นชนิด Dimer ของ As (As_2) และ P (P_2) ได้แก่ Ga-trapping cap วัสดุที่ใช้ในการนี้ เป็นสารประกอบ GaAs และ GaP ที่อยู่ในรูปโพลีคริสตัลไลน์ (Polycrystalline) เนื่องจากมีราคาถูกและอุณหภูมิของการสลายตัวมีค่าไม่สูงเกินไป และค่าความแตกต่างของค่าความดันไอของสารประกอบในสถานะสมดุลที่มีค่าต่ำกว่าไอของ Dimer ที่อุณหภูมิเดียวกัน โดยอุณหภูมินี้มีค่าสูงกว่าค่าอุณหภูมิจุดระเหิดของสารประกอบ Ga-trapping cap นั้นทำหน้าที่กักไอของสารประกอบ GaP ไว้ภายในภาชนะ Crucible ของ Knudsen cell โดย Ga-trapping cap เพื่อรักษาภาวะสมดุลของไอในสถานะที่เกิดการสลายตัว (decomposition) ของสารประกอบ สำหรับการสลายตัวของสารประกอบดังกล่าวนี้ เกิดขึ้นจากพลังงานความร้อนหรือการทำให้สารประกอบอยู่ในสถานะอุณหภูมิสูง ซึ่งในภาวะสมดุลนี้ สารประกอบ III-V มีจำนวนหรือปริมาณของอะตอมธาตุหมู่ III จำนวนมากกว่าธาตุหมู่ V และในภาวะอุณหภูมิสูงนี้ธาตุหมู่ V อยู่ในรูปของ Dimer (V_2) เป็นส่วนใหญ่ แต่เนื่องจากค่าความดันไอของโมเลกุล Dimer ของหมู่ V นั้นมีค่าสูงกว่า ทำให้โมเลกุลของ Dimer ที่เกิดขึ้นถูกพ่นออกมาเป็นโมเลกุลหลักเพียงอย่างเดียว โครงสร้างของ Ga-trapping cap ตามรูปที่ 2.4

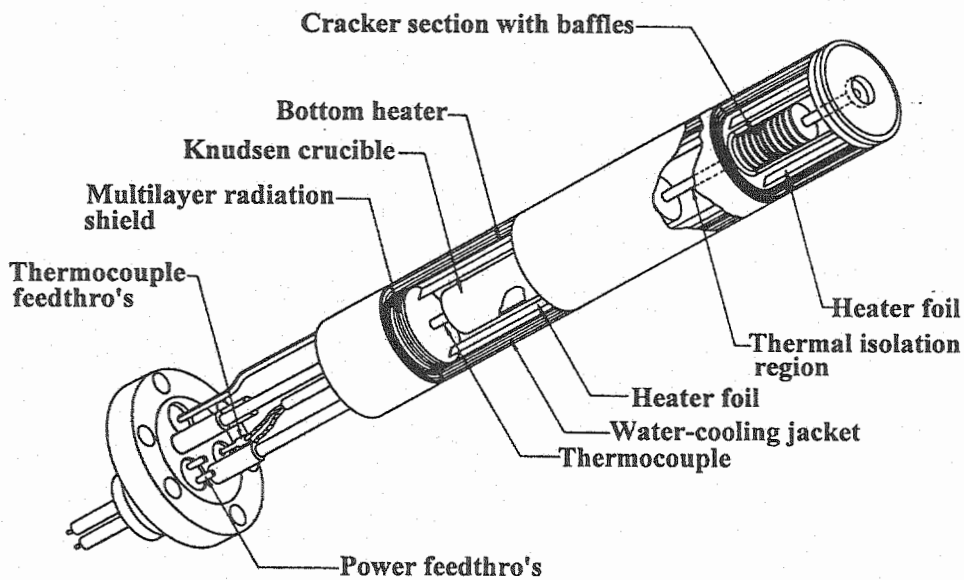


รูปที่ 2.4 ภาพโครงสร้างของ Ga-trapping cap [8]

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

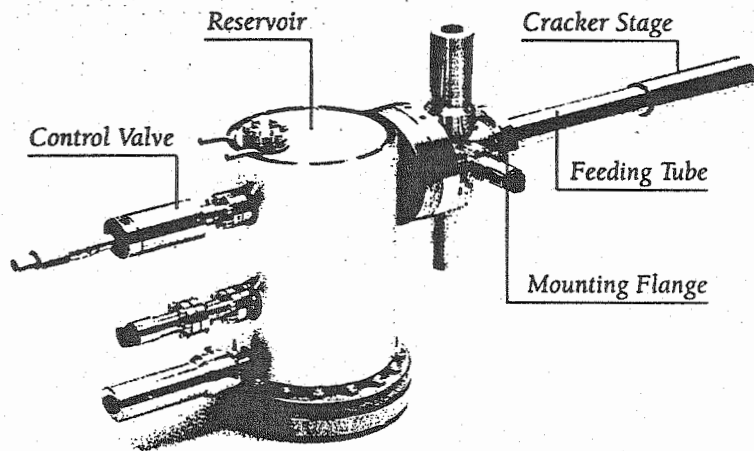
นั้นมี Cracking zone ซึ่งเป็นส่วนของขดลวดความร้อนที่ให้อุณหภูมิสูงในช่วง 800-1000°C เพื่อให้โมเลกุล Tetramer แตกตัวเป็นโมเลกุล Dimer และในการออกแบบนั้นข้อควรระวังคือต้องให้ส่วน Cracking zone อยู่ห่างจาก Crucible หรือ Reservoir ที่บรรจุวัตถุดิบมากเพียงพอ เพื่อมิให้ความร้อนจาก Cracking zone ซึ่งมีค่าอุณหภูมิสูงรบกวนส่วน Crucible อันมีผลต่อการควบคุมค่าความดันไอได้ ดังนั้น Effusion cell ชนิดนี้จึงมีความยาวกว่า Knudsen cell และจำเป็นต้องมีส่วนของท่อนำหรือส่วนระบายความร้อนในลักษณะอื่นๆ สำหรับทำหน้าที่เป็นระบบระบายความร้อน (Cooling) เพื่อให้การควบคุมอุณหภูมิในส่วน Crucible สามารถทำได้



รูปที่ 2.5 แผนภาพ โครงสร้างของ 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 ที่ใช้ในการควบคุมค่าความดันไอได้จากตำแหน่งของ Valve รวมถึงความสามารถในการปิดกั้นไอไว้ภายใน Reservoir เพื่อไม่ให้ไอออกมาได้ในสภาวะที่เราไม่มีความต้องการ ทำให้มีความคล่องตัวในการกำหนดค่าความดันไอตามเงื่อนไขได้ง่าย และความสามารถในการตัดลำโมเลกุลได้ดีกว่า Effusion cell ชนิดอื่นๆ โดยเฉพาะการปลูกผลึกของโครงสร้างเฮเทโร (Heterostructure) ที่มีสารประกอบของธาตุหมู่ V ที่ต่างชนิดกัน ข้อดีของ Valved cracker cell คือสามารถใช้วัตถุดิบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งแตกต่างจาก Knudsen cell และ Cracker cell ซึ่งวัตถุดิบภายในนั้นถูกทำให้กลายเป็นไอระเหยออกมาตลอดเวลาถึงแม้ว่า Shutter อยู่ในตำแหน่งปิดก็ตาม

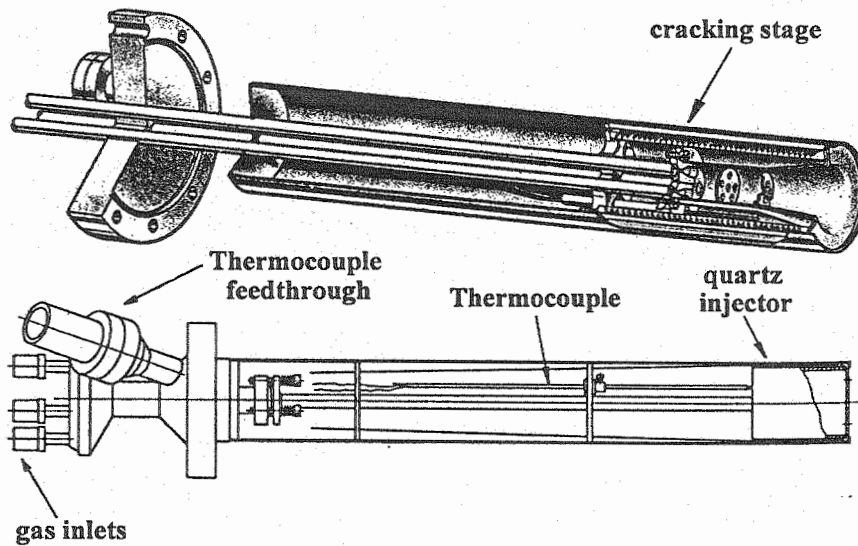


รูปที่ 2.6 ภาพของ As Valve Cracker Cell [9]

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 ต่างกันแต่ขดลวดความร้อนที่ใช้นั้นมีอุณหภูมิสูงกว่า เพื่อให้ก๊าซที่ไหลผ่านแตกตัวออกเป็นโมเลกุลแบบ Dimer หรือ Tetramer สำหรับโมเลกุลธาตุหมู่ V และอะตอมเดี่ยวสำหรับธาตุหมู่ III ควบคุมได้จากค่าอุณหภูมิในส่วน Cracking zone สำหรับข้อดีของการใช้ก๊าซเป็นวัตถุดิบคือความต่อเนื่องและความสะดวกในการเติมก๊าซวัตถุดิบ โดยไม่มีความจำเป็นในการทำให้ระบบร่วก่อนการเติมวัตถุดิบเหมือนระบบ MBE ทั่วไป เนื่องจากวัตถุดิบนั้นถูกเก็บไว้ในท่อก๊าซที่ต่อเข้าระบบ MBE ซึ่งสามารถปิดท่อของระบบการป้อนก๊าซที่ต่อเข้าระบบและทำการเปลี่ยนท่อก๊าซได้ โดยไม่กระทบกับสภาวะสุญญากาศของ Growth Chamber แต่อย่างไรก็ตามการใช้ก๊าซเป็นวัตถุดิบนั้นมีความจำเป็นที่ต้องติดตั้งระบบปั๊มสุญญากาศที่มีขนาดกำลังสูงเพียงพอและชนิดของปั๊มต้องเป็นชนิดที่ทนต่อการกัดกร่อนของก๊าซเหล่านั้นได้

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 [10]

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบชนิด Effusion cell และชนิดของลำ โมเลกุลที่ได้จากวัสดุชนิดต่างๆ

Effusion Cell	ชนิดของลำ โมเลกุล				
	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 ที่เหนือกว่าวิธีการปลูกผลึกอพิเทกซ์วิธีอื่นๆ ในเชิงเทคนิคก็คือสามารถติดตั้งอุปกรณ์วิเคราะห์ต่างๆ เข้ากับระบบได้ ทำให้มีความต่อเนื่องในการตรวจสอบ/วิเคราะห์และมีความสะดวก ซึ่งเหมาะสมสำหรับการวิจัยและการผลิตเชิงพาณิชย์ สำหรับในรายงานนี้ขอกกล่าวถึงโดยสังเขปเฉพาะอุปกรณ์วิเคราะห์หลักที่เป็นพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับระบบ MBE เท่านั้น

2.1.3.1 Reflection high energy electron diffraction (RHEED)

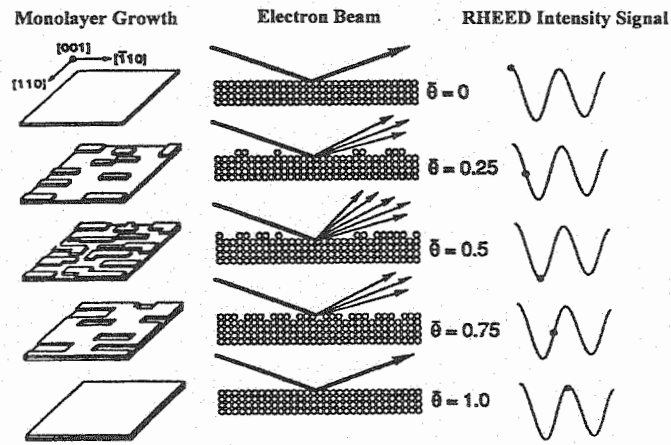
RHEED เป็นเครื่องมือหลักพื้นฐานที่สำคัญชนิดหนึ่งในระบบ MBE ที่ใช้ในการวิเคราะห์และตรวจสอบโครงสร้างผิว (Surface structure) โดยข้อมูลที่ได้จาก RHEED นี้บ่งบอกรูปแบบของลักษณะโครงสร้างผิวในเชิง Microstructure และความเรียบของผิว (Smoothness) ซึ่งลักษณะรูปแบบ (Pattern) ที่ได้จากรูปแบบ RHEED นี้ขึ้นกับลักษณะการเรียงตัวของอะตอมในโครงร่างผลึกและความเรียบของผิวที่ทำให้ลำอิ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

สำหรับหน้าที่หลักสำคัญของ RHEED ที่สรุปได้มีดังนี้

1. การตรวจสอบผิวหน้าแผ่นผลึกฐานในขณะที่ทำความสะอาดด้วยความร้อน (Thermal cleaning) ก่อนการปลูกผลึก
2. การควบคุมสถานะเริ่มต้นของการปลูกผลึก
3. การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผิวในขณะที่ทำการปลูกผลึก

