

การปลูกชั้นอิพิแทกซีอินเดียมอาร์เซไนด์บนแผ่นฐานแกเลียมอาร์เซไนด์
โดยวิธีปลูกผลึกจากลำโมเลกุล



นาย ไมตรี ไพศาลภาณุมาศ

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

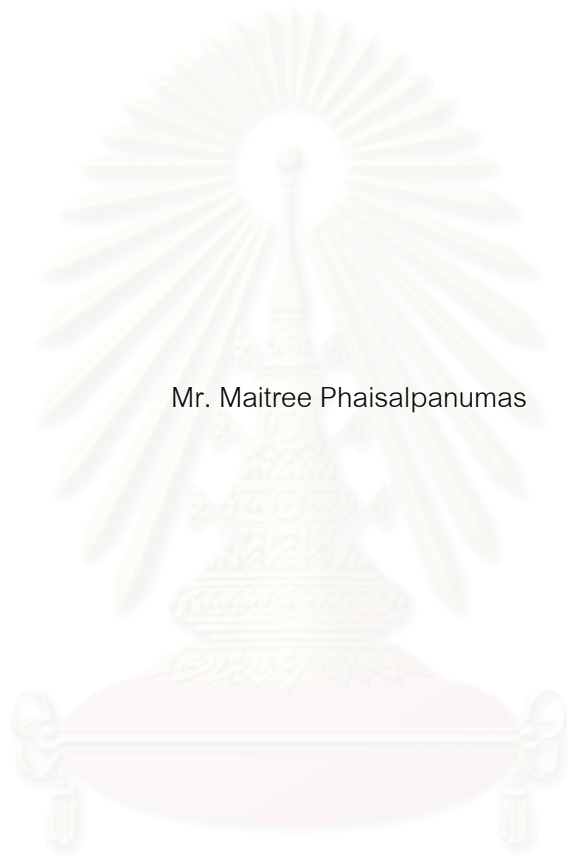
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2770-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE GROWTH OF InAs EPILAYERS ON GaAs SUBSTRATE
BY MOLECULAR BEAM EPITAXY



Mr. Maitree Phaisalpanumas

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-2770-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การปลูกชั้นอิพิแทกซีอินเดียมอาร์เซไนด์บนแผ่นฐานแกเลียมอาร์เซไนด์
โดยวิธีปลูกผลึกจากลำโมเลกุล
โดย นาย ไมตรี ไพศาลภาณุมาศ
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยดำเนินการ
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบ
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชุมพล อังตรเสน)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.บรรยง โตประเสริฐวงศ์)

ไมตรี ไพศาลภาณุมาศ : การปลูกชั้นอิพิแทกซีอินเดียมอาร์เซไนด์บนแผ่นฐานแกเลียมอาร์เซไนด์โดยวิธีการปลูกผลึกจากลำโมเลกุล (THE GROWTH OF InAs EPILAYERS ON GaAs SUBSTRATE BY MOLECULAR BEAM EPITAXY) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์, จำนวนหน้า 64 หน้า. ISBN 974-17-2770-4.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการศึกษาเงื่อนไขการปลูกผลึกอิพิแทกซีอินเดียมอาร์เซไนด์บนแผ่นฐานแกเลียมอาร์เซไนด์ โดยวิธีการปลูกผลึกจากลำโมเลกุล และตรวจสอบคุณภาพของผลึกโดยใช้ Optical Microscope, SEM, RHEED, และวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธี van der Pauw โดยทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นฐาน อัตราส่วนความดันไอของอาร์เซนิคต่ออินเดียม และอัตราการปลูกผลึก ผลจากการทดลองพบว่าการปลูกผลึกอิพิแทกซีอินเดียมอาร์เซไนด์โดยไม่เติมสารเจือ ผลึกที่ได้เป็นชนิดเอ็น ซึ่งมีความหนาแน่นของประจุพาหะอยู่ในช่วง $8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ถึง $8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ และค่าความคล่องตัวของประจุพาหะ ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการปลูก ในการทดลองพบว่าอุณหภูมิแผ่นฐานที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 480 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมินี้จะได้ทั้งคุณภาพของผลึกที่ดีทั้งคุณสมบัติทางไฟฟ้า และผิวหน้าที่ราบเรียบ สำหรับการทดลองหาเงื่อนไขอัตราส่วนความดันไอของอาร์เซนิคต่ออินเดียม พบว่าช่วงที่เหมาะสมอยู่ที่ 22-32 เท่า และอัตราความเร็วในการปลูกที่สามารถปลูกได้ คือ 0.34-0.48 ML/s แต่ค่าที่เหมาะสมอยู่ที่ 0.4 ML/s ซึ่งค่านี้จะได้ทั้งผิวหน้าที่ราบเรียบ และค่าความคล่องตัวที่สูงที่สุดประมาณ $8,000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ที่ความหนา $1 \mu\text{m}$

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2545.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4470472521 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD : InAs, GaAs, van der Pauw, HALL EFFECT, MOLECULAR BEAM EPITAXY

MAITREE PHAISALPANUMAS : THE GROWTH OF InAs EPILAYERS ON GaAs
SUBSTRATE BY MOLECULAR BEAM EPITAXY. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.
SOMCHAI RATANATHAMPAN, Dr. Eng., 64 pp. ISBN 974-17-2770-4.

This thesis studies the growth condition of InAs epitaxy on GaAs substrate by the Molecular Beam Epitaxy technique (MBE). The quality of epitaxial layers are investigated by optical microscope, scanning electron microscope (SEM), reflection high energy electron diffraction (RHEED) and the electrical properties are measured by van der Pauw technique. The investigations are conducted to study the following effects : namely, the substrate temperature used in the growth process, the beam equivalent pressure ratio (BEP) As_4/In and the growth rate. The results from the experiment show that undoped InAs epitaxy is the n-type. The carrier mobility and surface morphology depend on the growth condition. The optimal substrate temperature is at 480 °C providing single crystal with high crystalline quality and specular surface. The BEP ratio As_4/In ranging of 22-32 times has been found to be an appropriate growth condition and the growth rate has an interval about 0.34-0.48 ML/s which has an optimal value at 0.4 ML/s. At this growth rate, flat surface and high carrier mobility are obtained. The mobility of InAs epilayer is found to be approximately about 8,000 $cm^2/V\cdot s$ at 1 μm .

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department... Electrical Engineering... Student's signature.....

Field of study... Electrical Engineering... Advisor's signature.....

Academic year... 2002... Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนด้านอุปกรณ์ เครื่องมือวัด และวัสดุจากห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยงบประมาณจากคณะวิศวกรรมศาสตร์

ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการวัด Scanning Electron Microscope (SEM) และศูนย์เครื่องมือภาคโลหะการ สำหรับการวัด X-ray Diffraction

ผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน อันประกอบด้วย ศ. ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว รศ. ดร.บรรยง โตประเสริฐพงศ์ รศ. ดร.ชุมพล อินทรเสน และ ผศ. ดร.สัมพันธ์ รัตนธรรมพันธ์

ขอขอบคุณ อ.ดร.อาภรณ์ ธีรมงคลรัศมี ผศ. ดร.ทรงพล กาญจนชูชัย ดร.สุวิทย์ กิระวิทยาคุณศุภโชค ไทยน้อย คุณบัณฑิตา รั้ววิเศษ คุณพรชัย ช่างม่วง ที่ได้ให้คำแนะนำอันมีค่าในเรื่อง การเรียน การทำวิจัย และการเขียนวิทยานิพนธ์แก่ผู้เขียน

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ และนิสิตปริญญาเอก โท ตรี ทุกท่าน ในห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ที่ได้รับความช่วยเหลือ และคำแนะนำต่างๆ ด้วยความเต็มใจ

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลรอบข้างทุกท่านที่ให้ความห่วงใย และเป็นกำลังใจ ในการทำวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี คุณประโยชน์อันจะเกิดจากผลงานวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นเครื่องบูชาพระคุณบูรพาจารย์ตลอดจนคุณบิดามารดาที่ได้มีส่วนช่วยวางรากฐานการศึกษาแก่ผู้วิจัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฐ

บทที่

1. บทนำ	1
2. ทฤษฎี	3
2.1 วัสดุแกแลเลียมอาร์เซไนด์ และอินเดียมอาร์เซไนด์	3
2.1.1 โครงสร้าง และค่าคงที่ที่สำคัญ	3
2.1.2 ลักษณะสมบัติทางแสง	4
2.2 การปลูกผลึกจากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy : MBE)	5
2.2.1 หลักการ	5
2.2.2 เงื่อนไขสุญญากาศสำหรับการปลูกผลึกจากลำโมเลกุล	6
2.2.3 ความเครียดที่เกิดขึ้นจากความไม่เข้ากันของผลึก	8
2.2.4 ระบบ Reflection High Energy Electron Diffraction (RHEED).....	9
2.3 รูปแบบของการเกิดผลึก (Epitaxial Growth Modes)	12
2.3.1 Frank van-der-Merwe	12
2.3.2 Strainski-Krastanov	13
2.3.3 Volmer Weber	14
2.4 ระบบสำหรับการปลูกผลึกจากลำโมเลกุล	14

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.5 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าวิธี van der Pauw	17
2.5.1 ปฏิกิริยาการฮอลล์ (Hall Effect)	17
2.5.2 ทฤษฎีของ van der Pauw	20
2.6 โครงสร้างของระบบวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธี van der Pauw	23
3. การทดลอง	25
3.1 การเตรียมแผ่นฐาน (Sample Preparation)	25
3.2 การเตรียมห้องปลูกผลึก	25
3.3 การกำจัดออกไซด์ออกจากผิวหน้าแผ่นฐาน	26
3.4 การปลูกชั้นแกเลียมอาร์เซไนด์บัฟเฟอร์ (GaAs Buffer Layer Growth)	27
3.5 การปลูกชั้นอิพิแทกซีอินเดียมอาร์เซไนด์ (InAs Epitaxy Growth)	28
3.6 การหาค่าอัตราการปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์	28
3.7 การทำขั้วต่อโลหะ	30
3.8 การพิจารณาเลือกใช้แผ่นฐาน	31
3.9 เงื่อนไขของการทดลอง	33
4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์	34
4.1 การหาเงื่อนไขของอุณหภูมิแผ่นฐาน	34
4.2 การหาเงื่อนไขของอัตราส่วนความดันไอ (Beam Equivalent Pressure : BEP)	35
4.3 การทดลองหาช่วงของค่าความดันไอของอาร์เซนิคต่ออินเดียม	37
4.4 การทดลองหาค่าอัตราการปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์ที่เหมาะสม	39
4.5 การทดลองศึกษาผลของความหนาของผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์	41
4.6 การขึ้นกับค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กของค่าแรงดันฮอลล์ที่เงื่อนไขการปลูก ต่างๆ	42
4.7 การวัดคุณภาพของชั้นผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์ด้วย X-ray Diffraction	47

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5. สรุปผลการทดลอง	51
5.1 การทดลองหาเงื่อนไขอุณหภูมิพื้นฐานที่ใช้ปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์	52
5.2 การทดลองหาค่าอัตราส่วนความดันไอของอาร์เซนิกต่ออินเดียม	52
5.3 การทดลองหาค่าอัตราการปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์	53
5.4 การทดลองศึกษาความหนาของผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์	53
6. ข้อเสนอแนะ	55
รายการอ้างอิง	56
ภาคผนวก	58
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	64

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าคงตัวของวัสดุแกเลียมอาร์เซไนด์ และอินเดียมอาร์เซไนด์ที่ 300 K	4
4.1 ค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการผลิต InAs	39
4.2 เป็นค่า 2θ และ d_{hkl} ของอินเดียมอาร์เซไนด์	48
4.3 เป็นค่า 2θ และ d_{hkl} ของแกเลียมอาร์เซไนด์	48
4.4 รูปแบบของค่า $h^2+k^2+l^2$ สำหรับลูกบาศก์ทั้ง 4 แบบ	50



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างแบบ Zinc-blende	3
2.2 พื้นฐานของการเกิดผลึกโดยการปลูกผลึกจากล้าโมเลกุล	5
2.3 กระบวนการการเกิดผลึกของการปลูกผลึกด้วยวิธีล้าโมเลกุล	6
2.4 การเกิดค่าความเครียดของโครงผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์บนแผ่นฐานแคลเลียมอาร์เซไนด์ ...	9
2.5 โครงสร้างของระบบ RHEED	9
2.6 แผนภาพ RHEED แสดงความเข้มของ Specular Beam (ก) สว่างมาก (ข) สว่างน้อย	11
2.7 RHEED Oscillation ที่เกิดขึ้นเมื่อเริ่มปลูกผลึกแคลเลียมอาร์เซไนด์	11
2.8 รูปแบบของการเกิดผลึกอีพิแทกซี (ก) Frank van-der-Merwe (ข) Stranski-Krastanov (ค) Volmer-Weber	12
2.9 รูปแบบของการเกิดผลึกอีพิแทกซี แบบ Stranski-Krastanov	13
2.10 โครงสร้างของระบบปลูกผลึกจากล้าโมเลกุล RIBER 32P	15
2.11 โครงสร้างปี้มที่ติดตั้งอยู่ในระบบ MBE	16
2.12 การเกิด "pile up" ของประจุ	17
2.13 แผนภาพโครงสร้าง Hall-bar	18
2.14 ชิ้นงานที่นำไปวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธี van der Pauw	20
2.15 วิธีการวัดแบบ van der Pauw สำหรับชิ้นงานรูปทรงที่ไม่สมมาตร	21
2.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Q กับ f	22
2.17 โครงสร้างของระบบวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธี van der Pauw	23
3.1 ส่วนประกอบภายในห้องปลูกผลึก	26
3.2 ขั้นตอนการกำจัดออกไซด์ (ก) เริ่มเพิ่มอุณหภูมิออกไซด์เริ่มหลุดออกจากผิวหน้าชิ้นงาน (ข) อุณหภูมิที่ทำให้ออกไซด์หลุดจากผิวหน้า (ค) หลังจากถึงอุณหภูมิที่ทำให้ออกไซด์หลุด	27
3.3 แผนภาพ RHEED ของการเกิด Dot Formation (ก) ผิวหน้าของแคลเลียมอาร์เซไนด์ (ข) ผิวหน้าที่เกิดดอท	29
3.4 ภาพถ่ายความหนาของชั้นอินเดียมอาร์เซไนด์ โดย SEM	30
3.5 ความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนความยาวขั้วต่อโลหะต่อความยาวชิ้นงานกับการเปลี่ยนแปลงสภาพต้านทาน	31

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 กราฟอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นฐานที่มีผลกับค่าความคล่องตัวของประจุพาหะ	35
4.2 กราฟค่าความคล่องตัว และค่าความหนาแน่นของพาหะที่อัตราส่วนความดันไอค่าต่างๆ	36
4.3 ภาพถ่ายผิวหน้าของชั้นอิพิแทกซีอินเดียมอาร์เซไนต์ที่อัตราความดันไอของอาร์เซนิคต่ออินเดียมค่าต่างๆ (ก) 12 เท่า (ข) 15 เท่า (ค) 20 เท่า และ (ง) 27 เท่า	36
4.4 กราฟค่าความสัมพันธ์ของค่าความคล่องตัวเมื่อมีการเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความดันไอของอาร์เซนิคต่ออินเดียม	38
4.5 ภาพถ่ายผิวหน้าของชั้นอิพิแทกซีอินเดียมอาร์เซไนต์ที่อัตราความดันไอของอาร์เซนิคต่ออินเดียมค่าต่างๆ (ก) 14 เท่า (ข) 22 เท่า (ค) 32 เท่า และ (ง) 36 เท่า	38
4.6 ลักษณะของผิวหน้าที่อัตราการปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนต์ค่าต่างๆ	40
4.7 กราฟค่าความคล่องตัวและค่าความหนาแน่นของพาหะที่ความหนาแน่นค่าต่างๆ.....	41
4.8 การขึ้นกับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กของค่าแรงดันฮอลล์ ของชิ้นงานที่ทำการปลูกที่อุณหภูมิแผ่นฐานค่าต่างๆ	43
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแผ่นฐานที่มีผลต่อค่าความไวในการตรวจวัดของชิ้นงาน	43
4.10 การขึ้นกับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กของค่าแรงดันฮอลล์ของชิ้นงานที่ทำการปลูกที่ความดันไออาร์เซนิคต่ออินเดียมค่าต่างๆ	44
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความดันไอของอาร์เซนิคต่ออินเดียมที่มีผลต่อความไวในการตรวจวัดของชิ้นงาน	45
4.12 การวัดค่าแรงดันฮอลล์ของชิ้นงานที่ใช้การปลูกที่อัตราการปลูกค่าต่างๆ	46
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการปลูกที่มีผลต่อค่าความไวในการตรวจวัดของชิ้นงาน	46
4.14 กราฟแสดงค่าตำแหน่งของมุมตกกระทบ และมุมสะท้อน ที่ได้จากชิ้นงาน	47
4.15 แบบจำลองสำหรับการพิสูจน์กฎของแบรกก์	49
5.1 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงสร้าง ค่าความกว้างแถบพลังงานต้องห้าม และค่าความยาวคลื่นของสารประกอบกึ่งตัวนำ	51

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

a	ค่าคงที่ไครองผลึก	(Å)
B	ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก	(Gauss)
d_b	เส้นผ่านศูนย์กลางของลำโมเลกุล	(cm)
d_g	เส้นผ่านศูนย์กลางของ Residual gas ภายในห้องปลูกผลึก	(cm)
e	ประจุไฟฟ้า	(C)
E	สนามไฟฟ้า	(V/m)
E_g	แถบพลังงานต้องห้าม	(eV)
F	แรง	(N)
J	ความหนาแน่นกระแส	(A/cm ²)
k_B	ค่าคงที่ Boltzmann (1.38×10^{-23})	(J/K)
L	ความยาว	(cm)
L_b	ระยะปลอดการชนของลำโมเลกุล	
λ	ความยาวคลื่น	(μm , Å)
μ	ความคล่องตัวของพาหะ	(cm ² /V-s)
n	ความหนาแน่นของพาหะ	(cm ⁻³)
n_b	ความหนาแน่นของลำโมเลกุล	(cm ⁻³)
n_g	ความหนาแน่นของ Residual gas ภายในห้องปลูกผลึก	(cm ⁻³)
n_H	ความหนาแน่นของพาหะฮอลล์	(cm ⁻³)
r	ความต้านทานแผ่น	(Ω)
R_H	สัมประสิทธิ์ฮอลล์	
ρ	สภาพต้านทานไฟฟ้า	($\Omega\text{-cm}$)
t_c	ความหนาวิกฤต	(μm , Å)
v_b	ความเร็วเฉลี่ยของลำโมเลกุล	(cm/s)
v_g	ความเร็วเฉลี่ยของ Residual gas ภายในห้องปลูกผลึก	(cm/s)
V_H	แรงดันฮอลล์	(volt)
W	ความกว้าง	(cm)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

2D	Two-Dimensional
2DEG	Two Dimensional Electron Gas
3D	Three-Dimensional
APD	Antiphase Domain Defect
BEP	Beam Equivalent Pressure
BP	Background Pressure
FM	Frank-van-der-Merwe
GR	Growth Rate
HBT	Hetero Bipolar Transistor
HEMT	High Electron Mobility Transistor
LPE	Liquid Phase Epitaxy
MBE	Molecular Beam Epitaxy
ML	Monolayer
MQW	Muti-Quantum Well
nm	nanometre
PL	Photoluminescence
QMS	Quadrupole Mass Spectroscope
RHEED	Reflective High Energy Electron Diffraction
SEM	Scanning Electron Microscope
SK	Stranski-Krastanov
UHV	Ultra-High Vacuum
VM	Volmer-Weber
VPE	Vapor Phase Epitaxy
XRD	X-ray Diffraction

บทที่ 1

บทนำ

สารประกอบอินเดียมอาร์เซไนด์ (Indium Arsenide : InAs) เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำที่มีบทบาทมากสำหรับงานด้านอุตสาหกรรมในปัจจุบัน [1] นอกเหนือไปจากสารกึ่งตัวนำชนิดซิลิคอน (Silicon) และสารประกอบกึ่งตัวนำชนิด แกลเลียมอาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide : GaAs) และอินเดียมฟอสไฟด์ (Indium Phosphide : InP) สารประกอบกึ่งตัวนำ InAs เป็นที่สนใจ เนื่องจากเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติที่ดีทางไฟฟ้า และทางแสงเหมาะสำหรับพัฒนาเป็น สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (Optoelectronic Devices) [2] สิ่งประดิษฐ์ทางแม่เหล็ก (Magnetic Devices) [3-4] และสิ่งประดิษฐ์ที่ผลตอบสนองของความถี่สูง (High Frequency Devices) เพราะสารประกอบกึ่งตัวนำชนิดนี้มีจุดเด่น คือ มีค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนสูง (High Electron Mobility) และมีเสถียรภาพทางอุณหภูมิที่ดี (Good Temperature Stability) [4] ตัวอย่างหนึ่งของการนำไปใช้งานใช้เป็นตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก (Magnetic Sensors) ชนิด Hall Element หรือ ที่เรียกว่า Hall Sensors ได้ถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น ระบบควบคุมความเร็วในมอเตอร์ที่เป็นแบบ DC Brushless Motors ในเครื่องใช้ต่างๆ ได้แก่ เครื่อง CD-ROM เครื่องบันทึกเทป VCD ชนิดต่างๆ นอกจากนี้ยังนำไปใช้เป็นตัวตรวจจับของระบบต่างๆ ภายในรถยนต์ (Automotive Sensors) ซึ่งการนำสิ่งประดิษฐ์ไปใช้ภายในรถยนต์นั้นจำเป็นต้องมีค่าเสถียรภาพทางอุณหภูมิที่ดี ซึ่งก็เป็นข้อดีของสิ่งประดิษฐ์ที่ทำจากสารประกอบกึ่งตัวนำ InAs

การประยุกต์ใช้งาน InAs สำหรับทำเป็น Hall Sensors มีข้อดี คือ ได้ค่า Hall Output Voltage มีค่าสูง เนื่องจาก InAs มีค่าความคล่องตัวของประจุพาหะสูง (High Carrier Mobility) และมีค่าความต้านทานแผ่นสูง (High Sheet Resistance) [4] และอีกอย่าง คือ มีค่าความเข้มข้นพาหะที่เหมาะสม เพื่อลดผลของ The effect of Intrinsic Carrier Excitation ในกรณี เมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ InAs ยังเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำที่ใช้ในการสร้างเลเซอร์ที่เปล่งแสงในย่านอินฟราเรด (Infrared) ในช่วง 2-5 ไมครอน สำหรับการใช้งานในการวัดมลภาวะ ปริมาณของก๊าซบางชนิด และการศึกษาปฏิกิริยาเคมีต่างๆ และนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในย่านที่มีผลตอบสนองของความถี่สูง เช่น High Speed HEMT เป็นต้น

แต่อย่างไรก็ดีสารประกอบกึ่งตัวนำ InAs มีราคาแพงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับ Si และ GaAs ดังนั้นวิธีการที่ทำให้สิ่งประดิษฐ์จากสารประกอบนี้มีราคาถูกลง ได้แก่ การปลูกผลึกอิมพิแทกซี InAs ลงบนแผ่นฐาน (Substrate) เริ่มต้นที่มีราคาถูกลง ได้แก่ Si และ GaAs ซึ่งแผ่นฐาน GaAs เหมาะสมที่สุดจากการศึกษาพบว่าถ้าปลูกผลึก InAs ลงบนแผ่นฐาน Si นั้นจะเกิดภาวะ

