

การประดิษฐ์นาโนโฮลจาก $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ บนแผ่นผลึกฐาน GaAs
ด้วยวิธีครอปเพลทออีพิแทกซ์ที่ใช้การปลูกผลึกอีพิแทกซ์จากลำโมเลกุล

Fabrication of $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ nanoholes on GaAs substrates
formed by droplet epitaxy using molecular beam epitaxy

โดย

สมชัย รัตนธรรมพันธ์ D. Eng. (Chulalongkorn Univ.)

โครงการวิจัยเลขที่ 108G-EE-2552
ทุนงบประมาณแผ่นดิน ปี 2552

คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
กรุงเทพฯ

กันยายน 2554

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสภาวิจัยแห่งชาติ ปีงบประมาณ 2552 นอกจากนี้โครงการนี้ยังได้รับการสนับสนุนจากศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช) โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) Asian office of Aerospace Research and Development (AOARD) และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญแก้ว ที่ได้ให้การสนับสนุนและคำแนะนำชี้แนะที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการวิจัยนี้ พร้อมทั้งคุณสุภโชค ไทน้อย คุณขวัญเรือน ไทน้อย คุณพรชัย ช่างม่วง ดร.วิภากร จีวะสุวรรณ ดร. ปุณยศิริ บุญเป็ง ดร.นราพร ปั่นเก่าและคุณองอาจ ตั้งเมตตาจิตตกุล ที่ให้ความช่วยเหลือในการวิจัยนี้

ชื่อโครงการวิจัย ...การประดิษฐ์นาโนโฮลจาก $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ บนแผ่นผลึกฐาน GaAs.....
...ด้วยวิธีครอปเปลทอพิแทกซีที่ใช้การปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล.....
ชื่อผู้วิจัย.....สมชัย...รัตนธรรมพันธ์.....
เดือนและปีที่ทำวิจัยเสร็จ กันยายน 2554.....

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำให้การศึกษาการประดิษฐ์โครงสร้างนาโนโฮล $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ บนแผ่นผลึกฐาน GaAs (100) ด้วยเทคนิคครอปเปลทอพิแทกซีที่ใช้การปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล ซึ่งในโครงการวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรและเงื่อนไขต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการประดิษฐ์ อันได้แก่ ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะ ค่าช่วงเวลาการขัดจังหวะหลังการขึ้นรูปหยดโลหะ ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการคริสตอลไลเซชัน และค่าช่วงเวลาในการคริสตอลไลเซชัน สำหรับค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง $270\text{-}360^{\circ}\text{C}$ ค่าช่วงเวลาการขัดจังหวะหลังการขึ้นรูปหยดโลหะอยู่ในช่วง 0-10 นาที ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการคริสตอลไลเซชันอยู่ในช่วง $170\text{-}260^{\circ}\text{C}$ และค่าช่วงเวลาในการทำการคริสตอลไลเซชันอยู่ในช่วง 1-10 นาที โดยตัวอย่างที่ได้ในงานวิจัยนี้ถูกวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ซึ่งค่าความหนาแน่นของโครงสร้างขนาดนาโนเมตรที่ได้อยู่ในช่วง $6 \times 10^8 - 1.8 \times 10^9$ ซม² ค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลางของสันขอบวงแหวนอยู่ในช่วง 90-120 nm และค่าเฉลี่ยความลึกของนาโนโฮลอยู่ในช่วง 2-5 nm โดยขึ้นกับเงื่อนไขที่ใช้ในกระบวนการประดิษฐ์ สำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะมีผลต่อค่าความหนาแน่นและค่าขนาดมิติของนาโนโฮล ค่าความหนาแน่นมีค่าลดลงและค่าขนาดมิติมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะมีค่าสูงขึ้น สำหรับอิทธิพลของค่าช่วงเวลาการขัดจังหวะภายหลังการขึ้นรูปหยดโลหะนั้นมีผลต่อค่าความหนาแน่นของนาโนโฮลอย่างเด่นชัด และอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการคริสตอลไลเซชันมีผลต่อรูปร่างของโครงสร้างขนาดนาโนเมตร คือ เมื่ออุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการคริสตอลไลเซชันมีค่าต่ำกว่า 230°C จะได้โครงสร้างนาโนโฮล แต่เมื่ออุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการคริสตอลไลเซชันตั้งแต่ 230°C เป็นต้นไปจะได้โครงสร้างควอนตัมดอตที่ล้อมรอบด้วยวงแหวนนาโนหรือนาโนริงค์ นอกจากนี้ได้มีการสาธิตการนำโครงสร้างนาโนโฮลมาประยุกต์ใช้เป็นเทมเพลตในการประดิษฐ์โครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุลที่เรียงตัวด้านข้างได้สำเร็จ แต่จำนวนควอนตัมดอตในควอนตัมดอตโมเลกุลมีค่า 2 ดอต 3 ดอต และ 4 ดอต

Project Title..... Fabrication of $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ nanoholes on GaAs substrates formed by droplet epitaxy.....
.....using molecular beam epitaxy.....

Name of Investigator...Somchai RATANATHAMMAPHAN.....

YearSeptember 2011.....

Abstract

This work reports on the fabrication of self-assembled $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ nanoholes on GaAs (100) by droplet epitaxy using molecular beam epitaxy. The effect of growth parameters such as substrate temperature during droplet forming, interruption time after droplet forming, crystallization temperature, and crystallization time were investigated. The surface morphology of $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ nanoholes were examined by atomic force microscope (AFM). The results showed the dependence of density, depth, and width of nanoholes on the growth parameters. The growth parameters were 270-360°C for the substrate temperature, 0-10 minutes for the interruption time, 170-260°C for the crystallization temperature, and 1-10 minutes for the crystallization time. The density were in range of 6×10^8 - $1.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ which decreased while increasing the substrate temperature. The structural were the depth in range of 2-5 nm, and the outer diameter in range of 90-120 nm along [110]. The crystallization temperature affected on the final shape of nanostructure. The crystallization temperature below 230°C, the nanostructure was nanohole. But the temperature higher than 230°C, the nanostructures were nanohole and quantum-dot surrounded with nanoring. An application of the fabrication of InAs lateral quantum-dot molecules on $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ nanohole template was also demonstrated in this work. The lateral quantum-dot molecules are bi-quantum-dot, tri-quantum-dot, and quadra-quantum-dot molecules.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ.....	II
บทคัดย่อภาษาไทย.....	III
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญสัญลักษณ์.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของ โครงการวิจัย.....	3
1.4 สาระของรายงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐาน.....	4
2.1 การปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล.....	4
2.1.1 ชุดระบบการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล.....	5
2.1.2 Effusion cell.....	6
2.1.2.1 Knudsen cell	7
2.1.2.2 Cracker cell	9
2.1.2.3 Valved cracker cell.....	10
2.1.2.4 Gas injection cell.....	11
2.1.3 อุปกรณ์วิเคราะห์	12
2.1.3.1 Reflection high energy diffraction electron (RHEED)	13
2.1.3.2 Residual gas analyzer.....	15
2.1.3.3 อุปกรณ์อื่นๆ ที่สามารถติดตั้งเข้าในระบบ MBE.....	15
2.2 กลไกการเกิดผลึกของการปลูกผลึกอพิแทกซีวิธี MBE.....	16
2.3 เทคนิคการปลูกผลึกครอบเปลทอพิแทกซี.....	19
2.4 สารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V.....	21
2.4.1 โครงสร้างของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V.....	21

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

	2.4.2 คุณสมบัติของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V.....	22
บทที่ 3	การออกแบบการทดลอง.....	24
	3.1 การเตรียมตัวอย่าง.....	24
	3.2 การศึกษาตัวแปรที่ใช้ในการประดิษฐ์โครงสร้างนาโนไฮส $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$	24
	3.2.1 การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหกดโลหะ.....	25
	3.2.2 การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของช่วงเวลาขัดจิ้งหะหลังการรูปหกดโลหะ.....	25
	3.2.3 การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าอุณหภูมิแผ่นในการทำคริสตอลไลเซชัน.....	25
	3.2.4 การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการทำคริสตอลไลเซชัน.....	25
	3.3 การวิเคราะห์ตัวอย่าง.....	26
บทที่ 4	ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	27
	4.1 การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหกดโลหะ.....	27
	4.2 การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหกดโลหะ.....	28
	4.3 การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าอุณหภูมิในการทำคริสตอลไลเซชัน.....	31
	4.4 การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าเวลาในการทำคริสตอลไลเซชัน.....	33
บทที่ 5	ตัวอย่างการประยุกต์.....	34
	5.1 วิธีการประดิษฐ์.....	34
	5.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	34
บทที่ 6	สรุป.....	38
บทที่ 7	ข้อเสนอแนะ.....	39
	เอกสารอ้างอิง.....	40
	ผลงานการเผยแพร่ของงานวิจัยนี้.....	42

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	ตารางเปรียบเทียบชนิดของ Effusion cell และชนิดของลำโมเลกุลที่ได้ จากวัสดุชนิดต่างๆ.....	12
ตารางที่ 2.2	รายการส่วนประกอบพื้นฐานใน Growth chamber ของระบบ MBE.....	16
ตารางที่ 2.3	อุณหภูมิจุดระเหิดของสารประกอบ III-V ชนิดต่างๆ.....	17
ตารางที่ 2.4	ตัวแปรทางกายภาพของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V ชนิด 2 ธาตุ.....	22
ตารางที่ 2.5	ค่าแถบพลังงานของตัวอย่างสารประกอบชนิด 3 ธาตุและ 4 ธาตุ.....	23
ตารางที่ 4.1	สรุปผลการทดลองการศึกษอิทธิพลของค่าอุณหภูมิในการคริสตอลไลเซชัน ในเทอมของตัวแปรขนาดจากนาโนโฮลที่ได้.....	33
ตารางที่ 4.2	สรุปผลการทดลองการศึกษอิทธิพลของค่าเวลาในการคริสตอลไลเซชัน ในเทอมของตัวแปรขนาดจากนาโนโฮลที่ได้.....	33

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	ภาพโครงสร้างชุดระบบ MBE ของ RIBER รุ่น 32 P.....	6
รูปที่ 2.2	แผนภาพโครงสร้าง Knudsen cell.....	7
รูปที่ 2.3	ภาพโครงสร้างของ Ga-trapping cap.....	9
รูปที่ 2.4	ภาพโครงสร้างของ Cracker cell.....	10
รูปที่ 2.5	ภาพของ Arsenic valve cracker cell.....	11
รูปที่ 2.6	ภาพโครงสร้างของ Effusion cell ชนิด Gas injector cell.....	12
รูปที่ 2.7	แผนภาพอธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลงความเข้มของอิเล็กตรอนในขณะที่ทำการปลูกผลึก.....	14
รูปที่ 2.8	แผนภาพความสัมพันธ์ของรูปแบบ RHEED และอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐาน (100) GaAs, InP และ InAs ภายใต้อิทธิพลของ Dimer.....	14
รูปที่ 2.9	แบบจำลองปฏิกิริยาของการเกิดผลึก GaAs ในกรณี Ga-As ₂ -(100) GaAs.....	18
รูปที่ 2.10	แบบจำลองปฏิกิริยาของการเกิดผลึก GaAs ในกรณี Ga-As ₄ -(100) GaAs.....	19
รูปที่ 2.11	แบบจำลองการแพร่ของ As ในหยดโลหะ Ga (ก) และการเกิดผลึกในหยดโลหะ Ga ภายใต้อิทธิพลของ As (ข) ในกระบวนการคริสตอลไลเซชัน.....	20
รูปที่ 2.12	แผนภาพโครงสร้างแบบ Zinceblende.....	21
รูปที่ 4.1	(ก) ภาพ AFM ของนาโนโฮลจาก In _{0.15} Ga _{0.85} As บน GaAs (ข) ภาคตัดขวางของตัวอย่างในกรอบเส้นประจากรูป (ก)	27
รูปที่ 4.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของนาโนโฮล (ก) และค่าเฉลี่ยความกว้าง ระหว่างสันขอบวงแหวน (ข) ในฟังก์ชันของค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะ..	28
รูปที่ 4.3	ฮิสโตแกรมการกระจายค่าความลึกของนาโนโฮลจากตัวอย่างที่มีค่าช่วงเวลาขัดจังหวะหลัง การขึ้นรูปหยดโลหะ (ก) 0 นาที (ข) 2 นาที (ค) 5 นาที และ (ง) 7 นาที.....	29
รูปที่ 4.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของนาโนโฮล (ก) แลค่าเฉลี่ยความกว้าง ในแนว [110] (ข) ในฟังก์ชันของค่าช่วงเวลาขัดจังหวะหลังการขึ้นรูปหยดโลหะ.....	43
รูปที่ 4.5	ภาพ AFM ของนาโนโฮลจาก In _{0.15} Ga _{0.85} As บน GaAs จากตัวอย่างที่ทำการคริสตอลไลเซชัน ที่อุณหภูมิ (ก) 200 °C (ข) 260°C.....	32
รูปที่ 4.6	ภาพภาคตัดขวางผ่าน AFM ของนาโนโฮลจาก In _{0.15} Ga _{0.85} As บน GaAs จากตัวอย่างที่ทำการคริสตอลไลเซชันที่อุณหภูมิ (ก) 200 °C (ข) 260°C.....	32

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.1	ภาพ AFM แบบ 2 มิติ 3 มิติ และภาพภาคตัดขวางของ (ก) นาโนโซล (ข) นาโนที่เปลี่ยนรูปไป หลังการเพิ่มอุณหภูมิ และ (ค) ควอนตัมดอท โมเลกุลชนิด 4 คอต.....	35
รูปที่ 5.2	ภาพ AFM แบบ 3 มิติของควอนตัมดอท โมเลกุลชนิด (ก) 2 คอต (ข) 3 คอต และ (ค) 4 คอต..	36
รูปที่ 5.3	กราฟแสดงการกระจายของจำนวนประชากรของควอนตัมดอท โมเลกุลที่มีจำนวน 2 คอต 3 คอต และ 4 คอตในแต่ละ โมเลกุล.....	37

តារាងស័ក្តិសម្គាល់

AFM	Atomic Force Microscope
AlAs	: Aluminium Arsenide
AlP	: Aluminium Phosphide
AlSb	: Aluminium Antimonide
AlInAs	: Aluminium Indium Arsenide
AlGaInAs	: Aluminium Gallium Indium Arsenide
As	Arsenic
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
P	Phosphorus
QMS	Quadupole Mass Spectrometer
RHEED	: Reflection High Energy Electron Diffraction
Sb	Antimony
SIMS	Secondary Ion Microscopic Spectroscopy
UHV	: Ultra-high vacuum

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

โครงสร้างขนาดนาโนเมตร (Nanostructure) ของสารกึ่งตัวนำได้เป็นที่ดึงดูดใจของนักวิจัยและนักวิทยาศาสตร์ทั่วโลก ด้วยสาเหตุจากคุณสมบัติเชิงอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics) เชิงแสง (Optical) เชิงแม่เหล็ก (Magnetics) และเชิงแม่เหล็ก-แสง (Magnetro-optic) ของโครงสร้างขนาดนาโนเมตรที่มีความพิเศษแตกต่างกันไป โครงสร้างแบบมวลสารปกติ เนื่องจากคุณสมบัติพิเศษที่มีสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ทั้งในด้านอิเล็กทรอนิกส์ ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ตัวอย่างโครงสร้างขนาดนาโนเมตร ได้แก่ โครงสร้างควอนตัมดอต (Quantum dot) ควอนตัมไวร์ (Quantum wire) และควอนตัมริงค์ (Quantum ring) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีโครงสร้างขนาดนาโนเมตรแบบซับซ้อน (Complex Nanostructure) ตัวอย่างเช่น โครงสร้างควอนตัมดอตโมเลกุล (Quantum-dot molecule) และ โครงสร้างนาโนโฮล (Nanohole) ที่มีคุณสมบัติพิเศษกว่าโครงสร้างขนาดนาโนเมตรแบบปกติทั่วไปคือความเหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานในด้าน Quantum computing [1] และ Quantum cryptography [2] โดยโครงสร้างดังกล่าวมีข้อกำหนดที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานเหล่านั้นคือมีค่าความหนาแน่นต่ำ เพื่อให้การเข้าถึงตำแหน่งของโครงสร้างขนาดนาโนเมตรสามารถทำได้ง่ายและแม่นยำ รวมถึงคุณสมบัติการกักพาหะ (Carrier confinement) สำหรับวิธีการประดิษฐ์โครงสร้างขนาดนาโนเมตรในยุคดั้งเดิมนั้นเริ่มต้นจากการประดิษฐ์โครงสร้างควอนตัมเวลล์ (Quantum well) และทำการขึ้นรูปขนาดนาโนด้วยกระบวนการลิโทกราฟี (Lithograph) และการกัดขึ้นรูปทางเคมี (Chemical etching) ซึ่งวิธีการนี้มีขีดจำกัดหลายประการคือไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตในเชิงพาณิชย์ โครงสร้างที่ได้นั้นมีจุดบกพร่อง (Defect) และการปนเปื้อน (Contamination) ภายในโครงสร้างภายหลังกระบวนการกัดขึ้นรูปทางเคมี สำหรับอีกวิธีการหนึ่งคือการปลูกผลึกโครงสร้างขนาดนาโนเมตรในแบบการก่อตัวขึ้นเอง (Self Assembly) ที่มีชื่อเรียกว่า Stranski-Krastanov (SK) growth mode หรือการปลูกผลึกในแบบ SK [3] ซึ่งคุณภาพผลึกที่ได้มีความสมบูรณ์และมีคุณสมบัติที่ดี แต่อย่างไรก็ดีกลไกการปลูกผลึกในแบบ SK นี้ผลึกที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นแบบ Random ทำให้ควอนตัมดอตที่ได้นั้นไม่มีการเรียงตัวหรือการก่อตัวขึ้นรูปเป็นควอนตัมดอตโมเลกุล รวมทั้งไม่สามารถกำหนดตำแหน่งการเกิดได้ ซึ่งวิธีการที่ทำให้เกิดการเรียงตัวเป็นควอนตัมดอตโมเลกุลคือการใช้นาโนโฮลเป็นเทมเพลต (Template) ในการขึ้นรูป โดยวิธีการประดิษฐ์นาโนโฮลได้มีการเริ่มต้นจากการประดิษฐ์ด้วยการกัดขึ้นรูปทางเคมีจากโครงสร้างควอนตัมดอตที่มีการปลูกกลับ (Capping regrowth) ด้วยชั้นผลึกบางๆ แต่ด้วยปัญหาของโครงสร้างที่ได้นั้นมีจุดบกพร่อง (Defect) และการปนเปื้อน (Contamination) ภายในโครงสร้างภายหลังกระบวนการกัดขึ้นรูปทางเคมี [4] สำหรับอีกวิธีการหนึ่งในการประดิษฐ์โครงสร้างขนาดนาโนเมตรด้วยวิธี Droplet epitaxy ตัวอย่างของการใช้วิธีการนี้ ได้แก่ การ

ประดิษฐ์ Nanoscale mound-like template [5] ซึ่งได้มีการศึกษาและสามารถประดิษฐ์โครงสร้างควอนตัมคอตโมเลกุลได้