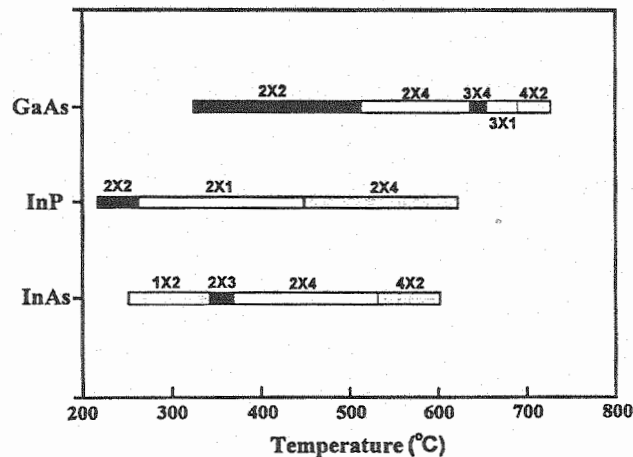
นอกจากนี้ RHEED ยังสามารถใช้ในการสอบเทียบอัตราการปลูกผลึก (Growth rate calibration) ได้ เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสง RHEED ในขณะที่ทำการปลูกผลึก ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามรูปที่ 2.8 ตามปกติผิวหน้าของผลึกก่อนการปลูกผลึกมีความเรียบ ทำให้อิเล็กตรอนสามารถสะท้อนผ่านผิวหน้าผลึกที่มีอะตอมเรียงตัวเป็นระเบียบ ซึ่งความเข้มของอิเล็กตรอนที่สะท้อนผ่านไปในการนี้มีความเข้มสูงสุด แต่เมื่อการปลูกผลึกเริ่มต้นขึ้นการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสง RHEED มีค่าลดลง ในขณะที่ทำการปลูกผลึกนี้เกิดจากการกระเจิง (Scattering) ของลำอิเล็กตรอน เนื่องจากผลึกที่เกิดขึ้นนั้นบนผิวหน้าของแผ่นผลึกเกิดการเรียงตัวของก้อนผลึกขนาดเล็ก (Cluster) โดยก้อนผลึกขนาดเล็กที่เกิดขึ้นนั้นมีลักษณะกระจัดกระจายไม่เป็นระเบียบ เป็นผลทำให้ความเข้มของลำอิเล็กตรอนมีค่าลดลง จนกระทั่งพื้นที่ของก้อนผลึกขนาดเล็กเหล่านั้นคลุมผิวหน้าของผลึกมากกว่าครึ่งหนึ่ง ความเข้มแสงของ RHEED จะกลับมามีความเข้มเพิ่มขึ้นอีก จนมีค่าสูงสุดเมื่อผลึกเรียงเต็มผิวหน้าแผ่นผลึกฐาน ซึ่งความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของความเข้มและค่าความหนาของผลึกที่เกิดขึ้นนี้มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบคลื่นรูปไซน์ (Sine) โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มหนึ่งรอบในการเปลี่ยนแปลงความหนาหนึ่งชั้น โมเลกุล (Monolayer) ด้วยเหตุนี้เองทำให้สามารถควบคุมค่าความหนาของชั้นผลึกที่ได้ ดังนั้น RHEED จึงเป็นเครื่องมือสำคัญในเทคนิค PLE และ MEE ซึ่งเป็นนิยมใช้ในปัจจุบัน นอกจากนี้ RHEED ยังเป็นเครื่องมือสำคัญในการสร้างโครงสร้าง Quantum dot แต่อย่างไรก็ดีเทคนิคนี้มีขีดจำกัดคือการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มไม่ชัดเจนในการปลูกผลึกของสารประกอบบางชนิดและการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสง

RHEED นั้นมีลักษณะที่แตกต่างกันไปตามเงื่อนไขในสถานะที่แตกต่างกันอีกด้วย สำหรับรายละเอียดต่างๆ จะขอไม่กล่าวถึงในที่นี้



รูปที่ 2.8 แผนภาพอธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลงความเข้มของอิเล็กตรอนในขณะที่ทำการปลูกผลึก

นอกจากนี้รูปแบบ (Pattern) ของ RHEED ที่ได้ของผลึกแต่ละชนิดสามารถบ่งบอกถึงช่วงค่าอุณหภูมิของผิวหน้าผลึกได้ด้วยดังตัวอย่างในรูปที่ 2.9 ซึ่งปัจจุบันยังนิยมใช้วิธีนี้ในการตรวจสอบอุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานในการปลูกผลึกวิธี MBE และสามารถใช้ได้กับสารประกอบเกือบทุกชนิด โดยเฉพาะสารประกอบกึ่งตัวนำที่ค่าแถบพลังงานมีค่าน้อยมาก อันเป็นข้อดีที่เหนือกว่าวิธีการวัดด้วย Pyrometer ซึ่งไม่สามารถใช้ได้ในกรณีนี้ [11] แต่อย่างไรก็ดีวิธีการนี้มีความคลาดเคลื่อนมากกว่า 10°C และมีความยุ่งยากในการอ่านรูปแบบของ RHEED ในการเทียบอุณหภูมิ โดยขึ้นกับความชำนาญของผู้อ่านเป็นอย่างมาก



รูปที่ 2.9 แผนภาพความสัมพันธ์ของรูปแบบ RHEED และอุณหภูมิของแผ่นผลึก (100) GaAs, InP และ InAs ภายใต้ไอของ Dimer [12]

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 [13] 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 โดยมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เช่น Pyrometer เพื่อใช้ในการวัดอุณหภูมิผิวหน้าแผ่นผลึกฐาน Ellipsometer เพื่อใช้ในการควบคุมความหนาและอัตราส่วนของสารประกอบได้แม่นยำยิ่งขึ้น ด้วยลักษณะของระบบ MBE ที่เป็นโมดูลที่มีสถานะสุญญากาศระดับพิเศษทำให้สามารถต่อระบบ 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 [14] 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 และค่าอัตราสัดส่วน (Composition)
Process Environment	Multichamber UHV system	ระบบ Multichamber ช่วยให้สามารถลดปริมาณของ 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 [15]

สารประกอบ	$T_{CS} (^{\circ}C)$	$T_{max}(V_4)(^{\circ}C)$	$T_{max}(V_2)(^{\circ}C)$	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)

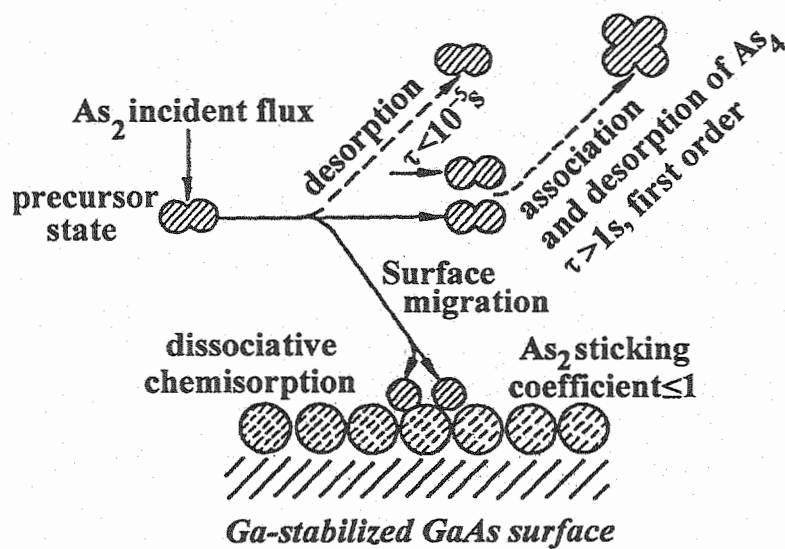
$T_{max}(V_4)$ หมายถึงอุณหภูมิสูงสุดภายบรรยากาศ tetramer โมเลกุลของธาตุหมู่ V

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

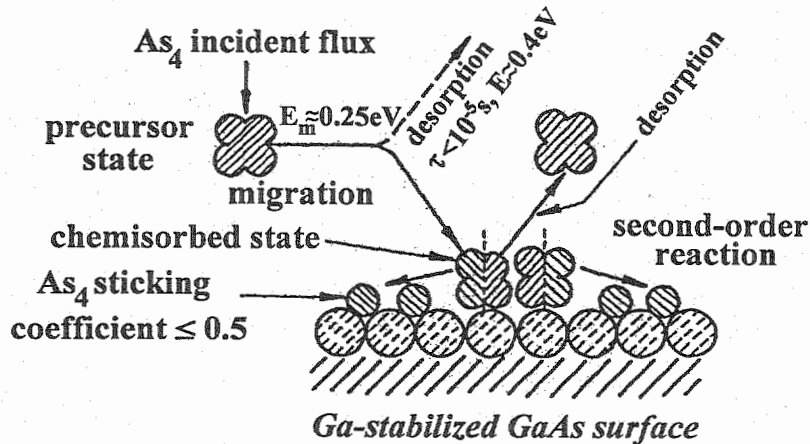
J_{V4}/J_{III} หมายถึงค่าอัตราส่วน flux ของ V/III ที่เกิดจากการสลายตัว (Decomposition)

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

การอธิบายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุลนั้นเราสามารถให้แบบจำลองตามรูปที่ 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 ที่เกาะลงบนผิวหน้ามีสัดส่วนเท่ากับจำนวนอะตอมของ Ga ที่เกาะที่ผิวหน้า ส่วนอะตอม As ส่วนที่เหลือจำนวน 4 อะตอมนั้นจะรวมตัวกันเป็นโมเลกุล As₄ และถูกปล่อยคาย (Desorp) ออกจากผิวไป ดังนั้นในกรณีนี้จึงมีความจำเป็นต้องให้ค่าความหนาแน่นของโมเลกุล 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 และอีกส่วนหนึ่งที่ถูกละคาย (Desorp) ออกมา ซึ่งเป็นส่วนที่สูญเสียไปและการสูญเสียนี้มีอัตราเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีค่าสูงขึ้น



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



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

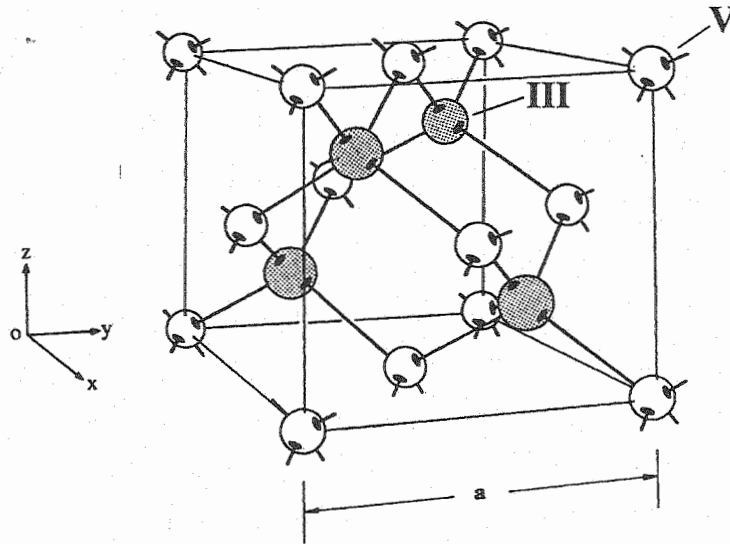
2.3 สารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V

นับตั้งแต่ทศวรรษที่ 50 ได้มีการค้นพบสารประกอบกึ่งตัวนำชนิดสองธาตุ (Binary) ของกลุ่ม III-V และคุณสมบัติต่างๆ ของสารประกอบเหล่านี้มีคุณสมบัติทางกายภาพที่หลากหลายตามชนิดและองค์ประกอบของสารประกอบ นับตั้งแต่ค่าแถบพลังงาน (Band Energy Gap) ในช่วง 0.18-2.42 eV ค่าดัชนีหักเห ฯลฯ เป็นต้น ต่อมาในทศวรรษที่ 60 ได้มีการพัฒนาวิธีการเตรียมของสารประกอบเหล่านี้ เพื่อประยุกต์ใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ และเทคนิคการปลูกผลึกต่างๆ ได้เริ่มต้นขึ้นในช่วงนี้ การปลูกผลึกอพิแทกซีในยุคนี้ส่วนใหญ่มีวัตถุประสงค์เพื่อการสร้างสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ 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 แผนภาพโครงสร้างแบบ Zincblende

ตารางที่ 2.4 ตัวแปรทางกายภาพของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V ชนิด 2 ธาตุ [16]

สารประกอบ	ค่าคงตัวผลึก (Å)	ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (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

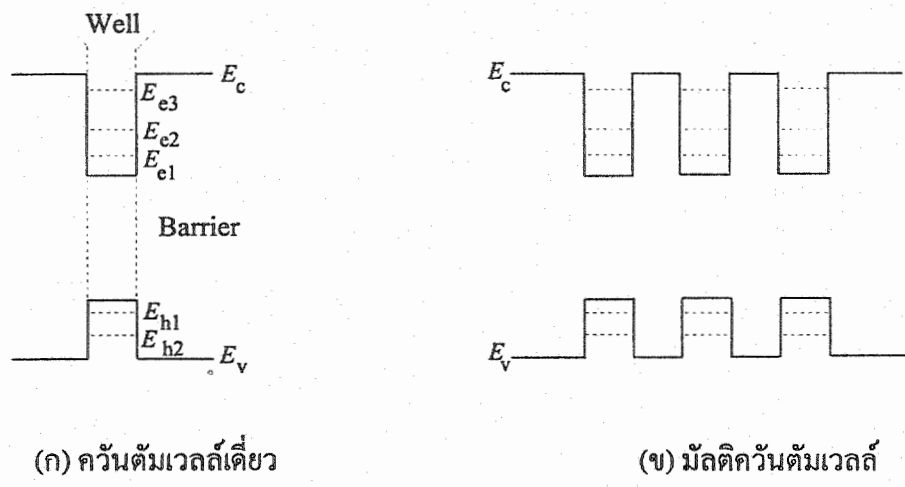
เนื่องจากสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V นั้นมีคุณสมบัติที่หลากหลาย โดยขึ้นกับองค์ประกอบและสัดส่วนปริมาณของธาตุที่ประกอบกันขึ้นเป็นสารประกอบ ตามปกติแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นส่วนใหญ่ นั้นเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำชนิด 2 ธาตุ (Binary) ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพเฉพาะตัว เนื่องจากตัวแปรขององค์ประกอบมีจำนวนน้อยที่สุด ดังนั้นในการสร้างแผ่นผลึกฐานจึงนิยมทำจากสารประกอบ 2 ธาตุ แต่คุณสมบัติที่จำกัดของสารประกอบชนิด 2 ธาตุที่ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในบางกรณี กุญแจสำคัญก็คือสารประกอบชนิด 3 ธาตุและ 4 ธาตุได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างหัวเซเทโร (Heterostructure) โดยมีค่าคงตัวผลึกเข้าได้กับแผ่นผลึกฐาน เนื่องจากค่าแถบพลังงานหรือค่าดัชนีหักเหที่มีค่าแตกต่างกันไป อันเป็นผลทำให้มีความสะดวกในการออกแบบสร้างสิ่งประดิษฐ์และสามารถกำหนดควัสดุที่ความเหมาะสมกับสิ่งประดิษฐ์ได้ สำหรับค่าตัวแปรต่างๆ ของสารประกอบกึ่งตัวนำตัวอย่างมีแสดงในตารางที่ 2.4 และ 2.5

ตารางที่ 2.5 ค่าแถบพลังงานของตัวอย่างสารประกอบชนิด 3 ธาตุและ 4 ธาตุ [17]

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

2.4 ควันตัมเวลล์ (Quantum well)