การไม่เข้ากันของผลึก (Lattice Mismatch) สูงถึง 11.3 % [5] ซึ่งสูงมากกว่าการปลูกบนแผ่นฐาน GaAs เพราะฉะนั้นจะทำให้เกิดปัญหาของ Antiphase Domain Defect ที่เกิดจากผลของการไม่เข้ากันของผลึกเป็นผลทำให้ผลึกที่ได้มีคุณภาพต่ำมาก ส่วนการปลูกผลึก InAs ลงบนแผ่นฐาน GaAs นั้นมีผลของการไม่เข้ากันของผลึกที่ 7.2 % ซึ่งมีค่าน้อยกว่าการปลูกบนแผ่นฐาน Si การเตรียมผิวทำได้ง่าย และการปลูกสารประกอบกึ่งตัวนำ InAs ลงบนแผ่นฐาน GaAs สามารถปลูกได้อย่างต่อเนื่อง โดยวิธีการปลูกด้วยวิธี MBE ซึ่งการปลูกด้วยวิธีนี้ จะทำให้ได้ผลึกที่มีคุณภาพดี ทั้งลักษณะของผิวหน้า และคุณสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งมีความดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการปลูกผลึกด้วยวิธีอื่นๆ เช่น LPE และ VPE เป็นต้น

เนื่องจากการปลูกผลึกอพิแทกซี InAs บนแผ่นฐาน GaAs เป็นการปลูกที่มีค่าคงที่โครงผลึก (Lattice Constant) แตกต่างกันประมาณ 7.4 เปอร์เซ็นต์ [6-7] อันเป็นผลทำให้เกิดภาวะการไม่เข้ากันของผลึก (Lattice Mismatch) ขึ้นทำให้เกิดค่าความเครียด (Strain) ขึ้นที่รอยต่อระหว่างชั้น InAs และแผ่นฐาน GaAs ซึ่งผลที่ได้ทำให้ค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นผลึก InAs ที่ได้มีลักษณะที่แตกต่างไปจากสภาวะปกติ จากสาเหตุของจุดบกพร่องทางตำแหน่ง (Dislocation) ที่รอยต่อซึ่งเกิดจากความเครียดของการไม่เข้ากันของผลึก [8] วิธีการควบคุมให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีสามารถควบคุมได้จากค่าอัตราส่วนอะตอม (Atomic Ratio) หรือ ค่าอัตราส่วนความดันลำโมเลกุล (Beam Equivalent Pressure, BEP) ระหว่าง As ต่อ In และความหนาของชั้นผลึก InAs ดังนั้นเพื่อให้การควบคุมคุณภาพของผลึก InAs ที่ปลูกบนแผ่นฐาน GaAs สามารถทำได้อย่างแม่นยำนั้น จำเป็นต้องมีความเข้าใจในอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการสร้างชั้นผลึกที่มีต่อคุณภาพของผลึกที่ได้ทั้งคุณสมบัติทางไฟฟ้า และลักษณะทางกายภาพ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาเงื่อนไขที่สำคัญบางประการที่มีผลต่อคุณภาพของผลึก InAs ที่สร้างโดยวิธีการปลูกผลึกจากลำโมเลกุล ได้แก่ เงื่อนไขของอุณหภูมิแผ่นฐานขณะทำการปลูกผลึกอพิแทกซี InAs การควบคุมอัตราส่วนจำนวนอะตอม As และ In การใช้อัตราการผลิตผลึก และสุดท้ายเป็นการศึกษาผลของความหนาของชั้น InAs การตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าจะทำโดยการวัดด้วยวิธี van der Pauw และวัดความหนาของผลึกที่ปลูกด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นหลัก สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ บทที่ 2 จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานของวัสดุ InAs เทคนิคการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล ทฤษฎีเกี่ยวกับการวัดด้วยวิธีปรากฏการณ์ฮอลล์ และการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธี van der Pauw บทที่ 3 เป็นรายละเอียดของการออกแบบการทดลอง บทที่ 4 เป็นการทดลองที่ได้ และการวิเคราะห์ผลการทดลอง บทที่ 5 เป็นสรุปของวิทยานิพนธ์ และบทสุดท้าย เป็นข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

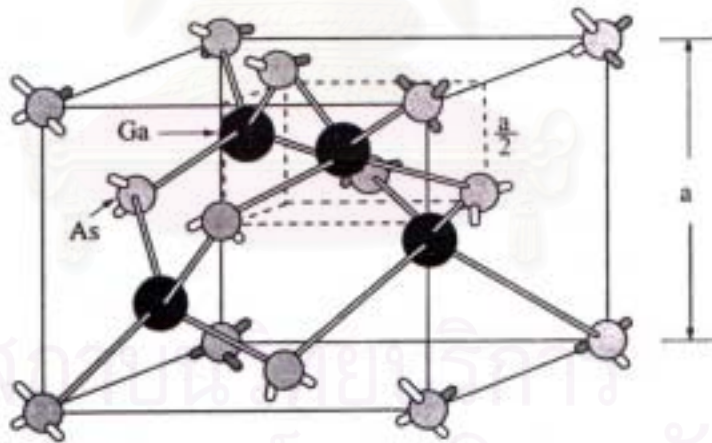
ทฤษฎี

สำหรับในบทนี้เป็นการทบทวนความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งมีเนื้อหาสาระเกี่ยวกับความรู้พื้นฐานของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V การปลูกผลึกอีพิแทกซีจากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy : MBE) กลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการปลูกผลึกอีพิแทกซีด้วยวิธี MBE และวิธีการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธี van der Pauw

2.1 วัสดุแกเลียมอาร์เซไนด์และอินเดียมอาร์เซไนด์

2.1.1 โครงสร้างและค่าคงตัวที่สำคัญ

วัสดุแกเลียมอาร์เซไนด์ และอินเดียมอาร์เซไนด์เป็นสารประกอบกลุ่ม III-V มีลักษณะโครงสร้างแบบ Zinc-blende ทราบได้จากการนำวัสดุไปทดสอบโดยวิธีการวัดการเลี้ยวเบนของรังสี X (X-ray Diffraction) โดยมีอะตอมของสารประกอบกึ่งตัวนำกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดทั่วทั้งผลึก ดังในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างแบบ Zinc-blende

ค่าคงตัวที่สำคัญของผลึกชนิดหนา (Bulk Material) ของวัสดุแกเลียมอาร์เซไนด์ และอินเดียมอาร์เซไนด์ แสดงในตารางที่ 2.1 [8] จะสังเกตเห็นได้ว่าวัสดุอินเดียมอาร์เซไนด์มีคุณสมบัติที่ดี คือ มีค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอน (Electron Mobility) สูงมาก แต่มีค่าความกว้างแถบพลังงานต้องห้ามแคบกว่า และมีค่าคงที่โครงผลึก (Lattice Constant) มากกว่า

ตารางที่ 2.1 ค่าคงตัวของวัสดุแกเลียมอาร์เซไนด์ และอินเดียมอาร์เซไนด์ที่ 300 K

Properties Compound	Electron Mobility (cm ² /V-s)	Intrinsic Carrier Concentration (cm ⁻³)	E _g (eV)	Lattice Constant (Å)
GaAs	8,500	2.1 × 10 ⁶	1.43	5.65
InAs	33,000	1.3 × 10 ¹⁵	0.36	6.06

การที่เราปลูกวัสดุอินเดียมอาร์เซไนด์ซึ่งมีค่าคงที่โครงสร้างผลึกมากกว่าวัสดุแกเลียมอาร์เซไนด์ที่เป็นแผ่นฐานจะทำให้เกิดความไม่เข้ากันของผลึก (Lattice Mismatch) ขึ้นที่รอยต่อ [8] เป็นผลอันเนื่องมาจากค่าความเครียด (Strain) และค่าความเครียดนี้จะทำให้เกิดจุดบกพร่องทางตำแหน่งขึ้น (Dislocation) ถ้าทำการปลูกชั้นอินเดียมอาร์เซไนด์เพียงบางๆ ก็จะได้ชั้นอินเดียมอาร์เซไนด์ที่มีความสมบูรณ์ของผลึกดีอยู่ แต่เมื่อทำการปลูกจนความหนาของชั้นอินเดียมอาร์เซไนด์มีความหนาถึงค่าความหนาวิกฤต (Critical Thickness) [9] ผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์ก็จะเริ่มเกิดความบกพร่อง (Defects) ขึ้นค่าความหนาวิกฤต สำหรับการปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์บนแผ่นฐานแกเลียมอาร์เซไนด์อยู่ที่ 1.7-1.8 ML หรือ 5.0-5.5 Å [8] แต่เมื่อเราทำการปลูกอินเดียมอาร์เซไนด์ ให้มีความหนามากกว่าความหนาวิกฤตมากๆ ผลึกของอินเดียมอาร์เซไนด์จะมีความสมบูรณ์ของผลึกมากขึ้น เนื่องจากค่าความเครียดลดลง (Strain Relaxation) เพราะผลึกที่ทำการศึกษานี้อยู่ที่ความหนาประมาณ 1 μm ซึ่งมากกว่าความหนาวิกฤตอยู่มาก

2.1.2 ลักษณะสมบัติทางแสง

วัสดุแกเลียมอาร์เซไนด์ และอินเดียมอาร์เซไนด์มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง (Direct Bandgap) จึงทำให้เกิดการรวมตัวแบบเปล่งแสงมากกว่าการรวมตัวแบบไม่เปล่งแสง วัสดุนี้จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้สร้างสิ่งประดิษฐ์ทางแสงค่าความยาวคลื่นของแสงที่เปล่งออกมาจากวัสดุขึ้นอยู่กับความกว้างของแถบพลังงานต้องห้ามเป็นไปตามสมการ

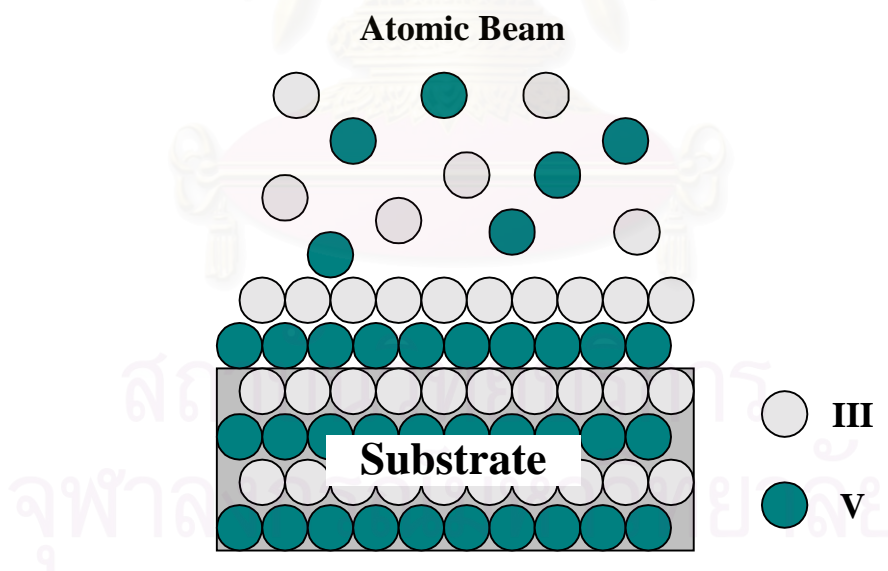
$$\lambda \text{ (nm)} = \frac{1240}{E_g \text{ (eV)}} \quad (1)$$

ที่อุณหภูมิ 300 K ค่าความยาวคลื่นของแสงที่วัสดุแกเลียมอาร์เซไนด์ชนิดหนาเปล่งออกมาอยู่ที่ประมาณ 870 nm และวัสดุอินเดียมอาร์เซไนด์อยู่ที่ประมาณ 2000-5000 nm [8]

2.2 การปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy : MBE)

2.2.1 หลักการ

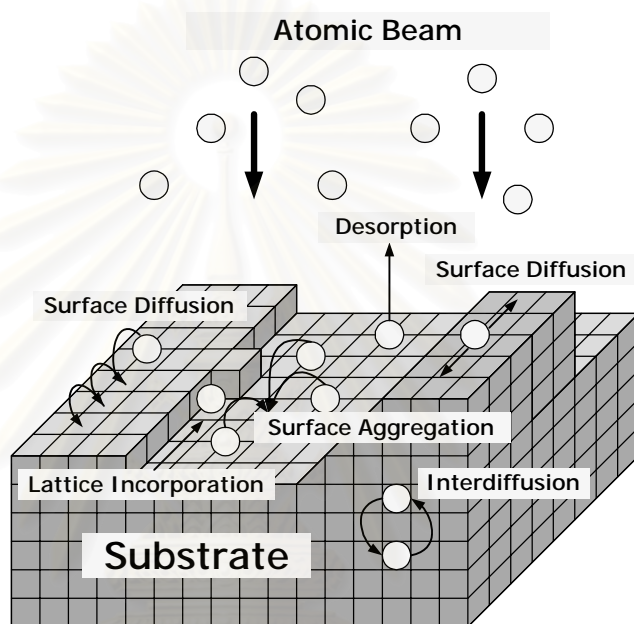
การปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุลเป็นที่นิยม และง่ายสำหรับการปลูกสารกึ่งตัวนำ การปลูกผลึกอพิแทกซีไม่จำเป็นต้องเป็นสารกึ่งตัวนำเพียงอย่างเดียว แต่ยังสามารถใช้ปลูกวัสดุที่เป็นโลหะ และฉนวนได้อีกด้วย ในการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุลกระทำภายใต้สภาวะสุญญากาศซึ่งมีความดันต่ำกว่า 10^{-9} Torr สารที่ใช้ทำการปลูกผลึกถูกทำให้ร้อนภายในเบ้า (Crucible) จนกระทั่งกลายเป็นไอโมเลกุล (Molecular Beam) แล้วจึงพุ่งออกมาไปยังแผ่นฐาน เพื่อทำการปลูกผลึกอุณหภูมิที่เบ้าจะเป็นตัวควบคุมปริมาณของไอโมเลกุล และจะมีชัตเตอร์ (Shutters) อยู่ด้านหน้าของเบ้าในระหว่างทำการปลูก เพื่อเป็นตัวควบคุมเวลาในการปลูกผลึกอพิแทกซีเพื่อควบคุมค่าความหนา และค่าอัตราส่วนของสารประกอบจากค่าอัตราส่วนของเวลา การเปิดปิดชัตเตอร์ การปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล (MBE) เป็นวิธีการปลูกผลึกอพิแทกซี ซึ่งผลึกที่ปลูกขึ้นมาจะมีลักษณะเหมือนกับโครงสร้างผลึกแผ่นฐาน ดังในรูปที่ 2.2 เป็นการปลูกผลึกอพิแทกซี ซึ่งใช้สาร 2 ตัว คือ Ga และ As จะเห็นว่าลักษณะการปลูกจะเป็นการที่ Ga และ As สลับกันไป จะได้เป็นชั้นผลึกของ GaAs



รูปที่ 2.2 พื้นฐานของการเกิดผลึกโดยการปลูกผลึกจากลำโมเลกุล

เมื่อเราเริ่มเพิ่มความร้อนให้กับแผ่นฐานอะตอมจะเกิดการเคลื่อนที่ไปมาบนผิวหน้าของแผ่นฐาน ตามรูปที่ 2.3 จนกว่าอะตอมจะหยุดเคลื่อนที่เข้าไปอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม (Lattice Incorporation) แล้วก้อพันธะที่ช่วยลดพลังงานของผิวหน้าแผ่นฐานนั้นแล้วทำให้ได้ชั้นผลึกที่

สมบูรณ์ อะตอมสามารถเคลื่อนที่ไปบนผิวหน้าด้วยกระบวนการแพร่ (Surface Diffusion) อะตอมสามารถเปลี่ยนตำแหน่งกับอะตอมที่อยู่ด้านล่างของผิวหน้า (Interdiffusion) และอะตอมยังสามารถก่อตัวขึ้น (Nucleation) เมื่ออะตอมเคลื่อนที่ไปยังจุดเดียวกัน แล้วทำให้เกิดพันธะขึ้น ถ้าอุณหภูมิของแผ่นฐานมีค่าสูงพอก็จะทำให้เกิดผลึกขึ้นได้โดยค่าอุณหภูมินี้ขึ้นอยู่กับสารประกอบแต่ละชนิด แต่ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปอะตอมที่เกิดพันธะที่ผิวหน้าจะเกิดเป็นไออีกครั้ง (Desorption) หลุดออกจากผิวหน้าของแผ่นฐาน



รูปที่ 2.3 กระบวนการการเกิดผลึกของการปลูกผลึกด้วยวิธีลำโมเลกุล

2.2.2 เงื่อนไขสุญญากาศสำหรับการปลูกผลึกจากลำโมเลกุล

สิ่งหนึ่งที่ทำให้การปลูกผลึกจากลำโมเลกุลเป็นวิธีที่นิยม นั่นคือ อะตอมสามารถเกิดเป็นผลึกบนผิวหน้าของแผ่นฐาน โดยเราต้องการให้มีสารปนเปื้อน (Contaminate) น้อยมาก อย่างไรก็ตาม การที่ลำโมเลกุลจะเดินทางไปถึงผิวหน้า และมีสารปนเปื้อนน้อยหรือไม่มีเลยนั้นจะต้องทำภายในห้องปลูกผลึก (Growth Chamber) เนื่องจากสาเหตุนี้จึงจำเป็นที่จะต้องพิจารณาระยะทางเฉลี่ยที่ลำโมเลกุลเคลื่อนที่ก่อนที่จะจับ (Colliding) กับอะตอมอื่นๆ และการกระเจิง (Scattering) ออกจากลำโมเลกุล ระยะทางนี้เรียกว่าระยะปลอดการชน (Mean free path, L) สามารถคำนวณโดยใช้ ทฤษฎีพลังงานจลน์ของก๊าซ โดยจะตั้งข้อสมมุติฐานเป็นข้อๆ ดังนี้

1. โมเลกุลก๊าซมีมวลเท่ากัน
2. แรงที่กระทำระหว่างโมเลกุลให้ละเลย

3. ความเร็วของโมเลกุลเป็นไปตามโมเดลของแมกเวลล์ (Maxwell's Model)
4. ก๊าซเป็น Isotropic มีคุณสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง

ภายในสมมุติฐานเหล่านี้ สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาระยะปลอดการชนหาได้จาก

$$L = \frac{1}{\sqrt{2}n\pi d^2} \quad (2)$$

เมื่อ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของลำโมเลกุล

n คือ ความหนาแน่นของโมเลกุลในสุญญากาศ

โดยค่าความหนาแน่นนี้เกี่ยวกับค่าของความดัน และอุณหภูมิเป็นไปตามสมการ

$$n = \frac{p}{k_B T} \quad (3)$$

เมื่อ p คือ ความดันของโมเลกุล

T คือ อุณหภูมิของเป้า

k_B คือ ค่าคงที่ Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K)

การปลูกผลึกจากลำโมเลกุลส่วนใหญ่ในห้องปลูกผลึกจะมีระยะห่างระหว่างเป้า และแผ่นฐานอยู่อย่างน้อย 0.2 เมตร ดังนั้นสำหรับลำโมเลกุลที่จะไปถึงผิวหน้าได้ต้องมีค่าระยะปลอดการชน (Mean free path, L_b) มากกว่า 0.2 เมตร ภายใต้ข้อมูลนี้ ค่าความดันก๊าซสูงสุด (Highest Residual Gas) ที่สามารถใช้ได้ในห้องปลูกผลึก สามารถคำนวณได้โดย สมมุติให้ลำโมเลกุล และ ก๊าซที่อยู่ภายในห้องปลูกผลึก (Residual Gas) รวมกัน และสูตรที่จะกล่าวนี้สามารถใช้สำหรับหาค่าระยะปลอดการชน (Mean free path, L_b) ของลำโมเลกุลได้ดังนี้

$$L_b = \frac{1}{\sqrt{2}n_b d_b^2 + n_g d_{bg}^2 \sqrt{1 + v_g^2/v_b^2}} \quad (4)$$

เมื่อ n_b , d_b , และ v_b คือ ความหนาแน่น, เส้นผ่านศูนย์กลาง, และความเร็วเฉลี่ยของลำโมเลกุล

n_g , d_g , และ v_g คือ ความหนาแน่น, เส้นผ่านศูนย์กลาง, และความเร็วเฉลี่ยของ Residual Gas

ความเร็วของ Residual Gas มักจะมีค่าต่ำกว่าความเร็วของลำโมเลกุล ทำให้สามารถทำ
สมการที่ 4 ให้ง่ายลง และจัดสมการใหม่เพื่อหาความหนาแน่นของ Residual Gas ได้ดังนี้

$$n_g = \frac{L_b^{-1} - \sqrt{2\pi n_b d_b^2}}{\pi d_{bg}^2} \quad (5)$$

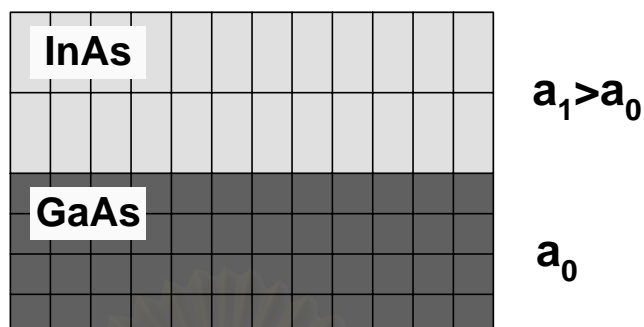
แทนสมการที่ 3 ในสมการที่ 5 จะได้ค่าความสัมพันธ์ความดันของ Residual Gas ดังนี้

$$p_g = k_B T \left[\frac{L_b^{-1} - \sqrt{2\pi n_b d_b^2}}{\pi d_{bg}^2} \right] \quad (6)$$

สำหรับแก๊สเฉื่อยอาร์เซนิก ($p_g(\max) = 7.7 \times 10^{-2}$ Pa หรือ 0.58 mTorr) นี้แสดงให้เห็น
ว่า ระบบสุญญากาศภายในห้องปลูกผลึกมีค่าเพียงพอที่จะรักษาลำโมเลกุลของแก๊สเฉื่อย
อาร์เซนิกไว้ได้ อย่างไรก็ตามกระบวนการปลูกผลึกจากลำโมเลกุลนั้นมีอัตราการปลูกผลึกที่ช้า
มากอาจทำให้สารเจือปนในห้องปลูกผลึกเข้ามาปนเปื้อนในระหว่างทำการปลูกได้ด้วยสาเหตุนี้จึง
ต้องมีสภาวะสุญญากาศไว้เพื่อกันไม่ให้มีสารปนเปื้อนเข้ามาในระหว่างทำการปลูกผลึก