ดังนั้นกระบวนการประดิษฐ์โครงสร้างขนาดนาโนเมตรที่เป็นนาโนโฮลและควอนตัมคอตโมเลกุลที่มีประสิทธิภาพและสามารถทำได้ง่ายขึ้นด้วยการเริ่มต้นการประดิษฐ์ด้วยวิธี Droplet epitaxy [6] อันเป็นกุญแจสำคัญของการพัฒนาเทคโนโลยี Quantum Computing และ Quantum cryptography ที่อาศัยโครงสร้างนาโนโฮลเป็นเทมเพลตในการขึ้นรูปควอนตัมคอตโมเลกุล และเทคนิคการประดิษฐ์นี้มีศักยภาพในการประดิษฐ์โครงสร้างดังกล่าว โดยกระบวนการของเทคนิคดังกล่าวสำหรับสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V เริ่มต้นด้วยการขึ้นรูปหยดโลหะ (Droplet) ของธาตุหมู่ III จากนั้นทำการเปลี่ยนรูปหยดโลหะให้กลายเป็นสารประกอบ III-V ด้วยไอของธาตุหมู่ V โดยกระบวนการนี้เราเรียกว่า คริสตอลไลเซชัน (Crystallization) ซึ่งกลไกการเปลี่ยนรูปร่างของหยดโลหะนี้ขึ้นกับเงื่อนไขในกระบวนการขึ้นรูปหยดโลหะ ในกระบวนการประดิษฐ์ ซึ่งปัจจุบันมีหลายสถาบันกำลังทำการวิจัยให้การประดิษฐ์โครงสร้างนาโนโฮลและควอนตัมคอตโมเลกุลด้วยวิธีทรอปเพลทอพิแทกซี (Droplet Epitaxy) ดังนั้นเพื่อการเตรียมความพร้อมทางด้านองค์ความรู้ (Knowhow) สำหรับรองรับการพัฒนาด้านนาโนอิเล็กทรอนิกส์ของประเทศ ผู้วิจัยจึงได้ดำริโครงการงานวิจัยนี้ในการเตรียมการศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีในการประดิษฐ์โครงสร้างนาโนโฮลด้วยเทคนิคดังกล่าว

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการงานวิจัย

1.2.1 เพื่อพัฒนาเทคนิคการปลูกผลึก Droplet epitaxy ที่ใช้วิธีการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล (Molecular beam epitaxy : MBE) ในการประดิษฐ์โครงสร้างนาโนโฮลจากสารประกอบ $In_{0.15}Ga_{0.85}As$ บนแผ่นผลึกฐาน GaAs (100)

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าตัวแปรที่ใช้ในเทคนิคการปลูกผลึก Droplet epitaxy ที่ใช้วิธีการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล ได้แก่ ค่าความหนาหรือปริมาณของโลหะในกระบวนการขึ้นรูปหยดโลหะ ค่าอุณหภูมิขณะขึ้นรูปหยดโลหะ ช่วงเวลาหลังการขึ้นรูปหยดโลหะ ค่าอุณหภูมิและช่วงเวลาในการคริสตอลไลเซชันที่มีต่อรูปร่างของโครงสร้างนาโนโฮลจากสารประกอบ $In_{0.15}Ga_{0.85}As$ บนแผ่นผลึกฐาน GaAs (100)

1.2.3 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประดิษฐ์โครงสร้างควอนตัมคอตโมเลกุลด้วยการใช้เทมเพลต (Template) ของโครงสร้างนาโนโฮลจากสารประกอบ $In_{0.15}Ga_{0.85}As$ บนแผ่นผลึกฐาน GaAs (100)

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

3.1 การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าตัวแปรที่ใช้ในเทคนิคการปลูกผลึก Droplet epitaxy ที่ใช้วิธีการปลูกผลึกอพิแทกจากลำโมเลกุล ได้แก่ ค่าความหนาหรือปริมาณของโลหะในกระบวนการขึ้นรูปหยดโลหะ ค่าอุณหภูมิขณะขึ้นรูปหยดโลหะ ช่วงเวลาหลังการขึ้นรูปหยดโลหะ ค่าอุณหภูมิและช่วงเวลาในการคริสตอลไลเซชันที่มีต่อรูปร่างของโครงสร้างนาโนโซลจากสารประกอบ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ บนแผ่นผลึกฐาน GaAs (100)

3.2 การทดลองเพื่อสาธิตการประดิษฐ์โครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุลด้วยการใช้เทมเพลตของโครงสร้างนาโนโซลจากสารประกอบ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ บนแผ่นผลึกฐาน GaAs (100)

1.4 สาระของรายงานวิจัย

สำหรับรายงานวิจัยนี้มีเนื้อหาสาระดังนี้ ในบทที่ 2 กล่าวถึงความรู้พื้นฐานของการปลูกผลึกอพิแทกซึจากลำโมเลกุล กลไกการเกิดผลึกในกระบวนการปลูกผลึกอพิแทกซึจากลำโมเลกุล และเทคนิคการปลูกผลึกวิธี Droplet epitaxy ในบทที่ 3 กล่าวถึงรายละเอียดและขั้นตอนการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่ใช้ในการประดิษฐ์โครงสร้างนาโนโซลด้วยวิธีครอปเพลทอพิแทกซึ ในบทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง ในบทที่ 5 กล่าวถึงการสาธิตของการประยุกต์ใช้โครงสร้างนาโนโซลในการประดิษฐ์โครงสร้างควอนตัมดอทโมเลกุล ในบทที่ 6 เป็นการสรุปของโครงการวิจัยนี้ และในบทที่ 7 ข้อเสนอแนะจากโครงการวิจัยนี้และแนวในการพัฒนาเพื่อนำผลการทดลองไปประยุกต์ใช้งานต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐาน

สำหรับในบทนี้เป็นการทบทวนความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้โดยสังเขป ซึ่งมีสาระเนื้อหาเกี่ยวข้องกับเทคนิคการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy : MBE) กลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการปลูกผลึกอพิแทกซ์วิธี MBE เทคนิคการประดิษฐ์โครงสร้างขนาดนาโนด้วยเทคนิคครอปเปลทอพิแทกซ์ และความรู้พื้นฐานของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V

2.1 การปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุล

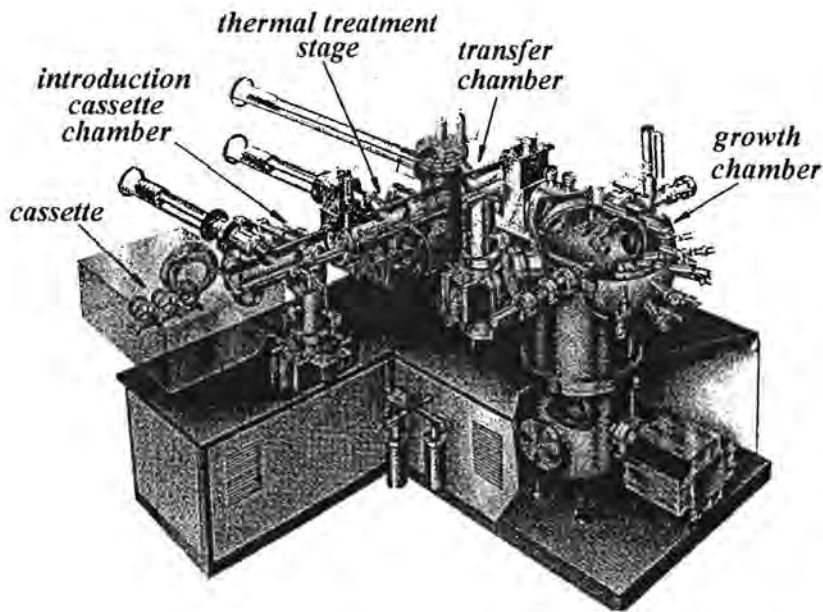
การปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุลหรือ MBE เป็นเทคนิคการปลูกชั้นผลึกสารประกอบกึ่งตัวนำบนผิวของแผ่นผลึกฐาน (Substrate) ที่เป็นผลึกเดี่ยว (Single Crystal) โดยการพ่นไอของลำโมเลกุลหรืออะตอมของธาตุที่เป็นวัตถุดิบลงบนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน ซึ่งโมเลกุลที่มีส่วนที่เป็นองค์ประกอบหรืออะตอมที่เป็นองค์ประกอบทำปฏิกิริยากันกลายเป็นชั้นผลึกของสารประกอบสารกึ่งตัวนำบนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน และไอของลำโมเลกุลเหล่านั้นได้จากการระเหยหรือระเหิด (Evaporation) วัตถุดิบที่มีธาตุหรือเป็นธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารประกอบ (Constituent species) ภายใต้สภาวะสุญญากาศระดับสูงพิเศษ (Ultra-high Vacuum) ปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบนี้เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ค่าสัดส่วนของสารประกอบและคุณสมบัติทางกายภาพของชั้นผลึกอพิแทกซ์ที่ปลูกได้นั้นขึ้นกับเงื่อนไขและตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการปลูกผลึก ได้แก่ อัตราส่วนค่าความดันไอของลำโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบ อุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูก ฯลฯ เป็นต้น นอกจากนี้ค่าอัตราการปลูกผลึกนี้ขึ้นค่าความดันไอขององค์ประกอบที่มีคุณสมบัติการเกาะติด (Impinging) ผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานสำหรับข้อดีของการปลูกผลึกอพิแทกซ์วิธี MBE ได้แก่ การเตรียมผิวแผ่นผลึกฐานสามารถทำได้ง่าย โดยวิธีการทำความสะอาดด้วยความร้อน (Thermal cleaning) ภายใต้สภาวะสุญญากาศระดับสูงพิเศษ ความสามารถในการตรวจสอบ (Monitoring) โครงสร้างผิว (Surface structure) ที่สามารถกระทำได้ตลอดเวลาตั้งแต่ก่อนเริ่มต้นการปลูกผลึกจนถึงสุดกระบวนการปลูกผลึก นอกจากนี้การปลูกผลึกอพิแทกซ์วิธี MBE ที่ดำเนินการในระบบสุญญากาศระดับสูงพิเศษ ทำให้ผลึกที่ปลูกได้นั้นมีความบริสุทธิ์สูงกว่าวิธีการอื่นๆ เนื่องจากก๊าซต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อคุณภาพผลึก ได้แก่ H_2O , O_2 , CO และ CO_2 เป็นต้น มีปริมาณที่ต่ำมากๆ ในสภาวะสุญญากาศระดับสูงพิเศษ จึงให้เราสามารถควบคุมคุณภาพของผลึกได้ตามที่เราต้องการ นอกจากนี้ชุดระบบการปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุลที่มีสภาวะสุญญากาศระดับสูงทำให้สามารถติดต่อเครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ เข้าในระบบ ทำให้สามารถวิเคราะห์คุณสมบัติของผลึกที่ได้ในขณะที่ทำการปลูกผลึกและภายหลังการปลูกผลึก รวมถึงสภาวะบรรยากาศในขณะที่ทำการปลูกผลึกได้ ด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์ต่างๆ ที่ติดตั้งเข้าในระบบ ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวถึงต่อไป

2.1.1 ชุดระบบการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล

ชุดระบบการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุลที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชุดระบบ MBE ของบริษัท RIBER รุ่น 32 P ซึ่งมีลักษณะเป็น โมดูล (Module) โดยประกอบด้วยส่วน Introduction Chamber ส่วน Thermal Treatment Stage ส่วน Transfer Buffer Chamber และส่วน Growth Chamber ดังแผนภาพในรูปที่ 2.1 โมดูลแต่ละส่วนที่ต่อกันนี้มี Gate Valve ต่อขึ้นกลางระหว่างโมดูล โดยจะเปิด Gate Valve ให้ Cassette ที่เป็น Carrier ในการบรรทุก Substrate holder ผ่านเข้า/ออกจาก โมดูลส่วนหนึ่งไปยังโมดูลอีกส่วนหนึ่ง และทำการปิดเพื่อแยกสภาวะสุญญากาศของ โมดูลแต่ละส่วนให้เป็นอิสระจากกัน ส่วน Introduction chamber เป็นส่วนที่ใช้ในการนำ Substrate เข้าและออกจากระบบ และส่วน Thermal treatment stage ซึ่งมีสภาวะสุญญากาศในระดับ 10^{-10} Torr โดยส่วน Introduction chamber นี้มีปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) จำนวน 2 ชุดคือ Rotary Pump และ Turbo Molecular Pump ทำหน้าที่ปั๊มเพื่อสร้างสภาวะสุญญากาศระดับปานกลาง (10^{-5} Torr) โดย Cassette ที่บรรจุ Substrate holder จากภายนอกสามารถลำเลียงผ่านโมดูลส่วนนี้ เพื่อลำเลียงเข้าสู่ระบบ MBE ต่อไป ในทำกลับกันการลำเลียง Cassette ออกจากระบบ MBE ก็ดำเนินการผ่านส่วน Introduction chamber เช่นเดียวกัน และทำการปรับสภาวะจากสุญญากาศสู่สภาวะบรรยากาศปกติด้วยการเติมก๊าซไนโตรเจนสะอาด ส่วน Thermal treatment stage เป็นส่วนที่ใช้ในการทำ Outgassing แผ่นผลึกฐานก่อนการปลูกผลึกด้วยความร้อน เพื่อไล่ความชื้นและขจัดออกไซด์ (บางส่วน) ที่ผิวของแผ่นผลึกฐาน ในส่วนนี้มีปั๊มสุญญากาศจำนวน 2 ชุดคือ Ion Pump และ Ti sublimation Pump ส่วน Transfer buffer chamber เป็นส่วนที่ใช้ในการลำเลียง Substrate Holder เข้าหรือออกจากส่วน Growth chamber และเก็บ Substrate holder เพื่อรอพักสำหรับการปลูกหรือนำออกจากระบบส่วน Growth chamber เป็นส่วนที่กระบวนการปลูกผลึกอพิแทกซีดำเนินการในโมดูลส่วนนี้ โดยแผนภาพของส่วน Growth chamber ดังรูปที่ 2.1 ส่วนประกอบต่างๆ มีดังนี้ ส่วน Cyopanel เป็นช่องว่างสำหรับรับไนโตรเจนเหลวจากภายนอก เพื่อทำหน้าที่หล่อเย็นระบายความร้อนที่เกิดจาก Effusion Cell ให้แก่ Growth chamber นอกจากนี้ไนโตรเจนเหลวยังช่วยทำให้สภาวะสุญญากาศในส่วน Growth Chamber ดีขึ้น เนื่องจากความเย็นของไนโตรเจนเหลวทำให้มวลของบรรยากาศภายในมีความหนาแน่นมากขึ้น ทำให้ระบบปั๊มสุญญากาศสามารถทำงานได้ดียิ่งขึ้น สำหรับวัตถุดิบที่ใช้ในระบบของคณะผู้วิจัย ได้แก่ Ga, Al, In, As, P (ได้จากการสลายตัวของ GaP ใน Knudsen 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 (QMS) และ Ionization Gauge ซึ่งเป็นอุปกรณ์หลักพื้นฐานที่มีความสำคัญของระบบ MBE โดย RHEED นี้เป็นเครื่องมือในการตรวจสอบโครงสร้างผิว นอกจากนี้ RHEED ยังสามารถใช้ในการควบคุมค่าความหนา

ของชั้นผลึกในขณะที่ทำการปลูกได้จากปรากฏการณ์ RHEED intensity oscillation ที่เกิดขึ้น โดยเทคนิคนี้มีชื่อเรียกว่า Phase-locked epitaxy หรือ PLE [7] และ Migration enhanced epiatxy หรือ MEE [8] ที่สามารถควบคุมค่าความหนาได้ในระดับ Monolayer ของผลึกที่ปลูก นอกจากนี้ RHEED intensity oscillation ยังสามารถบอกค่าอัตราการปลูกผลึกอีกด้วย ส่วน QMS หรือ Gas analyzer เป็นเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบสถานะบรรยากาศภายใน Growth chamber และ Ionization gauge เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดเทียบค่าความดันไอของลำโมเลกุลต่างๆ ที่ใช้ในการปลูกผลึกแต่ละครั้ง เพื่อปรับแต่งเงื่อนไขค่าความดันไอขององค์ประกอบต่างๆ ในการปลูกผลึกแต่ละครั้งให้ได้เงื่อนไขตามที่ต้องการ ในปัจจุบันระบบ MBE ได้มีการพัฒนาให้สามารถติดตั้งอุปกรณ์อื่นๆ สำหรับใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของผลึกเข้าไปในระบบ MBE ได้แก่ Ellipsometer ที่ใช้ในการควบคุมค่าความหนา (Thickness) และวิเคราะห์ค่าสัดส่วน (Composition) ของผลึกในขณะที่ทำการปลูก ซึ่งทำให้เกิดความคล่องตัวและความต่อเนื่องในการทำงาน อันช่วยให้เราสามารถควบคุมกระบวนการปลูกผลึก การวิเคราะห์โครงสร้างและคุณสมบัติของผลึกที่ปลูกได้อย่างรวดเร็ว รวมทั้งยังสามารถติดตั้ง Pyrometer ที่ใช้ในการตรวจสอบอุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึก ซึ่งให้ความแม่นยำกว่าเทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermocouple) ที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ทำให้การดำเนินการสามารถทำได้อย่างรวดเร็วและน่าเชื่อถือ



รูปที่ 2.1 ภาพโครงสร้างชุดระบบ MBE ของ RIBER รุ่น 32 P

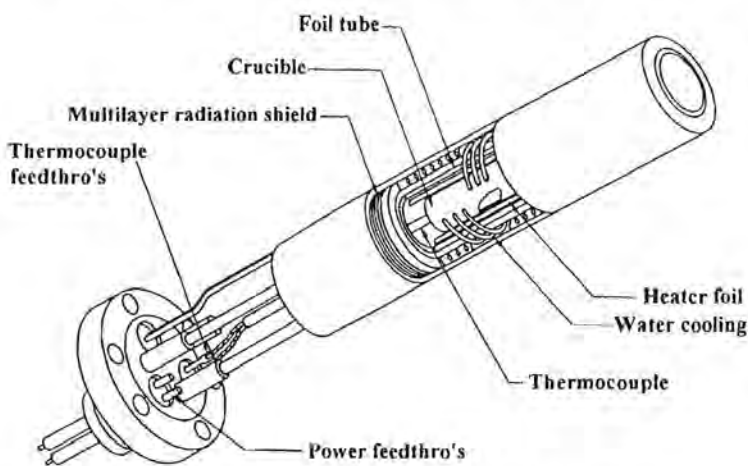
2.1.2 Effusion Cell

Effusion Cell เป็นอุปกรณ์หลักสำคัญของระบบ MBE โดยหน้าที่ของ Effusion cell เป็นแหล่งกำเนิดลำโมเลกุลขององค์ประกอบจากวัสดุที่ใช้ในการปลูกผลึก ซึ่งวัสดุชนิดนี้เป็นธาตุบริสุทธิ์หรือสาร