ควันตัมเวลล์เป็นโครงสร้างเฮเทโรแบบคู่ (Double Heterostructure) ของสารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกัน โดยสารกึ่งตัวนำชั้นกลางที่ถูกประกบ (Sandwich) ด้วยสารกึ่งตัวนำอีกสองชั้น โดยสารกึ่งตัวนำชั้นกลางนี้มีค่าความหนาแน่นน้อยกว่า จนทำให้ระดับพลังงานในแถบนำไฟฟ้า (Conduction band) และ/หรือแถบวาเลนซ์ (Valence band) เกิดการแยกตัวออกเป็นระดับพลังงานควันไตซ์ (Quantized state) หรือระดับพลังงานย่อย (Subband) อยู่ในแถบพลังงานเดิม โดยระดับพลังงานควันไตซ์สำหรับอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้น เมื่อแถบพลังงานนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำชั้นกลางมีระดับต่ำกว่าของสารกึ่งตัวนำที่ประกบ มีผลทำให้ระดับพลังงานควันไตซ์ที่เกิดขึ้นอยู่ในแถบพลังงานนำไฟฟ้า ในทำนองเดียวระดับพลังงานควันไตซ์สำหรับโฮลที่เกิดขึ้น เมื่อแถบพลังงานวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำชั้นกลางมีระดับสูงกว่าของสารกึ่งตัวนำที่ประกบ มีผลทำให้ระดับพลังงานควันไตซ์ที่เกิดขึ้นอยู่ภายในแถบพลังงานวาเลนซ์ โดยเราเรียกสารกึ่งตัวนำชั้นกลางที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า จนเกิดปรากฏการณ์นี้ว่า "เวลล์" (Well) และชั้นสารกึ่งตัวนำที่ประกบสารกึ่งตัวนำชั้นกลางนี้เรียกว่า "แบร์เรียร์" (Barrier) ตามปกติโครงสร้างควันตัมเวลล์ที่มีชั้นเวลล์เพียงหนึ่งชั้นนั้น มีชื่อเรียกว่า "ควันตัมเวลล์เดี่ยว" (Single quantum well : SQW) สำหรับกรณีโครงสร้างที่มีการเรียงชั้นเวลล์และชั้นแบร์เรียร์สลับกันไปเป็นจำนวนหลายๆ ชั้น เราเรียกโครงสร้างนี้ว่า "มัลติควันตัมเวลล์" (Multi-quantum well : MQW) ตามรูปที่ 2.13 โดยโครงสร้างควันตัมเวลล์สามารถแบ่งออกได้ 4 ลักษณะ ตามลักษณะการเรียงแถบพลังงาน (Band alignment) หรือแบ่งชนิดตามลักษณะโครงสร้างหัวต่อเฮเทโรตามรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 แผนภาพโครงสร้างควันตัมเวลล์ (ก) ควันตัมเวลล์เดี่ยว (ข) มัลติควันตัมเวลล์

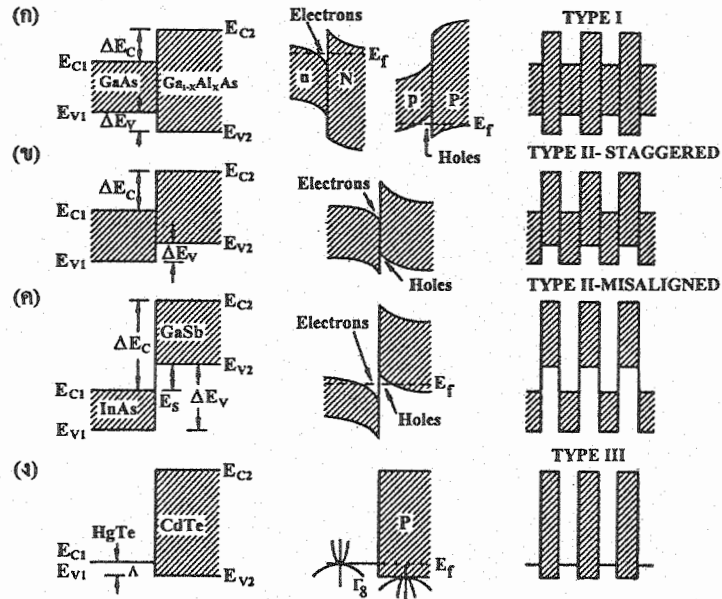
ก) โครงสร้างควันตัมเวลล์แบบ type I มีลักษณะตามรูปที่ 2.14 (ก) แถบพลังงานนำไฟฟ้าของเวลล์มีระดับพลังงานต่ำกว่าของแบร์เรียร์และแถบพลังงานวาเลนซ์ของชั้นเวลล์มีระดับพลังงานสูงกว่า

ของแบร์เรียร์ ทำให้เกิดระดับพลังงานย่อยของอิเล็กตรอนและโฮลขึ้นในชั้นเวลล์ ซึ่งการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในกรณีลักษณะนี้ต้องใช้พลังงานหรือคายพลังงานมากกว่าค่าแถบพลังงานช่องว่างของชั้นเวลล์ เนื่องจากการเปลี่ยนระหว่างระดับพลังงานย่อยของอิเล็กตรอนที่สูงกว่าค่าต่ำสุดของแถบพลังงานนำไฟฟ้าของชั้นเวลล์และระดับพลังงานย่อยโฮลที่อยู่ต่ำกว่าค่าสูงสุดพลังงานของแถบพลังงานวาเลนซ์ของชั้นเวลล์ ตัวอย่างของโครงสร้างควันตัมเวลล์ลักษณะนี้ได้แก่ GaAs-GaAlAs, InGaAs-GaAs, GaSb-AlGaSb, GaAs-GaP เป็นต้น

ข) โครงสร้างควันตัมเวลล์แบบ type II-staggered มีลักษณะตามรูปที่ 2.14 (ข) แถบพลังงานนำไฟฟ้าของชั้นเวลล์มีระดับต่ำกว่าของชั้นแบร์เรียร์ แต่แถบพลังงานวาเลนซ์ของชั้นเวลล์มีระดับสูงกว่าของแบร์เรียร์ ทำให้เกิดระดับพลังงานย่อยของอิเล็กตรอนเกิดขึ้นในชั้นเวลล์และระดับพลังงานย่อยของโฮลขึ้นในแถบพลังงานวาเลนซ์ของชั้นแบร์เรียร์ ซึ่งการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในกรณีนี้ใช้พลังงานหรือคายพลังงานน้อยกว่าค่าแถบพลังงานของชั้นเวลล์หรือชั้นแบร์เรียร์ได้ โดยขึ้นกับค่าความแตกต่างของระดับพลังงานระหว่างระดับพลังงานย่อยในแถบพลังงานนำไฟฟ้าของชั้นเวลล์และในแถบพลังงานวาเลนซ์ของชั้นแบร์เรียร์ เนื่องจากการเปลี่ยนระหว่างระดับพลังงานย่อยของอิเล็กตรอนที่สูงกว่าค่าพลังงานของแถบนำไฟฟ้าของชั้นเวลล์และระดับพลังงานย่อยโฮลที่อยู่ต่ำกว่าค่าพลังงานของแถบวาเลนซ์ของชั้นแบร์เรียร์ โดยแต่ละระดับพลังงานมีระดับพลังงานอยู่ในระดับแถบช่องว่างพลังงานของชั้นเวลล์ ซึ่งทำให้ระดับพลังงานในการเปลี่ยนแปลงในกรณีนี้มีค่าน้อยกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของชั้นเวลล์ ตัวอย่างของโครงสร้างควันตัมเวลล์ลักษณะนี้ได้แก่ InGaAs-InP, InAlGaAs-InGaAsP, GaAs-InP เป็นต้น

ค) โครงสร้างควันตัมเวลล์แบบ Type II-misaligned มีลักษณะตามรูปที่ 2.14 (ค) แถบพลังงานนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดมีระดับแตกต่างกันจนทำให้ค่าต่ำสุดแถบพลังงานนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งอยู่ต่ำกว่าค่าสูงสุดของแถบพลังงานวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำอีกชนิดหนึ่ง เป็นผลให้ระดับพลังงานย่อยของอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นมีค่าอยู่ในระดับเดียวกัน ซึ่งความรู้ของโครงสร้างควันตัมเวลล์ชนิดนี้ยังมีจำกัด เนื่องจากการศึกษาและการวิจัยมีน้อยมากจากสาเหตุในการเตรียมโครงสร้างได้ยากมาก ตัวอย่างของโครงสร้างควันตัมเวลล์ลักษณะนี้ได้แก่ InAs-GaSb, GaAs-GaSb เป็นต้น

ง) โครงสร้างควันตัมเวลล์แบบ Type III มีลักษณะตามรูปที่ 2.14 (ง) เป็นโครงสร้างเฮเทโรของสารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าและสารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวน ซึ่งโครงสร้างควันตัมเวลล์ชนิดนี้ได้จากสารประกอบกลุ่ม II-VI เป็นส่วนใหญ่ ตัวอย่างของโครงสร้างควันตัมลักษณะนี้ได้แก่ CdTe-HgTe เป็นต้น



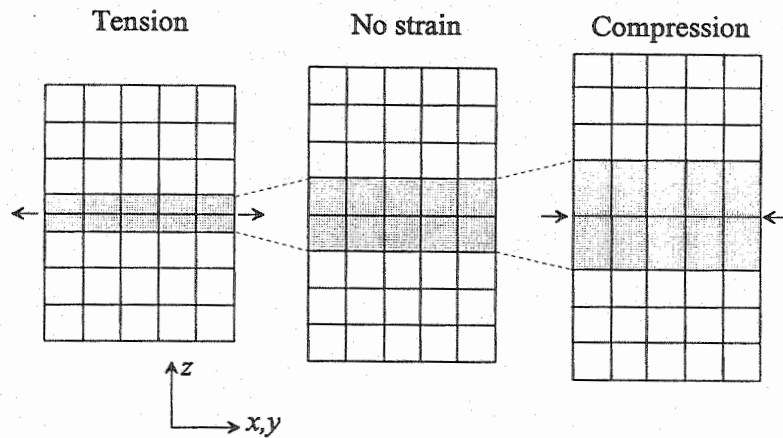
รูปที่ 2.14 แผนภาพโครงสร้างควันตัมเวลล์แบบต่างๆ ที่แบ่งตามโครงสร้างหัวต่อเฮเทโร [18]

ในโครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์นั้นระดับพลังงานย่อยจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับในโครงสร้างควันตัมเวลล์เดี่ยวได้ หากชั้นแบร์เรียร์มีค่าหนาเพียงพอจนการคัปปีง (Coupling) ของระดับพลังงานย่อยในชั้นเวลล์ข้างเคียงเป็นอิสระจากกัน แต่ในกรณีที่ค่าความหนาของชั้นแบร์เรียร์มีความบางจนมีผลทำให้เกิดระดับพลังงานย่อยเกิดปฏิกริยาขึ้น ทำให้ระดับพลังงานย่อยใหม่มีลักษณะเป็นแถบพลังงานย่อยขึ้น

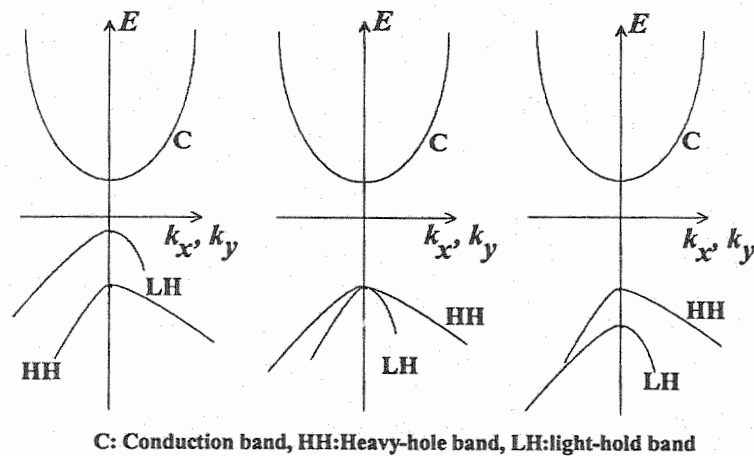
2.5 ควันตัมเวลล์ที่มีความเครียด (Strained Quantum Well)

โครงสร้างควันตัมเวลล์อีกชนิดหนึ่งได้แก่โครงสร้างควันตัมเวลล์ที่มีความเครียด ซึ่งความเครียดเกิดขึ้นจากความแตกต่างของค่าคงตัวผลึก (Lattice constant) หรือการไม่เข้าคู่ของค่าคงตัวผลึก (Lattice-mismatch) ของสารประกอบที่ประกอบกันขึ้นเป็นโครงสร้าง โดยที่ความหนาของชั้นที่มีค่าคงตัวผลึกแตกต่างกันไปนั้นมีค่าความหนาน้อยกว่าค่าความหนาวิกฤติ (Critical thickness) เนื่องจากความหนาที่มีค่าน้อยทำให้จุดบกพร่อง (Defect) หรือ Dislocation ที่เกิดจากความแตกต่างของค่าคงตัวผลึกไม่แสดงในทางลบสำหรับกรณีนี้ แต่ผลในกรณีนี้ทำให้แถบพลังงานในชั้นเวลล์มีความแตกต่างไปจากกรณีปกติหรือกรณีที่ไม่มี ความแตกต่างของค่าคงตัวผลึก (Lattice Matching) สำหรับโครงสร้างควันตัมเวลล์ที่มีความเครียดนี้สามารถแบ่งตามลักษณะของความเครียดที่เกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะคือ ความเครียดในลักษณะการดึง (Tensile strain) ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่ชั้นเวลล์มีค่าคงตัวผลึกน้อยกว่าของชั้นแบร์เรียร์ โดยผลของความเครียดในกรณีนี้ทำให้แถบโฮลเบา (Light-hole band) อยู่ในระดับที่สูงกว่าแถบโฮลหนัก และความเครียดในลักษณะการบีบ (Compressive strain) ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่ชั้นเวลล์มีค่าคงตัวผลึกมากกว่าของชั้นแบร์เรียร์ โดยผล

ของความเครียดในกรณีนี้ทำให้แถบโฮลเบา (Light-hole band) อยู่ในระดับที่ต่ำกว่าแถบโฮลหนัก ตามรูปที่ 2.15



(ก) โครงสร้างควันทัมเวลล์ที่มีความเครียด



C: Conduction band, HH: Heavy-hole band, LH: light-hole band

(ข) แผนภาพแถบพลังงาน

รูปที่ 2.15 แผนภาพโครงสร้างควันทัมเวลล์ที่มีความเครียด (ก) และแผนภาพแถบพลังงาน (ข)

นอกจากนี้ผลของความเครียดนี้ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของแถบพลังงานแล้ว ความเครียดยังมีผลต่อค่ามวลประสิทธิผล (Effective mass) ของอิเล็กตรอนเช่นกัน ดังในตารางที่ 2.6 โดยผลของนี้มีผลต่อคุณสมบัติของสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ ในด้านผลสนองเชิงความถี่ (Frequency response) ค่าความหนาแน่นกระแสขีดเริ่มต้นการเปล่งแสงเลเซอร์ (Threshold current density) ในเลเซอร์ไดโอดที่มีโครงสร้างควันทัมเวลล์เป็นชั้นแอคทีฟ (Active layer) และค่าช่วงกว้างความยาวคลื่นของการตอบสนองในสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์ (Photodetector) และออปติคัลมอดูเลเตอร์ (Optical modulator)

ตารางที่ 2.6 ค่ามวลประสิทธิผลของอิเล็กตรอนใน $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ บน GaAs และ $\text{In}_{0.53+x}\text{Ga}_{0.47-x}\text{As}$ บน InP [19]