2.2.3 ความเครียดที่เกิดขึ้นจากความไม่เข้ากันของผลึก

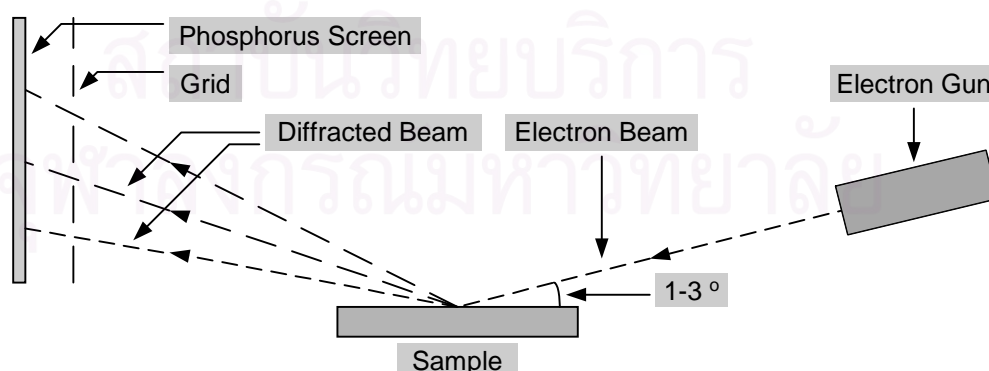
กรณีที่ยากที่สุดของการปลูกผลึกจากลำโมเลกุล คือ การปลูกสารชนิดเดียวกันกับ
แผ่นฐาน เช่น การปลูกผลึกแก๊สเฉื่อยอาร์เซนิกบนแผ่นฐานแก๊สเฉื่อยอาร์เซนิก ในกรณีนี้จะตอม
แก๊สเฉื่อย และอะตอมอาร์เซนิกจากลำโมเลกุลจะก่อพันธะเป็นชั้นแก๊สเฉื่อยอาร์เซนิกที่ผิวของ
แผ่นฐาน อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ยังสามารถปลูกสารต่างชนิดกันกับแผ่นฐานได้อีกด้วย ดังเช่น
ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซนิกบนแผ่นฐานแก๊สเฉื่อยอาร์เซนิก เมื่อเราเริ่ม
ต้นปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซนิกโครงสร้าง และขนาดของผลึกก็คงเหมือนกับโครงสร้างของ
แผ่นฐานแก๊สเฉื่อยอาร์เซนิก แต่ว่าค่าคงตัวโครงผลึก (Lattice Constant) อินเดียมอาร์เซนิกมีค่า
มากกว่าแก๊สเฉื่อยอาร์เซนิกจึงทำให้เกิดความไม่เข้ากันของผลึก (Lattice Mismatch) ผลที่ได้ คือ
จะเกิดค่าความเครียด (Strain) ขึ้นเป็นไปตามรูปที่ 2.4 ให้ค่าคงที่โครงผลึกอินเดียมอาร์เซนิก (a_i)
ซึ่งมีค่ามากกว่า ค่าคงที่โครงผลึกแก๊สเฉื่อยอาร์เซนิก (a_g) สำหรับค่าความเครียดที่เกิดขึ้นเป็นผล
อันเนื่องมาจากค่าคงที่โครงผลึกมีความแตกต่างกันอยู่ประมาณ 7.4 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.4 การเกิดค่าความเครียดของโครงสร้างอินเดียมอาร์เซไนด์บนแผ่นฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์

2.2.4 ระบบ Reflection High Energy Electron Diffraction (RHEED)

การปลูกผลึกอีพิแทกซ์จากลำโมเลกุลจะต้องไม่มีอะไรมาขวางลำโมเลกุลจากเบ้า (Crucible) กับแผ่นฐาน (Substrate) ดังนั้นการวัดหลายวิธีจึงไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ผลึกในระหว่างทำการปลูกผลึกได้ อย่างไรก็ตามมีความสำคัญที่จะรู้ว่าผิวหน้าเป็นอย่างไรในขณะที่ทำการปลูกผลึกมีเทคนิคหนึ่งที่ใช้เรียกว่าเทคนิคการหักเหลำอิเล็กตรอน (Electron Diffraction Techniques) เป็นวิธีที่ดีมากในการวิเคราะห์ว่าผลึกที่กำลังทำการปลูกในเวลานั้นมีลักษณะเป็นอย่างไร และเป็นเครื่องมือเพียงอย่างเดียวที่สามารถตรวจสอบคุณภาพของผลึกในระหว่างทำการปลูกได้ ระบบ RHEED ที่ติดตั้งในเครื่องปลูกผลึกจากลำโมเลกุล ดังในรูปที่ 2.5 อธิบายได้ คือ ลำอิเล็กตรอนมีทิศทางไปยังแผ่นฐานด้วยมุม 1-3 องศา และใช้พลังงาน 15-30 keV ลำอิเล็กตรอนที่ทะลุเข้าไปในผิวหน้าแผ่นฐานมีผลน้อยมาก



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของระบบ RHEED

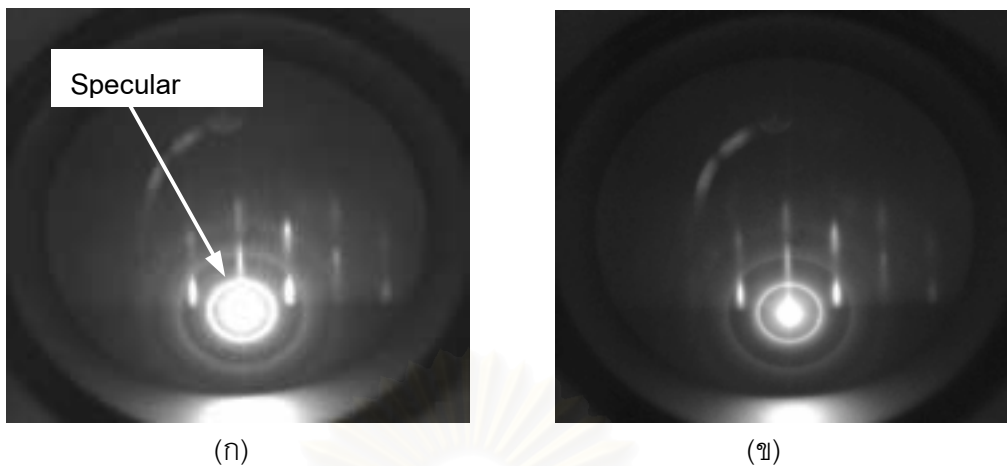
เนื่องจากค่าความยาวคลื่น (Wavelength) ที่ใช้ของลำอิเล็กตรอน (Electron Beam) อยู่ที่ 0.17-0.06 อังสตรอม เพราะว่าลำอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านเข้าไปในชั้นของผลึกเพียงไม่กี่ชั้น ผลที่ได้จากเทคนิคนี้จะได้ข้อมูลเกี่ยวกับผิวหน้าซึ่งข้อมูลนี้จะแสดงบนฉากฟอสฟอรัส (Phosphorus Screen) มีลักษณะเป็นแผนภาพการแทรกสอดของลำอิเล็กตรอนซึ่งมีรูปแบบต่างๆ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถตรวจสอบการเปลี่ยนแปลง และลักษณะของผิวหน้าแต่ไม่ได้ให้ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างของผิวหน้า ข้อมูลนี้ยังสามารถนำไปหาอัตราการปลูกผลึก (Growth Rate) ได้ ซึ่งในขณะที่สารก่อพันธะบนผิวหน้าของแผ่นฐานเราจะสังเกตเห็นความเข้ม (Intensity) ของลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบกับฉากฟอสฟอรัส สำหรับผิวหน้าที่ราบเรียบจะเห็นว่าความเข้มมีค่ามากที่สุดแต่สำหรับผิวหน้าที่ยังไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดค่าของการกระเจิงแบบแพร่ซิม (Diffuse Scattering) ขึ้นทำให้ความสว่างของลำอิเล็กตรอนที่กระทบฉากฟอสฟอรัสมีความสว่างน้อย ภายใต้เงื่อนไขนี้เราสามารถนำไปหาค่าอัตราการปลูกผลึก โดยพล็อตค่าของ RHEED Oscillation เทียบกับเวลาที่ใช้ โดยกำหนดให้ค่าระหว่างจุดสูงสุดของ RHEED Oscillation คือ 1 ชั้นอะตอม (1ML) กำหนดให้ค่าอัตราการปลูกผลึกมีหน่วยเป็น ชั้นอะตอมต่อวินาที (ML/sec) จากข้อมูลข้างต้นรวมถึงค่าคงที่โครงสร้างของสารที่ต้องการปลูกทำให้สามารถหาระยะเวลาที่ใช้ในการปลูกผลึกได้อย่างแม่นยำ

การหาค่าอัตราการปลูกผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์โดยสังเกตจาก Specular Beam ของ RHEED Pattern บน Phosphorus Screen ดังในรูปที่ 2.6 ซึ่ง Specular Beam จะมีความเข้มที่แตกต่างกันในระหว่างทำการปลูกผลึก ความเข้มที่แตกต่างกันนี้อธิบายได้จากลักษณะของผิวหน้า ถ้าผิวหน้ามีความสมบูรณ์ราบเรียบจะเห็นความเข้มของ Specular Beam สว่างมากที่สุด แต่สำหรับผิวหน้าที่ยังไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดการกระเจิงแบบแพร่ซิม (Diffuse Scattering) ขึ้นทำให้ความเข้มของ Specular Beam สว่างน้อย ในรูปที่ 2.7 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของผิวหน้าเทียบกับความเข้มของ Specular Beam ซึ่งจุดยอดของกราฟจะแสดงถึงผิวหน้าที่สมบูรณ์ราบเรียบหรือความเข้มสว่างมากที่สุด นั้นหมายความว่าได้ทำการปลูกเรียบร้อยแล้ว 1 ML ถ้านำกราฟของ RHEED Oscillation เทียบกับเวลาที่จะได้ค่าอัตราการปลูกผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์ ดังสมการนี้

$$\text{Growth Rate (ML/s)} = \frac{\text{Number of monolayers (ML)}}{\text{Time (sec)}}$$

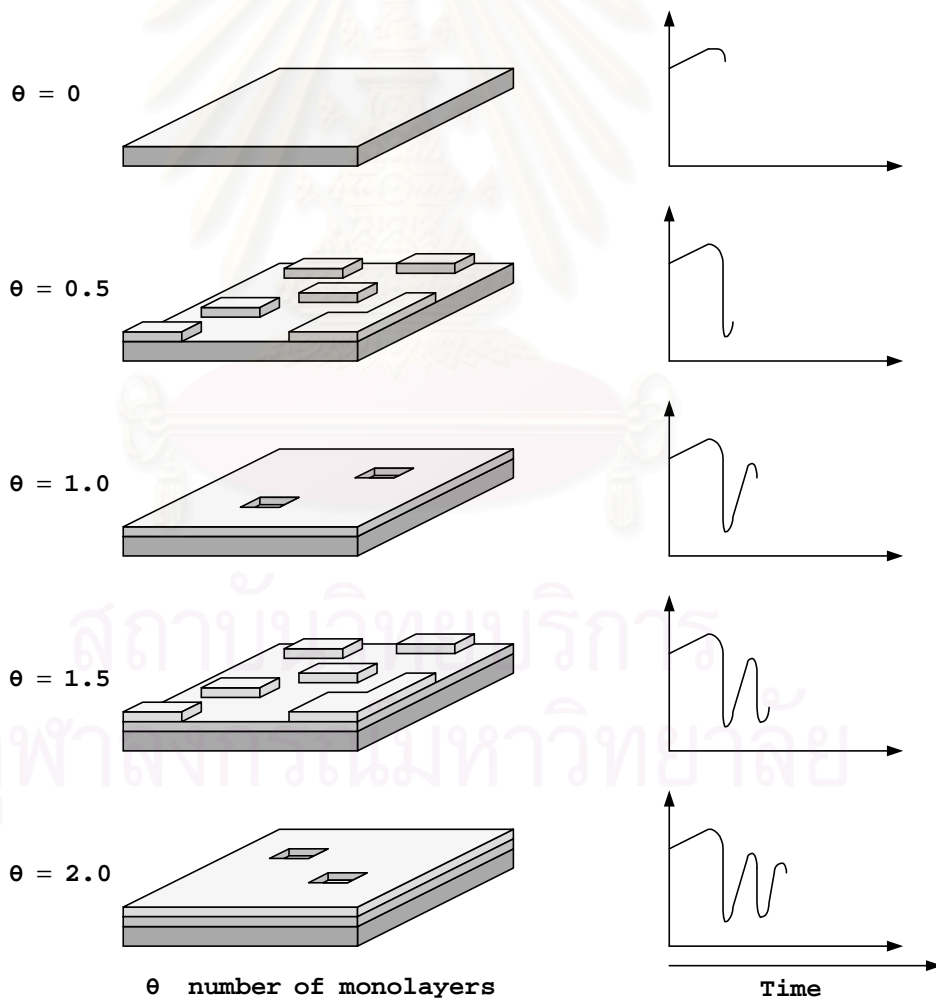
ตัวอย่าง จำนวนชั้นผลึกของแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่สังเกตได้เท่ากับ 10 ML ใช้เวลา 20 วินาที

$$\text{Growth Rate of GaAs (ML/s)} = \frac{10 \text{ ML}}{20 \text{ sec}} = 0.5 \text{ ML/s}$$



รูปที่ 2.6 แผนภาพ RHEED แสดงความเข้มของ Specular Beam

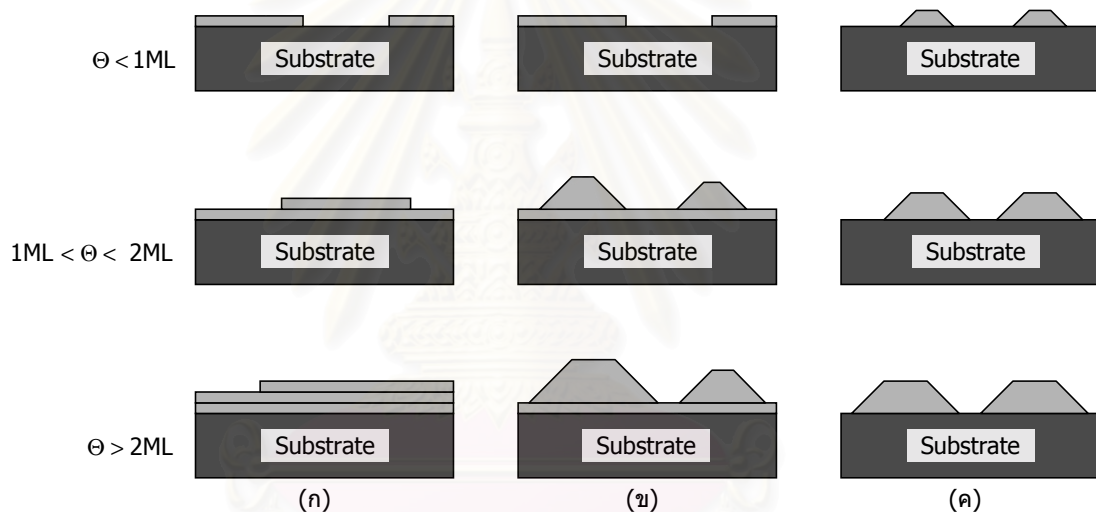
(ก) สว่างมาก (ข) สว่างน้อย



รูปที่ 2.7 RHEED Oscillation ที่เกิดขึ้นเมื่อเริ่มปลูกผลึกแคลเดียมอาร์เซไนด์

2.3 รูปแบบของการเกิดผลึก (Epitaxial Growth Modes)

การปลูกผลึกอพิแทกซ์ซึ่งจะมีรูปแบบที่สังเกตได้จากการเกิดเป็นชั้นผลึกที่มีความแตกต่างกันอยู่ 3 รูปแบบ คือ Frank van-der-Merwe (layer-by-layer), Stranski-Krastanov (layer plus island) และ Volmer-Weber (island) ดังในรูปที่ 2.8 [6] แต่ละรูปแบบของการเกิดผลึกจะอธิบายถึงคุณสมบัติของจำนวนการตกผลึกที่แตกต่างกัน ซึ่งการเกิดผลึกแต่ละรูปแบบนั้นจะขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุที่ใช้ และเงื่อนไขของการปลูกผลึกความแตกต่างของการเกิดผลึกมีประโยชน์และสำคัญมากในความเข้าใจของการปลูกผลึกเพื่อนำความรู้ที่ได้ไปทำการวิเคราะห์หาเงื่อนไขการปลูกผลึกเพื่อให้ได้ผลึกที่มีคุณภาพดี



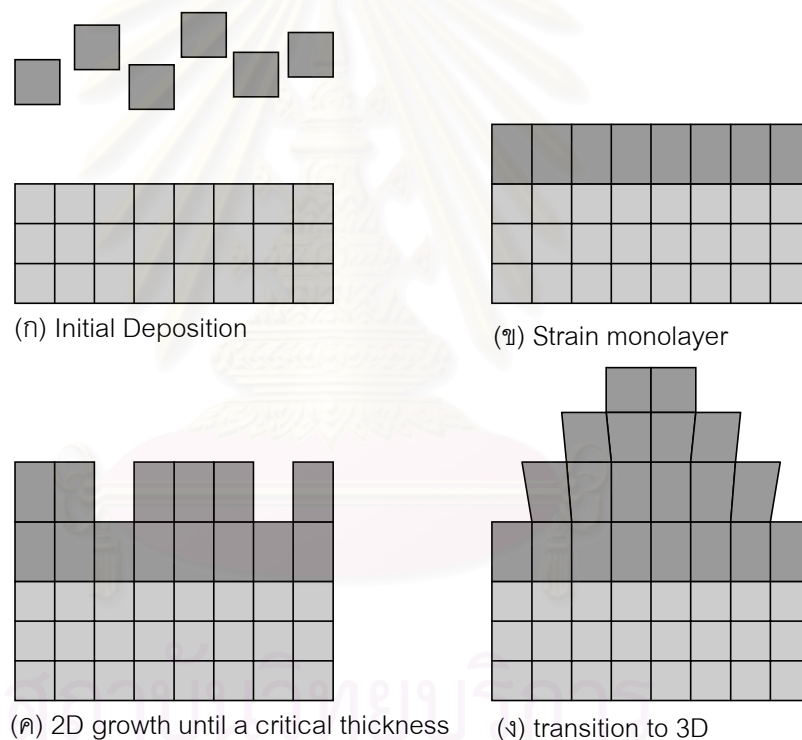
รูปที่ 2.8 รูปแบบของการเกิดผลึกอพิแทกซ์ (ก) Frank van-der-Merwe (ข) Stranski-Krastanov (ค) Volmer-Weber

2.3.1 Frank van-der-Merwe

การเกิดผลึกจะเกิดเป็นชั้นใน 2 มิติ (2D layers) ในระบบนี้ความเครียดที่เกิดขึ้นจากการไม่เข้ากันของโครงผลึกจะเกิดขึ้นเพียงไม่กี่ชั้นของการปลูกผลึก ชั้นแรกจะมีการยึดแน่นโดยค่าของโครงผลึกจะถูกบังคับให้เท่ากับค่าโครงผลึกแผ่นฐาน อย่างไรก็ตามสำหรับชั้นต่อมาแรงอัดระหว่างอะตอมจะมีค่าลดลงจนกระทั่งสารที่ทำการปลูกมีค่าคงที่โครงผลึกเท่ากับสารนั่นเอง โดยปราศจากความเครียดการปลูกในลักษณะนี้จะเกิดในเงื่อนไขที่ว่าค่าคงที่โครงผลึกมีความแตกต่างกันน้อยมาก

2.3.2 Stranski-Krastanov

การเกิดผลึกจะมีลักษณะเป็นเกาะ 3 มิติ (3D Island) เกิดจากค่าคงที่ของโครงผลึกมีความแตกต่างกันมากการเกิดขึ้นในลักษณะนี้จะปรากฏขึ้นสำหรับการปลูกอินเดียมอาร์เซไนด์บนแผ่นฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์นั้นจึงมีความสำคัญ สำหรับการศึกษานี้เป็นอันมาก ดังในรูปที่ 2.9 จากรูปแสดงให้เห็นขั้นตอนการเกิดผลึก คือ ในตอนเริ่มต้นนั้นเริ่มทำการปลูกผลึกอพิแทกซีที่มีค่าคงที่โครงผลึก a_1 บนแผ่นฐานที่มีค่าคงที่โครงผลึก a_0 ซึ่งมีค่าคงที่โครงผลึกน้อยกว่า สารที่ทำการปลูกผลึกจะเกิดความเครียด



รูปที่ 2.9 รูปแบบของการเกิดผลึกอพิแทกซี แบบ Stranski-Krastanov

ขึ้นจนถึงค่าความหนาวิกฤต (Critical Thickness, t_c) ที่ความหนามากกว่าความหนาวิกฤต ค่าความเครียดจะมีค่ามากเกินกว่าจะรักษาความเป็นชั้นผลึกใน 2 มิติ ต่อไปได้ ชั้นสารที่ทำการปลูกผลึกจะเกิดการโค้งงอขึ้น (Buckles) เพื่อลดค่าความเครียดลง ค่าความเครียดถูกทำให้ลดลงที่ขอบของเกาะ (Island) และกลายเป็นเกาะ 3 มิติ (3D Island)

2.3.3 Volmer-Weber

ในการผลึกรูปแบบนี้ การเกิดผลึกจะไม่เป็นชั้น 2 มิติ (2D layers) จะกลายเป็นเกาะ 3 มิติ (3D Island) เพียงอย่างเดียวเท่านั้น โดยเกิดขึ้น เนื่องจากอะตอมที่ตกผลึกต่างยึดกันแน่นมากกว่าแผ่นฐาน การเกิดผลึกในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นเมื่อสารที่ตกผลึกนั้นเป็นสารที่ต่างชนิดกัน เช่น โลหะปลูกบนออกไซด์

2.4 ระบบสำหรับการปลูกผลึกจากลำโมเลกุล

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยเป็นเครื่องมือที่สร้างขึ้นโดยบริษัท Riber 32P ประกอบด้วยห้องสำหรับบรรจุแผ่นฐาน (Loading Chamber) ห้องสำหรับเตรียมแผ่นฐาน (Introduction Chamber) ห้องสำหรับเคลื่อนย้าย (Transfer Chamber) และห้องปลูกผลึก (Growth Chamber) โดยแต่ละห้องจะมีประตูปิดเปิด (Gate Valve) เพื่อแยกบรรยากาศของแต่ละห้อง และมีปั๊มชนิดไอออน (Ion Pump) และติตาเนียมซับลิเมชัน (Titanium Sublimation Pump) ห้องละหนึ่งคู่ ยกเว้นห้องบรรจุแผ่นฐาน แต่ละห้องจะมีความดันบรรยากาศแตกต่างกันขึ้นกับประสิทธิภาพการทำงานของปั๊ม และสภาพของห้อง โครงสร้างระบบปลูกผลึกจากลำโมเลกุล ดังในรูปที่ 2.10 ห้องปลูกผลึกยังประกอบด้วยสารที่ใช้ทำการปลูกผลึก (Ga, In, As, Al, Si, Be, และ P) และระบบตรวจวัดผลึกในระหว่างทำการปลูกผลึก (Reflective High Energy Diffraction System : RHEED System) โดยหลักการใช้ลำอิเล็กตรอนพุ่งตรงสู่ผิวหน้าแผ่นฐานก็จะเกิดการสะท้อนและการเลี้ยวเบนของลำอิเล็กตรอนฉายไปบนฉากฟอสฟอรัส เพื่อตรวจเช็คสภาพผิวหน้าว่าเป็นอย่างไร ณ เวลานั้น

การควบคุมกระบวนการสร้างชั้นผลึกทำได้โดยผ่านคอมพิวเตอร์หน่วยควบคุมเป็นระบบควบคุมแบบ FIC11 ของบริษัท EURO THERM ซึ่งเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ตอนุกรม RS232 ระบบควบคุม FIC11 ทำหน้าที่ควบคุมหน่วยจ่ายกำลัง (Power Supply Unit) ของเซลล์ของธาตุแต่ละชนิดเพื่อให้เข้าแต่ละอันมีอุณหภูมิคงที่ตามที่กำหนดไว้ ควบคุมอุณหภูมิของหัวจับบอล็อก (Manipulator) ในห้องปลูกผลึก ควบคุมการเปิดปิดชัตเตอร์ และวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น อุณหภูมิ และความดัน ในการปลูกผลึกสามารถทำได้โดยการสร้างโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิและชัตเตอร์ของเซลล์แต่ละเซลล์ให้เปิดปิดตามเวลาที่ถูกกำหนดไว้