ประกอบที่มีธาตุที่เป็นองค์ประกอบก็ได้ และความสำคัญของ Effusion Cell นั้นเป็นกุญแจสำคัญที่ทำให้การปลูกผลึกวิธี MBE มีข้อดีเด่นที่เหนือกว่าเทคนิคอื่นๆ ซึ่ง Effusion Cell แต่ละชนิดนั้นมีความเหมาะสมสำหรับวัสดุแต่ละชนิดแตกต่างกันซึ่งในรายงานวิจัยนี้นำเสนอเฉพาะ Effusion Cell ที่เกี่ยวข้องกับการปลูกผลึกอพิแทกซีของ GaAs และ InP เท่านั้น

2.1.2.1 Knudsen Cell

Knudsen Cell หรือ K-cell เป็น Effusion Cell แบบที่ง่ายที่สุด ซึ่งใช้ในการระเหยหรือระเหิด (Evaporate) วัสดุให้เป็นลำโมเลกุลด้วยพลังงานความร้อน สำหรับโครงสร้างของ Knudsen Cell ดังในรูปที่ 2.2 วัสดุที่ใช้ถูกบรรจุไว้ในเบ้าหลอม (Crucible) ซึ่งทำจากวัสดุ Pyrolytic boron nitride หรือ PBN โดยเบ้าหลอมนี้ถูกล้อมรอบด้วยขดลวดความร้อน (Heating elements) โดยขดลวดความร้อนเป็นตัวกำเนิดความร้อนให้แก่เบ้าหลอมจากขดลวดความร้อนที่มีการป้อนผ่านกระแสไฟฟ้า และที่ใต้เบ้าหลอมนี้มีเทอร์โมคัปเปอร์ดัดตั้งอยู่ เพื่อใช้ในการตรวจสอบอุณหภูมิและควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดความร้อนให้ได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ ด้วยสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปอร์ท่ต่อเข้ากับเครื่องควบคุมแบบ PID ที่ทำหน้าที่ควบคุมแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้ขดลวดความร้อนของ Effusion cell เพื่อทำให้เบ้าหลอมมีอุณหภูมิตามที่กำหนด สำหรับ K-Cell ที่มีเบ้าหลอมขนาดใหญ่จำเป็นต้องมีท่อระบายความร้อนอยู่ภายใน เพื่อให้ป้องกันมิให้ความร้อนที่เกิดขึ้นไปรบกวนส่วนอื่นๆ อีกด้วย



รูปที่ 2.2 แผนภาพโครงสร้าง Knudsen Cell

สำหรับการควบคุมปริมาณของจำนวนโมเลกุลที่พ่นออกจาก Knudsen Cell ควบคุมได้จากอุณหภูมิของขดลวดความร้อนภายใน Knudsen Cell ซึ่งปริมาณของจำนวนโมเลกุลของสารที่พ่นออกจาก Knudsen Cell สามารถคำนวณได้จากสมการ

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

โดย p คือค่าความดันไอของธาตุหรือสารที่อุณหภูมิกำหนดมีหน่วยเป็นทอร์ (Torr)

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

l คือค่าระยะห่างจากปากช่องเปิดของ Knudsen Cell ถึงผิวหน้าของผลึกฐานมีหน่วยเป็น ซม.

M คือค่ามวลโมเลกุลขององค์ประกอบที่เป็นวัตถุดิบมีหน่วยเป็น AMU

T คือค่าอุณหภูมิจากสมการของภาชนะบรรจุใน Knudsen Cell มีหน่วยเป็นเคลวิน (K)

สำหรับค่าอัตราการปลูกผลึก (Growth rate) ของการปลูกผลึกวิธี MBE สำหรับสารประกอบกลุ่ม III-V นี้ขึ้นกับจำนวน โมเลกุลของธาตุหมู่ III เช่นกรณีของ GaAs ค่าอัตราการเกิดผลึกสามารถคำนวณได้จากสมการ

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

โดย R คืออัตราการเกิดผลึกมีหน่วยเป็น ไมครอน/ชั่วโมง

α คือค่าคงที่ ซึ่งค่าคงที่นี้ขึ้นกับค่าอุณหภูมิจากทิศทางผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน

กลไกการเกิดผลึกของสารประกอบกลุ่ม III-V นั้นถูกกำหนดจากอะตอมของธาตุหมู่ III ในสถานะก๊าซที่ถูกพ่นไปยังผิวหน้าของผลึกแผ่นฐานเป็นหลัก อันเนื่องจากอะตอมของธาตุหมู่ III มีค่าสัมประสิทธิ์การเกาะติด (Sticky coefficient) สูงกว่าอะตอมของธาตุหมู่ V โดยกลไกการเกิดผลึกขึ้นกับค่าอัตราการพ่นของธาตุ III จาก K-cell ที่เกาะลงบนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน จากนั้นจะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับอะตอมของธาตุหมู่ V รวมตัวกันเป็นสารประกอบ และเรียงตัวเป็นผลึกตามโครงสร้างของแผ่นผลึกฐาน ตัวอย่างเช่น In-As ที่ได้จากลำโมเลกุลของ In และ As₄ หรือ As₂ และ Ga-As ที่ได้จากลำโมเลกุลของ Ga และ As₄ หรือ As₂ ทำปฏิกิริยากันที่ผิวหน้าของผลึกแผ่นฐาน แล้วก่อให้เกิดพันธะขึ้นเป็นโครงผลึกที่มีลักษณะเช่นเดียวกับของแผ่นผลึกฐาน โดยกระบวนการเกิดผลึกนี้ขึ้นกับพลังงานกระตุ้นที่ให้แก่โมเลกุลเหล่านั้น ได้แก่ ความร้อนจากอุณหภูมิของผลึกแผ่นฐาน และพลังงานจลน์ของโมเลกุลที่ได้จาก Knudsen cell

อย่างไรก็ตาม Knudsen cell นั้นมีขีดจำกัดสำหรับสารหรือธาตุบางชนิด เนื่องจากไม่เหมาะสมสำหรับในการผลิตลำโมเลกุลของสารหรือธาตุที่มีค่าความดันไอสูงได้ ตัวอย่างเช่น P, S, Se และ Te เป็นต้น เนื่องจากการควบคุมค่าความดันไอทำได้ยาก ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนา Effusion Cell ที่มีคุณสมบัติพิเศษ ได้แก่ Valved cracker cell สำหรับสารที่มีค่าความดันไอสูงเหล่านี้ แต่อย่างไรก็ดี Valved cracker cell นั้นมีราคาแพงและโครงสร้างซับซ้อน สำหรับสิ่งประดิษฐ์อีกชนิดหนึ่งที่ได้ออกแบบมาเพื่อ

ใช้ร่วมกับ Knudsen cell แบบธรรมดา นี้ เพื่อใช้ในการผลิตโมเลกุลชนิด Dimer ของ As (As_2) และ P (P_2) ได้แก่ Ga-trapping cap วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการนี้ เป็นสารประกอบ GaAs และ GaP เนื่องจากมีราคาถูกและ อุณหภูมิของการสลายตัวมีค่าไม่สูงเกินไป จากค่าความแตกต่างของค่าความดันไอระหว่าง Ga และ P ที่ได้จากการสลายตัวของสารประกอบในสภาวะสมดุลนั้น โดยค่าความดันไอของ Ga มีค่าต่ำกว่าไอของ As_2 หรือ P_2 ที่อุณหภูมิเดียวกัน ดังนั้น ไอของ Ga ถูกกักไว้ภายในภาชนะเบ้าหลอมหรือ Crucible ของ Knudsen cell ด้วยส่วน Ga-trapping cap นอกจากนี้ส่วน Ga-trapping cap ยังช่วยในการรักษาภาวะสมดุลของไอ ในสภาวะที่เกิดการสลายตัวของสารประกอบอีกด้วย สำหรับการสลายตัวของสารประกอบดังกล่าวนี้เกิดขึ้นจากความร้อนหรือการทำให้สารประกอบอยู่ในสภาวะอุณหภูมิสูง ซึ่งในสภาวะ สมดุลนี้สารประกอบกลุ่ม III-V มีจำนวนหรือปริมาณของอะตอมธาตุหมู่ III มากกว่าของธาตุหมู่ V และ ในสภาวะอุณหภูมิสูงนี้ธาตุหมู่ V ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ Dimer (V_2) แต่เนื่องจากค่าความดันไอของ โมเลกุล Dimer ของหมู่ V นั้นมีค่าสูงกว่า จึงทำให้โมเลกุลของ Dimer ที่เกิดขึ้นถูกพ่นออกมาเป็น โมเลกุล หลักเพียงอย่างเดียว ตามปกติอุณหภูมิจุดทำงานของการกำเนิดไอ As_2 หรือ P_2 มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิการ สลายตัวโครงสร้างของ Ga-trapping cap ดังในรูปที่ 2.3

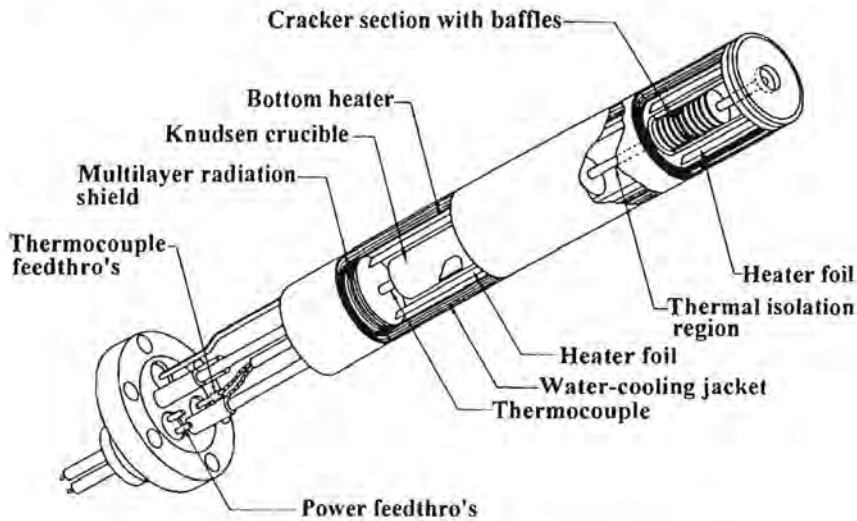


รูปที่ 2.3 ภาพ โครงสร้างของ Effusion ที่มี Ga-trapping cap [9]

2.1.2.2 Cracker cell

Cracker cell มีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Dissociation cell เป็น Effusion cell ที่ออกแบบเพื่อใช้เป็น แหล่งกำเนิดโมเลกุลของธาตุหมู่ V ชนิด Dimer (V_2) ซึ่งตามปกติโมเลกุลของธาตุหมู่ V ที่ได้จาก Effusion cell นั้นเป็นโมเลกุลชนิด 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 ซึ่งเป็นส่วนของเขตลดความร้อนอีกชุดหนึ่งที่ทำให้อุณหภูมิสูงในช่วง $800-1000^{\circ}C$ ที่ปลายของช่องทางออก เพื่อทำให้โมเลกุล Tetramer แตกตัวเป็นโมเลกุล Dimer และในการออกแบบนั้นมี

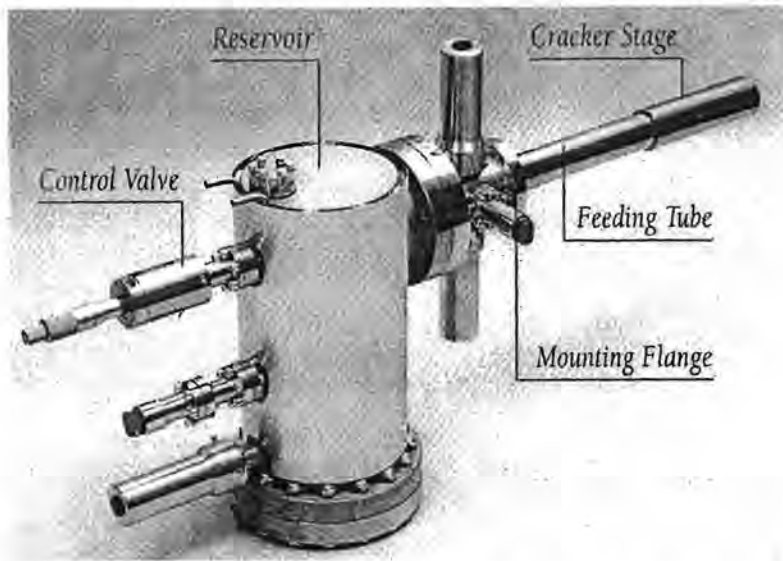
ข้อควรระวังคือต้องให้ส่วน Cracking zone อยู่ห่างจาก Crucible หรือ Reservoir ที่บรรจุวัตถุดิบมากเพียงพอ เพื่อมิให้ความร้อนจาก Cracking zone ซึ่งมีค่าอุณหภูมิสูงรบกวนส่วน Crucible อันมีผลต่อการควบคุมค่าความดันไอได้ ดังนั้น Effusion cell ชนิดนี้จึงมีความยาวมากกว่า Knudsen Cell แบบปกติและจำเป็นต้องมีส่วนของท่อน้ำหรือส่วนระบายความร้อนในลักษณะอื่นๆ สำหรับทำหน้าที่เป็นระบบระบายความร้อน (Cooling) เพื่อให้การควบคุมอุณหภูมิในส่วน Crucible สามารถทำได้ สำหรับโครงสร้างแบบง่ายของ Cracker cell ดังในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ภาพโครงสร้างของ Cracker Cell

2.1.2.3 Valved cracker cell

Valved cracker cell เป็น Effusion cell ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดลำโมเลกุลชนิด Dimer ของธาตุหมู่ V ซึ่ง Valved cracker cell มีกลไกของ Nozzle valve ที่ใช้ในการควบคุมค่าความดันไอจากการปรับตำแหน่งของ Nozzle ในการเปิดช่องทางออกของลำโมเลกุล รวมถึงความสามารถในการปิดกั้นไอไว้ภายใน Reservoir เพื่อไม่ให้ไอออกมาได้ในกรณีที่เราไม่มีความต้องการ ทำให้มีความคล่องตัวในการกำหนดค่าความดันไอตามเงื่อนไขที่ต้องการได้ง่ายและความสามารถในการตัดลำโมเลกุลได้ดีกว่า Effusion cell ชนิดอื่นๆ โดยเฉพาะการปลูกผลึกของโครงสร้างเฮเทอโร (Heterostructure) ที่มีสารประกอบของธาตุหมู่ V ที่ต่างชนิดกัน สำหรับข้อดีของ Valved cracker cell ก็คือสามารถใช้วัตถุดิบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งแตกต่างจาก Knudsen cell และ Valved cracker cell คือวัตถุดิบภายในนั้นถูกทำให้กลายเป็นไอระเหยออกมาตลอดเวลา ถึงแม้ว่า Shutter อยู่ในตำแหน่งปิดก็ตาม

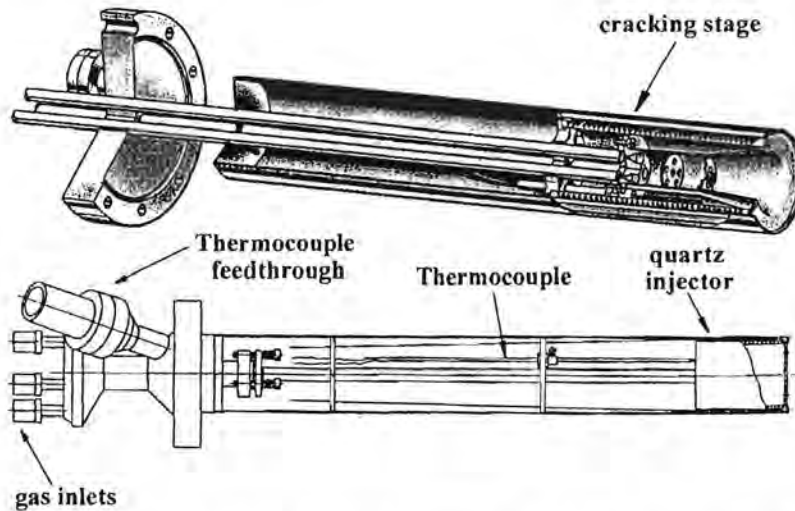


รูปที่ 2.5 ภาพของ Arsenic Valve Cracker Cell [10]

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 $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$ (Trimethyl Gallium : TMGa) และ $\text{In}(\text{CH}_3)_3$ (Trimethyl Indium : TMIn) เป็นต้น โดยโครงสร้างของ Gas injector cell มีลักษณะคล้ายคลึงกับ Knuden cell แต่แตกต่างกันที่ Effusion cell ชนิดนี้มีขดลวดความร้อนที่ใช้น้ำมันอุณหภูมิสูงกว่า โดยหน้าที่ขดลวดความร้อนทำให้ก๊าซที่ไหลผ่านแตกตัวออกเป็นโมเลกุลแบบ Dimer หรือ Tetramer สำหรับธาตุหมู่ V และเป็นอะตอมเดี่ยวสำหรับธาตุหมู่ III ซึ่งสามารถควบคุมได้จากค่าอุณหภูมิในส่วน Cracking zone สำหรับข้อดีของการใช้ก๊าซเป็นวัตถุดิบคือความต่อเนื่องและความสะดวกในการเติมก๊าซวัตถุดิบ โดยไม่มีความจำเป็นในการทำให้ระบบร้วก่อนการเติมวัตถุดิบเช่นระบบ MBE ทั่วๆ ไป เนื่องจากวัตถุดิบนั้นถูกเก็บไว้ในท่อก๊าซที่ต่อเข้าระบบ MBE ซึ่งสามารถปิดท่อของระบบการป้อนก๊าซที่ต่อเข้าระบบและทำการเปลี่ยนท่อก๊าซได้ โดยไม่มีผลกระทบต่อสถานะสุญญากาศของ Growth chamber แต่อย่างไรก็ตามการใช้ก๊าซเป็นวัตถุดิบนั้นมีความจำเป็นที่ต้องติดตั้งระบบปั๊มสุญญากาศที่มีขนาดกำลังสูงเพียงพอ และปั๊มที่ใช้ต้องเป็นชนิดที่มีความคงทนต่อการกัดกร่อนของก๊าซเหล่านั้น

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



รูปที่ 2.6 ภาพโครงสร้างของ Effusion cell ชนิด Gas injector Cell [11]

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบชนิด Effusion cell และชนิดของลำโมเลกุลที่ได้จากวัสดุชนิดต่างๆ

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

2.1.3 อุปกรณ์วิเคราะห์

ข้อเด่นของระบบ MBE ที่เหนือกว่าวิธีการปลูกผลึกอพิแทกซีวิธีอื่นๆ ในเชิงเทคนิคก็คือสามารถติดตั้งอุปกรณ์วิเคราะห์ต่างๆ เข้ากับระบบได้ ทำให้มีความต่อเนื่องในการตรวจสอบและวิเคราะห์คุณภาพและคุณสมบัติผลึกในขณะที่ทำการปลูกผลึกได้ จึงทำให้สะดวกและมีความคล่องตัว ซึ่งเหมาะสมสำหรับการวิจัยและการผลิตเชิงพาณิชย์ สำหรับในรายงานนี้ขอกล่าวถึงโดยสังเขปเฉพาะอุปกรณ์วิเคราะห์หลักพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับระบบ MBE เท่านั้น