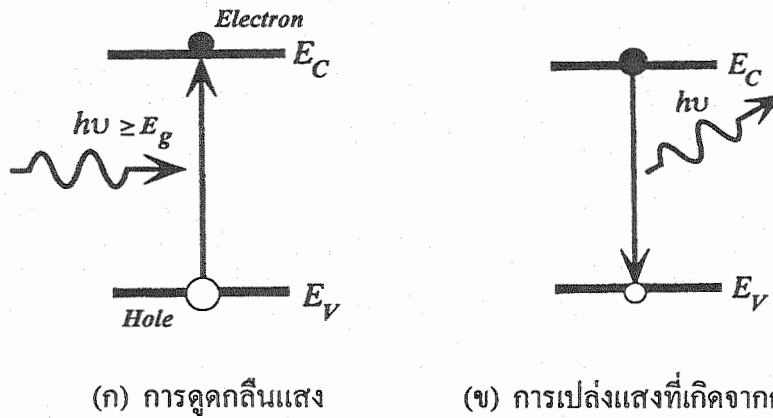
x	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$			$\text{In}_{0.53+x}\text{Ga}_{0.47-x}\text{As}$		
	$m_{unstrained}^*$	$m_{ \text{ strained}}^*$	$m_{\perp\text{ strained}}^*$	$m_{unstrained}^*$	$m_{ \text{ strained}}^*$	$m_{\perp\text{ strained}}^*$
0.000	0.066	0.066	0.066	0.045	0.045	0.045
0.050	0.064	0.065	0.064	0.044	0.044	0.045
0.100	0.062	0.064	0.063	0.042	0.043	0.045
0.150	0.060	0.063	0.063	0.040	0.041	0.044
0.200	0.058	0.062	0.062	0.037	0.039	0.044
0.250	0.056	0.061	0.061	0.035	0.037	0.044
0.300	0.054	0.060	0.061	0.033	0.035	0.043
0.350	0.052	0.058	0.060	0.031	0.033	0.043
0.400	0.050	0.057	0.060	0.028	0.030	0.043

2.6 การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์

การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์เป็นวิธีการวัดคุณสมบัติการเปล่งแสงของสารกึ่งตัวนำโดยการกระตุ้นด้วยแสงที่มีค่าพลังงานโฟตอนไม่น้อยกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Energy Band Gap) ของสารกึ่งตัวนำ ผลของการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดพาหะส่วนเกิน (Excess carrier) ขึ้น โดยในสภาวะปกติอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (Valence Band) ได้รับความพลังงานการกระตุ้นนี้หรือได้รับการถ่ายเทพลังงานจากโฟตอน ทำให้ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนเปลี่ยนไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้า (Conduction Band) ซึ่งเป็นสภาวะที่มีระดับพลังงานที่สูงกว่าเดิม ผลจากเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนนี้ทำให้เกิดสภาวะว่างหรือโฮล (Hole) ซึ่งอิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะใหม่นี้สามารถอยู่ในสภาวะดังกล่าวได้ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง จากนั้นอิเล็กตรอนและโฮลหรือพาหะส่วนเกินที่เกิดขึ้นมาจะรวมตัวกัน (Recombination) ซึ่งการรวมตัวนี้อิเล็กตรอนคายพลังงานออกมาในรูปของโฟตอนที่มีค่าประมาณเท่ากับค่าแถบพลังงานช่องว่าง (Band gap energy) หรือค่าระดับพลังงานที่เกิดการเปลี่ยนระดับในขณะที่คายพลังงาน เมื่อเราวัดสเปกตรัมของแสงที่ได้จากการเปล่งแสงนี้จะทำให้ทราบค่าแถบพลังงานช่องว่างของสารกึ่งตัวนำได้ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานต่างๆ เช่นการเปลี่ยนระดับพลังงานแบบ Band to Impurity level เป็นต้น ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะของสเปกตรัมที่ได้

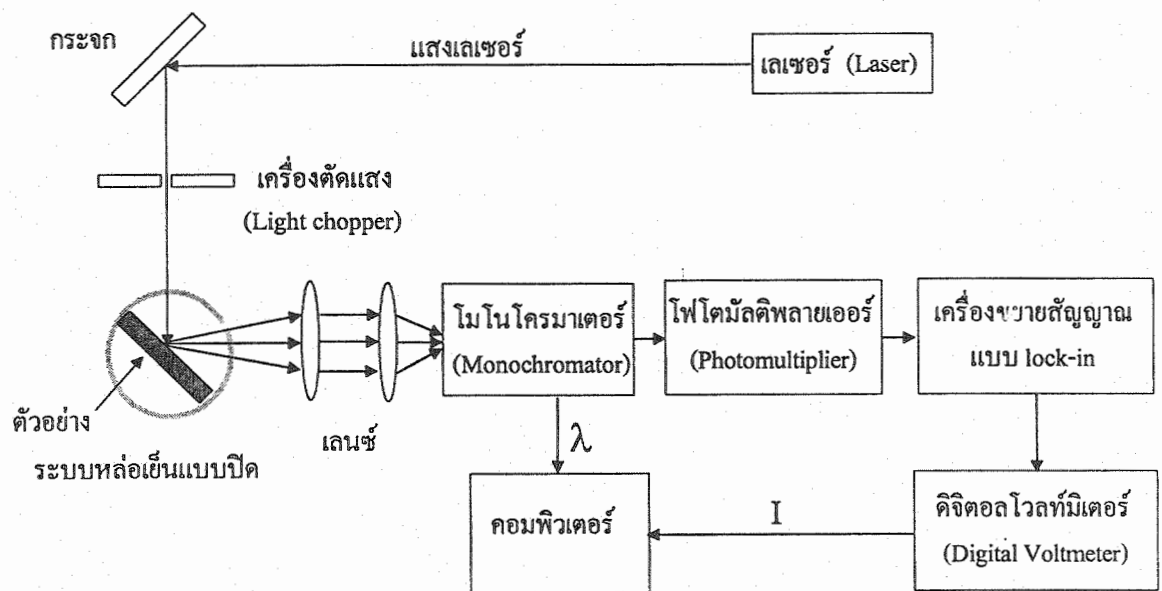
นอกจากนี้การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ยังสามารถใช้ในการวัดคุณสมบัติทางแสงของโครงสร้างคว้นตัมได้เช่นกัน ทำให้เราทราบค่าพลังงานในการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานย่อยได้

เช่นเดียวกัน โดยอิเล็กตรอนในระดับพลังงานปกติถูกแสงกระตุ้นให้ขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานย่อยของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานย่อยที่อยู่ในแถบนำไฟฟ้า จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นนี้ก็คายพลังงานออกมาในรูปของแสง (Photon) เพื่อลดระดับพลังงานกลับคืนสู่สถานะปกติ



รูปที่ 2.16 แผนภาพจำลองการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงที่เกิดจากการรวมตัว

สำหรับรายละเอียดของระบบการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ มีการจัดระบบตามแผนภาพรูปที่ 2.17 เลเซอร์ชนิด Ar-ion เป็นแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 488 nm ซึ่งเทียบเท่ากับโฟตอนที่มีค่าพลังงาน 2.54 eV โดยทำหน้าที่กระตุ้นตัวอย่างในการทดลอง ตัวอย่างจะถูกติดตั้งในระบบทำความเย็นชนิดไครโอเจนิกแบบวงจรปิด (Closed Circuit Cryogenic System) ซึ่งภายในใช้การหล่อเย็นด้วยฮีเลียมเหลว (Liquid Helium) และอุณหภูมิต่ำที่สุดในการทดลองนี้คือ 10 K แสงที่ได้จากตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นถูกรวบรวมด้วยเลนส์ 2 ชุด เพื่อให้แสงที่ได้มีค่าความเข้มสูงขึ้นและผ่านเข้าไปยังโมโนโครมาเตอร์ (Monochromator) โมโนโครมาเตอร์ทำหน้าที่ในการแยกสเปกตรัมของแสงที่ได้จากตัวอย่าง ซึ่งแสงที่ได้จะผ่านได้เฉพาะแสงที่มีค่าตามที่โมโนโครมาเตอร์ได้ตั้งค่าไว้ จากนั้นแสงที่ผ่านโมโนโครมาเตอร์ไปยังโฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier : PMT) เพื่อแปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งสัญญาณนี้อยู่ในรูปของกระแสที่มีขนาดสัญญาณเล็กมาก ดังนั้นจึงต้องให้สัญญาณผ่านเครื่องขยายสัญญาณชนิดล็อกอินแอมพลิไฟเออร์ (Lock-in Amplifier) ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ได้จาก PMT และแปลงสัญญาณให้เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้นี้ผ่านมัลติมิเตอร์แบบเชิงเลข (Digital Multimeter : DMM) และส่งข้อมูลเชิงเลข (Digital format) ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อทำการสร้างกราฟสเปกตรัมความสัมพันธ์ระหว่างค่าขนาดสัญญาณแสงที่ได้และค่าความยาวคลื่นหรือค่าพลังงานโฟตอนของตัวอย่างแต่ละตัวอย่าง



รูปที่ 2.17 แผนภาพระบบการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์

บทที่ 3

การออกแบบการทดลอง

สำหรับในบทนี้เป็นรายละเอียดของขั้นตอนการทดลองในการศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขต่างๆ ที่มีต่อคุณสมบัติทางแสงของโครงสร้างควันตัมเวลต์ InGaAs/GaAs ที่สร้างด้วยวิธีการปลูกผลึกอิมพิเทกซ์จากลำโมเลกุล ตัวแปรที่ได้ศึกษาในการทดลองนี้ได้แก่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะที่ทำการปลูกผลึก ค่าความหนาของชั้นเวลต์ InGaAs ในโครงสร้าง ค่าสัดส่วน In ในชั้น InGaAs และค่าอัตราส่วน BEP ของ V/III หรือ $As_4/(In+Ga)$

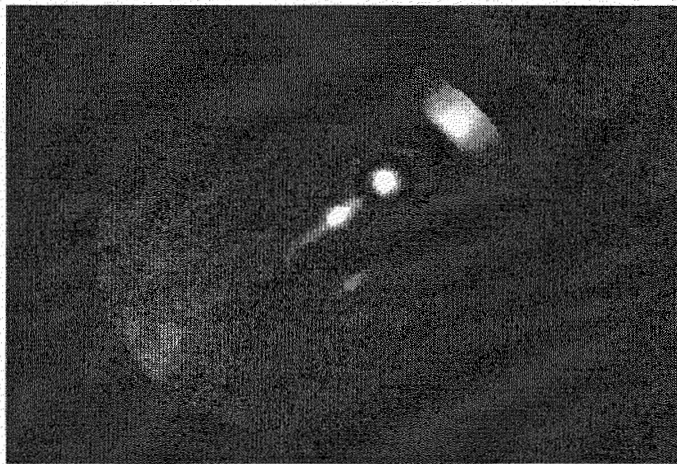
3.1 การเตรียมแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น

แผ่นผลึกฐาน (Substrate) เริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองนี้คือแผ่นผลึกเดี่ยว (Single Crystal Wafer) GaAs ที่มีผิวหน้าผลึก (Orientation) อยู่ในระนาบ (100) แผ่นผลึกฐาน GaAs ที่ใช้ในการทดลองนี้มีคุณสมบัติแบบกึ่งฉนวน (Semi-insulator) และมีรูปร่างเป็นวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50.8 มม. โดยตัวอย่างแต่ละตัวอย่างเป็นส่วน 1 ส่วนที่ได้จากการตัดแบ่งแผ่นผลึกเดี่ยว GaAs ข้างต้นออกเป็น 4 ชิ้นตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางให้มีรูปร่าง 1/4 ของวงกลม จากนั้นนำไปต้มใน Trichloroethylene และ Acetone เดือดเป็นเวลาไม่น้อยกว่าอย่างละ 5 นาทีตามลำดับและล้างทำความสะอาด (Rinse) ด้วยน้ำ DI (Deionized Water) จนสะอาด หลังจากนั้นแช่ตัวอย่างในสารละลาย HCl : H₂O (1:1 โดยปริมาตร) เป็นเวลานานไม่น้อยกว่า 10 นาที สุดท้ายทำการล้างทำความสะอาด (Rinse) ด้วยน้ำ DI สะอาด และเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ จากนั้นนำแผ่นผลึกฐาน GaAs ที่ผ่านการล้างแล้วไปติดลงบน Mo block โดยการติดด้วย In ที่หลอมเหลวด้วยความร้อน จากนั้นทิ้งไว้รอให้ Mo block ที่มีแผ่นผลึกฐาน GaAs ติดอยู่เย็นลงเพื่อนำ Mo block ที่มีแผ่นผลึกฐาน GaAs ติดอยู่ไปบรรจุใส่ในระบบ MBE ต่อไป

หลังจากนั้นนำ Mo block ที่มีแผ่นผลึกฐาน GaAs ติดอยู่ทำการบรรจุใส่ใน Cassette เพื่อใช้ Cassette เป็นพาหะในการลำเรียง Mo block ที่มีแผ่นผลึกฐาน GaAs ติดอยู่ภายในระบบ MBE การบรรจุแผ่นผลึกฐานที่ติดเข้ากับ Mo block เข้าสู่ระบบ MBE นั้นโดยกระทำผ่าน Cassette introduction chamber ไปยัง Thermal treatment chamber หรือ Preparation chamber จากนั้นทำการไล่ความชื้นและสิ่งสกปรกที่ผิว (Outgassing) ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อไปทำการลำเรียง Mo Block ที่มีแผ่นผลึกฐาน GaAs ติดอยู่เข้าสู่ห้องปลูกผลึก (Growth Chamber) ซึ่งก่อนการนำ Mo Block ที่มีแผ่นผลึกฐาน GaAs ติดอยู่เข้าสู่ห้องปลูกผลึก (Growth chamber) ได้มีการปรับค่าอุณหภูมิของแหล่งจ่าย Ga, In และ As หรือ Effusion cell ที่บรรจุ Ga, In และ As (ในการทดลองนี้ Ga, In มีความบริสุทธิ์ 99.9999% และ As มีความบริสุทธิ์ 99.99999%) ให้มีค่าความดันตามที่กำหนดในแต่ละการทดลองที่จะได้กล่าวถึงต่อไป

3.2 การเตรียมการในห้องปลูกผลึกก่อนการปลูกผลึก

หลังจากที่ได้นำแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นที่ได้ผ่านกระบวนการตามในหัวข้อที่ 3.1 ทำการลำเลียงต่อไปเข้าสู่ Growth chamber ทำการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานในอัตรา $10^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$ จากสภาวะปกติ ซึ่งตามปกตินี้มีค่าอุณหภูมิอยู่ประมาณในช่วง $30\text{-}50^{\circ}\text{C}$ เมื่ออุณหภูมิมีค่าถึง 300°C ทำการเปิด Shutter ของ As_4 โดยค่าความดัน BEP ของ As_4 ในขั้นนี้กำหนดตามเงื่อนไขในแต่ละการทดลองที่จะได้กล่าวถึงต่อไป เพื่อเป็นการชดเชยการสูญเสีย As ของแผ่นผลึกฐานในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง ในขณะที่เดียวกันมีการตรวจสอบผิวหน้าด้วย RHEED ซึ่งตามปกติในขั้นเริ่มต้นในการนี้ผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน GaAs นั้นมีออกไซด์อยู่โดยรูปแบบ (Pattern) ที่ได้จากรHEED ที่ปรากฏนั้นไม่มีรูปแบบที่ชัดเจน เนื่องจากชั้นออกไซด์ (Ga_2O_3) ที่ผิว แต่ออกไซด์นี้จะสลายตัวเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงกว่า 580°C ซึ่งในกรณีนี้มีผลทำให้รูปแบบของ RHEED ที่ปรากฏมีความชัดเจนของรูปแบบ RHEED ขึ้นและจะปรากฏชัดเจนเมื่อผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานสะอาดในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว ในการนี้ตั้งให้อุณหภูมิมีค่าคงที่ในช่วง $580\text{-}600^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลานาน 15-20 นาที เพื่อให้ผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานสะอาด ซึ่งรูปแบบของ RHEED ที่ได้จากผิวหน้าสะอาดของแผ่นผลึกฐาน GaAs ตามรูปที่ 3.1 รูปแบบ RHEED ที่อุณหภูมิดังกล่าวเป็นแบบ $c(2\times 4)$ ในขั้นนี้เป็นเริ่มต้นของการเตรียมการของการทดลองทั้งหมดในงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.1 รูปแบบของ RHEED จากผิวหน้าแผ่นผลึกฐาน GaAs สะอาดที่อุณหภูมิ 580°C