เครื่องมือวัดอื่นๆ ที่ประกอบอยู่ในระบบปลูกผลึกรุ่นนี้ได้แก่

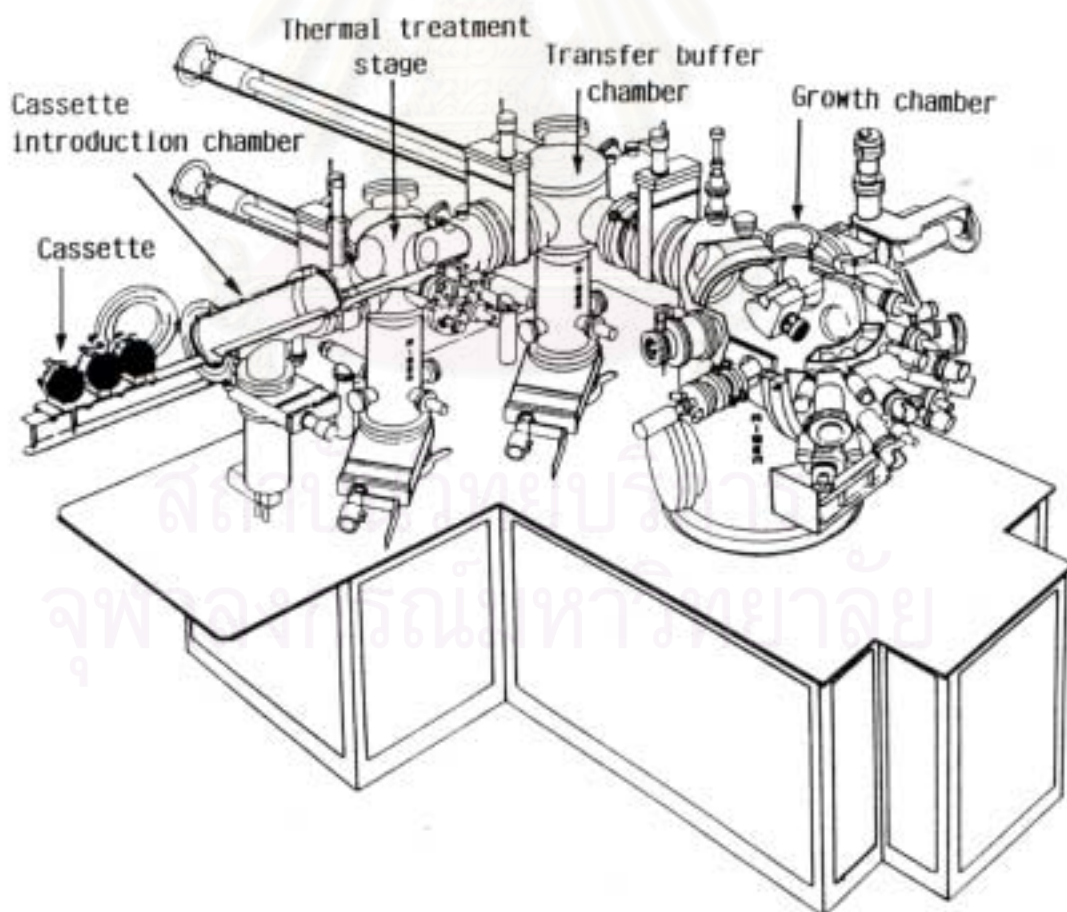
เครื่องวิเคราะห์มวล (Mass Spectroscope) สำหรับตรวจดูบรรยากาศของห้องปลูกผลึกว่าประกอบไปด้วยธาตุอะไรบ้างที่ตกค้างอยู่

ระบบสร้างแผนภาพ (RHEED Pattern System) สำหรับตรวจดูสภาพพื้นผิวของผลึกขณะทำการปลูกว่ามีคุณภาพเป็นผลึกดีหรือไม่ อุปกรณ์ของระบบนี้ประกอบด้วยปั๊มอเล็กตรอนพร้อมระบบไฟก๊าส และฉากรับแผนภาพการแทรกสอดของลำอิเล็กตรอน

ปั๊มที่ใช้อยู่ในระบบการปลูกผลึกนี้ประกอบด้วย

ปั๊มไดอะแฟรม (Diaphragm Pump) เป็นปั๊มที่ทำงานโดยปราศจากน้ำมันหล่อลื่นป้องกันมิให้น้ำมันปนพลัดเข้าไปในระบบสุญญากาศ ใช้สร้างสภาวะสุญญากาศจากความดันบรรยากาศสู่ระดับประมาณ 10^{-3} Torr เป็นปั๊มที่สามารถเคลื่อนย้ายไปมาเพื่อใช้กับห้องทั้งสี่ได้ จะใช้ในกรณีที่ต้องการเริ่มสร้างสภาวะสุญญากาศจากความดันบรรยากาศ หลังจากปล่อยอากาศเข้าไปในแต่ละห้อง

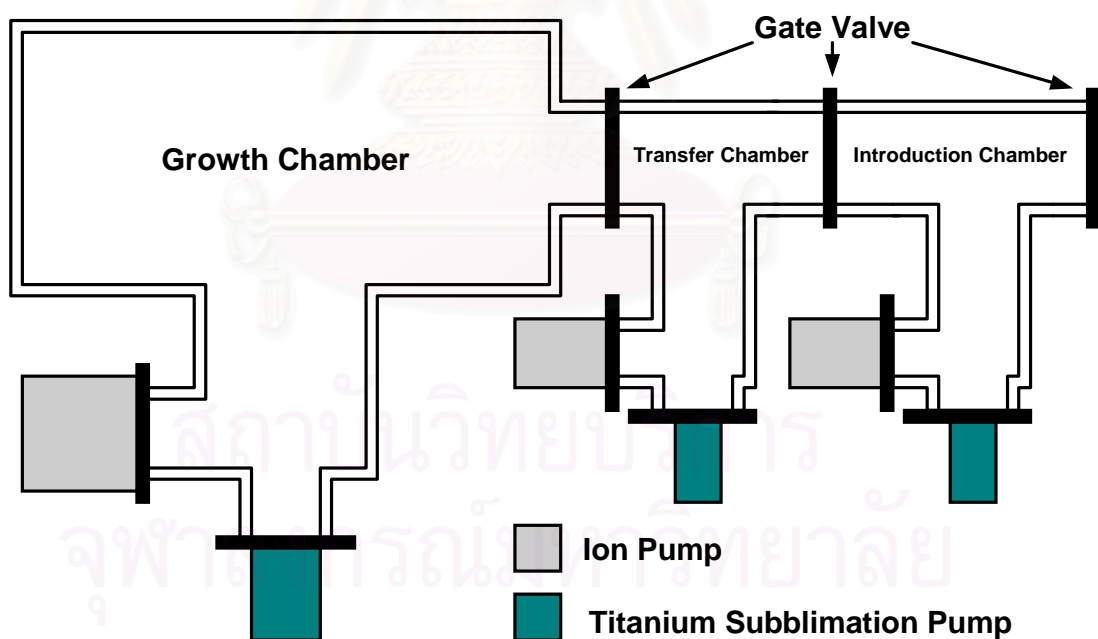
ปั๊มดูดซับ (Absorption Pump) เป็นปั๊มที่ใช้สร้างสภาวะสุญญากาศต่อจากปั๊มไดอะแฟรม ปั๊มนี้อาศัยวัสดุดูดซับอะตอมของก๊าซซึ่งจะทำงานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นจึงต้องเติมไนโตรเจนเหลวให้แก่ปั๊มตลอดเวลาที่ใช้งานปั๊มนี้สร้างสภาวะสุญญากาศได้ตั้งแต่ 10^{-3} ถึง 10^{-6} Torr



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของระบบปลูกผลึกจากลำโมเลกุล RIBER 32P

ปั๊มไอออน (Ion Pump) จะทำให้อะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซแตกตัวเป็นไอออน และถูกดึงดูดมาที่ขั้วด้วยสนามไฟฟ้า ปั๊มนี้สร้างสภาวะสุญญากาศได้ตั้งแต่ 10^{-3} ถึง 10^{-12} Torr อย่างไรก็ตาม อัตราการดูดก๊าซที่น้อยมาก ทำให้ดึงอากาศออกได้ช้า หากใช้ที่ความดันใกล้เคียง 10^{-3} Torr กับห้องที่มีปริมาตรใหญ่ๆ จะใช้เวลานานมาก จะทำให้ปั๊มได้รับความเสียหาย ดังนั้นจึงต้องใช้ปั๊มดูดซับดึงความดันบรรยากาศลงให้ได้มากที่สุดก่อนจะเปิดใช้ปั๊มไอออน มีลักษณะการติดตั้งตามรูปที่ 2.11

ปั๊มติตาเนียมซับลิเมชัน (Titanium Sublimation Pump) จะปล่อยอะตอมของติตาเนียมออกไปด้วยหลอดความร้อนติตาเนียม อะตอมของติตาเนียมจะไปจับเอาอะตอมของก๊าซอื่นๆ เกิดเป็นสารประกอบ และเคลื่อนไปเกาะที่อุณหภูมิต่ำ เช่น ที่ผนังห้องปลูกผลึก หรือ ถูกดูดออกโดยปั๊มไอออน เพื่อให้ปั๊มนี้ทำงานได้ดีจำเป็นต้องป้อนไนโตรเจนเหลวแก่ผนังห้องปลูกผลึก ปั๊มนี้จะถูกปิดในขณะทำการปลูกชั้นผลึก มีลักษณะการติดตั้งตามรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โครงสร้างปั๊มที่ติดตั้งอยู่ในระบบ MBE

2.5 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าวิธี van der Pauw

ในการทำวิจัยหรือพัฒนาสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำให้มีประสิทธิภาพ ควรที่จะต้องรู้คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุนั้นว่าเป็นอย่างไร พารามิเตอร์ที่สำคัญที่ควรจะต้องรู้ ได้แก่ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity : ρ) ค่าความคล่องตัว (Mobility : μ) และค่าความหนาแน่นพาหะ (Carrier Concentration : n) ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้มีวิธีวัดได้หลายวิธี ในจำนวนนั้นวิธีการวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์เป็นที่นิยมมากที่สุดวิธีหนึ่ง [10] แต่การวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ให้ได้ค่าที่ถูกต้องกับความเป็นจริงยังมีวิธีการ และข้อควรระวัง อาทิ เช่น การสร้าง และขนาดของขั้วไฟฟ้า รูปทรงชิ้นงาน และอื่นๆ เทคนิคของ L.J. van der Pauw เป็นที่ยอมรับกันว่าให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องเป็นที่น่าพอใจ และยังสามารถใช้วัดชิ้นงานรูปทรงแปลกๆ (Arbitrary Shape) ได้ดี

2.5.1 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect)

ปรากฏการณ์ฮอลล์ได้พบครั้งแรกในปีในปี 1879 เมื่อ Edwin H. Hall ได้ค้นพบว่าเกิดแรงดันขึ้นที่วัสดุ เมื่อป้อนกระแสไหลผ่านวัสดุนั้นในสภาพที่มีสนามแม่เหล็ก ผลที่ได้อธิบายด้วย Quantum Physics

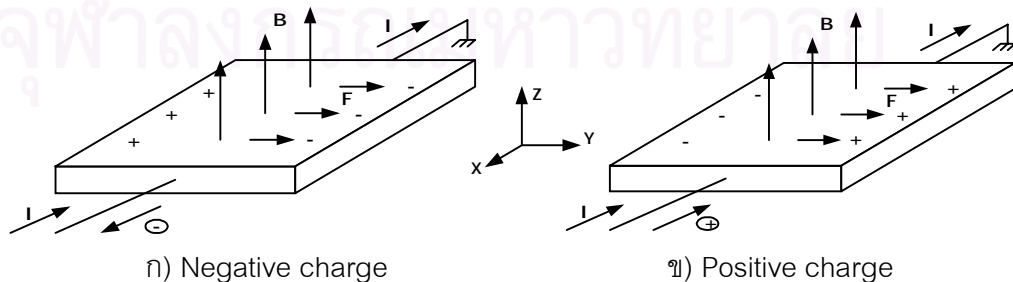
$$\vec{F} = e (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (7)$$

เมื่อ e คือ ประจุ (C)

v คือ ความเร็วของประจุที่เคลื่อนที่ (m/s)

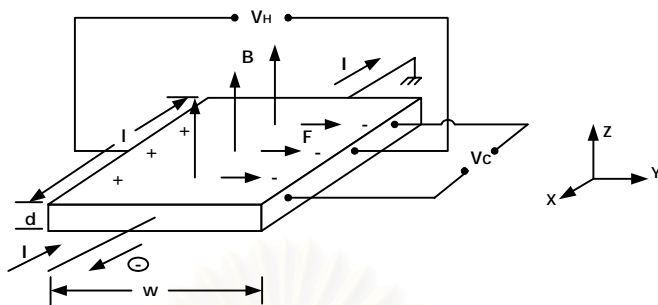
B คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (T), (Wb/m^2), (Gauss)

ซึ่งจะทำให้เกิดการ “pile up” ของประจุที่อยู่ในวัสดุนั้นก็ คือ ทำให้ประจุบวก และประจุลบแยกออกจากกันอันเนื่องมาจากสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสามารถ อธิบายได้ด้วยรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การเกิด “pile up” ของประจุ

ถ้าเราต้องการทราบค่าความคล่องตัว (Mobility) กับค่าความหนาแน่นพาหะ (Carrier Concentration) ของวัสดุจะอธิบายได้จาก Hall-bar ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แผนภาพโครงสร้าง Hall-bar

พิจารณาให้พาหะนำไฟฟ้าเป็นอิเล็กตรอน และเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v ในทิศทางบวก x และให้ B ทิศทางบวก z ผลลัพธ์จะได้สนามไฟฟ้าเกิดขึ้นในทิศทางบวก y

$$\vec{F} = -e (\vec{v}_x \times \vec{B}_z) \tag{8}$$

$$\vec{F} = ev_x B_z \vec{a}_y \tag{9}$$

- เมื่อ F คือ แรง (N)
- v คือ ความเร็ว (cm/s)
- B คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Wb/cm^2)

ต่อไปพิจารณา ความหนาแน่นของกระแส

$$\vec{J}_x = - ne\vec{v}_x \tag{10}$$

$$\vec{v}_x = \frac{-\vec{J}_x}{ne} \tag{11}$$

จาก
$$\vec{F}_y = e\vec{E}_y = ev_x B_z \vec{a}_y = e \left(\frac{-\vec{J}_x}{ne} \right) B_z \vec{a}_y \tag{12}$$

จาก
$$R_H = \frac{-1}{ne} \tag{13}$$

เมื่อแทน (11) ลง (12) จะได้

$$R_H = \left(\frac{E_Y}{J_x B_z} \right) \quad (14)$$

เมื่อ n คือ ความหนาแน่นของประจุพาหะ (cm^{-3})

E คือ สนามไฟฟ้า (V/m)

J คือ ความหนาแน่นกระแส (A/cm^2)

ค่าความคล่องตัวจะคิดในทิศทางบวก x จะได้ว่า

$$\mu = \frac{v_x}{E_x} \quad (15)$$

เมื่อ
$$\vec{v}_x = \frac{-J_x}{ne} \vec{a}_x \quad (16)$$

จะได้
$$\mu = \left(\frac{-J_x}{ne} \right) \left(\frac{1}{E_x} \right) \quad (17)$$

$$= \left(\frac{J_x}{E_x} \right) \left(\frac{E_Y}{J_x B_z} \right) = \left(\frac{E_Y}{E_x} \right) \left(\frac{1}{B_z} \right) \quad (18)$$

เมื่อ
$$V_c = E_x l \quad (19)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
$$V_H = E_Y w \quad (20)$$

$$\mu = \left(\frac{V_H}{w} \right) \left(\frac{1}{V_c} \right) \left(\frac{1}{B_z} \right) \quad (21)$$

เมื่อ V คือ ศักย์ไฟฟ้า (Volt)

l คือ ความยาว (cm)

w คือ ความกว้าง (cm)

$$\text{Hall Mobility} \quad \mu_H = \mu \quad (22)$$

$$R_H = \frac{-1}{n_H e} \quad (23)$$

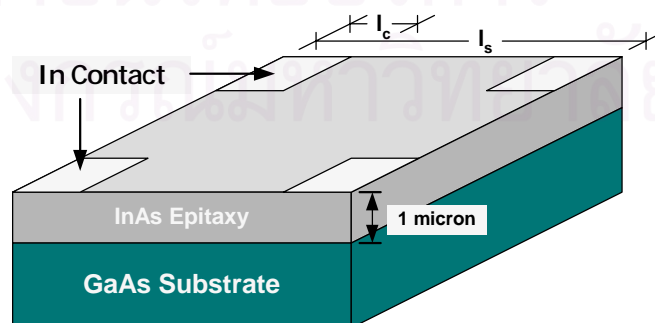
$$\text{Hall Concentration} \quad n_H = \frac{-1}{R_H e} \quad (24)$$

2.5.2 ทฤษฎีของ van der Pauw

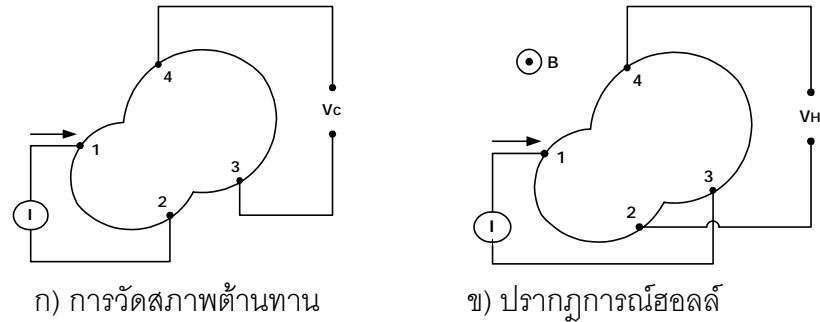
วิธีการวัดใช้วิธีของ van der Pauw ในการแก้ปัญหาเรื่องของชิ้นงานที่ทำขั้วโลหะไม่สมมาตรกัน (Arbitrary Shape) เนื่องจากการทำขั้วโลหะให้สมมาตรนั้นทำได้ไม่ถนัดนัก ซึ่งวิธีนี้ยังเหมาะกับการใช้วัดชิ้นงานที่เป็นฟิล์มบาง (Thin Film) แบบอพิแทกซีที่ปลูกบนแผ่นฐานได้อีกด้วย ถ้าชิ้นฟิล์มบางที่มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าควรใช้แผ่นฐานชนิด Semi-Insulating [10] สำหรับข้อควรคำนึงในวิธีของ van der Pauw มีสิ่งที่ต้องปฏิบัติดังนี้

1. ขั้วโลหะต้องเป็นโอห์มมิก (Ohmic Contact) กับชิ้นงาน
2. ทำขั้วต่อโลหะที่ผิวของชิ้นงาน 4 จุด และแต่ละขั้วควรมีพื้นที่เล็กที่สุด (เล็กกว่าชิ้นงานมากๆ)
3. ชิ้นงานควรมีความราบเรียบ ความหนาสม่ำเสมอ และไม่มีรูพรุน

วิธีวัดแบบนี้ใช้คำนวณหาค่าสภาพต้านทานแผ่น (Sheet Resistivity) หรือ ความหนาแน่นพาหะแผ่น (Sheet Carrier Concentration) แต่วิธีนี้ต้องการผิวหน้าทีเรียบแสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ชิ้นงานที่นำไปวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธี van der Pauw



รูปที่ 2.15 วิธีการวัดแบบ van der Pauw สำหรับชิ้นงานรูปทรงที่ไม่สมมาตร

พิจารณารูปที่ 2.15(ก) เริ่มแรกในสภาพที่ยังไม่ป้อนสนามแม่เหล็ก ให้กระแสไฟฟ้า I_{12} ไหลผ่านระหว่างขั้วต่อ 1 ไปสู่ 2 และวัดแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วต่อ 3 และ 4 ให้ค่า V_{34} จะได้ค่า R_{12} เช่นเดียวกันถ้าให้กระแสไฟฟ้า I_{34} ไหลผ่านขั้วต่อ 3 ไปสู่ 4 แล้ววัดแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วต่อ 1 และ 2 ได้ค่า V_{12} จะได้ค่า R_{12} และ R_{34} ให้นิยามของความต้านทาน $R_{12,34}$ ดังสมการที่ 25

$$R_{12,34} = V_{34,12}/I_{12,34} \quad (25)$$

ต่อจากนั้น ให้กระแสไหลไฟฟ้า I_{23} จากขั้ว 2 ไปสู่ 3 และวัดแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วต่อ 4 และ 1 ให้ค่า V_{41} เช่นเดียวกันถ้าให้กระแสไฟฟ้า I_{41} ไหลผ่านขั้วต่อ 4 ไปสู่ 1 และวัดแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วต่อ 2 และ 3 ได้ค่า V_{23} จะได้ค่า R_{23} และ R_{41} ให้นิยามของความต้านทาน $R_{23,41}$ ดังสมการที่ 26

$$R_{23,41} = V_{41,23}/I_{23,41} \quad (26)$$

ดังนั้นค่าสภาพต้านทานแผ่นหาได้จากสมการที่ 27 ส่วนค่า f คือ ตัวเลขที่ใช้คูณเพื่อแก้ไขความไม่สมมาตร หรือ สม่่าเสมอของชิ้นงาน f เป็นฟังก์ชันของ $R_{12,34}$ และ $R_{23,41}$ ตามสมการที่ 28 และสมการที่ 29

$$\rho = \left(\frac{\pi d}{\ln 2} \right) \left[\frac{R_{12,34} + R_{23,41}}{2} \right] f \quad (27)$$

$$\left[\frac{(Q-1)}{(Q+1)} \right] = \left(\frac{f}{\ln 2} \right) \cosh^{-1} \left[\left(\frac{1}{2} \right) \exp \left(\frac{\ln 2}{f} \right) \right] \quad (28)$$

ซึ่ง
$$Q = \frac{R_{12,34}}{R_{23,41}} \quad (29)$$

$$f = \left(\frac{\ln 0.25}{[\ln(0.5 + \alpha) + \ln(0.5 - \alpha)]} \right) \quad (30)$$

และ
$$Q = \left(\frac{\ln(0.5 - \alpha)}{\ln(0.5 + \alpha)} \right) \quad (31)$$

เมื่อ
$$-\frac{1}{2} < \alpha < \frac{1}{2} \quad (32)$$

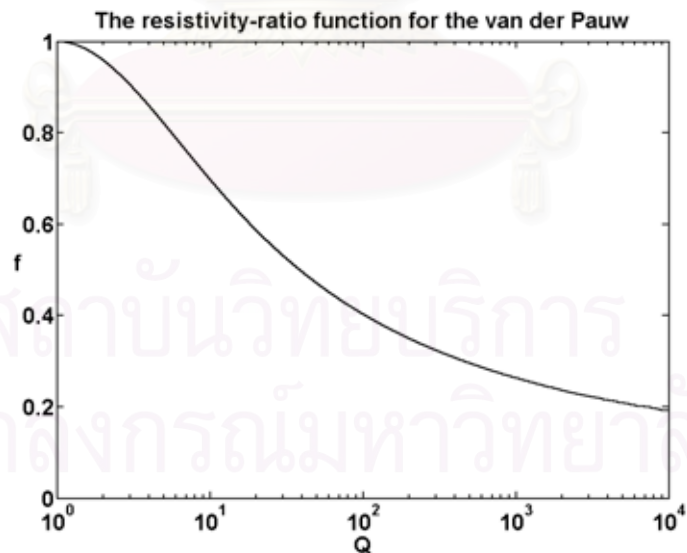
เมื่อ ρ คือ สภาพต้านทานแผ่น $(\Omega\text{-cm})$

d คือ ความหนาของชั้นอีพ็อกซี (cm)

R คือ ความต้านทานของชั้นอีพ็อกซี (Ω)

α คือ ค่าคงตัวที่ทำให้สมการที่ 30, 31 เป็นจริง

จะได้กราฟความสัมพันธ์ Q กับ f ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Q กับ f