2.1.3.1 Reflection High Energy Electron Diffraction (RHEED)

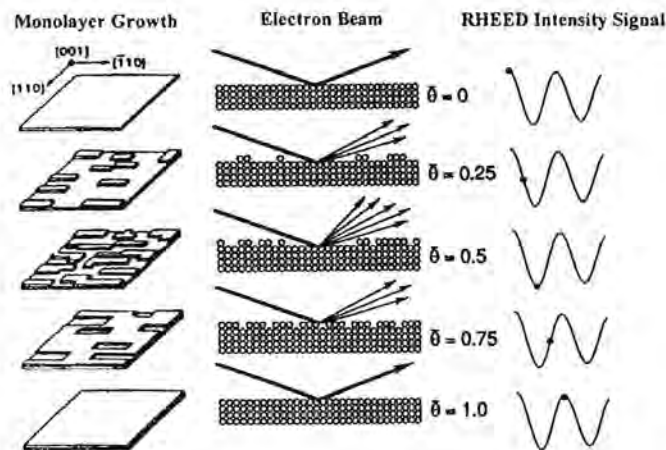
RHEED เป็นเครื่องมือหลักพื้นฐานที่สำคัญชนิดหนึ่งในระบบ MBE ที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์และตรวจสอบโครงสร้างผิว (Surface Structure) โดยข้อมูลที่ได้จาก RHEED นี้บ่งบอกรูปแบบของลักษณะโครงสร้างผิวในเชิง Microstructure และความเรียบของผิว (Smoothness) ซึ่งลักษณะรูปแบบ (Pattern) ที่ได้จาก RHEED นี้ขึ้นกับลักษณะการเรียงตัวของอะตอมในโครงร่างผลึก และความเรียบของผิวมีผลทำให้ลำอิเล็กตรอนเบี่ยงเบน (Diffraction) ไปในลักษณะ 3 มิติ อันเป็นเหตุทำให้รูปแบบของ RHEED ที่ปรากฏขึ้นแตกต่างกันไปในแต่ละกรณี

สำหรับหน้าที่หลักสำคัญของ RHEED ที่สรุปได้มีดังนี้

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

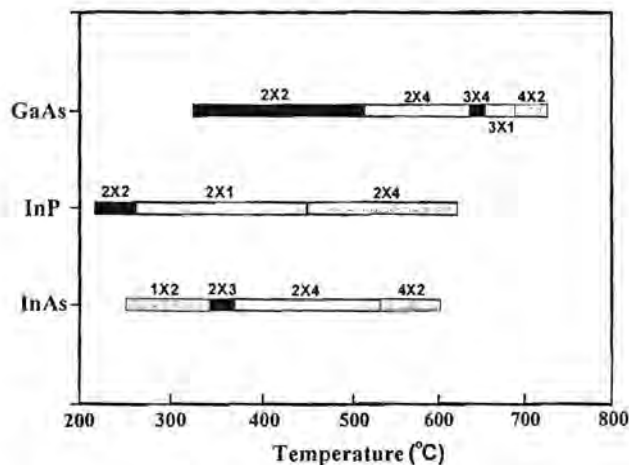
นอกจากนี้ RHEED ยังสามารถใช้ในการสอบเทียบค่าอัตราการปลูกผลึก (Growth Rate Calibration) ได้ เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสง RHEED ในขณะที่ทำการปลูกผลึก ซึ่งสามารถอธิบายได้ในรูปที่ 2.7 ตามปกติผิวหน้าของผลึกก่อนการปลูกผลึกมีความเรียบ ทำให้อิเล็กตรอนสามารถสะท้อนผ่านผิวหน้าผลึกที่มีอะตอมเรียงตัวเป็นระเบียบ ซึ่งความเข้มของอิเล็กตรอนที่สะท้อนผ่านไปในครณีนี้มีค่าความเข้มสูงสุด แต่เมื่อการปลูกผลึกเริ่มต้นขึ้นการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสง RHEED มีค่าลดลง ในขณะที่ทำการปลูกผลึกนี้เกิดจากการกระเจิง (Scattering) ของลำอิเล็กตรอนตามส่วนของผลึกขนาดเล็กที่กระจายบนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน อันเนื่องจากผลึกที่เกิดขึ้นนั้นบนผิวหน้าของแผ่นผลึกเกิดการเรียงตัวของก้อนผลึกขนาดเล็ก (Cluster) โดยก้อนผลึกขนาดเล็กที่เกิดขึ้นนั้นมีลักษณะกระจัดกระจายไม่เป็นระเบียบ อันเป็นผลทำให้ความเข้มของลำอิเล็กตรอนมีค่าลดลง จนกระทั่งพื้นที่ของก้อนผลึกขนาดเล็กเหล่านั้นปกคลุมผิวหน้าของผลึกมากกว่าครึ่งหนึ่ง ความเข้มแสงของ RHEED จะกลับมามีความเข้มเพิ่มขึ้นอีกจนมีค่าสูงสุดเมื่อผลึกเรียงเต็มผิวหน้าแผ่นผลึกฐาน ซึ่งความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของความเข้มและค่าความหนาของผลึกที่เกิดขึ้นนี้มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบคลื่นรูปไซน์ (Sine) โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มหนึ่งรอบในการเปลี่ยนแปลงความหนาหนึ่งชั้น โมเลกุล (Monolayer) ด้วยเหตุนี้เองทำให้เราสามารถควบคุมค่าความหนาของชั้นผลึกที่ได้ในระดับชั้น โมเลกุลจากการสังเกตการเปลี่ยนค่าความเข้ม RHEED ที่เปลี่ยนแปลงไปในขณะที่ทำการปลูกผลึก โดย RHEED เป็นเครื่องมือสำคัญในเทคนิค PLE และ MEE ซึ่งนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน อีกทั้งยังเป็นเทคนิคสำคัญในการ

สังเกตการก่อตัวของโครงสร้าง Quantum Dot จากกลไก Stranski-Krastanow แต่อย่างไรก็ดีเทคนิคนี้มีขีดจำกัดคือการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสงไม่ชัดเจนสำหรับการปลูกผลึกของสารประกอบบางชนิดและการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสง RHEED นั้นมีลักษณะที่แตกต่างกันไปตามเงื่อนไขในสถานะที่แตกต่างกันอีกด้วย สำหรับรายละเอียดต่างๆ จะขอไม่กล่าวถึงในที่นี้



รูปที่ 2.7 แผนภาพอธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลงความเข้มของอิเล็กตรอนในขณะที่ทำการปลูกผลึก

นอกจากนี้รูปแบบ (Pattern) ของ RHEED ที่ได้ของผลึกแต่ละชนิดสามารถบ่งบอกถึงช่วงค่าอุณหภูมิของผิวหน้าผลึกได้ด้วยดังตัวอย่างในรูปที่ 2.8 ซึ่งปัจจุบันยังนิยมใช้วิธีนี้ในการตรวจสอบอุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานในการปลูกผลึกวิธี MBE และสามารถใช้ได้กับสารประกอบเกือบทุกชนิด โดยเฉพาะสารประกอบกึ่งตัวนำที่ค่าแถบพลังงานมีค่าน้อยมาก อันเป็นข้อดีที่เหนือกว่าวิธีการวัดด้วย Pyrometer ซึ่งไม่สามารถใช้ได้ในกรณีนี้ [12] แต่อย่างไรก็ดีวิธีการนี้มีความคลาดเคลื่อนมากกว่า 10°C และมีความยุ่งยากในการอ่านรูปแบบของ RHEED ในการวัดที่ขอบอุณหภูมิ โดยขึ้นกับความชำนาญมากของผู้อ่านเป็นอย่างมาก



รูปที่ 2.8 แผนภาพความสัมพันธ์ของรูปแบบ RHEED และอุณหภูมิของแผ่นผลึก (100) GaAs, InP และ InAs ภายใต้ไอของ Dimer [13]

2.1.3.2 Residual Gas Analyzer

Residual Gas Analyzer หรือ Quadrupole Mass Spectrometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของอนุภาคที่เป็นก๊าซภายใน Growth Chamber ซึ่งทำให้เราสามารถรู้สภาพบรรยากาศภายใน Growth Chamber นอกจากนี้ Residual Gas Analyzer ยังสามารถใช้วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ (Composition) ของสารประกอบในขณะที่ทำการปลูกผลึกได้เช่นกัน [14] 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 ที่ติดตั้งเพื่อช่วยให้การปลูกผลึกสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น Pyrometer เพื่อใช้ในการวัดอุณหภูมิผิวหน้าแผ่นผลึกฐาน Ellipsometer เพื่อใช้ในการควบคุมค่าความหนาและค่าอัตราส่วนของสารประกอบได้แม่นยำยิ่งขึ้น ด้วยลักษณะของระบบ MBE ที่เป็นโมดูลที่มีสถานะสุญญากาศระดับพิเศษทำให้เราสามารถติดตั้งเครื่องมือวิเคราะห์อื่นๆ เข้ากับระบบ MBE ได้ ตัวอย่างเช่น Auger Electron Spectroscopy (AES), X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS), Secondary Ion Microscopic Spectroscopy (SIMS), Scanning Tunnelling Microscope (STM) เป็นต้น จึงทำให้เราสามารถวิเคราะห์และตรวจสอบคุณสมบัติของผลึกที่ปลูกได้อย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว โดยเฉพาะ STM เป็นเครื่องมือที่มีขีดความสามารถในการวิเคราะห์ที่ช่วยให้เราสามารถเข้าใจกลไกต่างๆ ในระดับขนาดของอะตอม [15] 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 กลไกการเกิดผลึกของการปลูกผลึกอพิแทกซีวิธี MBE

กลไกการเกิดผลึกของการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุลสำหรับสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V นั้นเกิดจากอะตอมของธาตุหมู่ III เป็นหลัก เนื่องจากความสามารถของการเกาะติดผิวแผ่นผลึกฐานของธาตุหมู่ III ซึ่งตามปกติแล้วผิวหน้าแผ่นผลึกฐานก่อนการปลูกถูกปกคลุมด้วยบรรยากาศของโมเลกุลธาตุหมู่ V เพื่อชะลอการสูญเสียในขณะแผ่นผลึกฐานมีค่าอุณหภูมิสูง อันเป็นผลทำให้ผิวหน้าแผ่นผลึกฐานเป็นชั้นของอะตอม V ดังนั้นอะตอมของธาตุหมู่ III จึงเรียงตัวเกาะลงบนชั้นของอะตอม V จนกลายเป็นชั้นของอะตอม III จากนั้นอะตอมของธาตุหมู่ V ทำปฏิกิริยาเกาะบนอะตอมของธาตุหมู่ III หรือถูกดูดซับ (Adsorp) จากอะตอมของธาตุหมู่ III โดยลักษณะของการเรียงตัวของอะตอมของธาตุหมู่ III และ V นั้นเรียงตัวเป็นชั้นระดับอะตอมสลับกันไปตลอดการปลูกผลึก ซึ่งอะตอมของธาตุหมู่ V ได้จาก

การแตกตัวของโมเลกุลที่อยู่ในรูป Dimer หรือ Tetramer ทำให้กระบวนการเกิดผลึกเป็นลักษณะได้สัดส่วนขององค์ประกอบตามโครงสร้าง (Stoichiometric) โดยโมเลกุลส่วนเกินของธาตุหมู่ V นั้นถูกปล่อยคายออก (Desorp) จากผิวของแผ่นผลึกฐาน แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีความสำคัญสำหรับการปลูกผลึกวิธีนี้ ดังนั้นหากอุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีค่าสูงทำให้เกิดผลดังต่อไปนี้

ก) ในกรณีที่อุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีค่าสูงกว่าจุดระเหิดของธาตุหมู่ V ทำให้เกิดการปล่อยคายอะตอมของธาตุหมู่ V ออกจากผิวแผ่นผลึกฐาน

ข) ในกรณีที่อุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีค่าสูงขึ้นและมีค่าสูงกว่าจุดระเหิดของของธาตุหมู่ III ทำให้เกิดการปล่อยคายอะตอมของธาตุหมู่ III ออกจากผิวแผ่นผลึกฐาน

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

ตารางที่ 2.3 อุณหภูมิจุดระเหิดของสารประกอบ III-V ชนิดต่างๆ [16]

สารประกอบ	$T_{CS}(^{\circ}C)$	$T_{max(V4)}(^{\circ}C)$	$T_{max(V2)}(^{\circ}C)$	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

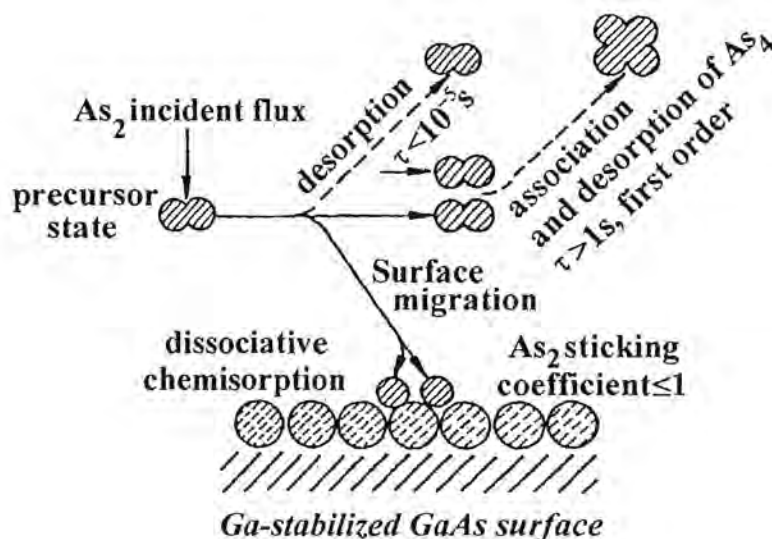
T_{CS} หมายถึงอุณหภูมิของการระเหิด (Congruent Sublimation Temperature)

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

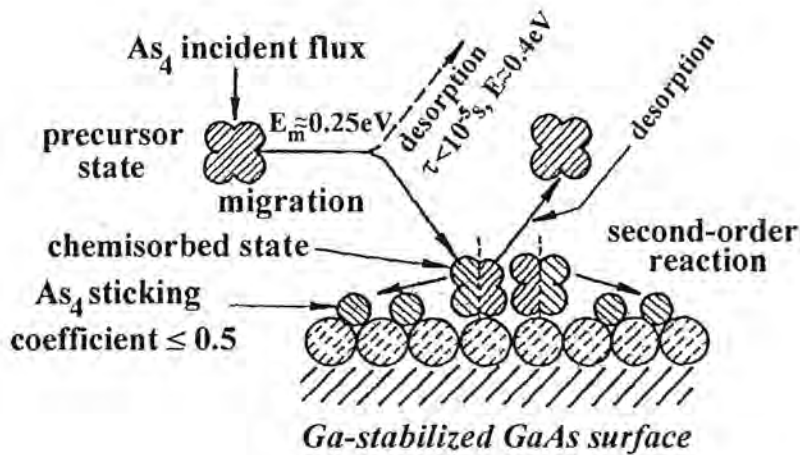
$T_{max}(V_2)$ หมายถึงอุณหภูมิสูงสุดภายใต้บรรยากาศ dimer โมเลกุลของธาตุหมู่ V

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

การอธิบายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุลนั้นเราสามารถจำลองตามรูปที่ 2.9 และ 2.10 อันเป็นตัวอย่างของ GaAs ซึ่งปฏิกิริยานั้นสามารถเกิดขึ้นได้ 2 กรณีคือกรณีของ Ga-As₂-(100) GaAs และกรณีของ Ga-As₄-(100) GaAs สำหรับในกรณี Ga-As₂-(100) GaAs ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเริ่มต้นจากอะตอมของ Ga เกาะติดบนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานและเรียงตัวเป็นชั้น (layer) จากนั้นโมเลกุล As₂ ทำปฏิกิริยากับอะตอมของ Ga โดยแตกตัวเป็นอะตอม As และเกาะตัวบนชั้นอะตอม Ga สำหรับอัตราการเกาะของโมเลกุล As₂ ที่ผิวหน้าแผ่นผลึกฐานขึ้นกับค่า Flux ของ Ga สำหรับโมเลกุล As₂ ส่วนเกินนั้นจะระเหิดไปในรูปของโมเลกุล As₂ และ As₄ ทำให้การเกิดผลึกเป็นแบบ Stoichiometric Growth ดังในรูปที่ 2.9 สำหรับกรณี Ga-As₄-(100) GaAs นั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีความซับซ้อนกว่าโดยโมเลกุล As₄ คู่หนึ่งทำปฏิกิริยากับอะตอม Ga ที่อยู่ใกล้เคียง ซึ่งอะตอม Ga ได้เกาะอยู่ที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากโมเลกุล As₄ แต่ละโมเลกุลแตกตัวให้อะตอม As จำนวน 2 อะตอมเกาะลงบนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานด้วยการดูดซับ (Adsorp) จากอะตอมของ Ga โดยจำนวนอะตอมของ As ที่เกาะลงบนผิวหน้ามีสัดส่วนเท่ากับจำนวนอะตอมของ Ga ที่เกาะที่ผิวหน้า ส่วนอะตอม As ส่วนที่เหลือจำนวน 4 อะตอมนั้นจะรวมตัวกันเป็นโมเลกุล As₄ และถูกปล่อยคาย (Desorp) ออกจากผิวไป ดังนั้นในกรณีนี้จึงมีความจำเป็นที่ต้องให้ค่าความหนาแน่นของโมเลกุล As₄ หรือ Flux ของ As₄ (J_{As_4}) มีค่ามากกว่าค่าความหนาแน่นของโมเลกุล Ga หรือ Flux ของ Ga (J_{Ga}) เพื่อให้จำนวนโมเลกุล As₄ มีจำนวนเพียงพอสำหรับปฏิกิริยาที่มีส่วนที่เกาะเรียงตัวในผลึกและส่วนที่ปล่อยคายออก ในขณะที่ทำการปลูกผลึกนั้นอะตอมของ As สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนหนึ่งที่เกาะลงบนผิว (Adsorp) ของอะตอม Ga เรียงตัวเป็นโครงผลึก และอีกส่วนหนึ่งที่ถูกปล่อยคาย (Desorp) ออกมา ซึ่งเป็นส่วนที่สูญเสียไปและการสูญเสียนี้มีอัตราเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 2.9 แบบจำลองปฏิกิริยาของการเกิดผลึก GaAs ในกรณี Ga-As₂-(100) GaAs