3.3 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะปลูกผลึก

เพื่อทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะที่ทำการปลูกผลึกที่มีต่อโครงสร้างคว้นดัมเวลล์ InGaAs/GaAs เนื่องจากผลการคายอะตอม In ออกจากผิวหน้าของแผ่นฐานในสภาวะอุณหภูมิสูง หรือกล่าวได้ว่าแผ่นผลึกฐานมีอัตราการคาย (Desorbion rate) อะตอม In ที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นค่าอุณหภูมิแผ่นฐานขณะที่ทำการปลูกผลึกจึงมีผลต่ออัตราสัดส่วนอะตอม In ในชั้นเวลล์ InGaAs และมีผล

ต่อความหนาของชั้นเวลล์ (Well) เช่นกัน ในการศึกษานี้เงื่อนไขตัวแปรที่ต้องการศึกษาคือค่าอุณหภูมิแผ่นฐานขณะที่ทำการปลูกผลึกดังนี้ 480, 510, 540, 570 และ 600°C โดยตัวแปรอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องในการนี้ ได้แก่ ค่าความดัน Beam-equivalent Pressure หรือ BEP ของแหล่งจ่ายต่างๆ มีดังนี้ $P_{Ga} = 4.9 \times 10^{-7}$ torr, $P_{In} = 1.77 \times 10^{-7}$ torr และ $P_{As_4} = 1 \times 10^{-5}$ torr ซึ่งค่าอัตราส่วนอะตอมระหว่าง Ga และ In ในเงื่อนไขนี้จะได้สารประกอบ $In_{0.2}Ga_{0.8}As$ สำหรับชั้นเวลล์ ค่า BEP ของ Ga และ In ที่กำหนดนี้ให้ค่าอัตราการปลูกผลึกในอัตรา 0.9 $\mu\text{m}/\text{ชั่วโมง}$ สำหรับ GaAs และ 1.1 $\mu\text{m}/\text{ชั่วโมง}$ สำหรับ $In_{0.2}Ga_{0.8}As$ โครงสร้างของตัวอย่างในการทดลองนี้ดังในรูปที่ 3.2 โดยแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นนั้นได้ผ่านการเตรียมการตามหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 มาแล้วตามลำดับ จากนั้นทำการปลูกผลึกมีตามลำดับขั้นตอนดังนี้

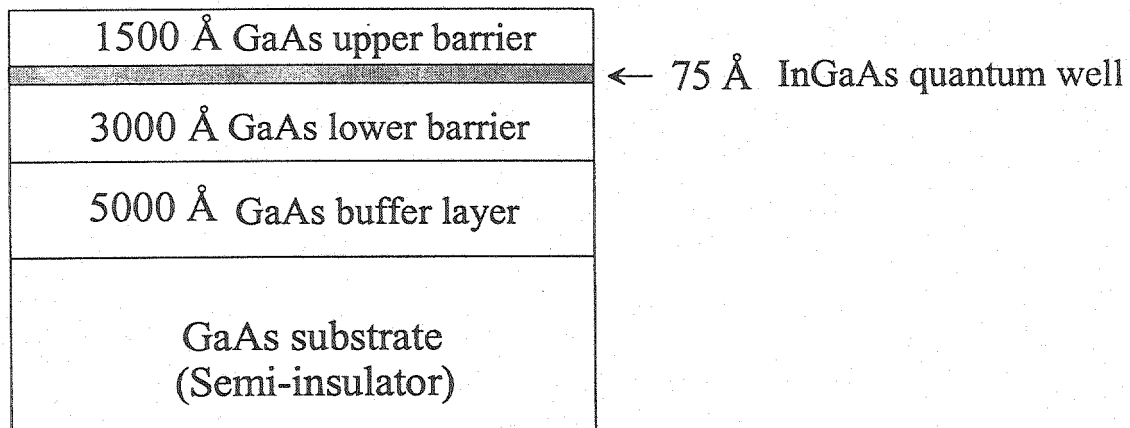
ก) ทำการปลูกชั้น Buffer layer ของ GaAs หนา 5000 Å ที่อุณหภูมิประมาณ 580 °C

ข) ปรับค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกที่ตามที่กำหนดดังนี้ 480, 510, 540, 570 และ 600°C จากนั้นทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาทีให้ค่าอุณหภูมิกงที่

ค) ทำการปลูกโครงสร้างควันตัมเวลล์ InGaAs/GaAs โดยประกอบด้วย Lower barrier ของ GaAs หนา 3000 Å ชั้นเวลล์ของ InGaAs หนา 75 Å และชั้น Upper barrier ของ GaAs หนา 1500 Å

ง) ทำการลดอุณหภูมิลงมาที่ค่าอุณหภูมิ 300 °C จากนั้นทำการปิด Shutter ของ As_4 และจากนั้นลดอุณหภูมิลงมาที่ค่าอุณหภูมิ 50 °C

จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้จากการทดลองนี้ไปทำการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ด้วยวิธีการตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2



รูปที่ 3.2 แผนภาพ โครงสร้างตัวอย่างที่สร้างขึ้นเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะปลูกผลึก

3.4 การศึกษาอิทธิพลค่าความหนาของชั้นเวลล์

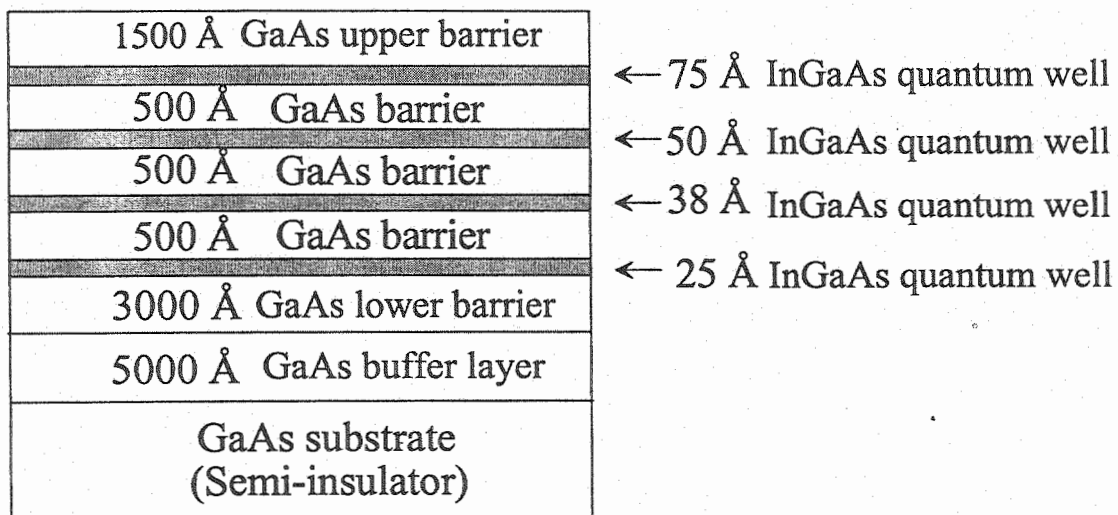
สำหรับในการทดลองนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลค่าความหนาของชั้นเวลล์ใน โครงสร้างควันตัมเวลล์

InGaAs/GaAs โดยวิธีการดำเนินการทดลองคล้ายกับการทดลองตามหัวข้อที่ 3.3 แต่เนื่องจากตัวแปรที่ต้องการศึกษานั้นคือค่าความหนาของชั้นเวลล์ InGaAs ในโครงสร้าง InGaAs/GaAs สำหรับเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองนี้ได้แก่ $P_{Ga} = 4.9 \times 10^{-7}$ torr, $P_{In} = 1.77 \times 10^{-7}$ torr และ $P_{As_4} = 1 \times 10^{-5}$ torr ซึ่งค่าอัตราส่วนระหว่าง Ga และ In ข้างต้นนี้ได้สารประกอบ $In_{0.2}Ga_{0.8}As$ ซึ่งค่า BEP ของ Ga และ In ตามที่กำหนดให้ได้ค่าอัตราการปลูกผลึก $0.9 \mu\text{m}/\text{ชั่วโมง}$ สำหรับ GaAs และ $1.1 \mu\text{m}/\text{ชั่วโมง}$ สำหรับ $In_{0.2}Ga_{0.8}As$ โครงสร้างที่ได้ออกแบบสำหรับการทดลองนี้ตามรูปที่ 3.3 โดยแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นนั้นได้ผ่านการเตรียมการตามหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 มาแล้วตามลำดับ จากนั้นทำปลูกผลึกมีตามลำดับขั้นตอนดังนี้

ก) ทำการปลูกชั้น Buffer layer ของ GaAs หนา 5000 \AA ที่อุณหภูมิ $580 \text{ }^\circ\text{C}$

ข) ปรับค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานที่ $510 \text{ }^\circ\text{C}$ และทิ้งไว้เป็นเวลานาน 10 นาทีให้ค่าอุณหภูมิดังที่ ซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ไม่ทำให้เกิดการสูญเสีย In เนื่องจากเกิดการระเหิด (Re-evaporation) ของ In ที่ผิวในขณะที่ปลูกผลึกค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึกในการทดลองนี้ได้จากผลการทดลองที่ 3.3 ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวไว้บทที่ 4

ค) ทำการปลูกโครงสร้าง MQW ของ InGaAs/GaAs โดยประกอบด้วย Lower Barrier ของ GaAs หนา 3000 \AA ชั้นเวลล์ที่ 1 ของ InGaAs หนา 25 \AA ชั้น Barrier ของ GaAs หนา 500 \AA ชั้นเวลล์ที่ 2 ของ InGaAs หนา 38 \AA ชั้น Barrier ของ GaAs หนา 500 \AA ชั้นเวลล์ที่ 3 ของ InGaAs หนา 50 \AA ชั้น Barrier ของ GaAs หนา 500 \AA ชั้นเวลล์ที่ 4 ของ InGaAs หนา 75 \AA และชั้น Upper barrier ของ GaAs หนา 1500 \AA ซึ่งโครงสร้างของตัวอย่างได้สร้างขึ้นนี้กำหนดให้ชั้นเวลล์ชั้นที่หนาที่สุดอยู่ด้านในสุด และชั้นเวลล์ในลำดับต่อมาที่มีค่าความหนาน้อยลดลงตามลำดับ โดยมีชั้น Barrier ของ GaAs หนา 500 \AA เป็นชั้นกั้นระหว่างชั้นเวลล์ที่อยู่ใกล้กัน



รูปที่ 3.3 แผนภาพโครงสร้างตัวอย่างที่สร้างขึ้นเพื่อการศึกษาอิทธิพลของความกว้างของชั้นเวลล์

ง) ทำการลดอุณหภูมิลงมาที่ค่าอุณหภูมิ $300 \text{ }^\circ\text{C}$ จากนั้นทำการปิด Shutter ของ As_4 และจากนั้น

ลดอุณหภูมิลงมาที่ค่าอุณหภูมิ 50 °C

จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้จากการทดลองนี้ไปทำการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ด้วยวิธีการตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2

3.5 การศึกษาอิทธิพลของค่าสัดส่วนอะตอม In ในชั้นเวสต์ InGaAs

สำหรับในการทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าสัดส่วนอะตอม In ในชั้นเวสต์ InGaAs ที่มีต่อคุณสมบัติทางแสงของโครงสร้างควันตัมเวสต์ InGaAs/GaAs ซึ่งในการทดลองนี้สิ่งที่ต้องคำนึงถึงและระมัดระวังได้แก่ผลของอัตราส่วนของ In และ Ga และค่าความหนาวิกฤติ (Critical thickness) ของชั้น InGaAs โดยโครงสร้างของตัวอย่างในการทดลองนี้ดังในรูปที่ 3.4 ค่าปริมาณ In (Indium content) ใน InGaAs มีค่า 0.1, 0.15, 0.2 และ 0.25 ตามลำดับ เงื่อนไขต่างๆ ในการปลูกผลึกได้แก่ ค่าความดัน BEP ของแหล่งจ่ายต่างๆ มีค่าดังนี้ $P_{In} = 1.77 \times 10^{-7}$ torr $P_{As_4} = 1 \times 10^{-5}$ torr ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก 510°C สำหรับ P_{Ga} ที่ใช้ในการปลูกชั้นเวสต์ที่มีค่าสัดส่วน In ตามในตารางที่ 3.1 โดยแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นนั้นได้ผ่านการเตรียมการตามหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 มาแล้วตามลำดับ จากนั้นทำปลูกผลึกมีตามลำดับขั้นตอนดังนี้

ก) ทำการปลูกชั้น Buffer layer ของ GaAs หนา 5000 Å ที่อุณหภูมิประมาณ 580°C

ข) ปรับค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกที่ 510°C และทิ้งไว้เป็นเวลานาน 10 นาทีให้ค่าอุณหภูมิกคงที่

ค) ทำการปลูกผลึก Lower barrier ของ GaAs หนา 5000 Å จากนั้นปลูกชั้นเวสต์ของ InGaAs ที่มีค่าสัดส่วน 0.1 และชั้น GaAs Barrier หนา 250 Å หลังจากนั้นทำการปรับค่าอุณหภูมิของแหล่งจ่าย Ga ให้มีค่าความดันเพิ่มขึ้นสำหรับการปลูกชั้น InGaAs ในลำดับต่อไป

ง) ทำการปลูกผลึก GaAs Barrier หนา 250 Å จากนั้นปลูกชั้นเวสต์ของ InGaAs ที่มีค่าสัดส่วน 0.15 และชั้น GaAs Barrier หนา 250 Å หลังจากนั้นทำการปรับค่าอุณหภูมิของแหล่งจ่าย Ga ให้มีค่าความดันเพิ่มขึ้นสำหรับการปลูกชั้น InGaAs ในลำดับต่อไป

จ) ทำการปลูกผลึก GaAs Barrier หนา 250 Å จากนั้นปลูกชั้นเวสต์ของ InGaAs ที่มีค่าสัดส่วน 0.2 และชั้น GaAs Barrier หนา 250 Å หลังจากนั้นทำการปรับค่าอุณหภูมิของแหล่งจ่าย Ga ให้มีค่าความดันเพิ่มขึ้นสำหรับการปลูกชั้น InGaAs ในลำดับต่อไป