ต่อไปป้อนสนามแม่เหล็กในทิศทางตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน ฉีดกระแสไฟฟ้า I_{13} จากขั้ว 1 ไปขั้ว 3 และวัดแรงดันฮอลล์ (Hall Voltage : V_H) ที่ขั้ว 2 และ 4 ได้ค่า V_{24} และ คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ (Hall Coefficient : R_H) เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความคล่องตัว (Mobility) และค่าความหนาแน่นพาหะ (Carrier Concentration) เป็นไปตามสมการต่อไปนี้

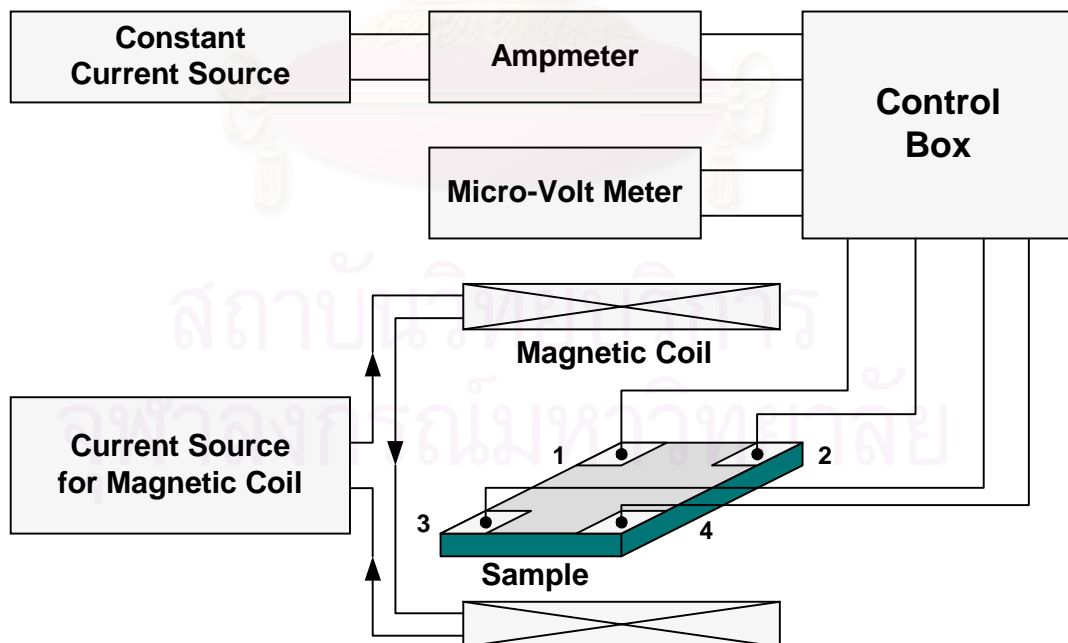
$$\text{Hall Coefficient} \quad R_H = \frac{d}{B} \left[\frac{R_{13,24} + R_{24,13}}{2} \right] \quad (33)$$

$$\text{Hall Mobility} \quad \mu_H = \left[\frac{R_H}{\rho} \right] \quad (34)$$

$$\text{Hall Carrier Concentration} \quad n_H = \frac{1}{eR_H} \quad (35)$$

2.6 โครงสร้างของระบบวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธี van der Pauw

โครงสร้างของระบบวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ที่สร้างขึ้น ดังในรูปที่ 2.17 ประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของระบบวัดด้วยวิธี van der Pauw

1. ชุดกำเนิดสนามแม่เหล็ก (Magnetic Coil) สามารถควบคุมความเข้มของสนามแม่เหล็กด้วยกระแสไฟตรง ปรับได้ 0-3000 Gauss มีจานใส่ชิ้นงาน และ Probe ปรับตำแหน่งได้อิสระ 4 เข็มสำหรับกดลงบนขั้วต่อไฟฟ้าของชิ้นงาน
2. กล่องควบคุม (Control Box) ภายในมีแหล่งจ่ายกระแสคงที่ (Constant Current) สูงสุด 1 mA มีปุ่มปรับสวิตช์ควบคุมการฉีดกระแส และวัดแรงดันไปสู่อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ บนชิ้นงาน
3. แหล่งจ่ายไฟตรง (DC Power Supply) 2 ตัว ตัวหนึ่งจ่าย 9 โวลต์ ให้กับกล่องควบคุม และอีกตัวหนึ่งจ่าย 0-40 โวลต์ ให้กับชุดกำเนิดสนามแม่เหล็ก
4. Ammeter ใช้วัด Constant Current
5. Micro-Voltmeter ใช้วัด แรงดันที่ตกคร่อมชิ้นงาน เมื่อมีการฉีดกระแสให้กับชิ้นงาน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

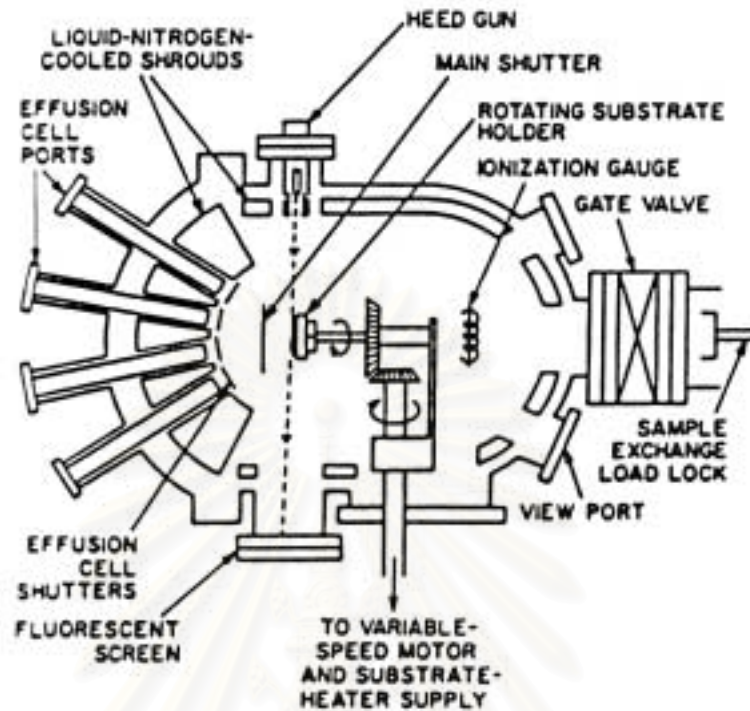
การทดลอง

3.1 การเตรียมแผ่นฐาน (Sample Preparation)

แผ่นฐานที่ใช้ทำการศึกษานี้เป็นผลึกเดี่ยวแกเลียมอาร์เซไนด์ที่มีคุณสมบัติกึ่งฉนวน ซึ่งเจือปนด้วย CrO และมีทิศทางผิวหน้าในระนาบ (100) (Semi-Insulating GaAs (100)) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ตัดออกเป็น 4 ส่วนใช้เพียง 1 ส่วนติดลงบนบล็อกโมลิบดีนัม (Molybdenum Block) โดยใช้อินเดียมหลอมเหลวเป็นตัวยึดติดแผ่นฐานบนบล็อกด้วยแรงตึงผิวของอินเดียมแล้วนำไปใส่รถเลื่อน (Trolley) เพื่อนำเข้าไปบรรจุไว้ในห้องบรรจุแผ่นฐาน (Loading Chamber) หลังจากนั้นปิดแล้วดูดอากาศจนกระทั่งเป็นสุญญากาศต่ำกว่า 10^{-3} Torr โดยใช้ปั๊มไดอะแฟรม (Diaphragm Pump) ต่อด้วยปั๊มดูดซับ (Absorption Pump) จนสภาวะสุญญากาศต่ำกว่า 10^{-6} Torr จึงค่อยเปิดประตู (Gate Valve) ระหว่างห้องบรรจุแผ่นฐานกับห้องสำหรับเตรียมแผ่นฐาน จากนั้นแผ่นฐานจะถูกส่งผ่านเข้าสู่ห้องเตรียมแผ่นฐาน แล้วใช้ก้านจับระบบแม่เหล็ก (Magnetic Holder) จับเอาบล็อกโมลิบดีนัมที่มีแผ่นฐานติดอยู่ออกจากตัวรถ แล้วนำไปใส่ไว้ที่ Pre Heater หรือ เรียกอีกอย่างว่า Degas Heater อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นไปสูงถึง 450°C และคงที่ไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งการทำแบบนี้จะช่วยขจัดไอน้ำ และอนุภาคต่างๆ ออกจากผิวหน้าแผ่นฐาน ก่อนที่จะนำแผ่นฐานไปทำการปลูกผลึก ขั้นตอนนี้จะต้องทำเสมอก่อนเริ่มทำการปลูกผลึกทุกครั้ง หลังจากนั้นแผ่นฐานจะถูกส่งต่อไปเก็บไว้ที่ห้องเคลื่อนย้าย และเข้าห้องปลูกผลึกตามลำดับ

3.2 การเตรียมห้องปลูกผลึก

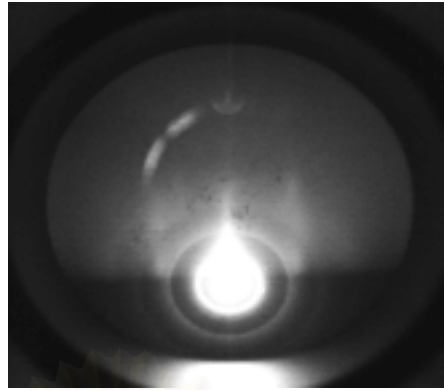
ก่อนที่จะทำการปลูกผลึกนั้นมีความจำเป็นที่จะต้องเตรียมห้องปลูกผลึกให้พร้อม สิ่งแรกที่ต้องทำ คือ การทำความสะอาดเซลล์ (Degas Cell) ก่อน โดยการทำเช่นนี้เพื่อป้องกันสารเจือปนที่อาจจะเกาะบนหรือรอบๆ เซลล์จากสิ่งสกปรกที่มาจากชิ้นงาน โดยการทำทำความสะอาดเซลล์ที่เหมาะสมก่อนการปลูกผลึกนั้นจะตั้งอุณหภูมิไว้สูงกว่าประมาณ $40-50^{\circ}\text{C}$ จากอุณหภูมิที่ต้องการใช้ปลูกเป็นเวลา 10 นาที ขั้นตอนการทำทำความสะอาดเซลล์ คือ Main Shutter ปิดอยู่ และเปิด Shutter ของเซลล์แกเลียม และอินเดียม เพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปที่ 940°C และ 840°C ตามลำดับ หลังจากเวลาผ่านไป 10-20 นาที Shutter ของทั้งสองเซลล์จะปิด และ Main Shutter จะถูกเปิดเพื่อ Degas Shutter ของเซลล์ ส่วนประกอบภายในห้องปลูกผลึก แสดงดังรูปที่ 3.1 หลังจากขั้นตอนการทำทำความสะอาดเซลล์เสร็จแล้วอุณหภูมิของเซลล์จะถูกลดลงไปยังอุณหภูมิที่ต้องการปลูก เซลล์แกเลียมจะถูกลดลงไปเป็น 890°C และเซลล์อินเดียมที่อุณหภูมิ 800°C



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบภายในห้องปลูกผลึก

3.3 การกำจัดออกไซด์ออกจากผิวหน้าแผ่นฐาน

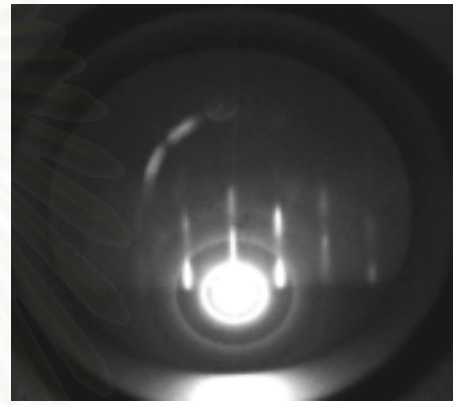
เมื่อแผ่นฐานที่ใช้ทำการปลูกได้ถูกนำเข้าสู่ห้องปลูกผลึกเป็นครั้งแรกจะยังคงมีออกไซด์ (Native Oxide) บนผิวหน้าอยู่ โดยออกไซด์นี้จะไปรบกวนในขั้นตอนการปลูกผลึกเนื่องจากออกไซด์เป็นวัสดุอสัณฐาน (Amorphous) ดังนั้นสารใดๆ ที่ทำการปลูกบนออกไซด์จะเป็นวัสดุอสัณฐานไปด้วย ก่อนที่จะปลูกผลึกบนแผ่นฐาน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องกำจัดออกไซด์เหล่านี้ ออกก่อนโดยขั้นตอนนี้เรียกว่า Oxide Desorption และทำในห้องปลูกผลึก เริ่มต้นเพิ่มอุณหภูมิเราจะสังเกตเห็นแผนภาพการแทรกสอดลำอิเล็กตรอน (RHEED Pattern) เป็นครึ่งวงกลมที่ไม่ชัดเจน ดังในรูปที่ 3.2(ก) สถานะนี้จะต้องมีความดันไอของอาร์เซนิกตกอยู่ (As rich) ตลอด เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปแผนภาพการแทรกสอดลำอิเล็กตรอนจะเปลี่ยนเป็นเส้น ดังในรูปที่ 3.2(ข) แล้วก็เพิ่มอุณหภูมิขึ้นจนกระทั่งออกไซด์หลุดออกจากผิวหน้า ภาพการแทรกสอดลำอิเล็กตรอนจะเปลี่ยนแปลงเป็น ดังรูปที่ 3.2(ค) ทำการรักษาอุณหภูมิของแผ่นฐานไว้ที่อุณหภูมินี้ประมาณ 10-20 นาที เพื่อให้แน่ใจว่ากำจัดออกไซด์ที่ผิวหน้าของแผ่นฐานจนหมด พร้อมทั้งจะเริ่มทำการปลูกชั้นต่อไป



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการกำจัดออกไซด์ (ก) เริ่มเพิ่มอุณหภูมิลำโพงเริ่มหลุดออกจากผิวหน้าชิ้นงาน (ข) อุณหภูมิที่ทำให้ออกไซด์หลุดจากผิวหน้า (ค) หลังจากถึงอุณหภูมิลำโพงทำให้ออกไซด์หลุดทิ้งไว้ 20 นาที

3.4 การปลูกชั้นแกเลียมอาร์เซไนด์บัฟเฟอร์ (GaAs Buffer Layer Growth)

การกำจัดออกไซด์ไม่ใช่วิธีการเพียงอย่างเดียวในการเตรียมผิวหน้าของแผ่นฐานที่ต้องการ ก่อนจะเริ่มทำการปลูกชั้นอีพิแทกซีอินเดียมอาร์เซไนด์จริงๆ แล้วหลังจากกำจัดออกไซด์แล้ว ผิวหน้าของแผ่นฐานแกเลียมอาร์เซไนด์ยังมีผิวที่หยาบจึงต้องทำการปลูกชั้นแกเลียมอาร์เซไนด์บัฟเฟอร์ เพื่อปรับปรุงให้ผิวหน้าแผ่นฐานมีความสมบูรณ์ของผลึกมากขึ้น โดยค่าอัตราการปลูกผลึก (Growth Rate) ความหนาที่ต้องการปลูก (Thickness) เวลาที่ใช้ในการปลูก และค่าคงที่โครงผลึก (Lattice Constant) มีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการนี้

$$t = \frac{d}{GR \times a_0} \quad (36)$$

เมื่อ	t	คือ เวลาที่ใช้ในการปลูก	(sec)
	d	คือ ความหนาของชั้นที่ต้องการ	(Å)
	GR	คือ ค่าอัตราการปลูกผลึก	(ML/sec)
	a ₀	คือ ค่าคงที่โครงผลึกที่ทำการปลูก	(Å)

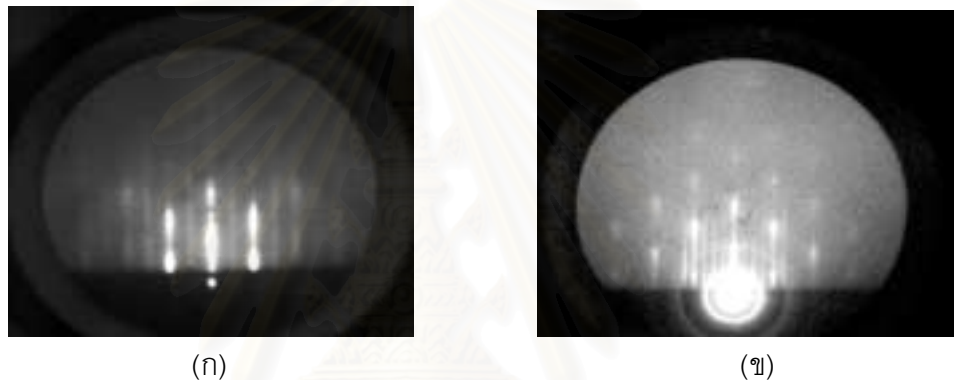
3.5 การปลูกชั้นอิพิแทกซีอินเดียมอาร์เซไนด์ (InAs Epitaxy Growth)

การปลูกชั้นอินเดียมอาร์เซไนด์ จำเป็นต้องทราบค่าช่วงอุณหภูมิปลูก จากการศึกษาทราบว่าค่าอุณหภูมิที่สามารถปลูกชั้นอินเดียมอาร์เซไนด์ได้ไม่เกิน 510 °C ถ้าปลูกอินเดียมอาร์เซไนด์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 510 °C จะทำให้อะตอมอินเดียมหลุด (In Desorption) ออกจากผิวหน้าแผ่นฐานด้วยสาเหตุนี้ การปลูกชั้นอินเดียมอาร์เซไนด์จึงต้องปลูกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 510 °C แต่ถ้าปลูกที่อุณหภูมิต่ำเกินไปจากการศึกษาพบว่าสิ่งสกปรก (Contaminate) ภายในห้องปลูกผลึกจะแสดงตัวเป็นสารเจือ (Dopant) ให้กับชั้นอินเดียมอาร์เซไนด์ทำให้ผลึกที่ได้มีค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่ำลง แต่จะต่ำลงไปถึงที่อุณหภูมิเท่าใดนั้นจะต้องทำการทดลอง ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงศึกษาหาเงื่อนไขทางอุณหภูมิ และค่าอัตราส่วนค่าความดันไอ (Beam Equivalent Pressure : BEP) ระหว่างอาร์เซนิกต่ออินเดียม ที่เหมาะสมสำหรับการปลูกชั้นอินเดียมอาร์เซไนด์

3.6 การหาค่าอัตราการปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์

การหาค่าอัตราการปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์นั้นมีความแตกต่างกับการหาค่าอัตราการปลูกผลึกแกเลียมอาร์เซไนด์ ซึ่งในแกเลียมอาร์เซไนด์นั้นสามารถสังเกตได้จาก RHEED Oscillation เพราะว่าผลึกที่ปลูกนั้นเป็นชนิดเดียวกันกับแผ่นฐานจึงไม่เกิดการไม่เข้ากันของผลึก (Lattice Mismatch) ทำให้ผลึกที่ได้มีผิวหน้าที่ดีผลของการกระเจิงแบบแพร่ซิม (Diffuse Scattering) ที่ผิวก็น้อย ดังนั้นการปลูกลักษณะนี้จึงสังเกต RHEED Oscillation ได้ แต่ในอินเดียมอาร์เซไนด์สังเกตจาก RHEED Oscillation ไม่ได้ เนื่องจากเป็นการปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์บนแผ่นฐานแกเลียมอาร์เซไนด์ ซึ่งมีค่าความไม่เข้ากันของผลึกอยู่ถึง 7.4 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ผิวหน้าที่ได้ในช่วงเริ่มปลูกมีผิวหน้าที่ไม่สมบูรณ์ จึงทำให้ลำอิเล็กตรอน (Electron Beam) เกิดการกระเจิงแบบแพร่ซิมมากที่ผิวหน้า ทำให้ Specular Beam ที่ปรากฏบนฉากฟอสฟอรัส (Phosphorus Screen) ไม่สามารถสังเกตได้

จากการศึกษาพบว่า การไม่เข้ากันของผลึกระหว่างแกเลียมอาร์เซไนด์กับอินเดียมอาร์เซไนด์ นั้นเมื่อทำการปลูกอินเดียมอาร์เซไนด์ซึ่งมีค่าคงตัวโครงสร้างผลึกที่ใหญ่กว่าบนแกเลียมอาร์เซไนด์ที่ค่าคงตัวโครงสร้างผลึกน้อยกว่า จะทำให้เกิดความเครียดขึ้นที่ผิวหน้า พบว่าการที่จะเกิดความเครียดขึ้นได้นั้นจะต้องปลีผลึกไปถึงความหนาวิกฤต (Critical Thickness) ซึ่งในที่นี้อยู่ที่ความหนาประมาณ 1.7-1.8 ML จากค่าที่ได้นี้สามารถนำไปหาค่าความเร็วในการปลูกได้ วิธีนี้เรียกว่า Dot Formation ดังรูปที่ 3.3 จากรูปสังเกตดูการเปลี่ยนแปลงของแผนภาพ RHEED ในรูป 3.3(ก) เป็นรูปของผิวหน้าแกเลียมอาร์เซไนด์ ส่วนในรูปที่ 3.3(ข) เป็นรูปที่แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงในช่วงเริ่มปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์จะเกิดการเกิดความเครียดขึ้นเมื่อความหนาถึงค่าความหนาวิกฤต



รูปที่ 3.3 แผนภาพ RHEED ของการเกิด Dot Formation

(ก) ผิวหน้าของแกเลียมอาร์เซไนด์ (ข) ผิวหน้าที่เกิดดอท

ตัวอย่าง สมมุติให้ระยะเวลาของการเกิดดอท (Dot Formation) เท่ากับ 4.5 วินาที

$$\begin{aligned} \text{Growth Rate of InAs (ML/s)} &= \frac{1.8 \text{ ML}}{4.5 \text{ sec}} \\ &= 0.4 \text{ ML/s} \end{aligned}$$

อีกวิธีหนึ่ง คือ ทำการปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์ด้วยเงื่อนไขต่างๆ ที่เสร็จเรียบร้อยแล้วนำไปวัดความหนาด้วย SEM (Scanning Electron Microscope) ดังในรูปที่ 3.4 แล้วนำความหนาที่ได้เทียบกับเวลาที่ใช้ปลูกผลึก

ตัวอย่าง สมมุติให้ชั้นผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์มีความหนาเท่ากับ 1 ไมครอน ใช้เวลา 160 นาที
(1 ไมครอน เท่ากับ 10000 อังสตรอม และ 1 ML เท่ากับ 3.03 อังสตรอม)

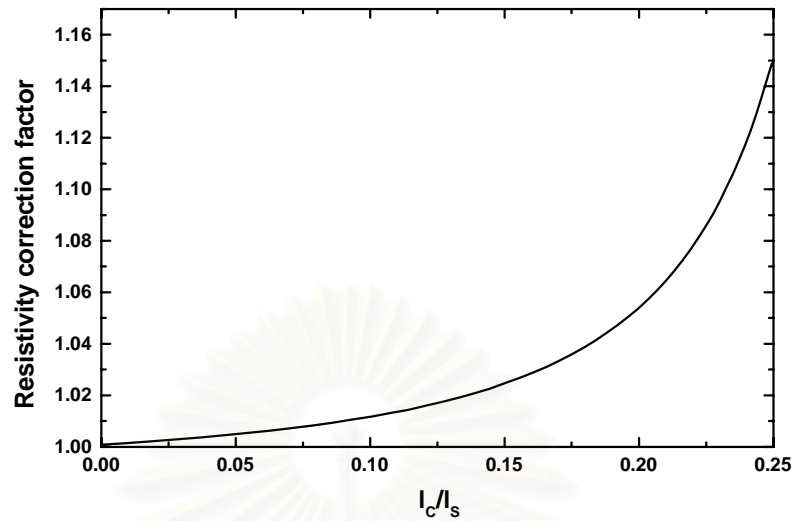
$$\begin{aligned} \text{Growth Rate of InAs (ML/s)} &= \frac{(10000)}{(160 \times 60)(3.03)} \\ &= 0.34 \text{ ML/s} \end{aligned}$$



รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายความหนาของชั้นอินเดียมอาร์เซไนด์ โดย SEM

3.7 การทำขั้วต่อโลหะ

ขั้วต่อที่ใช้ในการทดลองนี้ทำจากอินเดียม โดยใช้วิธีการทำขั้วต่อโลหะที่เรียกว่า Filament Evaporation ซึ่งมีวิธีการทำดังนี้ เริ่มต้นใส่เม็ดอินเดียมลงในโบริด (Boat) ที่ทำมาจากทังสเตน และให้ความร้อนโดยการเพิ่มกระแสไหลผ่านโบริด จนกระทั่งเม็ดอินเดียมหลอมเป็นของเหลวทิ้งไว้ เพื่อให้อินเดียมมีความสะอาดก่อน การทำเช่นนี้เพื่อลดสิ่งเจือปนที่อยู่ในอินเดียมให้น้อยลง จากนั้นก็เพิ่มกระแสขึ้นอีกจะทำให้อินเดียมกลายเป็นไอพุ่งกระจาย ไปเคลือบลงบนชิ้นงานที่วางอยู่ในห้องทำขั้วโลหะ (Bell Jar) ที่เป็นสุญญากาศประมาณ 10^{-6} torr ลักษณะของขั้วต่อโลหะ ดังในรูปที่ 2.14 ซึ่งมีขั้วต่อโลหะเป็นสี่เหลี่ยมขนาด 1×1 mm บนชิ้นงานขนาด 6×6 mm ซึ่งการทำขั้วต่อโลหะลักษณะนี้จะทำให้ค่าสภาพความต้านทานในชิ้นงานมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 2 % ค่านี้ได้มีการทดลองมาแล้ว [10] ดังในรูปที่ 3.5 กำหนดให้ ความยาวของขั้วต่อโลหะเป็น l_c และความยาวของชิ้นงานเป็น l_s จากรูปจะเห็นว่า ถ้าเรายิ่งทำขนาดขั้วต่อโลหะเล็กๆ ก็จะทำให้ค่าสภาพต้านทานของชิ้นสารไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลยจึงมีความเหมาะสมกับการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธี van der Pauw [10]



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนความยาวขั้วต่อโลหะต่อความยาวชิ้นงานกับการเปลี่ยนแปลงสภาพต้านทาน [10]

3.8 การพิจารณาเลือกใช้แผ่นฐาน

เริ่มต้นต้องเลือกแผ่นฐานที่เหมาะสมสำหรับการทดลอง ในการทดลองเป็นการปลูกชั้นอิพิแทกซีอินเดียมอาร์เซไนด์ ซึ่งมีค่าสภาพต้านทานต่ำ (Low Resistivity) ดังนั้นจะต้องใช้แผ่นฐานที่มีค่าสภาพต้านทานสูง เพื่อที่ในการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าจะได้ค่าที่แท้จริงของชั้นอิพิแทกซี จึงได้เลือกใช้แผ่นฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์แบบไม่เติมสารเจือซึ่งมีค่าสภาพต้านทานสูง (High Resistivity) ดังนั้นโดยธรรมชาติแล้วแผ่นฐานต้องไม่นำกระแส แต่ข้อสมมุติไม่เป็นจริง เนื่องจากยังมีความเกี่ยวข้องกับความหนา และค่าความต้านทานของวัสดุอื่นๆ เป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$r = \rho/d \quad (37)$$

เมื่อ	r	คือ	ความต้านทานแผ่น (Sheet Resistance) (Ω)
	ρ	คือ	สภาพต้านทาน (Resistivity) ($\Omega\text{-cm}$)
	d	คือ	ความหนา (Thickness) (cm)

ตัวอย่าง การหาค่าความต้านทานเปรียบเทียบกันระหว่างแผ่นฐานแกเลียมอาร์เซไนด์ต่อชั้นอิพิแทกซีอินเดียมอาร์เซไนด์ เพื่อนำไปสรุปหาว่าแผ่นฐานมีความเหมาะสม หรือไม่นำมาใช้ในการทดลองจากสมการ

$$\frac{r_s}{r_1} = \frac{\rho_s d_1}{\rho_1 d_s} \quad (38)$$

เมื่อ r_s, ρ_s, d_s คือ ค่าความต้านทาน สภาพต้านทาน และความหนาของแผ่นฐานแกเลียมอาร์เซไนด์แบบไม่เติมสารเจือตามลำดับ
 r_1, ρ_1, d_1 คือ ค่าความต้านทาน สภาพต้านทาน และความหนาของชั้นอิพิแทกซีอินเดียมอาร์เซไนด์ตามลำดับ

จากการทดลองได้ทำการปลูกชั้นอิพิแทกซีอินเดียมอาร์เซไนด์ที่มีความหนาประมาณ 1 ไมครอน บนแผ่นฐานแกเลียมอาร์เซไนด์หนา 300 ไมครอน จากการศึกษาทราบว่าค่าสภาพต้านทานของอินเดียมอาร์เซไนด์ และแผ่นฐานแกเลียมอาร์เซไนด์ อยู่ที่ประมาณ $3.1 \times 10^{-1} \Omega\text{-cm}$ และ $3.8 \times 10^0 \Omega\text{-cm}$ ตามลำดับ เมื่อทำการคำนวณใน สมการที่ 38 ผลของค่าความต้านทานของแผ่นฐานต่อค่าความต้านทานของชั้นอิพิแทกซีอินเดียมอาร์เซไนด์ ได้ค่า 4.08×10^6 จากค่าที่ได้แสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานของแผ่นฐานมีค่ามาก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานของชั้นอิพิแทกซีอินเดียมอาร์เซไนด์ นั้นหมายความว่า การนำกระแสส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่ชั้นอิพิแทกซีอินเดียมอาร์เซไนด์ และเมื่อนำไปทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธีวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธี van der Pauw โดยทำขั้วต่อโลหะ 4 ขั้ว บนผิวหน้าของชั้นอิพิแทกซีอินเดียมอาร์เซไนด์ ดังในรูปที่ 2.14 ก็จะได้คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่แน่นอนโดยไม่มีผลกระทบที่เกิดจากแผ่นฐาน

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.9 เงื่อนไขของการทดลอง

เริ่มต้นใช้แผ่นฐานแกเลียมอาร์เซไนด์แบบไม่เติมสารเจือระนาบ 100 แล้วปลูกชั้นแกเลียมอาร์เซไนด์บัพเฟอร์เพื่อปรับปรุงผิวหน้าให้มีความสมบูรณ์ของผลึกดีขึ้นก่อนการปลูกชั้นอินเดียมอาร์เซไนด์ที่ต้องการทำการทดลอง ด้วยเงื่อนไขต่างเพื่อที่จะให้ได้ผลึกที่มีคุณภาพ ดังนี้

เงื่อนไขแรก ทำการทดลองหาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการปลูกชั้นอินเดียมอาร์เซไนด์ โดยให้ค่าความดันไอของอาร์เซนิก และอินเดียมคงที่ไว้ ที่ค่า 1×10^{-5} Torr และ 5×10^{-7} Torr ตามลำดับ ทำการเปลี่ยนอุณหภูมิแผ่นฐานไปที่ 400, 440, 480, และ 520 องศาเซลเซียส เงื่อนไขนี้จะสังเกตแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยสังเกตที่ค่าความคล่องตัวอิเล็กตรอน (Electron Mobility) ของชั้นอินเดียมอาร์เซไนด์ที่ได้ทำการปลูก ตรงจุดสูงสุดของกราฟการทดลองจะเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปลูกชั้นอิพิแทกซ์อินเดียมอาร์เซไนด์ที่ค่าอัตราส่วนความดันไอของอาร์เซนิกต่ออินเดียมค่านี้ และอุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงอย่างไรเมื่อใช้อัตราส่วนความดันไอของอาร์เซนิกต่ออินเดียมค่าอื่น

เงื่อนไขที่สอง เป็นการทดลองหาคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยการเปลี่ยนค่า อัตราส่วนความดันไอของอาร์เซนิกต่ออินเดียม ที่ค่า 12, 15, 20, และ 27 โดยทำการเปลี่ยนค่าความดันไอของอาร์เซนิก คงที่ค่าความดันไอของอินเดียมไว้ 5×10^{-7} Torr หรือเป็นการใช้อัตราการปลูกผลึกประมาณ 0.48 ML/sec โดยการทดลองนี้ใช้อุณหภูมิแผ่นฐาน 440 องศาเซลเซียส แล้วสังเกตแนวโน้มของคุณสมบัติทางไฟฟ้ากับลักษณะผิวหน้าที่ได้จากการทดลอง

เงื่อนไขที่สาม ทำการทดลองหาค่าอัตราการปลูกผลึกที่สามารถปลูกได้ แล้วยังคงรักษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า และผิวหน้าไว้ โดยในการทดลองนี้ใช้ค่าอัตราการปลูกผลึก ที่ค่า 0.2, 0.34, 0.4, และ 0.6 ML/s ให้ค่าอัตราส่วนความดันไอของอาร์เซนิกต่ออินเดียม และอุณหภูมิแผ่นฐานคงที่

เงื่อนไขที่สี่ ทำการทดลองหาค่าความหนาที่เหมาะสมสำหรับการปลูกชั้นอินเดียมอาร์เซไนด์โดยสังเกตจากค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนว่ามีการเพิ่มขึ้น และมีการเปลี่ยนแปลงมากน้อยอย่างไร ในเงื่อนไขนี้จะใช้ค่าอัตราส่วนความดันไอของอาร์เซนิกต่ออินเดียม และอุณหภูมิแผ่นฐานเดียวกัน

บทที่ 4

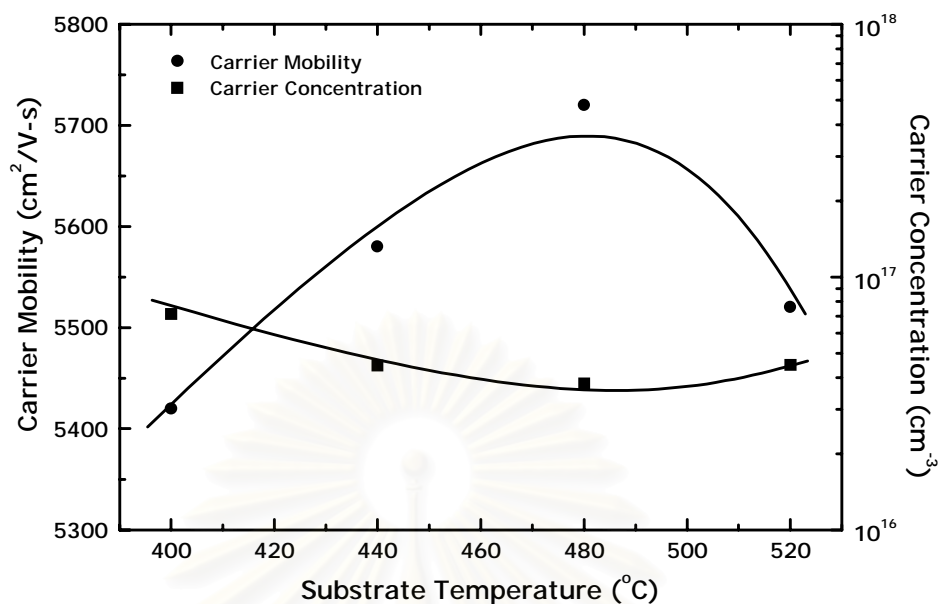
ผลการทดลองและการวิเคราะห์

การตรวจสอบและการวิเคราะห์ คุณภาพของชั้นผลึกที่ทำการทดลองเป็นส่วนสำคัญ สำหรับการที่จะทราบถึงเงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสม และทำให้เข้าใจถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการทดลอง

4.1 การหาเงื่อนไขของอุณหภูมิแผ่นฐาน

จากการทดลองศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการปลูกอินเดียมอาร์เซไนด์ที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยใช้เงื่อนไขค่าอัตราส่วนความดันไอของอาร์เซนิคต่ออินเดียม คงที่ 20 เท่า อัตราการปลูกผลึกเท่ากันที่ 0.48 ML/sec ความหนา 1 ไมครอน จากการทดลอง ได้ผลลัพธ์ ดังในรูปที่ 4.1 สามารถอธิบายได้ คือ การปลูกที่อุณหภูมิแผ่นฐานต่ำๆ แล้วทำให้ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะที่ได้ต่ำไปด้วยนั้นเป็นผลอันเนื่องมาจากค่าสัมประสิทธิ์การติดของสารตกค้างที่อยู่ภายในห้องปลูกผลึกมีค่าสูงชัน เปรียบเสมือนว่าเกิดการปนเปื้อนกับชั้นอีพิแทกซีอินเดียมอาร์เซไนด์ การที่เกิดสภาวะเช่นนี้ขึ้นอาจทำให้เกิดจุดบกพร่องขึ้นในชั้นอีพิแทกซีอินเดียมอาร์เซไนด์แล้วทำให้ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะลดลง และอีกสาเหตุหนึ่ง คือ การปลูกที่อุณหภูมิต่ำ อะตอม และโมเลกุลของธาตุต่างๆ จะมีระยะปลอดภัยการชนน้อย และมีพลังงานกระตุ้นที่ใช้ในการสร้างพันธะต่ำกว่า ดังนั้นการปลูกผลึกที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้มีโอกาสเกิดจุดบกพร่องได้สูง และการปลูกที่อุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้อะตอมของอินเดียมเกิดการหลุด (In Desorption) ออกจากผิวหน้าจากสาเหตุนี้ก็เป็นผลทำให้ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะลดลงอีกด้วย

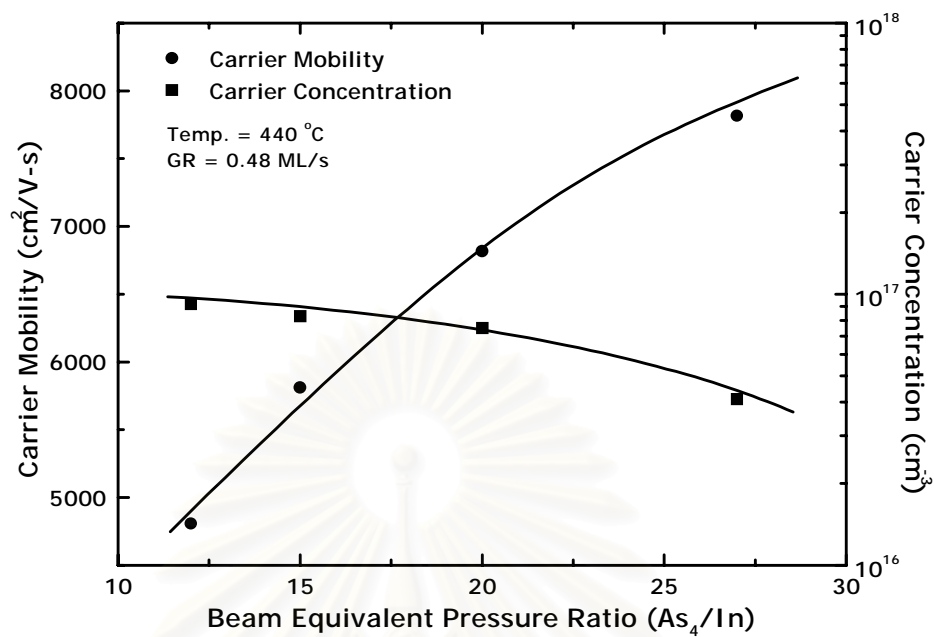
จากกราฟจะสังเกตเห็นอีกว่าค่าความคล่องตัวของประจุพาหะของชั้นอีพิแทกซีอินเดียมอาร์เซไนด์ (InAs Epilayer) มีค่าไม่สูง เมื่อเทียบกับค่าความคล่องตัวของประจุพาหะของอินเดียมอาร์เซไนด์ชนิดหนา (Bulk) สาเหตุหลักเป็นเรื่องของคุณภาพของผลึกที่แตกต่างกัน และเทคนิคการผลิต การที่ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะของอินเดียมอาร์เซไนด์ชนิดหนามีค่าสูงนั้นคิดว่าอินเดียมอาร์เซไนด์บริสุทธิ์ แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการทดลองสร้างเป็นอินเดียมอาร์เซไนด์ชนิดฟิล์มบางซึ่งปลูกลงบนแผ่นฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์ซึ่งการปลูกนี้จะเกิดความไม่เข้ากันของผลึก (Lattice Mismatch) อยู่ถึง 7.4 % เป็นผลทำให้คุณภาพของผลึกที่ได้ต่ำกว่าอินเดียมอาร์เซไนด์ชนิดหนา แต่คุณภาพของผลึกนี้สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ โดยการศึกษาหาเงื่อนไขการปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์ที่เหมาะสม เช่น ค่าอัตราส่วนความดันไอ (Beam Equivalent Pressure : BEP) ของอาร์เซนิคต่ออินเดียม และอัตราการปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์



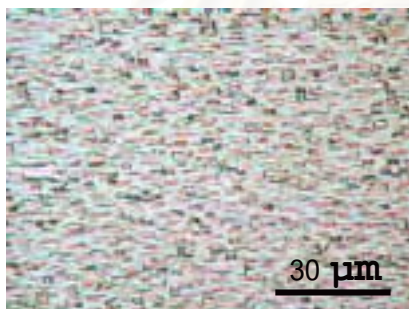
รูปที่ 4.1 กราฟอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นฐานที่มีผลกับค่าความคล่องตัวของประจุพาหะ

4.2 การหาเงื่อนไขของอัตราส่วนความดันไอ (Beam Equivalent Pressure : BEP)

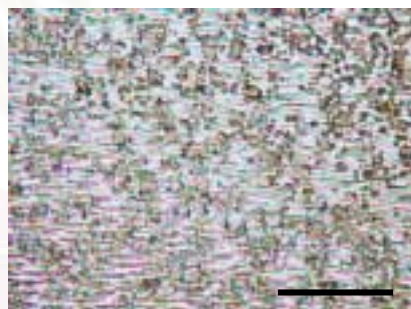
จากการทดลองเป็นการปลูกชั้นอิพิแทกซีอินเดียมอาร์เซไนด์ ในการทดลองนี้ใช้อัตราการปลูกผลึกคงที่ 0.48 ML/sec และอุณหภูมิอยู่ที่ 440 องศาเซลเซียส โดยเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความดันไอของอาร์เซนิกต่ออินเดียม แล้วสังเกตดูแนวโน้มของค่าความคล่องตัวของประจุพาหะ และค่าความหนาแน่นของพาหะ ดังในรูปที่ 4.2 จากผลการทดลองที่ได้ในรูปนี้ ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะจะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าอัตราส่วนความดันไอเท่ากับ 20 เท่าถ้าเพิ่มอัตราส่วนความดันไอสูงขึ้นกว่าค่าดังกล่าว จะเห็นว่าค่าความคล่องตัวของประจุพาหะค่อยๆ เพิ่มขึ้นสาเหตุที่เป็นเช่นนี้สามารถอธิบายได้จากลักษณะผิวหน้าของชั้นผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์ ในรูปที่ 4.3 ซึ่งในรูปนี้จะเป็นรูปที่สังเกตผิวหน้าของชั้นผลึกที่ทำการปลูกโดยการเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความดันไอที่ค่าต่างๆ ถ้าสังเกตรูปที่ 4.3(ก, ข) ใช้ค่าอัตราส่วนความดันไอที่ 12 และ 15 เท่าตามลำดับ จะมีลักษณะของผิวหน้าที่ไม่เรียบคล้ายลายน้ำ (In Droplet) ซึ่งลักษณะเช่นนี้เกิดขึ้นมาจากใช้ความดันไออาร์เซนิกน้อยเกินไปทำให้เสถียรภาพของอาร์เซนิกไม่ดีพอ เป็นสาเหตุนี้เป็นผลทำให้ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะต่ำ เนื่องจากเกิดความไม่สมดุลขึ้นระหว่างการเกิดผลึกและการคายอะตอมออกจากผิวหน้าของผลึก เมื่อเพิ่มอัตราส่วนความดันไอเท่ากับ 20 เป็นรูปที่มีผิวหน้าค่อนข้างดีขึ้น ดังในรูปที่ 4.3(ค) และยังให้ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะที่สูงอีกด้วย แสดงว่าเงื่อนไขนี้เหมาะสมกับค่าอัตราส่วนความดันไอที่ 20 คือ ได้ทั้งผิวหน้าที่ดี และความคล่องตัวของประจุพาหะมีค่าสูง



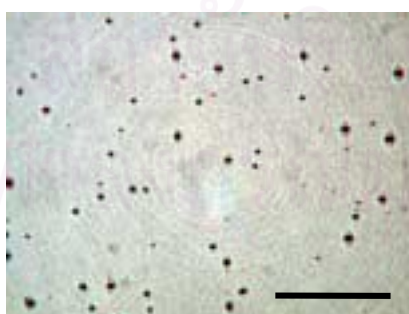
รูปที่ 4.2 กราฟค่าความคล่องตัว และค่าความหนาแน่นของพาหะที่อัตราส่วนความดันไอค่าต่างๆ



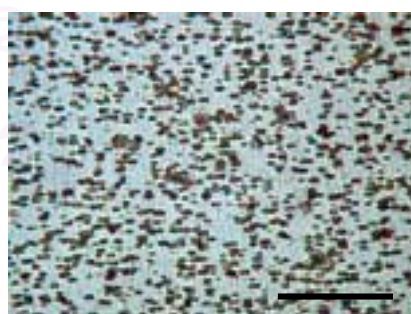
(ก)



(ข)



(ค)



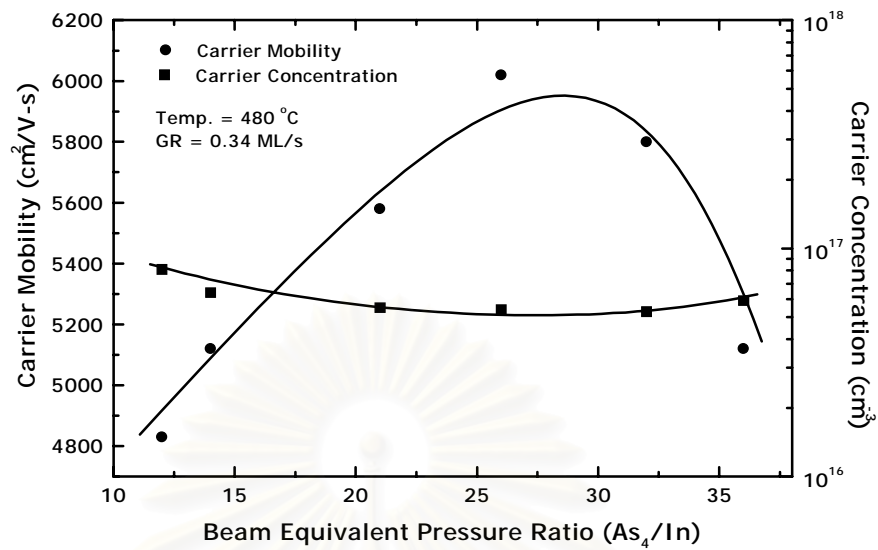
(ง)

รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายผิวหน้าของชั้นอีพิแทกซีอินเดียมอาร์เซไนด์ที่อัตราความดันไอของอาร์เซนิคต่ออินเดียมค่าต่างๆ (ก) 12 เท่า (ข) 15 เท่า (ค) 20 เท่า และ (ง) 27 เท่า