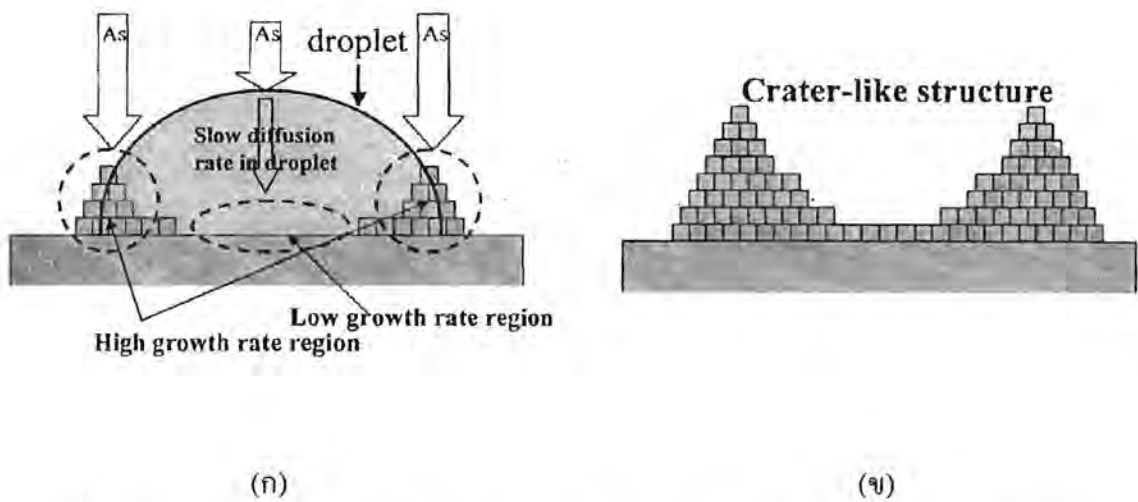
รูปที่ 2.10 แบบจำลองปฏิกิริยาของการเกิดผลึก GaAs ในกรณี Ga-As₄-(100) GaAs

2.3 เทคนิคการปลูกผลึกดรออปเพลทอพิแทกซี

เทคนิคการปลูกผลึกดรออปเพลทอพิแทกซีเป็นวิธีการปลูกผลึกอพิแทกซีที่แตกต่างไปจากวิธีการปลูกผลึกตามแบบปกติ (Conventional) ซึ่งได้มีการเสนอครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1990 โดย Dr. Koguchi [17] ต่อมาเทคนิคนี้ได้ถูกพัฒนาและนำมาประยุกต์ใช้ในการประดิษฐ์โครงสร้างขนาดนาโนแบบต่างๆ ตัวอย่างเช่น โครงสร้างควอนตัมดอตแบบคู่ โครงสร้างนาโนริงค์แบบคู่ เป็นต้น โดยเทคนิคนี้มีกระบวนการหลัก 2 ขั้นตอนคือกระบวนการขึ้นรูปหยดโลหะและกระบวนการคริสตอลไลเซชัน (Crystallization) หรือกระบวนการเปลี่ยนรูปหยดโลหะให้เป็นผลึก ซึ่งเทคนิคเหมาะสำหรับสารประกอบกลุ่มตัวนำ โดยขนาดของรูปหยดโลหะมีขนาดในระดับนาโนเมตรและค่าขนาดของรูปหยดโลหะขึ้นกับเงื่อนไขในการขึ้นรูปหยดโลหะ สำหรับรูปร่างของหยดโลหะนั้นส่วนใหญ่จะมีรูปร่างเป็นรูปครึ่งทรงกลม และรูปร่างสุดท้ายของหยดโลหะที่เปลี่ยนรูปเป็นผลึกขึ้นเงื่อนไขในกระบวนการคริสตอลไลเซชัน ซึ่งกระบวนการคริสตอลไลเซชันมีความสำคัญต่อรูปร่างสุดท้ายของโครงสร้างนาโนเมตรดังนี้

สำหรับกลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการคริสตอลไลเซชันนั้นเกิดจากกระบวนการเปลี่ยนรูปหยดโลหะ 2 กลไกที่เกิดการแพร่ (Diffusion) จากแบบจำลองในรูปที่ 2.11 สำหรับกรณีของโครงสร้างขนาดนาโนเมตร GaAs [18] ซึ่งในตอนเริ่มต้นการฟุ้งไอของ As₄ นั้น กลไกการเกิดผลึกขึ้นเกิดขึ้น 2 กลไกที่เกิดจากการแพร่ของอะตอม As คือกลไกแรกที่บริเวณผิวขอบรอบนอกวงของหยดโลหะ (Process B) ซึ่งหยดโลหะ Ga ที่อยู่บนแผ่นผลึกฐานสัมผัสไอ As₄ โดยตรง อันเป็นผลให้หยดโลหะนั้นดังกล่าวเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบ GaAs ทันทีจากผิวด้านนอกของหยดโลหะ จากนั้นผลึกจากผิวขอบรอบนอกวงของหยด

โลหะนี้จะค่อยๆ ขยายตัวเข้าภายในหยดโลหะ โดยผลึกที่ผิวขอบรอบนอกที่เกิดขึ้นนี้มีรูปร่างเป็นวงแหวน กลไกอีกกลไกหนึ่งคืออะตอม As ที่แพร่จากด้านผิวบนของหยดโลหะ (Process A) ซึ่งอะตอม As จะทำปฏิกิริยากับโลหะหลอมเหลว Ga กลายเป็นสารละลาย Ga-GaAs โดย GaAs นี้เป็นสารแขวนลอยในหยดโลหะ และจะกลายเป็นผลึก GaAs เมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่ผิวรอยต่อระหว่างหยดโลหะและแผ่นผลึกฐาน จะทำให้เกิดขึ้นผลึกขึ้นที่ผิวของแผ่นผลึกฐาน ซึ่งอัตราการเกิดผลึกบริเวณผิวรอยต่อระหว่างหยดโลหะและแผ่นผลึกฐานสำหรับกลไกการเกิดผลึกในกระบวนการนี้ขึ้นกับค่าอัตราการแพร่ของ As สำหรับค่าอัตราการแพร่ของ As ในกรณีนี้ขึ้นกับค่าความดันไอของ As, และค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะที่ทำการคริสตอลไลเซชัน โดยตัวแปรสำคัญในการกำหนดรูปร่างในที่นี้ถูกกำหนดจากอัตราการเกิดผลึกที่ผิวขอบรอบวงของหยดโลหะ (Process B) และผิวรอยต่อระหว่างหยดโลหะและแผ่นผลึกฐาน (Process A) หากค่าอัตราการเกิดผลึกทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน รูปร่างของโครงสร้างขนาดนาโนเมตรที่ได้สุดท้ายจะมีรูปร่างเหมือนหยดโลหะเริ่มต้นหรือควอนตัมดอท แต่ในกรณีที่อัตราการเกิดผลึกทั้งสองกรณีนี้แตกต่างกัน รูปร่างของโครงสร้างขนาดนาโนเมตรที่ได้สุดท้ายจะมีรูปร่างเป็นวงแหวนหรือโดนัท



รูปที่ 2.11 แบบจำลองการแพร่ของ As ในหยดโลหะ Ga (ก) และการเกิดผลึกในหยดโลหะ Ga ภายใต้ไอของ As (ข) ในกระบวนการคริสตอลไลเซชัน [18]

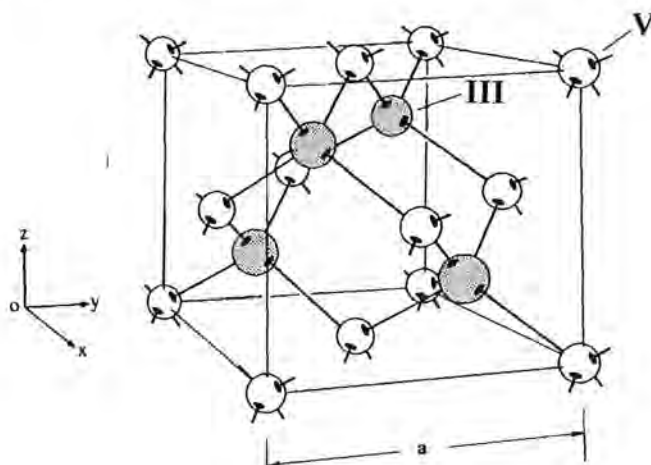
สำหรับเทคนิคการประดิษฐ์โครงสร้างขนาดนาโนเมตรด้วยเทคนิคครอปเพลทอพิเทกซีได้ถูกศึกษาและพัฒนาขีดความสามารถในการประดิษฐ์โครงสร้างขนาดนาโนเมตรจนสามารถประดิษฐ์โครงสร้างที่มีความซับซ้อน ซึ่งรายละเอียดไม่ขอกกล่าวถึงในที่นี้

2.4 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 การปลูกผลึกอพิแทกซีในยุคนี้ส่วนใหญ่เน้นมีวัตถุประสงค์เพื่อการสร้างสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ ประมาณปี 1970 สิ่งประดิษฐ์ที่เกี่ยวข้องกับ GaAs เป็นสิ่งประดิษฐ์ของสารประกอบ III-V กลุ่มแรกที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นและสิ่งประดิษฐ์ที่เกิดขึ้นในยุคนี้เป็นต้นแบบของสิ่งประดิษฐ์ในยุคต่อมา โดยเฉพาะสิ่งประดิษฐ์สำหรับระบบสื่อสารทางแสงในช่วงย่าน 1.3 และ 1.5 μm ที่สร้างจากสารประกอบ InGaAsP บนแผ่นผลึกฐาน InP ดังนั้นในหัวข้อนี้จะเป็นการทบทวนความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V

2.4.1 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 ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมในโครงสร้างนี้เป็นแบบโควาเลนต์ (Covalent bond) เป็นส่วนใหญ่ และระยะห่างระหว่างอะตอมนั้นขึ้นกับชนิดของอะตอมที่มาประกอบกันเป็นสารประกอบในโครงผลึก ดังนั้นตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่เป็นคุณสมบัติเฉพาะของสารประกอบแต่ละชนิดคือ ค่าคงตัวผลึก (Lattice constant : a) ซึ่งสารประกอบแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน ดังในตารางที่ 2.4



รูปที่ 2.12 แผนภาพโครงสร้างแบบ Zincblende

ตารางที่ 2.4 ตัวแปรทางกายภาพของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V ชนิด 2 ธาตุ [19]

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

2.3.2 สมบัติของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V

เนื่องจากสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V นั้นมีคุณสมบัติที่หลากหลาย โดยขึ้นกับองค์ประกอบและสัดส่วนปริมาณของธาตุที่ประกอบกันขึ้นเป็นสารประกอบ ตามปกติแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นส่วนใหญ่ นั้นเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำชนิด 2 ธาตุ (Binary) ซึ่งมีสมบัติทางกายภาพเฉพาะตัว เนื่องจากตัวแปรขององค์ประกอบมีจำนวนน้อยที่สุด ทำให้ตัวแปรในการปลูกผลึกสามารถทำได้ง่าย ดังนั้นในการผลิตแผ่นผลึกฐานจึงนิยมทำจากสารประกอบ 2 ธาตุ แต่สมบัติที่จำกัดของสารประกอบชนิด 2 ธาตุที่ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในบางกรณี ฤกษ์แจสำคัญคือสารประกอบชนิด 3 ธาตุและ 4 ธาตุได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างหัวต่อเฮเทอโร (Heterojunction) โดยมีค่าคงตัวผลึกเข้าได้กับแผ่นผลึกฐาน เนื่องจากค่าแถบพลังงานหรือค่าดัชนีหักเหที่มีค่าแตกต่างกันไป อันเป็นผลทำให้มีความสะดวกในการออกแบบสร้างสิ่งประดิษฐ์และสามารถกำหนดวัสดุที่มีความเหมาะสมกับสิ่งประดิษฐ์ได้ สำหรับค่าตัวแปรต่างๆ ของสารประกอบกึ่งตัวนำตัวอย่างดังในตารางที่ 2.4 และ 2.5

ตารางที่ 2.5 ค่าแถบพลังงานของตัวอย่างสารประกอบชนิด 3 ธาตุและ 4 ธาตุ [20]

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

บทที่ 3

การออกแบบการทดลอง

สำหรับในบทนี้เป็นรายละเอียดและขั้นตอนของกระบวนการทดลองในโรงงานวิจัยนี้ เพื่อทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรหรือเงื่อนไขต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการประดิษฐ์โครงสร้างนาโนโฮลจาก $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ บนแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs (100) ด้วยวิธีครอปเปลทอพิเทกซ์ที่ใช้การปลูกผลึกอพิเทกซ์จากลำโมเลกุล โดยตัวแปรในกระบวนการประดิษฐ์ที่ได้ศึกษาในโรงงานวิจัยนี้ ได้แก่ ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกขณะขึ้นรูปหอคโลหะ ค่าช่วงเวลาการขัดจิ้งหะหลังการขึ้นรูปหอคโลหะ ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐาน และค่าเวลาในการคริสตอลไลเซชัน

3.1 การเตรียมแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น

แผ่นผลึกฐานในการทดลองนี้ใช้แผ่นผลึกเดี่ยว GaAs (100) เริ่มต้นจากการนำแผ่นผลึกฐานเริ่มมาติดลง Mo Block ด้วย Indium หลอมเหลว หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นสู่อุณหภูมิห้องปกติ และนำ Mo Block ที่แผ่นผลึกฐาน GaAs เข้าสู่ระบบ MBE และทำการ Out-gassing ที่ 400 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงภายใต้สภาวะสุญญากาศ ($<10^{-9}$ Torr) กระบวนการนี้กระทำภายใน Pre-heat chamber เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานเริ่มต้นด้วยความร้อนภายใต้สภาวะสุญญากาศ ต่อจากนั้นทำการลำเลียง Mo Block ที่ติดแผ่นผลึกฐาน GaAs ที่ผ่านกระบวนการ Out-gassing เข้าสู่ Growth Chamber สำหรับกระบวนการภายใน Growth Chamber ในลำดับต่อมาทำการขจัดออกไซด์ที่ผิวแผ่นผลึกฐานเริ่มต้น GaAs ที่อุณหภูมิ 600 °C ภายใต้บรรยากาศ As_4 จนผิวสะอาด ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จาก RHEED pattern ที่ปรากฏขึ้นเป็นแบบ $c(2 \times 4)$ จากนั้นทำการปลูกชั้น Buffer ผลึก GaAs หนา 3000 Å ที่อุณหภูมิ 580 °C ด้วยค่าอัตราการปลูกผลึก 0.6 $\mu\text{m}/\text{ชั่วโมง}$ และค่าอัตราส่วน Beam Equivalent Pressure (BEP) ของ As_4/Ga มีค่าประมาณ 30 โดยชั้น GaAs ที่ปลูกในขั้นตอนนี้เพื่อปรับคุณภาพความเรียบของผิวหน้าให้ดีขึ้น

3.2 การศึกษาตัวแปรที่ใช้ในการประดิษฐ์โครงสร้างนาโนโฮล $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$

หลังจากการปลูกผลึก GaAs ตามหัวข้อที่ 3.1 แล้วทำการลดอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานไปสู่ค่าอุณหภูมิที่ได้กำหนดไว้ โดยไม่มีลำโมเลกุล As_4 เพื่อทำการลดปริมาณ As_4 ที่ผิวของแผ่นผลึกฐานให้มีค่าต่ำที่สุด (Minimize) จากนั้นรอจนค่าความดันภายใน Growth Chamber มีค่าดันบรรยากาศต่ำ 10^{-9} Torr เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง InGa และ As ในขณะที่ขึ้นรูปหอคโลหะ InGa สำหรับเงื่อนไขในการทดลองมีดังนี้

3.2.1 การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหอคดโลหะ

สำหรับในการทดลองนี้ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหอคดโลหะมีค่าดังนี้ 270, 300, 330, และ 360°C ตามลำดับ จากนั้นทำการขึ้นรูปหอคดโลหะของ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}$ โดยมีค่าความหนา 20 ML ด้วยอัตรา 1 ML/วินาที (ปริมาณของ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}$ และค่าอัตราการพ่นนี้เทียบเท่ากับปริมาณที่ใช้ในการปลูกผลึก $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ บน GaAs ในอัตราการปลูกผลึก 1 ML/วินาที) จากนั้นลดอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานลงไปที่ 210°C และทำการพ่นไอ As_4 ลงบนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน เป็นเวลา 5 นาที เพื่อทำการเปลี่ยนหอคดโลหะให้เป็นสารประกอบ III-V สุดท้ายทำการลดอุณหภูมิแผ่นผลึกลงและนำออกจากระบบ MBE เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

3.2.2 การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของเวลาขัดจังหวะหลังการขึ้นรูปหอคดโลหะ

สำหรับในการทดลองนี้ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหอคดโลหะในการทดลองนี้มีค่า 300 °C ทำการขึ้นรูปหอคดโลหะของ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}$ โดยมีค่าความหนา 20 ML ด้วยอัตรา 1 ML/วินาที จากนั้นทำการหยุดหลังจากการขึ้นรูปของหอคดโลหะเป็นเวลา 0, 2, 5, และ 7 นาที ต่อจากนั้นทำการลดอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานลงไปที่ 210°C และทำการพ่น As_4 ลงบนแผ่นผลึกฐานเป็นเวลา 5 นาที เพื่อทำการเปลี่ยนหอคดโลหะให้เป็นสารประกอบ III-V สุดท้ายทำการลดอุณหภูมิแผ่นผลึกลงและนำออกจากระบบ MBE เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

3.2.3 การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าอุณหภูมิในการทำคริสตอลไลเซชัน

สำหรับในการทดลองนี้ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหอคดโลหะในการทดลองนี้มีค่า 360°C ทำการขึ้นรูปหอคดโลหะของ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}$ โดยมีค่าความหนา 20 ML ด้วยอัตรา 1 ML/วินาที จากนั้นทำการลดอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานลงไปที่กำหนดดังนี้ 150, 180, 210, และ 240 °C และทำการพ่น As_4 ลงบนแผ่นผลึกฐานเป็นเวลา 5 นาที เพื่อทำการเปลี่ยนหอคดโลหะให้เป็นสารประกอบ III-V สุดท้ายทำการลดอุณหภูมิแผ่นผลึกลงและนำออกจากระบบ MBE เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

3.2.4 การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการทำคริสตอลไลเซชัน

สำหรับในการทดลองนี้ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหอคดโลหะในการทดลองนี้มีค่า 360 °C ทำการขึ้นรูปหอคดโลหะของ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}$ โดยมีค่าความหนา 20 ML ด้วยอัตรา 1 ML/วินาที จากนั้นลดอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานลงไปที่ 210 °C และทำการพ่น As_4 ลงบนแผ่นผลึกฐาน โดยระยะเวลาที่กำหนดมีดังนี้

1, 2, 3, และ 5 นาที เพื่อทำการเปลี่ยนชนิดโลหะให้เป็นสารประกอบ III-V สุดท้ายทำการลดอุณหภูมิแผ่นผลึกลงและนำออกจากระบบ MBE เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

สำหรับค่าความดันไอ BEP ของ As_4 ในกระบวนการเปลี่ยนรูปชนิดโลหะธาตุหมู่ III ให้เป็นสารประกอบกลุ่ม III-V มีค่าความดันไอประมาณ 8×10^{-9} Torr

3.3 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

ตัวอย่างที่ได้จากระบวนการประดิษฐ์นำมาวิเคราะห์ลักษณะผิวของตัวอย่างที่ได้ด้วย Atomic Force Microscope (AFM) ในการทำงานใน Tapping mode โดยผลที่ได้นี้แสดงไว้ในบทที่ 4

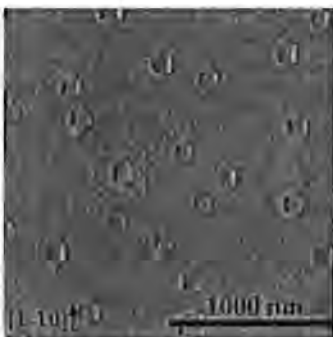
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