ฉ) ทำการปลูกผลึก GaAs Barrier หนา 250 Å จากนั้นปลูกชั้นเวสต์ของ InGaAs ที่มีค่าสัดส่วน 0.25 และชั้น GaAs Barrier หนา 1500 Å

ช) ทำการลดอุณหภูมิลงมาที่ค่าอุณหภูมิ 300 °C จากนั้นทำการปิด Shutter ของ As_4 และจากนั้นลดอุณหภูมิลงมาที่ค่าอุณหภูมิ 50 °C

จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้จากการทดลองนี้ไปทำการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ด้วยวิธีการตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2

ตารางที่ 3.1 ค่าความดัน BEP ของ Ga และอัตราการเกิดผลึกสำหรับ GaAs และ InGaAs

ค่าสัดส่วน In ใน InGaAs	P_{Ga} (torr)	อัตราการเกิดผลึกสำหรับ GaAs (Å/วินาที)	อัตราการเกิดผลึกสำหรับ InGaAs (Å/วินาที)
0.25	3.6×10^{-6}	1.86	2.48
0.2	4.9×10^{-6}	2.53	3.16
0.15	6.9×10^{-7}	3.56	4.19
0.1	1.1×10^{-6}	5.67	6.3

1500 Å GaAs upper barrier
500 Å GaAs barrier
500 Å GaAs barrier
500 Å GaAs barrier
3000 Å GaAs lower barrier
5000 Å GaAs buffer layer
GaAs substrate (Semi-insulator)

← 75 Å $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ quantum well
 ← 75 Å $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ quantum well
 ← 75 Å $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ quantum well
 ← 75 Å $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ quantum well

รูปที่ 3.4 แผนภาพโครงสร้างตัวอย่างที่สร้างขึ้นเพื่อการศึกษา อิทธิพลของค่าสัดส่วนอะตอม In ในชั้นเวลล์ InGaAs

เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าตัวอย่างที่ได้สร้างในการทดลองนี้มีความถูกต้อง ในการทดลองนี้ได้มีการออกแบบการทดลองอีกการทดลองหนึ่งขึ้น เพื่อต้องการใช้ตัวอย่างนี้ประกอบในการวิเคราะห์ผลที่ได้ง่ายขึ้น โดยตัวอย่างในการทดลองนี้มีโครงสร้างเช่นเดียวกับตัวอย่างในการทดลองตามหัวข้อที่ 3.3 ตามรูปที่ 3.2 และเงื่อนไขต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองนี้มีดังนี้ ค่าความดัน BEP ของแหล่งจ่ายต่างๆ มีค่าดังนี้ $P_{Ga} = 4.9 \times 10^{-7}$ torr, $P_{In} = 1.77 \times 10^{-7}$ torr และ $P = 1 \times 10^{-5}$ torr ซึ่งค่าอัตราระหว่าง Ga และ In สำหรับค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานในขณะที่ทำการปลูกผลึก 510°C และรายละเอียดของขั้นตอนการปลูกในการทดลองนี้มีดังนี้

- ก) ทำการปลูกชั้น Buffer layer ของ GaAs หนา 5000 Å ที่อุณหภูมิประมาณ 580°C
- ข) ปรับค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกที่ตามที่กำหนดดังนี้ 510°C และทิ้งไว้ประมาณ 10 นาทีให้ค่าอุณหภูมิ

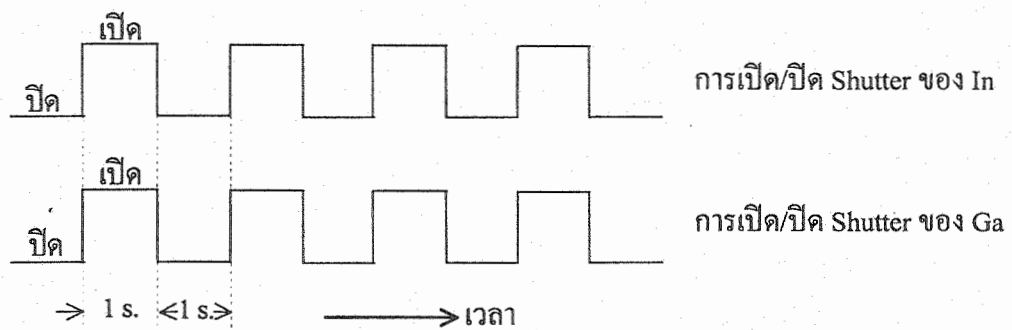
คงที่

ค) ทำการปลูกโครงสร้าง SQW ของ InGaAs/GaAs โดยประกอบด้วย Lower barrier ของ GaAs หนา 3000 Å

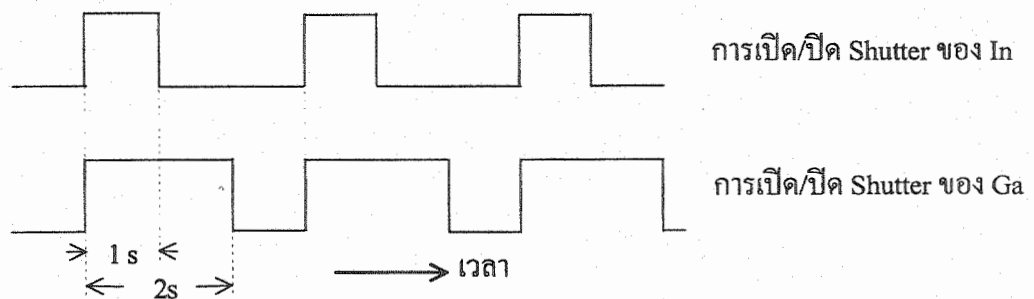
ง) ทำการปลูกชั้นเวลล์ของ InGaAs ด้วยการเปิด/ปิด Shutter ของ In และ Ga สำหรับตัวอย่างแรกของการทดลองนี้ทำการเปิด Shutter ของ In และ Ga พร้อมกันเป็นเวลา 1 วินาทีและปิด 1 วินาที โดยทำการปลูกผลึกในลักษณะนี้ 30 รอบ ในเงื่อนไขนี้จะได้สารประกอบ $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ซึ่งค่าความหนาที่ได้เท่ากับการทดลองตามหัวข้อที่ 3.3 เทียบได้กับค่าความหนา 75 Å และอีกตัวอย่างหนึ่งทำการเปิด Shutter ของ In และ Ga พร้อมกัน โดย Shutter ของ In เปิดเป็นเวลา 1 วินาทีและปิดเป็นเวลา 2 วินาที สำหรับชัตเตอร์ของ Ga เป็นเวลา 2 วินาที และปิดเป็นเวลา 1 วินาที โดยทำการปลูกผลึกในลักษณะนี้ 15 รอบ ซึ่งสัดส่วนของ In ในกรณีนี้ได้สารประกอบ $\text{In}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{As}$ ค่าสัดส่วนที่ได้สามารถคำนวณได้จากสมการข้างล่าง และค่าความหนาของชั้นเวลล์ในกรณีเทียบได้กับค่าความหนา 75 Å

$$x = \frac{\text{In content} \times \text{time ratio}}{\text{Ga content} + \text{In content} \times \text{time ratio}}$$

$$x = \frac{0.2 \times 0.5}{0.8 + 0.2 \times 0.5} = 0.11$$



(ก) กรณีอัตราส่วนค่าเวลาในการเปิด 1 : 1



(ข) กรณีอัตราส่วนค่าเวลาในการเปิด 1 : 2

รูปที่ 3.5 แผนภาพจำลองเวลาการเปิด/ปิด Shutter ของ In และ Ga ในการทดลอง เพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าสัดส่วนอะตอม In ในชั้นเวลล์ InGaAs

จ) ปลุกชั้น Upper barrier ของ GaAs หนา 1500 Å

ฉ) ทำการลดอุณหภูมิลงมาที่ค่าอุณหภูมิ 300°C จากนั้นทำการปิด Shutter ของ As₄ และจากนั้นลดอุณหภูมิลงมาที่ค่าอุณหภูมิ 50 °C

จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้จากการทดลองนี้ไปทำการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ด้วยวิธีการตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2

3.6 การศึกษาอิทธิพลของค่าอัตราส่วน BEP ของ V/III

สำหรับในการทดลองนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของค่าอัตราส่วน BEP ของ V/III หรือ As₄/(Ga+In) โดยโครงสร้างตัวอย่างในการทดลองนี้มีลักษณะและการดำเนินการเช่นเดียวกันกับการทดลองในหัวข้อที่ 3.3 และมีโครงสร้างตามรูปที่ 3.2 โดยเงื่อนไขต่างๆ ในการสร้างตัวอย่างในการทดลองนี้มีรายละเอียดดังนี้ ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะที่ทำการปลูกผลึก 510°C ค่าความดัน BEP ของแหล่งจ่ายต่างๆ มีค่าดังนี้ $P_{Ga} = 4.9 \times 10^{-5}$ torr, $P_{In} = 1.77 \times 10^{-7}$ torr ในกรณีนี้ค่าอัตราส่วนของ In และ Ga ได้ In_{0.2}Ga_{0.8}As สำหรับตัวแปรในการทดลองนี้ $P_{As_4} = 4.9 \times 10^{-6}$, 9.8×10^{-6} , 1.5×10^{-5} และ 2×10^{-5} torr ซึ่งค่าอัตราส่วน BEP ของ V/III มีค่า 8, 17, 25 และ 33 ตามลำดับ โดยแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นนั้นได้ผ่านการเตรียมการตามหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 มาแล้วตามลำดับ จากนั้นทำปลูกผลึกมีตามลำดับขั้นตอนดังนี้

ก) ทำการปลูกชั้น Buffer layer ของ GaAs หนา 5000 Å ที่อุณหภูมิประมาณ 580°C

ข) ปรับค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกที่ตามที่กำหนดดังนี้ 500°C จากนั้นทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาทีให้ค่าอุณหภูมิกคงที่

ค) ทำการปลูกโครงสร้าง SQW ของ InGaAs/GaAs โดยประกอบด้วย Lower Barrier ของ GaAs หนา 3000 Å ชั้นเวลล์ของ InGaAs หนา 75 Å และชั้น upper barrier ของ GaAs หนา 1500 Å

ง) ทำการลดอุณหภูมิลงมาที่ค่าอุณหภูมิ 300°C จากนั้นทำการปิด Shutter ของ As₄ และจากนั้นลดอุณหภูมิลงมาที่ค่าอุณหภูมิ 50°C

จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้จากการทดลองนี้ไปทำการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ด้วยวิธีการตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2

ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดและการวิเคราะห์ผลของการทดลองจะได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 ต่อไป

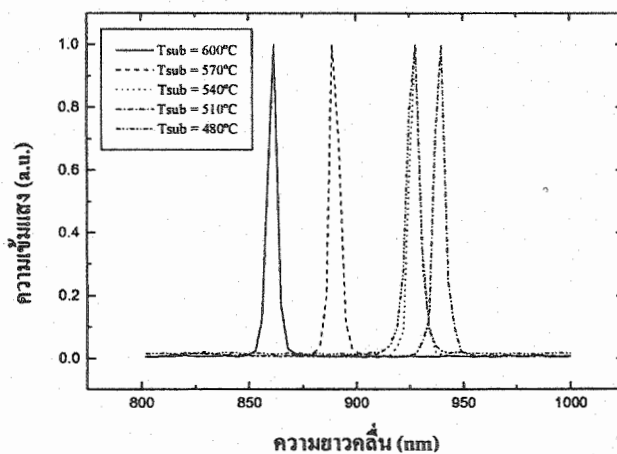
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ในบทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดลองที่ได้ดำเนินการตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 และการวิเคราะห์ผลการทดลอง การศึกษาคุณสมบัติของโครงสร้างควันดัมเวลล์ InGaAs/GaAs ด้วยวิธีการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุลที่สร้างขึ้นด้วยเงื่อนไขต่างๆ ได้แก่ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานในขณะที่ทำการปลูกผลึก ค่าความหนาของชั้นเวลล์ ค่าสัดส่วนอะตอม In ในชั้นเวลล์ InGaAs/GaAs และค่าอัตราส่วน BEP ของ $As_4/(Ga+In)$ โดยมีรายละเอียดดังนี้

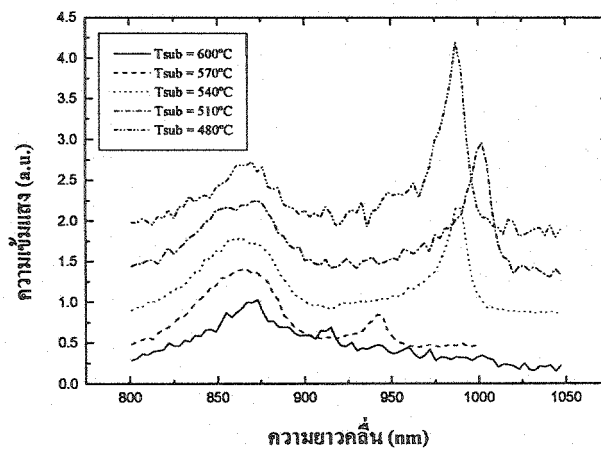
4.1 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะปลูกผลึก

ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์จากตัวอย่างที่ได้จากการสร้างตามหัวข้อที่ 3.3 มีผลดังในรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นการวัดชั้นงานที่อุณหภูมิประมาณ 10 K โดยค่ายอดแหลม (Peak) ของสเปกตรัมจากตัวอย่างที่ปลูกในเงื่อนไขอุณหภูมิต่างๆ จะอยู่ในย่านความยาวคลื่นยาวหรืออีกนัยหนึ่งคือระดับพลังงานควันไตซ์ในเวลล์จะมีค่าลดลง ซึ่งจากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าค่ายอดแหลมจากโฟโตลูมิเนสเซนซ์นั้นมีการเลื่อนไปในย่านความยาวคลื่นสั้นเมื่ออุณหภูมิแผ่นฐานสูงขึ้น ทั้งนี้เกิดขึ้นเนื่องจากเมื่อค่าอุณหภูมิขณะปลูกชั้นเวลล์สูงขึ้น มีผลทำให้เกิดการคายอะตอม In (Indium desorption) จากผิวหน้าและเกิดการระเหิด (Evaporation) จากผิวหน้าของแผ่นผลึกมากขึ้น อัตราสัดส่วนของอะตอม In และ Ga ในชั้นเวลล์ $In_xGa_{1-x}As$ จึงลดลงจากค่าที่ได้กำหนดให้ ($x = 0.2$) นอกจากนี้ผลที่จำนวนอะตอมที่ลดลงนี้ยังทำให้ค่าความหนาของชั้น InGaAs ที่ได้ลดลงอีกด้วย ผลดังกล่าวนี้ทำให้ระดับพลังงานควันไตซ์ในชั้นเวลล์ InGaAs มีค่าสูงขึ้นจากผลดังกล่าว ซึ่งผลจากสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์แสดงให้เห็นการเลื่อนของค่ายอดแหลมของสเปกตรัมในด้านความยาวคลื่นสั้นลงหรือค่าพลังงานโฟตอนสูงขึ้น เมื่อการปลูกที่ค่าอุณหภูมิสูงขึ้น