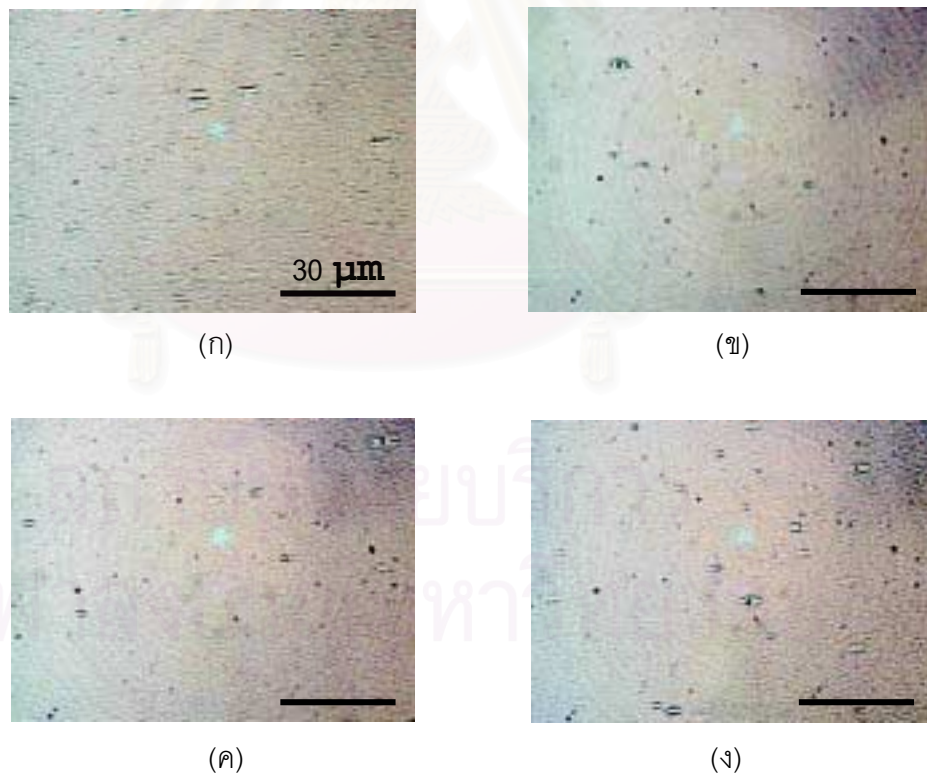
เมื่อทำการเพิ่มค่าอัตราส่วนความดันไอของอาร์เซนิกต่ออินเดียม นั้นหมายถึงว่าเป็นการเพิ่มค่าความดันไอของอาร์เซนิกขึ้นไปจนเกินค่าที่เหมาะสม ทำให้อะตอมของอาร์เซนิกมากเกินไป ทำให้เกิดสภาวะอะตอมของอาร์เซนิกตกตะกอน (As Precipitate) มีลักษณะ ดังในรูปที่ 4.3(ง) ซึ่งใช้ค่าอัตราส่วนความดันไอเท่ากับ 27 จะเห็นว่าผิวหน้าที่ไม่เรียบ และการใช้ความดันไอของอาร์เซนิกมากเกินไปยังทำให้มีระยะปลดการชนของอะตอมอินเดียมน้อยลง จะทำให้เกิดจุดบกพร่องที่ผลึกได้มาก เป็นสาเหตุให้ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ถึงค่าความคล่องตัวของประจุพาหะจะสูง แต่การเกิดลักษณะของผิวหน้าเช่นนี้ก็ไม่น่าเหมาะที่จะนำไปทำเป็นอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างหลายชั้น

4.3 การทดลองหาช่วงของค่าความดันไอของอาร์เซนิกต่ออินเดียม

การทดลองนี้จะปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความดันไอของอาร์เซนิกต่ออินเดียม ในช่วง 10 เท่าถึง 35 เท่า โดยใช้ค่าความเร็วในการปลูกเท่ากับ 0.34 ML/s ความหนา 1 ไมครอน ปลูกที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกับในข้อ 4.2 คือ ปรับค่าความดันไอของอาร์เซนิก เพื่อปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความดันไอซึ่งผลที่ได้ ดังในรูปที่ 4.4 สังเกตที่อัตราส่วนความดันไอในช่วง 22 เท่า ถึง 32 เท่า เป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการปลูกในเงื่อนไขนี้ เนื่องจากได้ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะสูงแล้วยังได้ผิวหน้าที่ดีอีกด้วย ดังในรูปที่ 4.5(ข,ค) แต่เมื่อเราลดค่าอัตราส่วนความดันไอลงค่าความคล่องตัวก็ลดลงด้วย เนื่องจากการลดค่าความดันไอของอาร์เซนิกจนทำให้เสถียรภาพของอาร์เซนิก (Arsenic Stabilization) ไม่ดีพอ ซึ่งมีผลทำให้ขณะทำการปลูกผลึกเกิดความไม่สมดุลระหว่างการเกิดผลึกกับการคายอะตอมออกจากผิวหน้าของผลึก ในกรณีนี้ก็คือมีการคายอะตอมออกมามากกว่าการเกิดผลึกจะมีลักษณะของผิวหน้า ดังในรูปที่ 4.5(ก) ซึ่งผิวหน้าที่ได้มีความไม่สมบูรณ์มีลักษณะเช่นเดียวกับ ในรูปที่ 4.3(ก,ข) คือ มีลักษณะคล้ายหยดน้ำ (In Droplet) ทำให้ได้ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะมีค่าต่ำ ตรงกันข้ามเมื่อเราเพิ่มค่าความดันไอของอาร์เซนิกมากเกินไปจะทำให้มีระยะปลดการชนของอะตอมอินเดียมน้อยลง และทำให้เกิดจุดบกพร่องได้มาก จะได้ลักษณะของผิวหน้าตามรูปที่ 4.5(ง) ค่าความคล่องตัวของพาหะก็จะต่ำเช่นกัน แต่จะสังเกตเห็นว่าลักษณะของผิวหน้ามีความแตกต่างกับ รูปที่ 4.3(ง) เนื่องจากว่าในเงื่อนไขนี้ใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าทำให้อะตอมอินเดียมมีระยะปลดการชนมากขึ้นจึงทำให้ลักษณะของผิวหน้าที่ได้ดีกว่าการปลูกที่อุณหภูมิต่ำ แต่ไม่ได้หมายความว่าค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าดีขึ้นตามลักษณะของผิวหน้าที่ดีขึ้น แต่จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการปลูกผลึกที่เหมาะสม ดังนั้นจะมีช่วงอัตราส่วนความดันไอที่เหมาะสมช่วงหนึ่งเท่านั้นที่จะทำให้ได้ผลึกดีมีคุณภาพ ทั้งลักษณะทางกายภาพ และคุณสมบัติทางไฟฟ้า



รูปที่ 4.4 กราฟค่าความสัมพันธ์ของค่าความคล่องตัวเมื่อมีการเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความดันไอของอาร์เซนิกต่ออินเดียม



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายผิวหน้าของชั้นอิพิแทกซีอินเดียมอาร์เซไนต์ที่อัตราความดันไอของอาร์เซนิกต่ออินเดียมค่าต่างๆ (ก) 14 เท่า (ข) 22 เท่า (ค) 32 เท่า และ (ง) 36 เท่า

4.4 การทดลองหาค่าอัตราการปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์ที่เหมาะสม

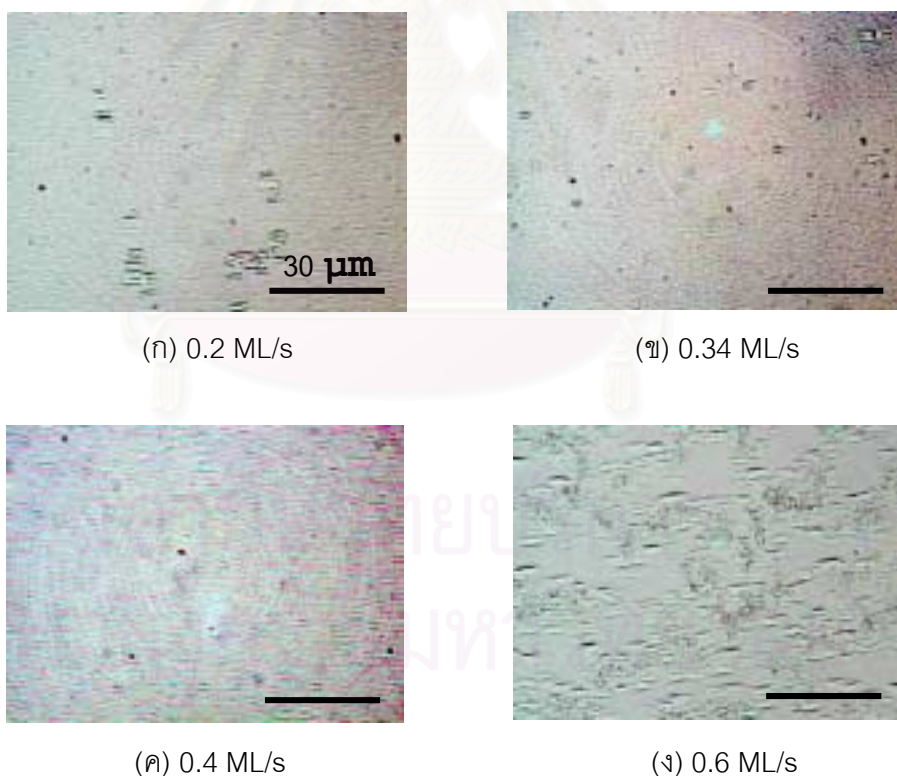
ในการทดลองนี้ทำการปลูกที่อุณหภูมิแผ่นฐาน 480 องศาเซลเซียส ความหนาที่ใช้ คือ 1 ไมครอน และอัตราส่วนความดันไอของอาร์เซนิคต่ออินเดียมอยู่ในช่วง 22 เท่า ถึง 32 เท่า ดังในตารางที่ 4.1 และยังแสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของผลึกที่ได้ทำการปลูกที่ค่าอัตราการปลูกผลึกที่ค่าต่างๆ

ตารางที่ 4.1 ค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการปลูกผลึก InAs

Properties Sample	Growth Rate (ML/s)	Thickness (μm)	BEP Ratio (As ₄ /In)	Carrier Concentration (cm^{-3})	Carrier Mobility ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)
A	0.2	1	32	5.5×10^{16}	5390
B	0.34	1	32	5.28×10^{16}	5875
C	0.4	1	25	2.2×10^{16}	6839
D	0.6	1	22	4.4×10^{16}	5963

การทดลองหาค่าอัตราการปลูกผลึกที่เหมาะสมสำหรับการปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์ชนิดหนา สังเกตที่ค่าอัตราการปลูกผลึกเท่ากับ 0.4 ML/s จะเห็นว่ามีค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้า คือ ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะดีที่สุด และยังคงสภาพผิวหน้าที่ดีอีกด้วย ดังในรูปที่ 4.6(ค) ซึ่งอัตราการปลูกผลึกที่เหมาะสมนี้ขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ เช่น ความดันไออาร์เซนิคและอินเดียม ค่าอัตราส่วนความดันไอของอาร์เซนิคต่ออินเดียมเป็นต้น การที่ใช้ค่าอัตราการปลูกผลึกน้อยที่ค่า 0.2 ML/s นั้นหมายถึงการใช้ความดันไอของอินเดียมน้อยจะทำให้ความแตกต่างระหว่างความดันไอของอินเดียมซึ่งมีค่า 1.8×10^{-7} Torr เทียบกับความดันบรรยากาศภายในห้องปลูกผลึก (Background Pressure) ซึ่งมีค่าประมาณ 1×10^{-7} Torr ในระหว่างทำการปลูกผลึก การที่ความดันมีความแตกต่างน้อยนั้นในระหว่างทำการปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์จะทำให้สารตกค้างที่อยู่ในห้องปลูกผลึกเข้ามาปนเปื้อนทำให้ผลึกที่ได้นั้นมีผลึกที่ไม่สมบูรณ์ทำให้ค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าลดลง ลักษณะของผิวหน้าที่ได้ยังคงผิวหน้าที่ดีอยู่ ดังในรูปที่ 4.6(ก) ตรงกันข้ามกัน เมื่อใช้อัตราการปลูกผลึกมากที่ค่า 0.6 ML/s ที่ค่านี้ไม่มีผลของการรักษาลำโมเลกุลของอินเดียมในห้องปลูกผลึกเพราะที่อัตราการปลูกผลึกนี้มีค่าความดันไอของอินเดียมอยู่ที่ 7×10^{-7} Torr เมื่อเทียบกับความดันบรรยากาศในในห้องปลูกผลึกแล้วมีความแตกต่างกันอยู่มาก ทำให้ลำโมเลกุลของอินเดียมยังคงสภาพไว้ได้ แต่การปลูกที่อัตราการปลูกผลึกสูงๆ นั้นจะทำให้ผลึกที่ได้มีจุดบกพร่องมาก

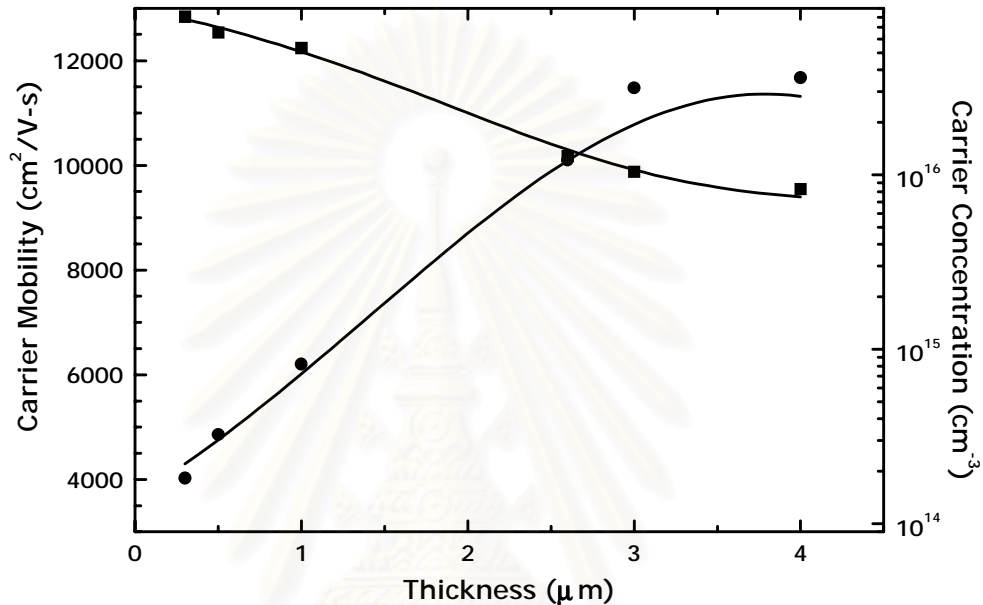
เนื่องจากการปลูกอินเดียมอาร์เซไนด์นั้นมีความเครียด (Strain) มากเพราะว่ามีค่าคงที่โครงผลึกแตกต่างกันถึงประมาณ 7.4 เปอร์เซ็นต์ การที่มีค่าคงที่โครงผลึกแตกต่างกันมากระหว่างชั้นผลึกอีพิแทกซีที่ทำการปลูกกับแผ่นฐานที่ใช้ ในที่นี้ชั้นผลึกอีพิแทกซีที่ทำการปลูกเป็นอินเดียมอาร์เซไนด์ซึ่งมีค่าคงที่โครงผลึกเท่ากับ 6.06 อังสตรอม ปลูกบนแผ่นฐานที่เป็นแกลเลียมอาร์เซไนด์ซึ่งมีค่าคงที่โครงผลึกเป็น 5.65 อังสตรอม การปลูกลักษณะนี้จำเป็นต้องมีระยะเวลาผ่อนคลาย (Relaxation Time) เพื่อให้เกิดการผ่อนคลายความเครียด (Strain Relaxation) ดังนั้นการปลูกโดยใช้ค่าอัตราการปลูกผลึกสูงๆ จะทำให้ระยะเวลาผ่อนคลายสั้นลงจึงเป็นผลให้เกิดจุดบกพร่องขึ้นลักษณะผิวหน้า ดังในรูปที่ 4.6(ง) ในรูปจะเห็นเป็นลักษณะลายน้ำที่เกิดจากอินเดียมเรียกว่า (In Droplet) หรือเหตุผลอีกอย่างหนึ่ง คือ อะตอมของอินเดียมไม่สามารถเคลื่อนที่ไปอยู่ยังจุดที่เหมาะสม (Lattice Incorporation) ดังในรูปที่ 2.3 นั้นหมายถึงว่าอะตอมอินเดียมมีการจับ (Colliding) กับอะตอมอื่นก่อนที่จะเคลื่อนที่เข้าไปยังจุดเหมาะสม



รูปที่ 4.6 ลักษณะของผิวหน้าที่อัตราการปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์ค่าต่างๆ

4.5 การทดลองศึกษาผลของความหนาของผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์

การทดลองนี้ทำหลังจากได้ค่าคุณสมบัติพื้นฐาน และค่าอัตราส่วนความดันไอของอาร์เซนิคต่ออินเดียม โดยทำการปลูกที่ความหนา 0.3, 0.5, 1.0, 2.6, 3.0 และ 4.0 ไมครอน หลังจากได้ทำการปลูกได้ลักษณะของผิวหน้าที่ดี ดังในรูปที่ 4.6(ข,ค) และได้คุณสมบัติทางไฟฟ้าดังในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กราฟค่าความคล่องตัวและค่าความหนาแน่นของพาหะที่ความหนาต่าง ๆ

จากการทดลองพบว่าที่ความหนาของผลึกมีค่าน้อยได้ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะต่ำนั้น เป็นผลอันเนื่องมาจากเกิดการกระเจิงแบบแพร่ที่ผิวหน้า (Diffuse Surface Scattering) และที่รอยต่อระหว่างชั้นผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์ที่ทำการปลูกกับแผ่นฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์จะเกิดการแลกเปลี่ยนอะตอม (Inter Diffusion) ของอะตอมแกลเลียม และอะตอมอินเดียมขึ้น ลักษณะเช่นนี้จะทำให้เกิดเป็นชั้นของอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์บางๆ ตรงรอยต่อ ซึ่งชั้นนี้จะมีค่าความคล่องตัวต่ำกว่าชั้นของอินเดียมอาร์เซไนด์ ดังนั้นการที่ปลูกชั้นของอินเดียมอาร์เซไนด์บางๆ จะได้รับผลกระทบจากการกระเจิงแบบแพร่หรือ การเกิดชั้นอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่มีค่าความคล่องตัวของประจุพาหะค่อนข้างต่ำ จากผลการทดลองจะเห็นว่า เมื่อเราเพิ่มความหนาของชั้นอินเดียมอาร์เซไนด์มากขึ้นก็จะทำให้ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะเพิ่มขึ้นนั้น สามารถอธิบายได้จากค่าอัตราส่วนความหนาของชั้นอินเดียมอาร์เซไนด์ต่อระยะปลอดการชนของพาหะในที่นี้พิจารณาเป็นอิเล็กตรอนจะมีความสัมพันธ์กับค่าความคล่องตัวของประจุพาหะดังนี้

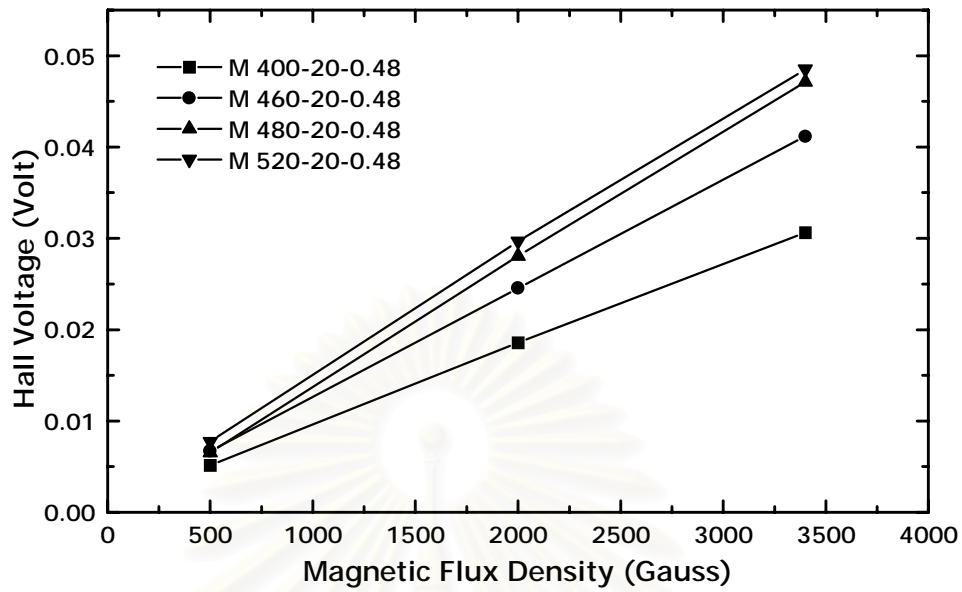
$$\text{Carrier Mobility} \propto \frac{\text{Thickness of InAs}}{\text{Mean free path of electron}}$$

จากการศึกษาพบว่าระยะปลอดการชนของอิเล็กตรอนอยู่ที่ประมาณ 0.3 ไมครอน ดังนั้น จากความสัมพันธ์ข้างต้นนี้ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะจะแปรผันตรงกับความหนาของ ชั้นอินเดียมอาร์เซไนด์ นั้นหมายความว่า ถ้าต้องการเพิ่มค่าความคล่องตัวของประจุพาหะก็ต้อง เพิ่มความหนาของชั้นอินเดียมอาร์เซไนด์ สังเกตการปลูกที่ความหนามากกว่า 3 ไมครอน จะเห็น ว่า ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะค่อนข้างอิมิตัว ซึ่งค่าความคล่องตัวนี้ถูกจำกัดโดยการกระเจิง (Scattering) ที่เกิดขึ้น การกระเจิงที่เกิดขึ้นนั้นมี 2 อย่างด้วยกัน คือ

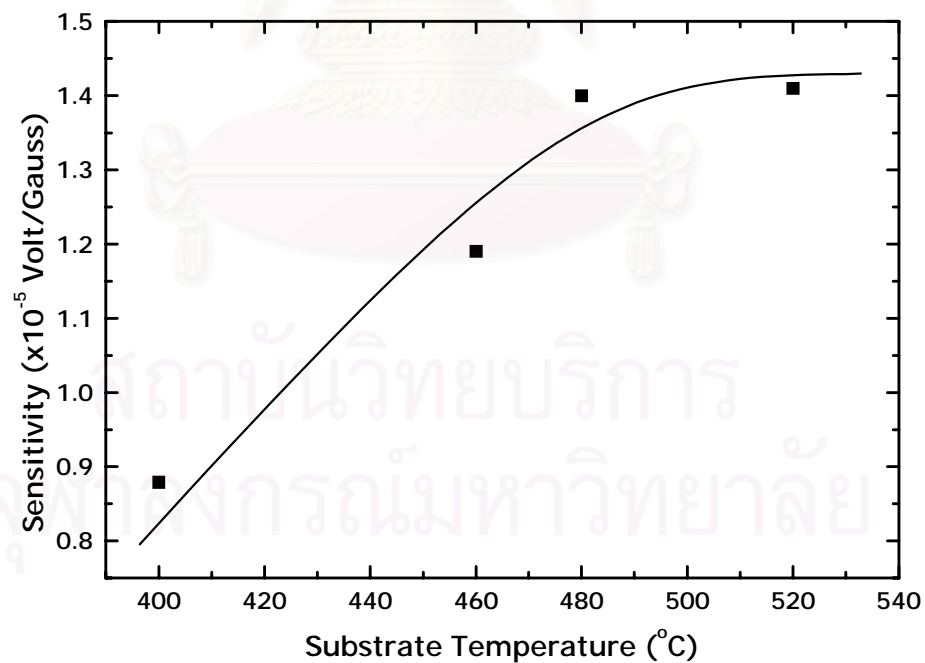
1. Lattice Scattering หรือ Phonon Scattering การกระเจิงลักษณะนี้เกิดขึ้นที่ อุณหภูมิ มากกว่า 200 K และการกระเจิงลักษณะนี้จะเกิดมากขึ้นถ้ามีคุณภาพของ ผลึกที่ไม่ดี
2. Surface Scattering การกระเจิงลักษณะนี้เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของชั้นที่ทำกรปลูก