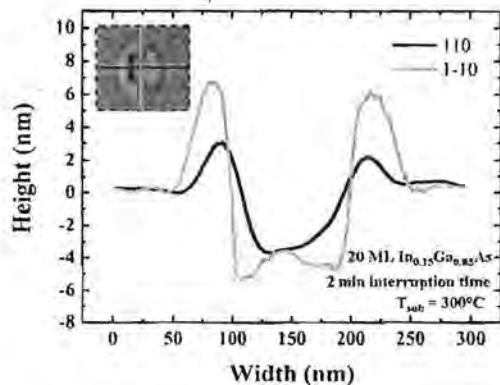
สำหรับในบทนี้นำเสนอผลการทดลองที่ได้จากการทดลองที่ได้ดำเนินการในโครงการวิจัยนี้ ซึ่งผลการทดลองได้แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของตัวแปรหรือเงื่อนไขต่างๆ ที่มีต่อผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของโครงสร้างนาโนไฮไลต์ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ ที่ประดิษฐ์ด้วยเทคนิคการปลูกผลึกอิมพิแทกซ์จากลำโมเลกุล (MBE) ตัวแปรในโครงการนี้ได้แก่ ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะ เวลาการขัดจังหวะหลังการขึ้นรูปหยดโลหะ ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานในการทำคริสตอลไลเซชัน และค่าเวลาในการทำคริสตอลไลเซชัน ซึ่งการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ได้ในโครงการนี้ใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมหรือ AFM

4.1 การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหยดโลหะ

ภาพตัวอย่างที่ได้จาก AFM ดังในรูปที่ 4.1 (ก) ซึ่งเป็นภาพผิวหน้าของนาโนไฮไลต์ของ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ ที่ได้จากตัวอย่างที่ขึ้นรูปหยดโลหะที่ 300°C และใช้เวลาขัดจังหวะหรือช่วงเวลาหลังการขึ้นรูปหยดโลหะก่อนการลดอุณหภูมิลงค่าสำหรับการคริสตอลไลเซชันเป็นเวลา 2 นาที ก่อนทำการลดอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานไปสู่ค่าอุณหภูมิ 210°C เพื่อทำการคริสตอลไลเซชันด้วยการพ่นไอของ As_4 โดยภาคตัดขวางของตัวอย่างนี้ดังในรูปที่ 4.1 (ข) ค่าความกว้าง (s) ความลึก (d) และความสูงสันขอบวงแหวน (h) ของโครงสร้างนาโนไฮไลต์จากรูปดังกล่าวมีค่าความกว้าง $s = 123 \text{ nm}$ ในแนว $[110]$ และมีค่าความกว้าง $s = 133.5 \text{ nm}$ ในแนว $[1\bar{1}0]$ ค่าความลึก $d = 3.7 \text{ nm}$ และมีค่าความหนาแน่น $6.2 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ สำหรับรูปร่างของนาโนไฮไลต์มีรูปร่างคล้ายตัว



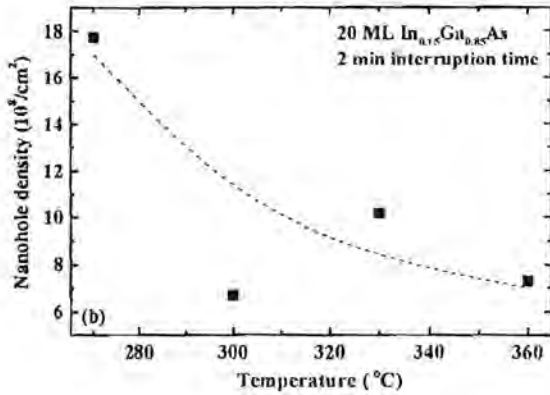
(ก)



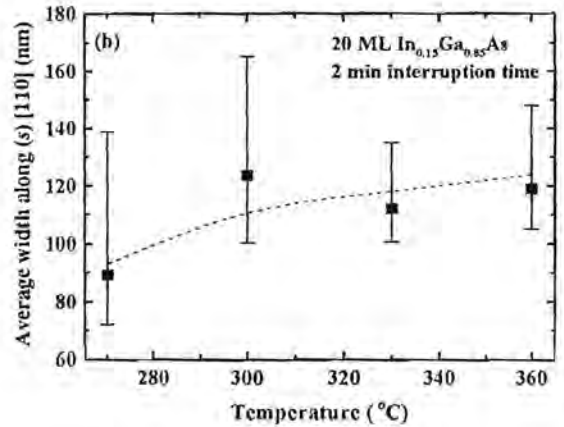
(ข)

รูปที่ 4.1 (ก) ภาพ AFM ของนาโนไฮไลต์จาก $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ บน GaAs

(ข) ภาพตัดขวางของตัวอย่างในกรอบเส้นประจากรูป (ก)



(ก)



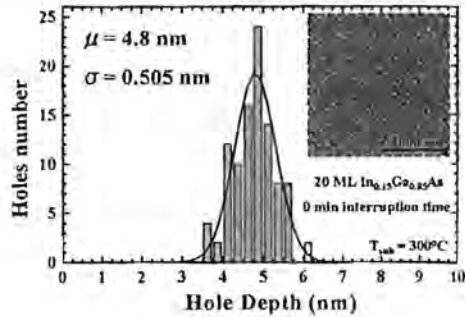
(ข)

รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของนาโนโฮล (ก) และค่าเฉลี่ยความกว้างระหว่างสันขอบวงแหวน (ข) ในฟังก์ชันของค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหอคดโลหะ

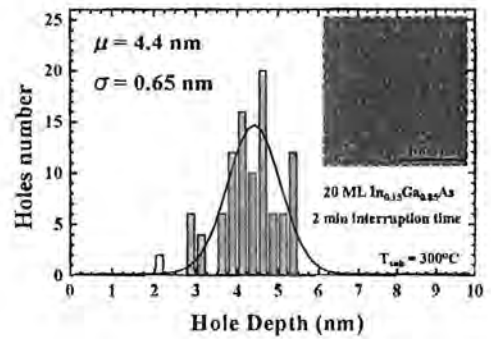
อักษร U (U-shape) ในแนว [110] และมีรูปร่างคล้ายตัวอักษร W (W-shape) ในแนว $[1\bar{1}0]$ โดยความแตกต่างของรูปร่างในแนว [110] และ $[1\bar{1}0]$ นี้เกิดจากคุณสมบัติแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic) ของผลึกที่เกิดขึ้นในกระบวนการคริสตอลไลเซชัน และค่าเฉลี่ยความสูงของสันขอบวงแหวน $h = 1.9 \text{ nm}$ ในแนว $[1\bar{1}0]$ และ $h = 5.7 \text{ nm}$ ในแนว [110] จากมุมมองด้านบน (Top-view) โครงสร้างนาโนโฮลมีรูปลักษณะเป็นหลุมรูปร่างคล้ายสี่เหลี่ยมที่มีวงแหวนที่ล้อมรอบ (Ring-and-hole) สำหรับความลึกของนาโนโฮลในแนว [110] และ $[1\bar{1}0]$ มีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากคุณสมบัติแอนไอโซทรอปิกของผลึกที่เกิดขึ้นในขณะทำการคริสตอลไลเซชัน สำหรับอิทธิพลของค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกขณะขึ้นรูปหอคดโลหะที่มีต่อโครงสร้างนาโนโฮล เมื่อพิจารณาค่าขนาดของโครงสร้าง ได้แก่ ค่าความกว้าง (s) ในแนว [110] ซึ่งมีค่าความกว้างเฉลี่ย 89 nm สำหรับตัวอย่างที่ใช้อุณหภูมิ 270 °C, 124 nm สำหรับตัวอย่างที่ใช้อุณหภูมิ 300°C, 112 nm สำหรับตัวอย่างที่มีค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐาน 330°C, และ 119 nm จากตัวอย่างที่มีค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐาน 360°C ตามลำดับ สำหรับค่าความลึกเฉลี่ยที่ได้นี้มีค่าน้อยกว่า 20 Monolayer ของ ($\sim 5.6 \text{ nm}$) $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ สำหรับค่าความหนาแน่นของนาโนโฮลและค่าเฉลี่ยความกว้างระหว่างสันขอบของวงแหวนดังในรูปที่ 4.2 โดยค่าความหนาแน่นนาโนโฮลมีค่าลดลง แต่ค่าเฉลี่ยความกว้างระหว่างสันขอบของวงแหวนมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหอคดโลหะมีค่าเพิ่มขึ้น

4.2 การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะขึ้นรูปหอคดโลหะ

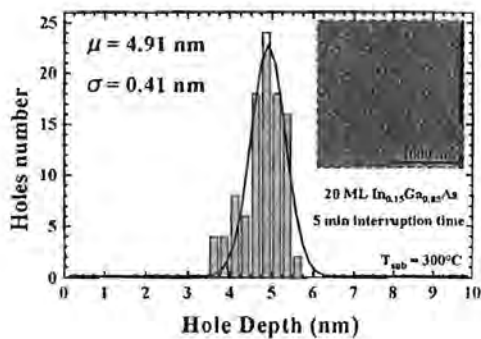
สำหรับอิทธิพลช่วงเวลาที่จัดจังหวะหลังการขึ้นรูปหอคดโลหะสามารถแสดงด้วยลักษณะการกระจายประชากรของตัวอย่างจากค่าเฉลี่ยความลึกจากผลของช่วงเวลาที่จัดจังหวะดังในรูปที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยความลึกของ



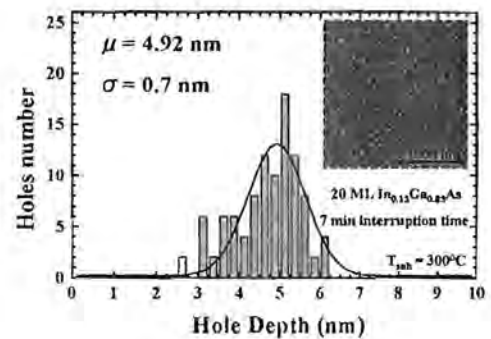
(ก)



(ข)



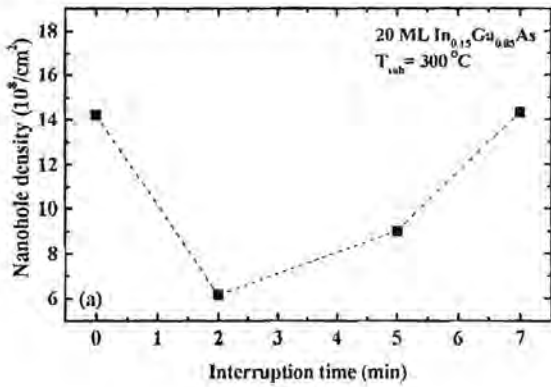
(ค)



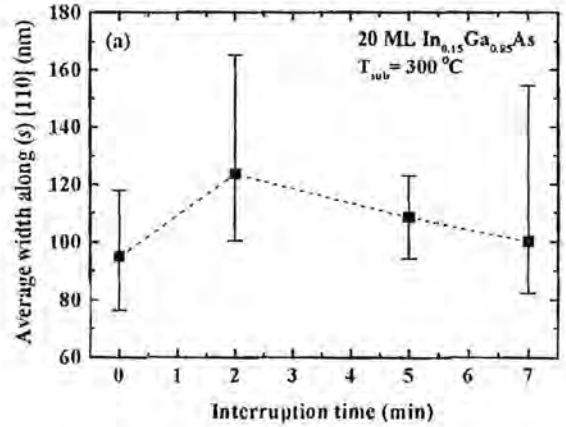
(ง)

รูปที่ 4.3 ฮิสโตแกรมการกระจายค่าความลึกของนาโนโฮลจากตัวอย่างที่มีค่าช่วงเวลาขัดจังหวะหลังการขึ้นรูปหอคดโลหะ (ก) 0 นาที (ข) 2 นาที (ค) 5 นาที และ (ง) 7 นาที โดยมีการขึ้นรูปหอคดโลหะที่อุณหภูมิ 300°C

นาโนโฮลมีดังนี้ จากตัวอย่างที่ไม่มีช่วงเวลาขัดจังหวะหลังการขึ้นรูปหอคดโลหะ (0 นาที) มีค่าเฉลี่ยความลึก 4.8 nm ตัวอย่างที่มีช่วงเวลาขัดจังหวะหลังการขึ้นรูปหอคดโลหะ 2 นาทีมีค่าเฉลี่ยความลึก 4.4 nm ตัวอย่างที่มีช่วงเวลาขัดจังหวะหลังการขึ้นรูปหอคดโลหะ 5 นาทีมีค่าเฉลี่ยความลึก 4.9 nm และตัวอย่างที่มีช่วงเวลาขัดจังหวะหลังการขึ้นรูปหอคดโลหะ 7 นาทีมีค่าเฉลี่ยความลึก 4.9 nm สำหรับค่าความกว้าง (s) ในแนว [110] จากตัวอย่างที่มีช่วงเวลาหลังการขึ้นรูปหอคดโลหะ 0 นาที มีค่ากว้าง 95 nm จากตัวอย่างที่มีช่วงเวลาหลังการขึ้นรูปหอคดโลหะ 2 นาทีมีค่าเฉลี่ยความกว้าง 124 nm จากตัวอย่างที่มีช่วงเวลาขัดจังหวะหลังการขึ้นรูปหอคดโลหะ 5 นาทีมีค่ากว้าง 108 nm และจากตัวอย่างที่มีช่วงเวลาขัดจังหวะหลังการขึ้นรูปหอคดโลหะ 7 นาทีมีค่าเฉลี่ยความกว้าง 100 nm เมื่อพิจารณาจากฮิสโตแกรมการกระจายของประชากรตัวอย่างในเทอมของความลึกจากรูปที่ 4.3 นั้น ค่าความสม่ำเสมอจะมีค่าที่ดีที่สุดที่ช่วงเวลาขัดจังหวะหลังการขึ้นรูปหอคดโลหะ 7 นาที เนื่องจากการเคลื่อนที่ของหอคดโลหะและการรวมตัวของหอคดโลหะมีผลทำให้การกัดเซาะที่ทำให้เกิดนาโนโฮลมีการกระจายความลึกที่หลากหลายมากขึ้น อีกทั้งหอคดโลหะที่เคลื่อนที่ไปนั้นได้มีการดูดกลืน As จากผิวของแผ่นผลึกฐาน ทำให้ขีดความสามารถในการกัดเซาะลดลงอีกด้วย ดังนั้นเราจึงเห็นประชากร



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของนาโนโฮล (ก) และค่าเฉลี่ยความกว้างในแนว [110] (ข) ในฟังก์ชันของค่าช่วงเวลาขัดจังหวะหลังการขึ้นรูปหอคดโลหะ

ของตัวอย่างที่มีค่าความลึกน้อยปรากฏให้เห็นในตัวอย่างที่ช่วงเวลาขัดจังหวะหลังการขึ้นรูปหอคดโลหะ 2 และ 10 นาที ซึ่งเป็นโฮลที่ได้จากการกัดขึ้นใหม่จากหอคดโลหะหลอมเหลวที่เคลื่อนย้ายไปยังตำแหน่งใหม่

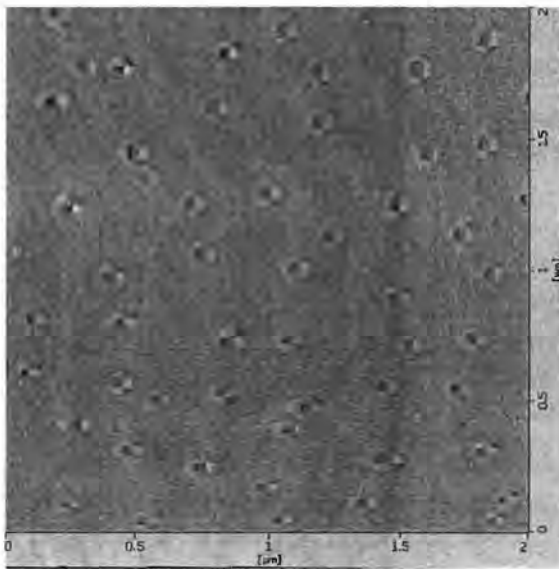
สำหรับค่าความหนาแน่นนาโนโฮลและค่าเฉลี่ยความกว้างในฟังก์ชันของค่าช่วงเวลาขัดจังหวะหลังการขึ้นรูปหอคดโลหะดังในรูปที่ 4 โดยผลที่ได้จากการทดลองศึกษาอิทธิพลของค่าช่วงเวลาขัดจังหวะหลังการขึ้นรูปหอคดโลหะดังในรูปที่ 4 (ก) นั้นสามารถอธิบายผลการทดลองที่ได้ด้วยแบบจำลองแบบง่ายดังนี้ ในสถานะเริ่มแรกที่ไม่ได้มี As_4 นั้น หลังจากการขึ้นรูปหอคดโลหะของ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}$ หอคดโลหะนั้นมีสภาพเป็นของเหลว เพื่อให้ระบบอยู่ในสถานะสมดุล ดังนั้นระบบจำเป็นต้องปรับตัวเองให้มีพลังงานต่ำที่สุด หอคดโลหะที่ผิวจะดูดซับ As จากแผ่นผลึกฐานด้วยกระบวนการแพร่ (Diffusion) และการกักเซาะ (Soaking) โดยทำให้หอคดโลหะเปลี่ยนรูปเป็นสารละลาย In-Ga-As เมื่อเวลาผ่านไประยะเวลาหนึ่งหอคดโลหะจำนวนหนึ่งมีการเคลื่อนที่และรวมตัวกันกลายเป็นหอคดโลหะที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อทำให้พลังงานระบบมีค่าลดลง ในปรากฏการณ์นี้ทำให้ค่าความหนาแน่นของจำนวนหอคดโลหะมีค่าลดลง ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าในช่วงเวลา 0-2 นาทีนั้นหลังจากทำการพ่น As_4 ในทำการคริสตอลไลเซชัน ค่าความหนาแน่นของนาโนโฮลที่ได้มีค่าลดลงเมื่อช่วงเวลาขัดจังหวะหลังการขึ้นรูปหอคดโลหะมีระยะเวลานานขึ้น เนื่องจากจำนวนของนาโนโฮลที่ได้สอดคล้องกับจำนวนของหอคดโลหะ ในกรณีนี้นาโนโฮลที่เกิดขึ้นจะมีค่าความหนาแน่นเท่ากับค่าความหนาแน่นของหอคดโลหะ และช่วงเวลาขัดจังหวะหลังการขึ้นรูปหอคดโลหะในกรณีไม่นานเพียงพอที่ทำให้เกิดนาโนโฮลด้วยกระบวนการกัดขึ้นรูป (Etching) ที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน หอคดโลหะจะเคลื่อนที่และรวมตัวกันทำให้จำนวนค่าความหนาแน่นที่ได้มีค่าลดลง แต่เมื่อช่วงเวลาขัดจังหวะหลังการขึ้นรูปหอคดโลหะนานขึ้น จำนวนของนาโนโฮลมีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น อันเกิดขึ้นเนื่องจากเวลาที่นานขึ้นทำให้เกิดนาโนโฮลขึ้นจากกระบวนการกัดขึ้นรูป และกระบวนการเปลี่ยนรูปนาโนโฮลในกระบวนการคริส