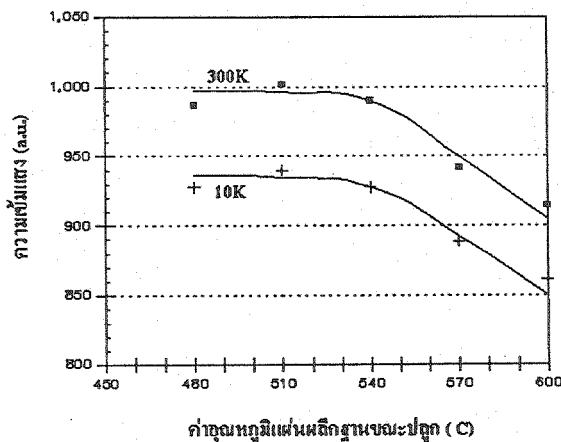


รูปที่ 4.1 สเปกตรัมจากการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ในการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกผลึก จากการวัดที่อุณหภูมิ 10 K

ข้อสังเกตอีกประการหนึ่งจากรูปที่ 4.1 ค่ายอดแหลมสามยอดที่ได้จากตัวอย่างในกรณีการปลูกที่อุณหภูมิ 540, 510 และ 480°C มีผลใกล้เคียงกัน และเมื่อนำค่าความยาวคลื่นยาวของตัวอย่างที่ได้และค่าอุณหภูมิดังในรูปที่ 4.3 ซึ่งผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าค่าอุณหภูมิจากการปลูกที่ต่ำกว่า 540°C จากผลของอัตราการคายอะตอม In ค่าที่มีผลลดลงเมื่ออุณหภูมิมียุคต่ำลง ทำให้ค่าสัดส่วน In ในชั้นเวสต์ InGaAs และค่าความหนาที่ได้ใกล้เคียงกัน จึงทำให้ผลที่ได้ของทั้งสามตัวอย่างใกล้เคียงกัน สำหรับตัวอย่างจากการปลูกที่อุณหภูมิ 510°C มีค่ายอดแหลมที่แตกต่างไปเล็กน้อยจากตัวอย่างที่ได้จากการปลูกที่ 540 และ 480°C เนื่องจากผลของความผิดพลาดในการเทียบอุณหภูมิที่ได้จากรูปแบบของ RHEED ที่เกิดขึ้นในการทดลองนี้ตามที่ได้อธิบายไว้ที่ 2 สำหรับสเปกตรัมจากการวัดที่อุณหภูมิต่ำ (~ 300 K) ตามในรูปที่ 4.2 ซึ่งแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่ายอดของสเปกตรัมแต่ละตัวอย่างสอดคล้องกับผลที่ได้กับผลที่ได้จากวัดที่อุณหภูมิต่ำ สำหรับค่ายอดที่ได้จากการทดลองนี้สามารถสรุปได้ในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ายอดและค่าอุณหภูมิ ดังในรูปที่ 4.3 สำหรับค่ายอดที่ค่าความยาวคลื่น 875 nm นั้นเป็นค่าที่ได้จากแผ่นผลึกฐาน GaAs โดยผลที่ได้จากการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Hayakawa [20]



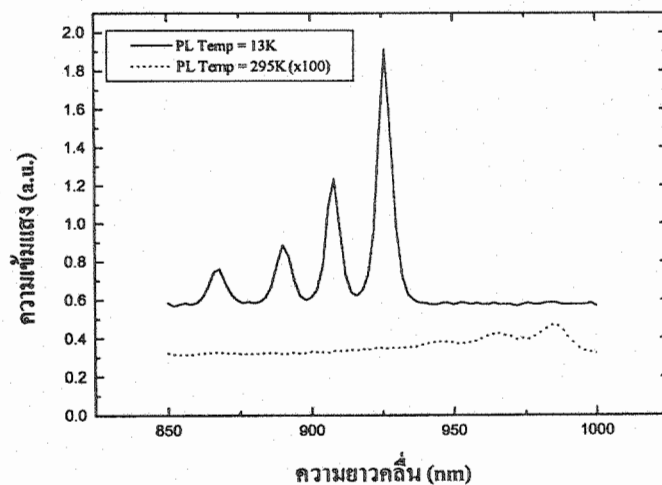
รูปที่ 4.2 สเปกตรัมจากการวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ในการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิจากการปลูกขณะทำการปลูกผลึก จากการวัดที่อุณหภูมิต่ำ (~ 300 K)



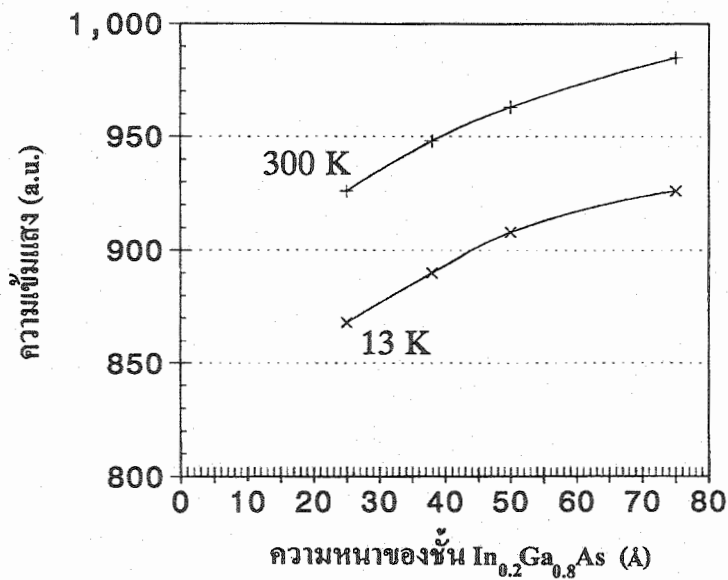
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งยอดแหลมและอุณหภูมิแผ่นฐาน

4.2 การศึกษาอิทธิพลค่าความหนาของชั้นเวลด์

สำหรับผลที่ได้ในการทดลองนี้ดังในรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นผลจากวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์จากตัวอย่างที่มีชั้นเวลด์ InGaAs ที่มีค่าความหนาต่างๆ กัน และจากผลดังกล่าวได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ายอดของสเปกตรัมที่ได้และค่าความถี่ชั้นเวลด์ดังในรูปที่ 4.5 โดยผลที่ได้มีค่าดังนี้ 868, 890, 908 และ 926 nm ตามลำดับ สำหรับการวัดที่อุณหภูมิ 13 K ค่ายอดที่ได้นั้นจากตัวอย่างที่มีชั้นเวลด์ที่ค่าความหนาต่างๆ โดยค่าความยาวคลื่น 926 nm ได้จากชั้นเวลด์ที่มีค่าความหนา 75 Å ค่าความยาวคลื่น 908 nm ได้จากชั้นเวลด์ที่มีค่าความหนา 50 Å ค่าความยาวคลื่น 890 nm ได้จากชั้นเวลด์ที่มีค่าความหนา 38 Å และค่าความยาวคลื่น 868 nm ได้จากชั้นเวลด์ที่มีค่าความหนา 25 Å ตามลำดับ ซึ่งค่าพลังงานโฟตอนที่ได้จากโครงสร้างควันตัมเวลด์นั้นแปรตามผกผันตามค่าความหนาของชั้นเวลด์ เนื่องจากระดับพลังงานควันตัมที่เกิดขึ้นในชั้นเวลด์มีระดับสูงขึ้นเมื่อชั้นเวลด์มีค่านาเลดลง สำหรับค่าความสูงที่แตกต่างกันนั้น โดยที่ค่ายอดความยาวคลื่นที่มีความยาวสูงสุดมีค่าสูงสุด เนื่องจากชั้นเวลด์ที่อยู่ด้านนอกสุดมีค่าความหนามากที่สุด แสงที่กระตุ้นมีค่าลดลงเนื่องจากการดูดกลืนแสงทำให้ค่าความเข้มที่ได้มีค่าลดลงตามลำดับ ทำให้ค่าความสูงที่ได้จากชั้นเวลด์ในลำดับต่อไปมีค่าลดลงตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีผลของการดูดกลืนจากชั้นเวลด์ที่มีค่าความหนามากกว่าในด้านนอกอีกเช่นกัน สำหรับผลการวัดที่อุณหภูมิในการทดลองได้ผลไม่ชัดเจน เนื่องจากค่ายอดความยาวคลื่นที่ได้จากเวลด์ที่ใกล้เคียงกันมีค่าใกล้เคียงกัน แต่สามารถสังเกตได้ว่ามีลักษณะคล้ายคลึงกับผลที่วัดที่อุณหภูมิ 13 K



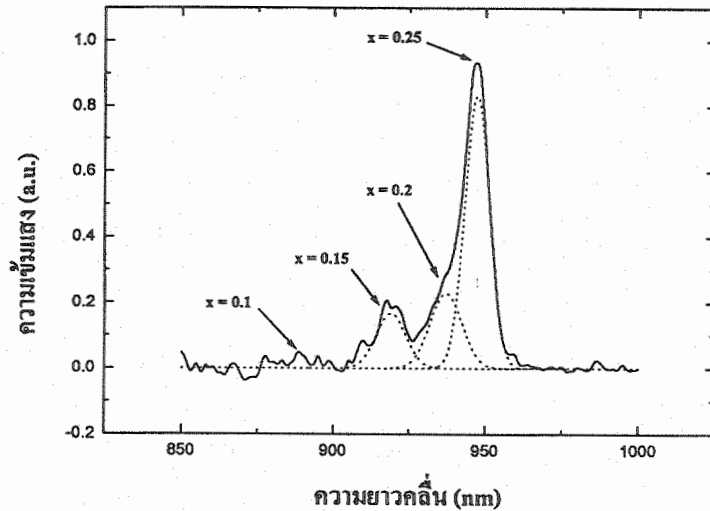
รูปที่ 4.4 สเปกตรัมจากการวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ในการทดลองเพื่ออิทธิพลค่าความหนาของชั้นเวลด์จากการวัดที่อุณหภูมิ 13 K และที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าขดแหลมและความกว้างของเวลต์

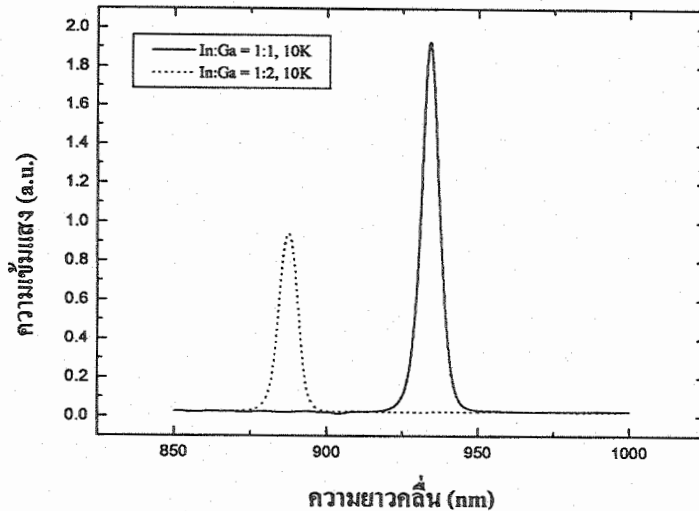
4.3 การศึกษาอิทธิพลค่าสัดส่วนอะตอม In ในชั้นเวลต์ InGaAs

สำหรับผลการวัดจากตัวอย่างในการทดลองนี้ดังในรูปที่ 4.6 เนื่องจากโครงสร้างที่ใช้ในการทดลองชั้นเวลต์ที่มีค่าสัดส่วน In มากที่สุดนั้นอยู่ด้านนอกสุดคือค่า $x=0.25$ โดยชั้นเวลต์ในลำดับต่อไปที่มีค่าสัดส่วน In ลดลงอยู่ในลำดับต่อไป $x=0.2, 0.15$ และ 0.1 ตามลำดับ โดยสเปกตรัมที่ได้มีค่าตำแหน่งขดแหลมอย่างน้อย 3 ขดที่มีความสูงแตกต่างกัน โดยขดแหลมที่มีความสูงมากที่สุดนั้นได้จากตัวอย่างที่มีชั้นเวลต์ที่อยู่ด้านนอกสุด ซึ่งเป็นค่าขดแหลมที่ตำแหน่งค่าความยาวคลื่นยาวที่สุด ดังนั้นขดแหลมนี้จึงเป็นขดที่ได้จากเวลต์ที่มีค่าอัตราส่วนอะตอม $x=0.25$ ส่วนค่าขดแหลมในลำดับถัดมาอยู่ใกล้เคียงกับขดแหลมแรกมากจนมีส่วนทับซ้อนกันและมีความสูงต่ำกว่าขดแหลมแรก ขดแหลมที่สามอยู่ห่างออกมาและมีความสูงต่ำกว่าขดแหลมที่สอง สาเหตุที่ค่าขดในลำดับต่อมาที่ได้จากชั้นเวลต์ที่มีค่า x ลดลงมีค่าเล็กน้อยนั้นอันเนื่องมาจากการดูดกลืนแสง (Optical Absorption) ของชั้นเวลต์ในลำดับต่อมาที่อยู่ด้านนอกที่มีค่าระดับพลังงานควันไชน์ต่ำกว่า สำหรับขดแหลมที่สี่ไม่ปรากฏชัดเจน เนื่องจากมีขนาดเล็กจนไม่สามารถสังเกตได้ เนื่องจากผลของการดูดกลืนแสง (Optical Absorption) ของชั้นเวลต์ในด้านนอกในลำดับต่อมาที่มีค่าระดับพลังงานต่ำกว่าของชั้นเวลต์จำนวน 3 ชั้นที่อยู่ด้านนอกสุด จึงทำให้ไม่สามารถสังเกตได้จากกรณีนี้



รูปที่ 4.6 สเปกตรัมจากการวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ในการทดลองเพื่ออิทธิพลค่าสัดส่วนของ In ในชั้นเวลล์ InGaAs จากการวัดที่อุณหภูมิ 10 K