ดอลไลเซชันที่ทำให้ของหยดโลหะกลายเป็นสารประกอบกลุ่ม III-V อันเป็นผลให้ค่าความหนาแน่นของนาโนโซลที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น จากสาเหตุที่ผิวรอยต่อระหว่างแผ่นผลึกฐาน และหยดโลหะมีสภาพเป็นของเหลว In-Ga-rich ดังนั้นบริเวณรอยต่อนี้แผ่นผลึกฐาน GaAs ถูกละลายด้วยโลหะหลอมเหลว In-Ga ทำให้หยดโลหะเปลี่ยนสภาพเป็นสารละลายเป็น In-Ga-As เนื่องจากอะตอม As จากแผ่นผลึกฐานแพร่จากแผ่นผลึกฐานเข้าสู่หยดโลหะ In-Ga และเปลี่ยน In-Ga กลายเป็น In-Ga-As ซึ่งกระบวนการดังกล่าวนี้ทำให้หยดโลหะบางส่วนกลายเป็นผลึก InGaAs โดยเฉพาะที่บริเวณขอบด้านข้างของหยดโลหะกลายเป็นผลึกก่อน [18] อันทำให้เกิดเป็นผลึก InGaAs รูปวงแหวนขึ้นที่ขอบด้านข้างภายในหยดโลหะ เมื่อเวลาผ่านไปนานสมควร สารละลายของโลหะหลอมเหลว In-Ga-As ทำให้เกิดกักขังจนกลายเป็นโซลหรือหลุมได้สารละลายหยดโลหะ กระบวนการเกิดโซลและวงแหวนที่ล้อมหลุมเกิดขึ้นไปพร้อมกัน แต่เนื่องจากปริมาณของ As ที่ได้จากกระบวนการกักมีค่าไม่เพียงพอที่จะทำให้หยดโลหะทั้งหมดกลายเป็นผลึก In-Ga-As ดังนั้นหยดโลหะบางส่วนที่ยังเป็นของเหลวสามารถเคลื่อนที่ได้ จึงเกิดการเคลื่อนที่และรวมตัวกับหยดโลหะอื่น ก่อนตัวขึ้นใหม่กลายเป็นหยดโลหะหยดใหม่ ซึ่งกระบวนการนี้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้ผลลัพท์ที่ได้จำนวนของนาโนโซลมีค่าความหนาแน่นมากขึ้นจากกระบวนการกักเซาะของหยดโลหะ และการเคลื่อนย้ายของหยดโลหะ และเมื่อทำการพ่น As_4 เพื่อทำการ Crystallization กระบวนการต่างๆ จะสิ้นสุดลง ด้วยเงื่อนไขค่าความดันไอของ As_4 ที่มีค่าต่ำทำให้หยดโลหะเปลี่ยนรูปเป็นนาโนโซล ดังนั้นค่าความหนาแน่นของนาโนโซลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าช่วงเวลาหลังการขึ้นรูปโลหะมีค่ามากขึ้น เมื่อทำการพิจารณาจากค่าเฉลี่ยขนาดของนาโนโซลในช่วงเวลา 0-2 นาที่ขนาดของนาโนโซลที่ขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งสอดคล้องตามสมมติฐานในแบบจำลองของการรวมตัวของหยดโลหะและค่าความหนาแน่นลดต่ำลง แต่เมื่อเวลานานกว่า 2 นาที่ค่าความหนาแน่นของนาโนโซลมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากกลไกการเกิดนาโนโซลเกิดจากกระบวนการกักของหยดโลหะและนาโนโซลที่เกิดขึ้นในกระบวนการคริสตอลไลเซชันและค่าเฉลี่ยของขนาดมีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณของหยดโลหะที่สูญเสียไปในกระบวนการกลายเป็นผลึก InGaAs ในกระบวนการกักขึ้นรูปก่อนกระบวนการคริสตอลไลเซชัน ข้อสังเกตจากผลการทดลองนี้ค่าขนาดของนาโนโซลจะมีจำนวนหนึ่งที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจากลักษณะการกระจายในรูปที่ 4.3 เวลานานหลังช่วงการขึ้นรูปหยดโลหะมีระยะเวลานานขึ้น แต่จำนวนของนาโนโซลขนาดใหญ่มีจำนวนลดลง เมื่อเวลานานหลังช่วงการขึ้นรูปหยดโลหะมีระยะเวลานานขึ้น ซึ่งผลที่ได้ในการทดลองนี้สอดคล้องกันกับกรณีของ Ga บนแผ่นผลึกฐาน GaAs (100) และกลไกที่เกิดขึ้นได้อธิบายไว้เอกสารอ้างอิง [21-22]

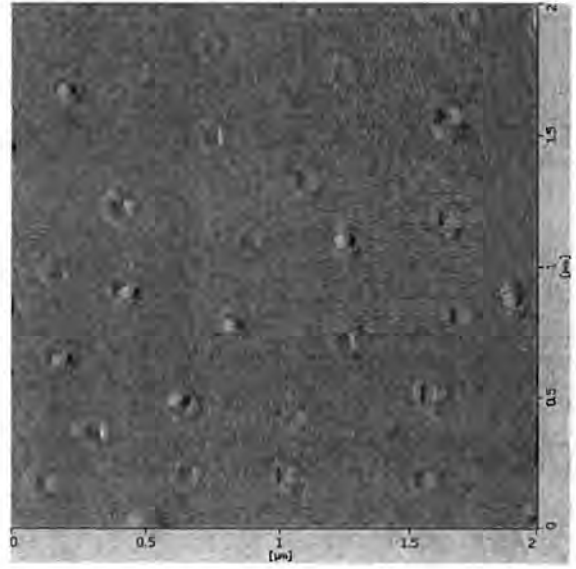
4.3 การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าอุณหภูมิในการคริสตอลไลเซชัน

สำหรับการทดลองในการศึกษาอิทธิพลของค่าอุณหภูมิในการคริสตอลไลเซชันนั้น ปรากฏว่าตัวอย่างที่ได้จากการทำคริสตอลไลเซชันที่อุณหภูมิ 170 และ 200°C นั้น ตัวอย่างที่ได้เป็นรูปวงแหวนนาโนที่ล้อมรอบนาโนโซล แต่เมื่อทำคริสตอลไลเซชันที่อุณหภูมิ 230 และ 260°C ตัวอย่างที่ได้มีนั้นมีโครงสร้าง

ขนาดนาโนเมตร 2 ลักษณะเกิดขึ้นคือ รูปร่างวงแหวนนาโนที่ล้อมรอบนาโนโฮล และรูปร่างวงแหวนล้อมรอบควอนตัมดอต ดังในรูปที่ 4.5 และภาคตัดขวางดังในรูปที่ 4.6 ซึ่งกลไกการเปลี่ยนรูปจากวงแหวนที่ล้อมรอบนาโนโฮลนั้นเกิดขึ้นบางส่วนเฉพาะเงื่อนไขการคริสตอลไลเซชันที่อุณหภูมิตั้งแต่ 230°C เป็นต้นไป โดยการคริสตอลไลเซชันที่อุณหภูมิสูงขึ้นมีผลทำให้ความสามารถในการแพร่ของ As ในหยดโลหะหลอมละลายเกิดได้ดีขึ้นกว่าในกรณีที่อุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความหนาแน่นของวงแหวนล้อมรอบนาโนโฮลจะมีค่าลดลง และค่าความหนาแน่นวงแหวนล้อมรอบควอนตัมดอตมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ผลรวมของค่าความหนาแน่นกลับมีค่าลดลง เมื่อค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานในการทำคริสตอลไลเซชันมีค่าเพิ่มขึ้น โดยปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้จากการเคลื่อนที่ของหยดโลหะ และที่รวมกัน



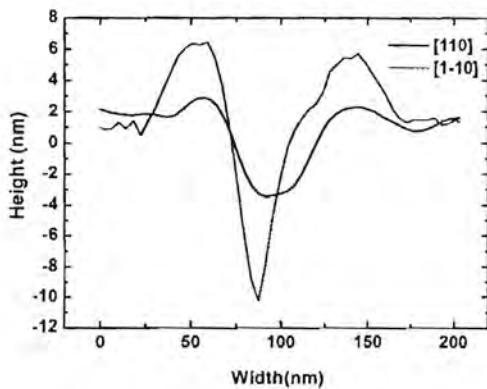
(ก)



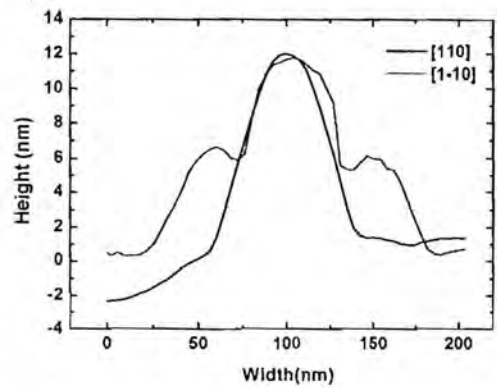
(ข)

รูปที่ 5 ภาพ AFM ของนาโนโฮลจาก $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ บน GaAs

จากตัวอย่างที่ทำการคริสตอลไลเซชันที่อุณหภูมิ (ก) 200°C (ข) 260°C



(ก)



(ข)

รูปที่ 6 ภาพภาคตัดขวางผ่าน AFM ของนาโนโฮลจาก $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ บน GaAs

จากตัวอย่างที่ทำการคริสตอลไลเซชันที่อุณหภูมิ (ก) 200°C (ข) 260°C

ตารางที่ 4.1 สรุปผลการทดลองการศึกษาอิทธิพลของค่าอุณหภูมิในการคริสตอลไลเซชัน
ในเทอมของตัวแปรขนาดจากนาโนโพลที่ได้

ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐาน ในขณะทำ การคริสตอลไลเซชัน (°C)	ค่าความหนาแน่น (cm ⁻²)	ค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลาง ที่ฐานรอบนอก (nm) ในแนว [110]	ค่าความสูง ของสันขอบ (nm)
170	1.6×10 ⁹	134.8	3.9
200	1.2 ×10 ⁹	133.6	3.3
230	9.4 ×10 ⁸ /1.1 ×10 ⁸	137.8/133.4	4.1/7.3
260	7.2 ×10 ⁸ /1.4 ×10 ⁸	144.6/150.0	3.5/12.6

หมายเหตุ ที่อุณหภูมิ 230 และ 270 °C ค่าความหนาแน่น ค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลางและค่าความสูงของ
สันเป็นค่าของ วงแหวนล้อมรอบนาโนโพล/วงแหวนล้อมรอบควอนตัมดอต

กัน ในกรณีอุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นค่ามิติต่างๆ จึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดหอคดโลหะที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจาก
การรวมตัวของหอคดโลหะ

4.4 การทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าเวลาในการคริสตอลไลเซชัน

สำหรับผลการทดลองในการศึกษาอิทธิพลของค่าเวลาในการคริสตอลไลเซชันนั้นผลที่ได้จาก
โครงสร้างนาโนโพลนั้นไม่ชัดเจนทางกายภาพ ซึ่งค่าขนาดของส่วนต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกันหรือแตกต่างกัน
เล็กน้อย ซึ่งสันนิฐานได้จากค่าตัวแปรในการประดิษฐ์ในการทดลองนี้คลาดเคลื่อนไป ทำให้ผลที่ได้
นั้นความแตกต่างกัน ดังผลสรุปในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สรุปผลการทดลองการศึกษาอิทธิพลของค่าเวลาในการคริสตอลไลเซชัน
ในเทอมของตัวแปรขนาดจากนาโนโพลที่ได้

ค่าเวลาการคริสตอลไลเซชัน (นาที)	ค่าความหนาแน่น (cm ⁻²)	ค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลาง ที่ฐานรอบนอก (nm)	ค่าความสูง ของสันขอบ (nm)
2.5	1.0×10 ⁹	147.8	4.3
5	1.2 ×10 ⁹	133.6	3.3
7.5	9.3 ×10 ⁸	138.3	4.1
10	1.2 ×10 ⁹	135	4.2

บทที่ 5

ตัวอย่างการประยุกต์

สำหรับในบทนี้เป็นการสาธิตการนำโครงสร้างนาโนโฮลไปประยุกต์ใช้งานในกระบวนการประดิษฐ์ควอนตัมโมเลกุลที่มีเรียงตัวเกาะกันทางด้านข้าง (Lateral Quantum Molecule) โดยหน้าที่ของโครงสร้างนาโนโฮลในกระบวนการประดิษฐ์นั้นเป็นเทมเพลต (Template) เพื่อรองรับควอนตัมดอทให้เกาะกลุ่มกันเป็นควอนตัมดอทโมเลกุล สันามความเครียดที่เกิดขึ้นในนาโนโฮลจะเหนี่ยวนำให้ควอนตัมดอทที่ปลูกขึ้นใหม่นี้เกาะตัวบนเทมเพลตดังที่จะได้กล่าวถึงต่อไป

5.1 วิธีการประดิษฐ์

ในการทดลองนี้เริ่มต้นจากแผ่นผลึกฐาน GaAs (100) ชนิดกึ่งฉนวน โดยมีการเตรียมแผ่นผลึกตามกระบวนการที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.1 ซึ่งขั้นตอนกระบวนการประดิษฐ์ควอนตัมดอทโมเลกุลแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

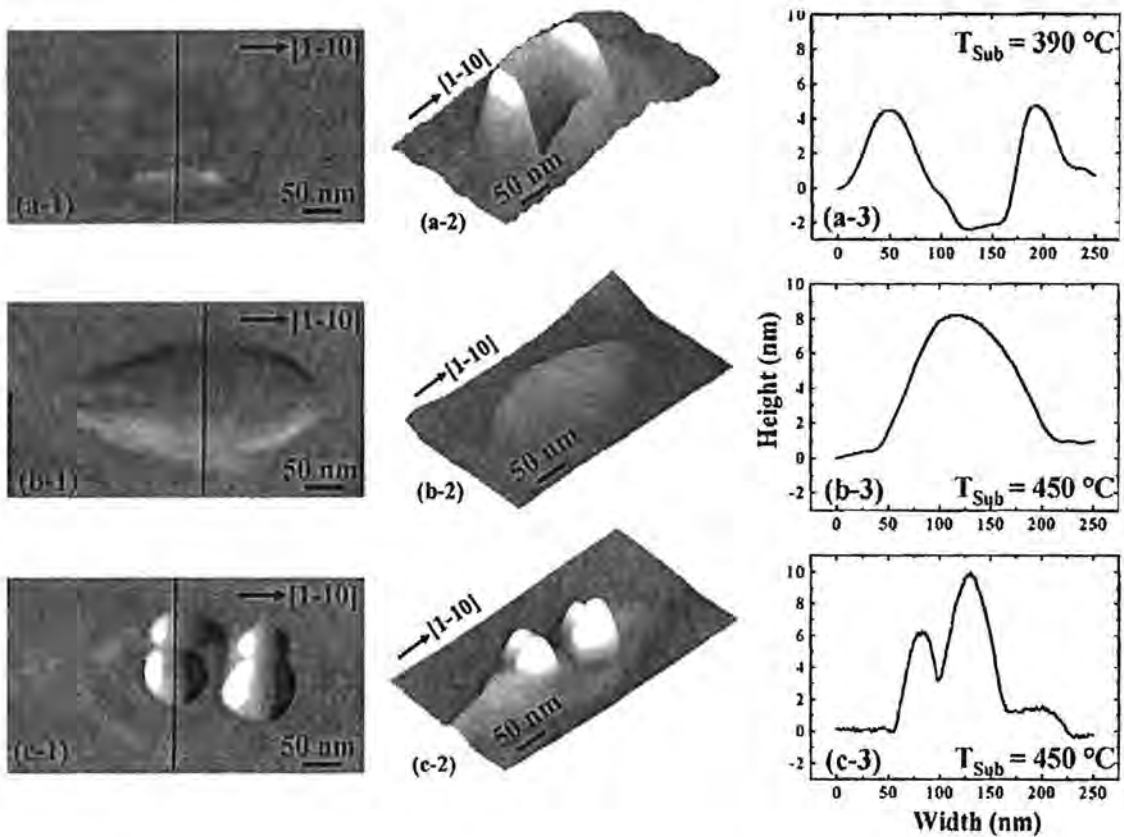
(ก) การประดิษฐ์นาโนโฮล : ทำการปลูกผลึกชั้น Buffer ของ GaAs หนา 300 nm ที่อุณหภูมิแผ่นผลึกฐาน 600°C ด้วยอัตราการปลูกผลึก 0.5 ML/วินาที โดยมีค่าอัตราส่วน BEP As_4/Ga 30 เท่า จากนั้นทำการลดอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานลงที่ 390°C โดยไม่มีลำโมเลกุลของ As_4 และรอจนกระทั่งค่าความดันบรรยากาศมีค่าต่ำกว่า 10^{-9} Torr ทำการขึ้นรูปหยดโลหะ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}$ ในปริมาณ 20 ML (ปริมาณนี้เทียบเท่ากับปริมาณของ In และ Ga ที่ใช้ในการปลูกผลึก $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ หนา 20 ML) ด้วยอัตราการพ่น 1 ML/วินาที จากนั้นลดอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานลงมาที่ 390°C และทำการคริสตอลไลเซชันด้วยการพ่นด้วยไอของ As_4 ที่มีค่าความดันไอ 8×10^{-6} Torr เพื่อเปลี่ยนรูปหยดโลหะ InGa ให้เป็น InGaAs

(ข) การประดิษฐ์ควอนตัมดอทโมเลกุล : จากนั้นทำการเพิ่มค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานไปที่ 450°C และทำการปลูกผลึกควอนตัมดอท InAs ในปริมาณ 1.7 ML ด้วยค่าอัตราการปลูกผลึก 0.05 ML/วินาที

สำหรับการวิเคราะห์กระบวนการประดิษฐ์ควอนตัมดอทโมเลกุลในที่นี่ จะทำตรวจสอบตัวอย่างนาโนโฮลก่อนการปลูกควอนตัมดอทที่อุณหภูมิปลูกควอนตัมดอท และควอนตัมดอทโมเลกุลด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมหรือ AFM

5.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์

สำหรับตัวอย่างที่ได้จากการสาธิตนี้ได้เทมเพลตของนาโนโฮลมีค่าความหนาแน่น $4.8 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ และภาพ AFM และภาพภาคตัดขวางดังในรูปที่ 5.1 (ก) โดยค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลางที่ฐานรอบนอก 230 nm



รูปที่ 5.1 ภาพ AFM แบบ 2 มิติ 3 มิติ และภาพภาคตัดขวางของ (ก) นาโนโซล (ข) นาโนโซลที่เปลี่ยนรูปไปหลังการเพิ่มอุณหภูมิ และ (ค) ควอนตัมดอตโมเลกุลชนิด 4 คอต

ค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลางรอบใน 82 nm และค่าเฉลี่ยความสูงของวงแหวน 3.5 nm ในแนว [110] และเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิแผ่นผลึกขึ้นไปที่ 450°C ตัวอย่างนาโนโซลเกิดการเปลี่ยนรูปมีลักษณะคล้ายเนิน (Mound) ดังในรูปที่ 5.1 (ข) โดยมีค่าเฉลี่ยความยาวของฐาน 180 nm ในแนว [110] และมีค่าเฉลี่ยความยาวของฐาน 270 nm $[1\bar{1}0]$ และค่าเฉลี่ยความสูงของเนิน 7.7 nm สาเหตุค่าเฉลี่ยความยาวของฐานแตกต่างกันในแต่ละแนวนั้น อันเนื่องจากคุณสมบัติแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic) ของผลึก และตัวอย่างควอนตัมดอตโมเลกุลแบบ 4 คอตดังในรูปที่ 5.1 (ค) ซึ่งขนาดของควอนตัมดอตที่ได้มีขนาดแตกต่างกัน เนื่องจากความสม่ำเสมอของสนามความเครียดของเนินที่ได้จากนาโนโซลมีความไม่สม่ำเสมอในแนว [110] และ $[1\bar{1}0]$ จึงทำให้ควอนตัมดอตที่ได้มีขนาดแตกต่างกัน

สำหรับตัวอย่างควอนตัมดอตโมเลกุลที่ได้จากตัวอย่างนี้มีจำนวนควอนตัมดอตในควอนตัมดอตโมเลกุลที่ได้มีจำนวน 2, 3, และ 4 คอต ดังในรูปที่ 5.2 สาเหตุเนื่องจากพื้นที่และสนามความเครียดของเนินที่ได้จากการเปลี่ยนรูปของนาโนโซลในกรณีมีความไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ค่าอัตราการปลูกผลึกของควอนตัมดอตที่ใช้ในกรณีมีค่าสูงอีกด้วย จึงทำให้ขนาดของควอนตัมที่ได้มีไม่สม่ำเสมอเกิดขึ้นในตัวอย่างที่ได้ในการสาธิตนี้



(ก)



(ข)

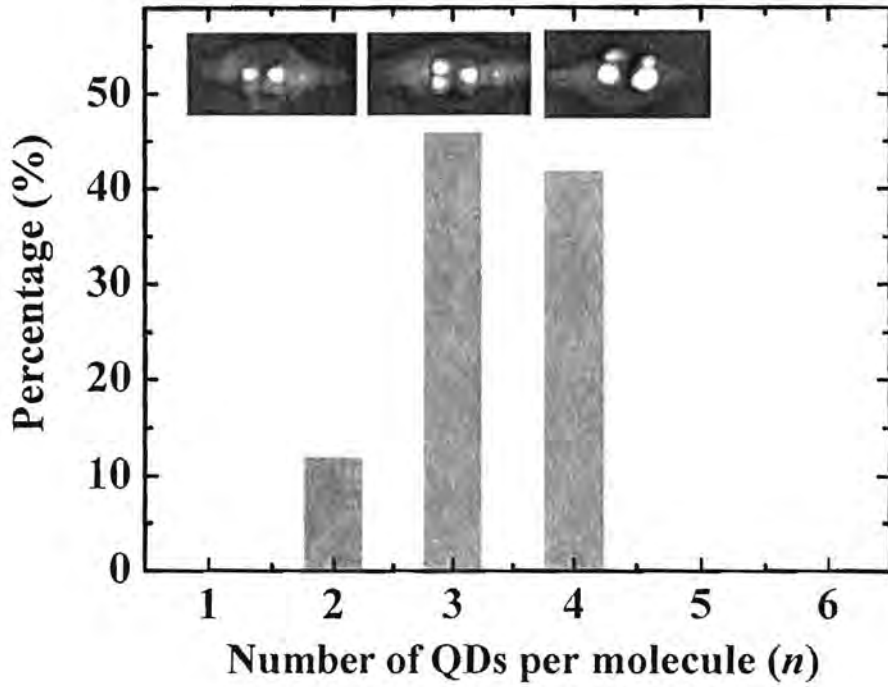


(ค)

รูปที่ 5.2 ภาพ AFM แบบ 3 มิติของควอนตัมดอทโมเลกุล ชนิด (ก) 2 ดอท (ข) 3 ดอท และ (ค) 4 ดอท

สำหรับความสม่ำเสมอของจำนวนควอนตัมดอทในควอนตัมดอทที่ได้จากการสาธิตมีลักษณะการกระจายดังในรูปที่ 5.3 โดยจำนวนประชากรของควอนตัมดอทโมเลกุลชนิด 3 ดอทมีมากที่สุดคือ 46% สำหรับควอนตัมดอทโมเลกุลชนิด 4 ดอทมีจำนวนประชากร 42 % และควอนตัมดอทโมเลกุลชนิด 2 ดอทมีจำนวนประชากร 12% สาเหตุที่ทำให้ควอนตัมดอทโมเลกุลมีจำนวนควอนตัมดอทแตกต่างกันที่นี้เกิดจากปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ความสม่ำเสมอของนาโนโซลเริ่มต้น อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิในการเปลี่ยนรูปนาโนโซลเป็นเนิน ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการปลูกควอนตัมดอท ค่าอัตราการปลูกผลึกสำหรับควอนตัมดอท และปริมาณของผลึกควอนตัมดอทที่ปลูก ฯลฯ เป็นต้น

ในการสาธิตนี้ได้แสดงความเป็นไปได้ในการนำนาโนโซลมาใช้เป็นเทมเพลตในกระบวนการประดิษฐ์ควอนตัมดอทโมเลกุล ซึ่งเงื่อนไขที่เหมาะสมนั้นยังต้องการการศึกษาและพัฒนาต่อไป



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงการกระจายของจำนวนประชากรของควอนตัมดอตโมเลกุล
ที่มีจำนวนควอนตัมดอต 2 คอต 3 คอต และ 4 คอตในแต่ละโมเลกุล

บทที่ 6

สรุป

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขหรือตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการประดิษฐ์นาโนโซล $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ บนแผ่นผลึกฐาน GaAs (100) ด้วยเทคนิคการปลูกผลึกอิมพิเทกซ์ที่ใช้วิธีการปลูกผลึกอิมพิเทกซ์จากลำโมเลกุล โดยตัวแปรที่ได้ทำการศึกษาในโครงการวิจัยนี้ ได้แก่ ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำการขึ้นรูปหอคดโลหะ ค่าช่วงเวลาการขัดจังหวะหลังการขึ้นรูปหอคดโลหะ ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำคริสตอลไลเซชัน และค่าช่วงเวลาในการทำคริสตอลไลเซชัน โดยรูปร่างของนาโนโซลที่ได้นั้นมีค่าขนาดในแนว [110] และ $[1\bar{1}0]$ แตกต่างกัน เนื่องจากคุณสมบัติแอนไอโซโทรปิกของผลึกที่เกิดขึ้นแนว [110] และ $[1\bar{1}0]$ นั้นแตกต่างกัน ซึ่งความหนาแน่นของนาโนโซลที่ได้มีอยู่ในช่วง $6 \times 10^8 - 1.8 \times 10^9$ ซม² และมีค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลางของสันขอบวงแหวนอยู่ในช่วง 90-120 nm โดยค่าความหนาแน่นลดลง แต่ค่ามิติของนาโนโซลมีขนาดเพิ่มใหญ่ เมื่อค่าแผ่นผลึกฐานขณะทำการขึ้นรูปหอคดโลหะมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับช่วงเวลาการขัดจังหวะหลังการขึ้นรูปหอคดโลหะนั้นมีผลต่อค่าความหนาแน่นของนาโนโซลที่ได้ โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือกรณีที่ช่วงเวลาสั้นไม่เพียงพอทำให้เกิดการกัดเซาะแผ่นผลึกฐาน หอคดโลหะบางส่วนสามารถเคลื่อนที่ได้บนผิวของแผ่นผลึกฐานและเกิดการรวมตัวของหอคดโลหะ ซึ่งในกรณีนี้ค่าความหนาแน่นที่ได้มีค่าลดลงจากค่าเริ่มต้น และในอีกกรณีที่ช่วงเวลาเพียงพอที่ทำให้เกิดการกัดเซาะแผ่นผลึกฐานได้ หอคดโลหะส่วนที่กัดเซาะแผ่นผลึกฐานแล้วได้เคลื่อนที่จากตำแหน่งเดิมไปยังตำแหน่งใหม่และทำให้เกิดการกัดเซาะ ซึ่งหอคดโลหะที่เคลื่อนที่ไปนั้นอาจรวมตัวกับหอคดโลหะอื่นก็ได้และจากนั้นทำการกัดเซาะผิวหน้าแผ่นผลึกฐาน ผลจากการเคลื่อนที่ของหอคดโลหะและการกัดเซาะเป็นผลทำให้ความสม่ำเสมอของนาโนโซลที่ได้ค่อนข้างดี โดยปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกว่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานมีค่าลดลงเพียงพอที่ให้ปรากฏการณ์ลดลงหรือยุติลงก็ได้ ซึ่งผลจากปรากฏการณ์นี้ทำให้ค่าความหนาแน่นนาโนโซลที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าช่วงเวลาการขัดจังหวะหลังการขึ้นรูปหอคดโลหะมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้จากค่าช่วงเวลาการขัดจังหวะหลังการขึ้นรูปหอคดโลหะนั้นมีผลต่อค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของสันขอบวงแหวนโดยแปรผกผันตามค่าความหนาแน่น สำหรับค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำคริสตอลไลเซชันนั้นมีผลต่อรูปร่างสุดท้ายของนาโนโซลอย่างเด่นชัด โดยค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำคริสตอลไลเซชันที่ต่ำกว่า 230°C โครงสร้างนาโนที่มีลักษณะเป็นวงแหวนล้อมรอบนาโนโซล แต่เมื่อค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานขณะทำคริสตอลไลเซชันตั้งแต่ 230°C เป็นต้นไป โครงสร้างขนาดนาโนเมตรที่ได้บางส่วนมีลักษณะเป็นวงแหวนล้อมรอบควอนตัมดอต แต่ผลของค่าช่วงเวลาในการทำคริสตอลไลเซชันนั้นมีผลต่อค่าความหนาแน่นและค่าขนาดมิติอย่างไม่น่าเด่นชัด

บทที่ 7

ข้อเสนอแนะ

สำหรับ โครงการวิจัยนี้ค่าอุณหภูมิแผ่นผลึกฐานที่ใช้เป็นค่าอุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานที่ได้จากการเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จากรูปแบบ RHEED ที่จุดเปลี่ยนแปลงต่างๆ ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนมากกว่า 10°C ซึ่งวิธีการที่ดีที่สุดคือการใช้ IR Pyrometer แต่เครื่องมือนี้มีราคาแพง สำหรับอีกวิธีการหนึ่ง ได้แก่ การใช้โลหะหรือวัสดุที่มีค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวในช่วงที่เราทำงาน เช่น Al มีค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่ 660°C หรือ InSb มีค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่ 525°C ติดไว้บนผิวหน้าแผ่นผลึกฐาน และทำการเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่อ่านได้จาก Pyrometer และค่าที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิ้ล เพื่อให้เราสามารถกำหนดค่าอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น แต่วิธีการนี้ยุ่งยากและไม่เหมาะสมสำหรับการทำงานในช่วงอุณหภูมิที่กว้างมากได้ หากใช้ในการผลิตเชิงพาณิชย์จำเป็นต้องใช้เครื่องมือดังกล่าว เพื่อให้การผลิตสามารถทำซ้ำได้อย่างน่าเชื่อถือ นอกจากนี้ยังมีส่วนที่ขาดในโครงการงานวิจัยนี้คือการตรวจสอบคุณสมบัติของโครงสร้างผลึกที่ได้ด้วย X-Ray ซึ่งเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับงานนี้คือ Double Crystal X-Ray Diffraction เนื่องจากผู้วิจัยไม่สามารถหาเครื่องมือนี้ได้ และเครื่องมือนี้เป็นเครื่องหลักของงานวิจัยด้านวัสดุ และสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าคงผลึก (Lattice constant) โดยเครื่องมือสามารถบอกค่าคงตัวผลึกและค่าความแตกต่างของค่าคงตัวผลึกที่ปลูกขึ้นบนแผ่นผลึกฐาน และผลการทดลองที่ได้จากเทคนิครอปเพลทอพิเทกซ์ของวิจัยนี้ไม่สามารถตรวจสอบสภาพความได้สัดส่วนของสารประกอบของผลึกที่ได้ รวมถึงองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ Focus Ion Beam (FIB) และ Secondary Ion Mass Spectrometer (SIMS) มีราคาแพงและไม่สามารถหาใช้บริการในประเทศไทยในการวิเคราะห์คุณภาพผลึกที่ได้ ผู้วิจัยหวังไว้ว่าจะได้รับการสนับสนุนและส่งเสริมในโครงการวิจัยอื่นๆ ที่ต่อเนื่องจากโครงการวิจัยนี้ต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

1. A. Imamoglu, D.D. Awschalom, G. Burkard, D.P. DiVincenzo, D. Loss, M. Sherwin, A. Small, *Phys. Rev. Lett* 83, 4204 (1999).
2. A. Lorke, R. J. Luyken, A.O. Govorovm, J.P. Kottau, *Phys. Rev. Lett.* 84, 2223 (2000).
3. D. Leonard, M. Krisnamurthy, C. Reaves, S.P. Denbaars, and S.M. Petroff, *Appl. Phys. Lett.* 63, 3203 (1993).
4. Rudeesun Songmaung, Suwit Kiravittaya, and Oliver G. Schmidt, *Appl. Phys. Lett* 82, 2892 (2003).
5. Ziad Y. AbuWaar, Yariy I. Mazur, Jihoon H. Lee, Zhiming M. Wang, and Gregory J. Salamo, *J. Appl. Phys.* 101, 024311 (2007).
6. T. Mano, N. Koguchi, *J. Crystal Growth* 278, 108 (2005).
7. 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.
8. 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.
9. Tomoya Shitara and Karl Eberl, "Electronic properties of InGaP grown by solid-source molecular beam epitaxy with a GaP decomposition source", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 65 No. 3, 1994, pp. 356-358.
10. MBE Components & Accessories, Valved Arsenic Cracker Cells, RIBER, February 1999.
11. M. A. Herman and H. Sitter, "Molecular Beam Epitaxy : Fundamentals and Current Status", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1989, pp. 96.
12. A. S. Bracker, M. J. Yang, B. R. Bennett, J. C. Culbertson, W. J. Moore, Surface reconstruction phase for InAs, AlSb and GaSb", *Journal of Crystal Growth*, vol. 220, 2000, pp. 384-392.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. GaInAsP Alloy Semiconductor, Edited by T. P. Pearsal Wiley & Sons, 1982, pp. 92.

17. T. Chikyow, N. Koguchi, "Microcrystal growth of GaAs on a Se-terminated GaAlAs surface for the quantum-well box structure by sequential supplies of Ga and As molecular beams", *Appl. Phys. Letters* 60, 2431 (1992).
18. T. Mano, K. Watanabe, S. Tsukamoto, H. Fujioka, M. Oshima, N. Koguchi, "Fabrication of InGaAs quantum dots on GaAs(100) by droplet epitaxy", *J. Crystal Growth* 209, 504 (2000)
19. *Data in Science and Technology*, Edited in Chief : R. Poershke, Semiconductor Group IV Elements and III-V Compound, Editor : O Madalung, Springer-Verlag, 1991.
20. *InP-Based Materials and Devices*, Edited by Osamu WADA and Hideki HASEKAWA, John Wiley & Sons, Inc., 1999.
21. Zh. M. Wang, B.L. Liang, K.A. Sablon, and G.J. Salamo, "Nanoholes fabricated by Self-assembled gallium nanodrill on GaAs (100)", *Appl. Phys. Lett.* 90, 113120 (2007).
22. P. Boonpeng, S. Panyakeow, S. Ratanathammaphan, "Fabrication of $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ on GaAs by droplet molecular Beam Epitaxy", *J. Crystal Growth* 311, 1843 (2009).

ผลงานที่ได้เผยแพร่ของงานวิจัยนี้

1. การประชุมวิชาการภายในประเทศ (Domestic Conference)

- 1.1 Poonyasiri Boonpeng, Wipakorn Jewasuwan, Pornchai Changoang, Supachok Thainoi, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathammaphan, "Fabrication of $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ Nanohole Templates on GaAs (100)", The 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32), Tawaravadee Resort Hotel, Prachiburi, Thailand, 28-30 October 2009, pp. 1239-1242.
- 1.2 Poonyasiri Boonpeng, Wipakorn Jewasuwan, Pornchai Changmoang, Supachok Thainoi, Somsak Panyakeow and Somchai Ratanathammaphan, "Fabrication of $\text{InXGa}_{1-x}\text{Ga}$ squarelike Nanohole Template on GaAs (001) for Quantum Dot Molecules" The 33rd Electrical Engineering Conference (EECON-33), Centara Duang Tawan Hotel, Chiang Mai, Thailand, 1-3 December 2010, pp. 1165-1168.

2. การประชุมวิชาการนานาชาติ (International Conference)

- 2.1 Poonyasiri Boonpeng, Wipakorn Jewasuwan, Somsak Panyakeow, Somchai Ratanathammaphan, "Fabrication of $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ nanohole templates by droplet molecular beam epitaxy", International Conference on Nanoscience and Technology, China 2009, September 1-3, 2009, Beijing, China, 5P-2008, pp. 447.
- 2.2 Poonyasiri Boonpeng, Wipakorn Jewasuwan, Somsak Panyakeow, and Somchai Ratanathammaphan, "Effect of Substrate temperature on $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ (001) Nanohole Templates Grown by Droplet Molecular Beam Epitaxy", International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT2009), 28 June-3 July 2009, Singapore, O-S11.12 pp. O22.
- 2.3 P. Boonpeng, W. Jewasuwan, S. Panyakeow, and S. Ratanathammaphan, "Fabrication of $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ Nanohole Templates on GaAs (001) for Quantum Dot Molecules", 2009 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2009), October 7-9, 2009, Miyagi, JAPAN, P-8-2, pp.66.
- 2.4 P. Boonpeng, W. Jewasuwan, S. Panyakeow, and S. Ratanathammaphan, "Transformation of Concentric Double Ring to Single Quantum Rings with Squarlike Nanoholes on GaAs (001) by Droplet Epitaxy", The 16th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE2010), Berlin, Germany, 22-27 August, 2010, P1.03, pp.6.

3. วารสารวิชาการนานาชาติ (International Journal)

- 3.1 P. Boonpeng, S. Panyakeow, S. Ratanathamphan, "Fabrication of $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ nanoholes on GaAs by droplet molecular beam epitaxy", *Journal of Crystal Growth*, Volume 311, Issue 7, 15 March 2009, Pages 1843-1846.
- 3.2 Poonyasiri BOONPENG, Wipakorn JEWASUWAN, Somsak PANYAKEOW, and Somchai RATANATHAMMAPHAN, "Fabrication of Self-Assembled InGaAs Squarelike Nanoholes on GaAs(001) by Droplet epitaxy", *Japanese Journal of Applied Physics* 49 (2010) , 04DH9.
- 3.3 P. Boonpeng, W. Jevasuwan, N. Nuntawong, S. Thainoi, S. Panyakeow, S. Ratanathamphan, "Transformation of concentric quantum double rings to single quantum rings with squarelike nanoholes on GaAs(0 0 1) by droplet epitaxy", *Journal of Crystal Growth*, Volume 323, Issue 1, 15 May 2011, Pages 271-274.