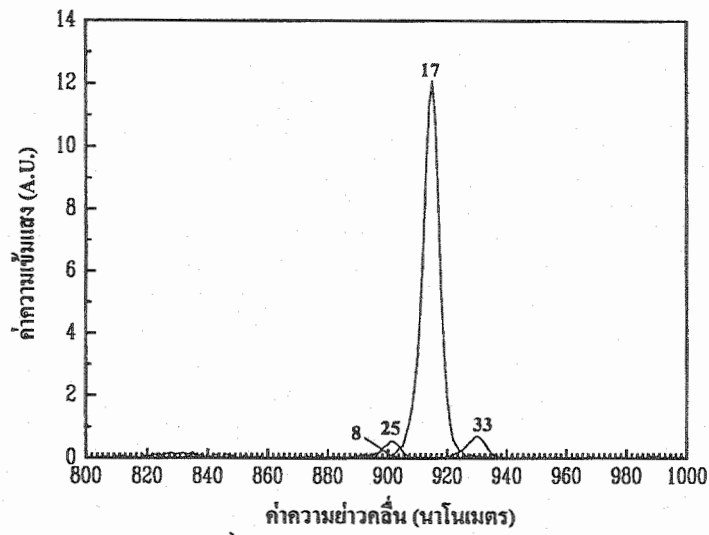
สำหรับผลที่ได้จากอีกตัวอย่างหนึ่งในการทดลองนี้ได้ผลดังในรูปที่ 4.7 โดยตัวอย่างที่สร้างขึ้นชั้นเวลล์ด้วยค่าอัตราส่วนเวลาเปิดชัตเตอร์ของ In:Ga = 1:1 มีค่าขดที่ค่าความยาวคลื่น 938 nm ซึ่งตรงกับขดแหลมของเวลล์ที่มีค่า $x=0.2$ สำหรับอีกอย่างหนึ่งที่สร้างขึ้นด้วยค่าอัตราส่วนเวลาเปิดชัตเตอร์เป็น In:Ga = 1:2 ได้ค่าขดที่ค่าความยาวคลื่น 890 nm อุณหภูมิในการวัดสำหรับตัวอย่างทั้งสองนี้ประมาณ 10 K ซึ่งตำแหน่งนี้เองที่ไม่ปรากฏอยู่ในรูปที่ 4.6 แต่เป็นตำแหน่งที่คาดว่ามิใช่ขดแหลมถูกการดูดกลืนจากชั้นเวลล์อื่นๆ ที่อยู่ด้านนอกสุดตามที่ได้กล่าวมาแล้ว สำหรับตัวอย่างนี้เป็นตำแหน่งที่มีค่า $x=0.1$ ซึ่งใกล้เคียงกับค่า $x=0.11$ ของตัวอย่างที่ใช้การปลูกชั้นเวลล์ค่าอัตราส่วนเวลาเปิดชัตเตอร์ In:Ga = 1:2 นั้นเอง จากผลการทดลองทั้งสองนี้สอดคล้องกัน แสดงให้เห็นว่าเราสามารถควบคุมอัตราส่วนอะตอมได้โดยใช้วิธีการควบคุมอัตราส่วนค่าความดันลำโมเลกุลของ In และ Ga หรือจะใช้การควบคุมเวลาในการเปิด/ปิดชัตเตอร์ของ In และ Ga ได้ โครงสร้างควมดัมเวลล์ที่ได้จะให้ขดแหลมที่ตำแหน่งใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติการควบคุมอัตราส่วนอะตอมโดยควบคุมความดันลำโมเลกุลนั้นทำได้ยากลำบากกว่า ดังตัวอย่างที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อการออกแบบการทดลองเรื่องนี้ (ปัญหาจากการคงค่าความดันไอลำโมเลกุลจากการเปลี่ยนอุณหภูมิ) ยิ่งไปกว่านั้นในการสร้างชิ้นงานหลายชิ้นเพื่อเปรียบเทียบ การแปรค่าความดันลำโมเลกุลโดยการแปรอุณหภูมิ K-cell อาจทำได้ไม่แม่นยำ ทำให้อัตราสัดส่วนอะตอมที่ได้มีความคลาดเคลื่อนสูง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมินั้นมีผลของการหน่วงเวลา โดยเฉพาะ Effusion cell ที่มีขนาดใหญ่หรือมีมวลของสารมาก และการหยุดรอในระหว่างการปลูกผลึกนั้นส่งผลให้รอยต่อเกิดจุดบกพร่องชนิด Interface state [21] โดยการแปรค่าอัตราส่วนเวลาในการเปิด/ปิดชัตเตอร์จะทำให้แม่นยำมากกว่า โดยไม่จำเป็นต้องแปรอุณหภูมิของเซลล์แต่ละเซลล์เลย



รูปที่ 4.7 สเปกตรัมจากการวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ในการทดลองเพื่ออิทธิพลค่าสัดส่วนของ In ในชั้นเวลล์ InGaAs จากตัวอย่างที่สร้างขึ้นด้วยการแปรเปลี่ยนค่าอัตราส่วนเวลา ในการเปิดปิดชัตเตอร์ของ In และ Ga จากการวัดที่อุณหภูมิประมาณ 12 K

4.4 การศึกษาอิทธิพลของค่าอัตราส่วน BEP ของ V/III

สำหรับผลที่ได้ในการทดลองนี้ดังในรูปที่ 4.8 จากตัวอย่างจำนวน 4 ตัวอย่างที่สร้างขึ้นด้วยเงื่อนไขที่มีค่าความดันไอของ As_4 ที่แตกต่างกัน โดยมีค่าอัตราส่วน BEP ของ V/III เป็น 8, 17, 25 และ 33 เท่าตามลำดับ โดยค่ายอดที่ได้แต่ละตัวอย่างนั้นมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากความคลาดเคลื่อนของตัวแปรที่ใช้การทดลองที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ โดยเฉพาะค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกขณะทำการปลูกผลึก แต่สามารถแก้ไขด้วยการใช้ pyrometer ในการอ่านอุณหภูมิ โดยค่าอุณหภูมิของการทดลองนี้ได้จากการเทียบค่า (Calibrate) จากรูปแบบของ RHEED ซึ่งมีค่าความผิดพลาดมากกว่า $10^\circ C$ และจากผลนี้ทำให้ตัวอย่างที่สร้างภายใต้เงื่อนไขค่าอัตราส่วน BEP ของ V/III เป็น 17 เท่าได้ค่าความเข้มแสงสูงที่สุด ซึ่งชี้ให้เห็นถึงการรวมตัวแบบเปล่งแสงมีค่าสูงที่สุดในตัวอย่าง สำหรับตัวอย่างอื่นๆ ในกลุ่มนี้มีค่าความเข้มแสงที่ได้น้อยกว่า อันเกิดจากสัดส่วนของ III และ V ขณะที่ทำการปลูกผลึกไม่เหมาะสม (Nonstoichiometric growth) โดยในกรณีค่าอัตราส่วน BEP ของ V/III เป็น 8 นั้นค่าอัตราส่วนความดันไอที่มีค่าต่ำ อันเป็นทำให้เกิดจุดบกพร่อง (Defect) ภายในเนื้อผลึกเนื่องจากปริมาณของ As_4 ไม่เพียงพอ สำหรับกรณีค่าอัตราส่วน BEP ของ V/III เป็น 17 สเปกตรัมที่ได้มีค่าสูงที่สุด สำหรับผลที่ได้จากตัวอย่างในกรณีค่าอัตราส่วน BEP ของ V/III เป็น 25 และ 33 มีค่าความสูงลดลง เนื่องจากปริมาณของ As_4 มีมากเกินไปทำให้เกิดจุดบกพร่องในลักษณะที่เรียกว่า "Antisite defect" ซึ่งอะตอม As แทรกตัวในตำแหน่งที่ว่างภายในเนื้อโครงผลึกทำให้ประสิทธิภาพของการเปล่งแสงลดลง



รูปที่ 4.8 สเปกตรัมจากการวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ในการทดลองเพื่ออิทธิพลของค่าอัตราส่วน BEP ของ As₄/(Ga+In) จากการวัดที่อุณหภูมิประมาณ 10 K

บทที่ 5

สรุป

จากผลการทดลองที่ได้จากงานโครงการวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

I) ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะปลูกผลึกมีช่วงค่าที่เหมาะสมในการสร้างโครงสร้างควันดัมเวลล์ที่มีความเครียดของ InGaAs-GaAs ด้วยวิธีการปลูกอพิแทกซีจากลำโมเลกุลอยู่ในช่วง 480-520°C

II) ค่าอัตราส่วน BEP ของ V/III หรือ $As_4/(In+Ga)$ ที่เหมาะสมในการสร้างโครงสร้างควันดัมเวลล์ที่มีความเครียดของ InGaAs-GaAs ด้วยวิธีการปลูกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล มีค่าประมาณ 17 เท่า

III) ค่าความยาวคลื่นของแสงที่ได้จากโครงสร้างควันดัมเวลล์ที่มีความเครียดของ InGaAs-GaAs ในการทดลองนี้มีค่าอยู่ในช่วง 930-986 nm ที่อุณหภูมิห้อง สำหรับชั้นเวลล์ InGaAs ที่มีค่าสัดส่วน อะตอม In ในชั้นเวลล์ $x_{In}=0.2$ โดยค่าความยาวคลื่นที่ได้นี้แปรตามค่าความหนาของชั้นเวลล์ InGaAs ในช่วง 25-75 Å สำหรับในช่วง 920-1000 nm ที่อุณหภูมิห้องและในช่วง 870-950 nm ที่อุณหภูมิ 10 K การเปลี่ยนแปลงมีลักษณะเช่นเดียวกัน

IV) ค่าความยาวคลื่นของแสงที่ได้จากโครงสร้างควันดัมเวลล์ มีความเครียดของ InGaAs-GaAs ในการทดลองนี้มีค่าอยู่ในช่วง 870-950 nm ที่อุณหภูมิ 10 K สำหรับชั้นเวลล์ InGaAs ที่มีค่าความหนา 75 Å โดยค่าความยาวคลื่นที่ได้แปรตามค่าสัดส่วนของ In ในชั้นเวลล์ InGaAs สำหรับค่าสัดส่วน In ในชั้นเวลล์ InGaAs ในช่วง $x_{In}=0.1-0.25$

บทที่ 6

ข้อเสนอแนะ

สำหรับงานวิจัยนี้ค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบจากรูปแบบของ RHEED ที่จุดเปลี่ยนแปลงต่างๆ ซึ่งทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนมากกว่า 10°C ซึ่งวิธีการที่ดีที่สุดคือการใช้ IR pyrometer แต่เครื่องมือนี้ราคาแพง และใช้โลหะหรือมีค่าจุดหลอมเหลวในช่วงที่เราทำงาน เช่น Al มีจุดหลอมเหลวที่ 660°C หรือ InSb มีจุดหลอมเหลว 525°C ติดไว้บน Block ที่มีแผ่นผลึกฐานติดอยู่ และทำการเปรียบเทียบที่ได้จาก pyrometer และค่าที่ได้จาก Thermocouple เพื่อให้สามารถกำหนดค่าอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น แต่วิธีการนี้ยุ่งยากและไม่เหมาะสำหรับการทำงานที่มีช่วงอุณหภูมิสูงได้ หากใช้ในการผลิตเชิงพาณิชย์จำเป็นต้องใช้เครื่องมือนี้ เพื่อให้การผลิตที่สามารถทำซ้ำได้ (repeatability) นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคือการตรวจสอบคุณสมบัติของโครงผลึกด้วย X-ray ซึ่งเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับงานนี้คือ Double crystal X-ray diffractometer เนื่องจากไม่มีเครื่องมือชนิดนี้ในประเทศไทยและเป็นเครื่องมือหลักสำคัญของการวิจัยด้านสิ่งประดิษฐ์และวัสดุสำหรับการสื่อสารทางแสง ที่ใช้ในการคำนวณค่าคงตัวผลึก (Lattice constant) โดยเฉพาะวัสดุสารประกอบชนิด 3 ธาตุ (Ternary) และชนิด 4 ธาตุ (Quaternary) โดยเครื่องมือสามารถบอกความแตกต่างของค่าคงตัวผลึกของชั้นผลึกที่ประกอบกันเป็นโครงสร้างสิ่งประดิษฐ์ สำหรับในงานขั้นต่อไปคือการวิจัยสารประกอบอื่นๆ เช่น GaSbAs, InGaAlAs, และ GaPSb ที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำความรู้และข้อมูลมาใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์ชนิดอื่นๆ สำหรับใช้ในการสื่อสารทางแสงในย่านความยาวคลื่น $1.3\ \mu\text{m}$ และ $1.5\ \mu\text{m}$ รวมถึงสิ่งประดิษฐ์อื่นๆ สำหรับการใช้งานในย่านความถี่สูงมาก (Ultra-high frequency) คณะผู้วิจัยหวังไว้ในโครงการวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวกับงานวิจัยจะได้รับการสนับสนุนและส่งเสริมต่อไปในอนาคต



เอกสารอ้างอิง

1. Properties fo Lattice-Matched and strained Indium Gallium Arsenide Edited by Pallab Bhattacharya, IEE, 1993.
2. Robert M. Kolbas, Neal G. Anderson, W. D. Laidig, Yongkun Sin, Y. C. Lo, K. Y. Hsieh, and Y. J. Yang, "Strained-Layer InGaAs-GaAs-GaAlAs Photopumped and Current Injection Lasers", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 24, No. 8, pp. 1605-1613, 1988.
3. R.G. Smart, J.L. Zyskind and D.J. DiGiovanni, "Experimental Comparison of 980 nm and 1480 nm-Pumped Saturated In-Line Erbium-Doped Fiber Amplifiers Suitable for Long-Haul Soliton Transmission Systems", IEEE Photonics Tech. Lett., Vol. 5, No.7, pp.770-773, 1993.
4. R. S. Geels, B. J. Thibeault, S. W. Corzine, J. W. Scott, and L. A. Coldren, "Design and Characterization of $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ MQW Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 29, No. 12, pp. 2977-2987, 1993.
5. T. R. Chen, L. Eng, B. Zhao, Y. H. Zhuang, S. Sanders, H. Morkoc and Amnon Yariv, "Submilliamp Threshold InGaAs-GaAs Strained Layer Quantum Well Laser", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 26, No. 7, pp. 1183-1189, 1990.
6. 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 .
7. 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.
8. Dr. Eberl MBE-Komponentenren GmH & Omicron Intruments for Surface Science, p.16.
9. MBE Components & Accessories, Valved Arsenic Cracker Cells, RIBER, Febuary 1999.
10. M.A. Herman and H. Sitter, "Molecular Beam Epitaxy : Fundamentals and Current Status", Spring-Verlag Berlin Heidelgeg, 1989. pp.96.
11. 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, pp. 384-392, 2000.

12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. GaInAsP Alloy Semiconductors Edited by T. P. Pearsal Wiley & Sons, 1982, pp.91 .
16. Data in Science and Technology, Editor in Chief : R. Poerschke, Semiconductors Group IV Elements and III-V Compounds Editor : O. Madelung, Springer-Verlag, 1991.
17. Yashikazu Takeda, "Materials Physics of InP-Based Compound Semiconductor", InP-Based Materials and Devices, Edited by Osamu WADA and Hideki HASEKAWA, John Wiley & Sons, Inc. 1999, pp.85.
18. Leo Esaki, "A Bird's-Eye View on the Evolution of Semiconductor Superlattices and Quantum Wells", *IEEE J. Quantum Electronics*, Vol. QE-22, No. 9, pp. 1611-1624, 1986.
19. Pallab BHATTACHAYA, "Semiconductor Optoelectronic devices", Prentice Hall, 1994, pp.27.
20. Toshiro Hayakawa, Masaharu Nagai, Hideyoshi Horie and Yoshihisa Niwata, "Effects of Growth Temperature and Substrate Misorientation in InGaAs/GaAs Strain Quantum Well Grown by MBE", *Journal of Grystal Growth*, Vol. 127, pp. 532-535.