4.6 การขึ้นกับค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กของค่าแรงดันฮอลล์ที่เงื่อนไขการปลูกต่างๆ

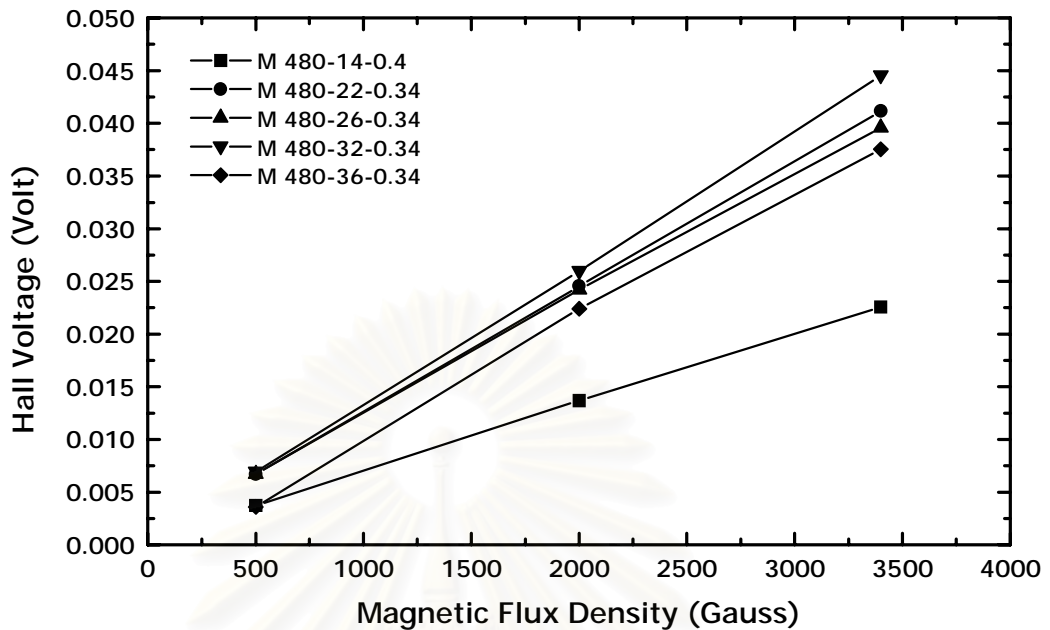
ผลที่ได้จากการวัดชิ้นงานที่ปลูกในเงื่อนไขอุณหภูมิแผ่นฐานต่างกันดังในรูปที่ 4.8 สังเกต เห็นว่าการปลูกที่อุณหภูมิแผ่นฐานสูงๆ จะทำให้ได้ค่าความไวสูง (High Sensitivity) ดังในรูปที่ 4.9 สังเกตในรูปที่ 4.8 ชิ้นงานที่ทั้งหมดที่แสดงนี้ใช้ค่าอัตราส่วนความดันไอของอาร์เซนิกต่ออินเดียม อยู่ที่ประมาณ 20 เท่า และอัตราการปลูกผลึกเท่ากับ 0.48 ML/s พิจารณาที่กราฟ M 520-20-0.48 และ M 480-20-0.48 ใช้อุณหภูมิแผ่นฐาน 520 และ 480 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ถึงจะมีค่าความไวใกล้เคียงกันแต่การปลูกที่อุณหภูมิสูงๆ นั้นทำให้ลักษณะของผิวหน้า ที่ได้เกิดความไม่ราบเรียบ แต่ที่อุณหภูมิแผ่นฐาน 480 องศาเซลเซียส มีความไวที่สูง ดังในรูปที่ 4.9 และยังมีลักษณะผิวหน้าที่ดีอีกด้วย ดังนั้นในการทดสอบนี้จึงยืนยันได้ว่าอุณหภูมิที่เหมาะสม สำหรับการปลูกอินเดียมอาร์เซไนด์เท่ากับ 480 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.8 การขึ้นกับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กของค่าแรงดันฮอลล์ ของชิ้นงานที่ทำการปลูกที่อุณหภูมิแผ่นฐานค่าต่างๆ

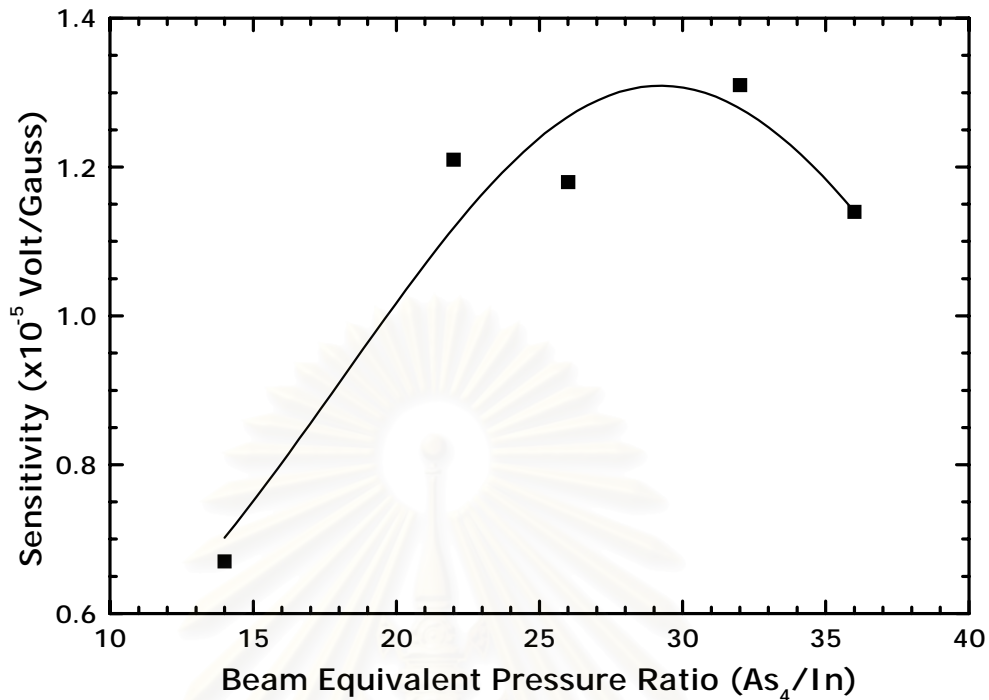


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแผ่นฐานที่มีผลต่อค่าความไวในการตรวจวัดของชิ้นงาน



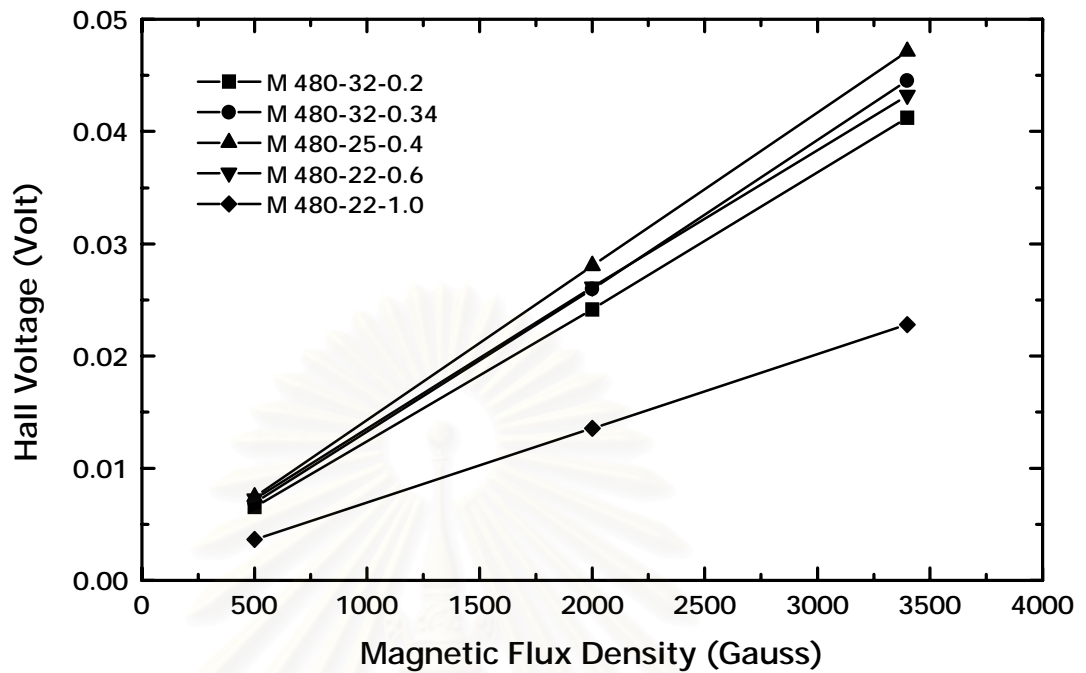
รูปที่ 4.10 การขึ้นกับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กของค่าแรงดันฮอลล์ ของชิ้นงานที่ทำการปลูกที่ความดันไออาร์เซนิกต่ออินเดียมค่าต่างๆ

ผลที่ได้จากการวัดชิ้นงานที่ใช้เงื่อนไขการปลูกต่างๆ ในที่นี้ คือ การเปลี่ยนอัตราส่วนความดันไอของอาร์เซนิกต่ออินเดียมซึ่งปลูกที่ 480 องศาเซลเซียส และใช้อัตราการปลูกผลึกประมาณ 0.34 ML/s ผลที่ได้ดังในรูปที่ 4.10 จากรูปนี้สังเกตเห็นว่าการที่ใช้ค่าอัตราส่วนความดันไอน้อยนั้นทำให้ได้ค่าแรงดันฮอลล์ต่ำ และความไวก็ต่ำอีกด้วย ดังในรูปที่ 4.11 แสดงในกราฟ M 480-14-0.4 ซึ่งการที่ทำให้ได้ผลเช่นนี้เกิดจากความดันไออาร์เซนิกน้อยเกินไปทำให้เสถียรภาพของอาร์เซนิกไม่ดีพอ ซึ่งจะทำให้เกิดความไม่สมดุลระหว่างการเกิดผลึกกับการคายอะตอมออกจากผิวหน้าของผลึก และทำให้ผิวหน้าที่ได้มีความไม่สมบูรณ์ ในเงื่อนไขนี้จะได้ลักษณะของผิวหน้าตามรูปที่ 4.5(ก) ต่อไปสังเกตที่กราฟ M 480-22-0.34, M 480-26-0.34, และ M 480-32-0.34 ซึ่งกราฟในช่วงนี้ คือ การใช้ค่าอัตราส่วนความดันไอ 22, 26, และ 32 ตามลำดับ จะเห็นว่าได้ค่าแรงดันฮอลล์สูง และมีค่าความไวค่อนข้างดีอีกด้วย การทดสอบนี้จะไปสัมพันธ์กับรูปที่ 4.4 ซึ่งช่วงของการปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์ที่เหมาะสมก็อยู่ในช่วงนี้เช่นกัน แต่เมื่อทำการเพิ่มค่าอัตราส่วนความดันไอมากขึ้นจะทำให้ได้ค่าแรงดันฮอลล์ลดลงเป็นไปตามกราฟ M 480-36-0.34 เกิดขึ้นเพิ่มค่าความดันของอาร์เซนิกมากเกินไปจะทำให้ระยะปลอดการชนน้อย และทำให้เกิดจุดบกพร่องได้มาก และยังสามารถสรุปด้วยค่าความไวในการตรวจวัดของชิ้นงาน ดังในรูปที่ 4.11 จากกราฟในรูปนี้สังเกตเห็นว่าช่วงที่เหมาะสมอยู่ที่ค่าอัตราส่วนความดันไอ ในช่วง 22-32 เท่า เช่นกัน

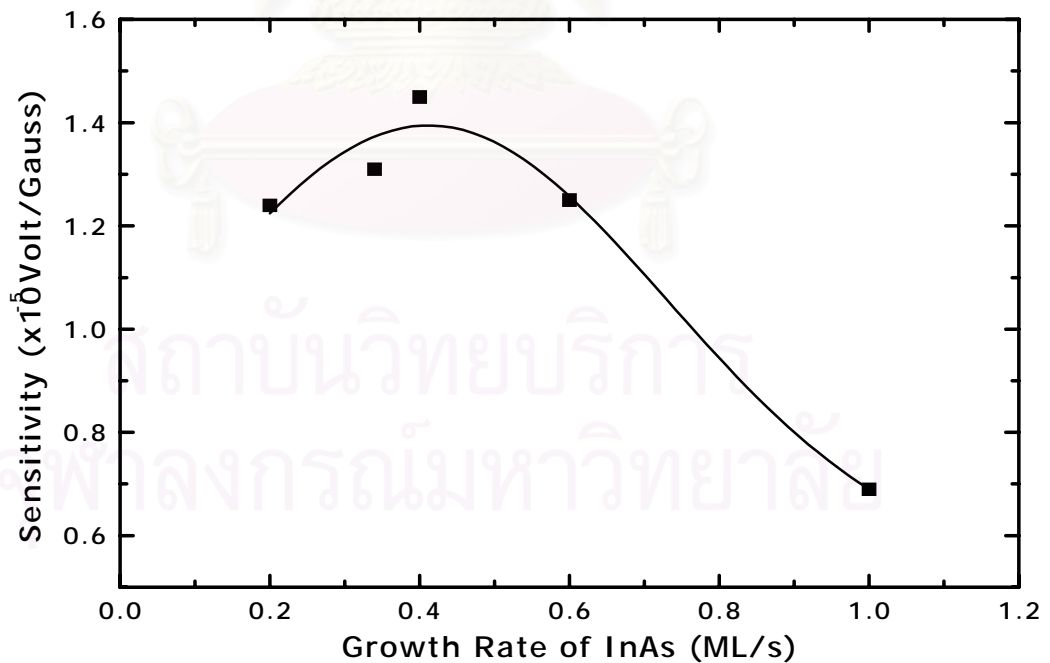


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความดันไอของอาร์เซนิกต่ออินเดียมที่มีผลต่อความไวในการตรวจวัดของชิ้นงาน

ผลของการทดสอบชิ้นงานที่ใช้เงื่อนไขการปลูกโดยปรับเปลี่ยนค่าอัตราการปลูกผลึกดังในรูปที่ 4.12 การทดสอบนี้จะเห็นว่าที่อัตราเร็วในการปลูกเท่ากับ 0.4 ML/s ให้ค่าแรงดันฮอลล์สูงสุด นั้นยังบ่งบอกถึงผลึกที่ได้จากการปลูกมีคุณภาพดีที่สุดในที่นี้ ซึ่งก็ไปสัมพันธ์กับ ตารางที่ 4.1 ที่ความเร็วในการปลูก 0.4 ML/s ในตารางนี้นั้นให้ค่าความคล่องตัวสูงที่สุด และยังอธิบายได้อีกว่าการปลูกที่อัตราการปลูกผลึกต่ำ และการปลูกที่อัตราการปลูกผลึกสูง ไม่ดีอย่างไร สามารถกลับไปดูในหัวข้อที่ 4.4 จะทำให้เข้าใจมากขึ้น และยังสามารถยืนยันด้วยผลของค่าความไวในการตรวจวัด ดังในรูปที่ 4.13 จะสังเกตเห็นว่าที่ อัตราการปลูกผลึกที่ 0.4 ML/s เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งค่านี้ทำให้ได้ค่าความไวสูงที่สุด ดังนั้นแสดงว่าที่อัตราการปลูกผลึกนี้เป็นอัตราการปลูกผลึกที่เร็วที่สุด ที่ทำให้ได้คุณภาพของผลึกที่ดี เมื่อเปรียบกับค่าอัตราการปลูกผลึกค่าอื่น



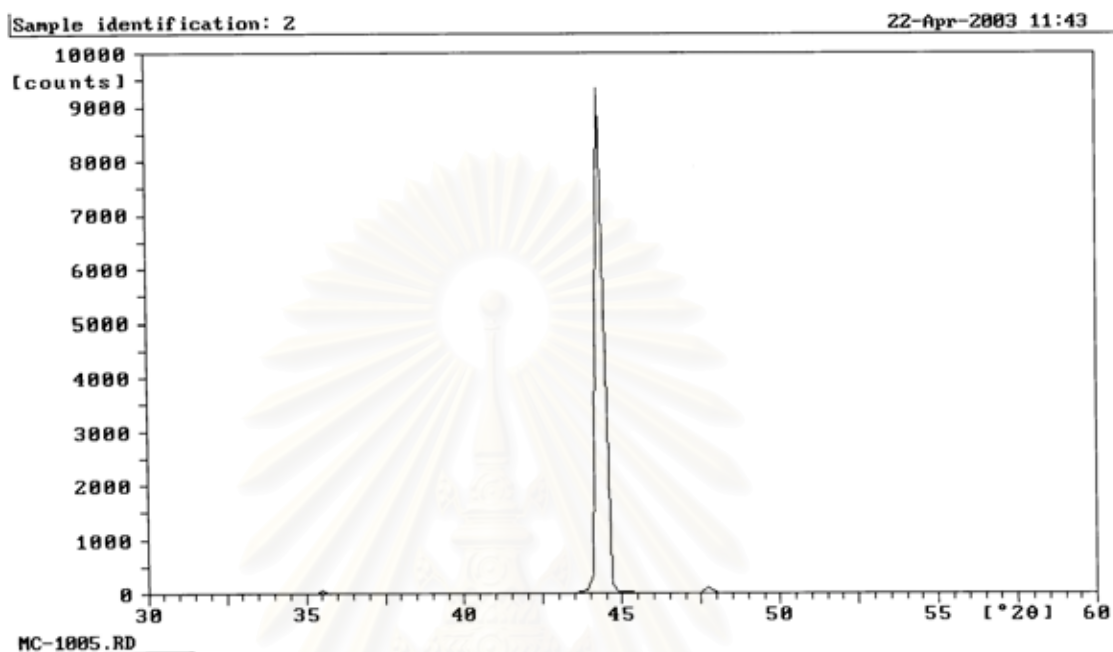
รูปที่ 4.12 การวัดค่าแรงดันฮอลล์ของชิ้นงานที่ใช้การปลูกที่อัตราการปลูกผลึกค่าต่างๆ



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการปลูกผลึกที่มีผลต่อค่าความไวในการตรวจวัดของชิ้นงาน

4.7 การวัดคุณภาพของชั้นผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์ด้วย X-ray Diffraction

ในการวัดคุณภาพของผลึกเป็นการวัดเพื่อพิสูจน์ว่าผลึกที่ปลูกเป็นวัสดุอินเดียมอาร์เซไนด์ที่สมบูรณ์ โดยสังเกตจากมุมตกกระทบ และมุมสะท้อน ได้ผลการวัดดังในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าตำแหน่งของมุมตกกระทบ และมุมสะท้อน ที่ได้จากชิ้นงาน

จากกราฟจะสังเกตเห็นว่าค่ามุมตกกระทบ และมุมสะท้อน (2θ) อยู่ที่ค่า 44.37 องศา และ 47.81 องศา จากการศึกษาคพบว่าค่า 2θ ของ อินเดียมอาร์เซไนด์ และแกลเลียมอาร์เซไนด์ จะสังเกตเห็นที่มุมต่างๆ เป็นไปตามตารางที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ ซึ่งข้อมูลพื้นฐานนี้ ใช้ค่าความยาวคลื่นที่ 2.2897 อังสตรอม จากรูปที่ 4.14 ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 44.37 องศา จะได้ว่า เป็นค่า 2θ ของอินเดียมอาร์เซไนด์ และที่เท่ากับ 47.81 องศา เป็นแกลเลียมอาร์เซไนด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3 ซึ่งค่าในตารางทั้งสองเป็นค่า 2θ ที่เกิดขึ้นที่ระนาบต่างๆ ผลที่ได้จากการวัดซึ่งได้ค่าเป็น 2θ สามารถที่จะหารระยะห่างระนาบได้ ดังสมการที่ 39

$$2d_{hkl} \sin\theta = n\lambda \quad (39)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่น (Å)

n คือ ลำดับการสะท้อน

d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ (Å)

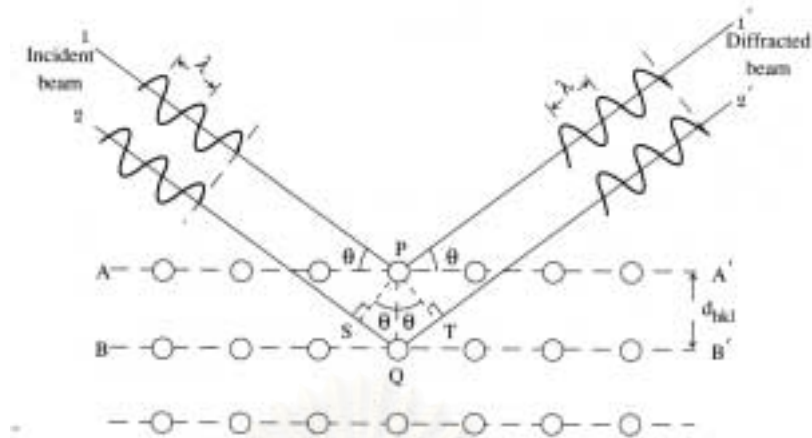
θ คือ มุมตกกระทบ และมุมสะท้อน

ตารางที่ 4.2 เป็นค่า 2θ และ d_{hkl} ของอินเดียมดียมอาร์เซไนต์

d value (d_{hkl})	Angle (2θ)
3.4980	38.208
3.0300	44.400
2.1420	64.617
1.8263	77.639
1.7489	81.780
1.5145	98.213
1.3895	110.960
1.3544	115.404
1.2366	135.580
1.1658	158.243

ตารางที่ 4.3 เป็นค่า 2θ และ d_{hkl} ของแกดเลียมอาร์เซไนต์

d value (d_{hkl})	Angle (2θ)
3.2630	41.080
2.8250	47.814
1.9982	69.911
1.7046	84.385
1.6319	89.102
1.4136	108.169
1.2972	123.904
1.2643	129.787



รูปที่ 4.15 แบบจำลองสำหรับการพิสูจน์กฎของแบรกก์

จากรูปที่ 4.15 จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้ $SQ + QT = 2d \sin(\theta) = n\lambda$ โดยที่ n เป็นจำนวนเต็มใดๆ จากข้อมูลที่ได้ในรูปที่ 4.14 สามารถคำนวณหาค่า d_{hkl} ได้จากสมการที่ 39 การวัดใช้ค่าความยาวคลื่นที่ค่า 2.2897 อังสตรอม เมื่อเราแทนค่า 2θ ที่ค่า 44.365 และ 47.805 องศา จะได้ค่า d_{hkl} เป็น 3.03 และ 2.82 อังสตรอม ตามลำดับ จากค่า d_{hkl} สามารถคำนวณกลับไปหาค่าระนาบ (hkl) ได้จากสมการที่ 40, 41

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (40)$$

$$h^2 + k^2 + l^2 = \left(\frac{a}{d_{hkl}} \right)^2 \quad (41)$$

เมื่อแทนค่าคงที่โครงผลึก (a_{InAs}) และ d_{hkl} ของอินเดียมอาร์เซไนด์ลงในสมการที่ 41 จะได้ค่า $h^2 + k^2 + l^2$ เท่ากับ 4 ซึ่งค่านี้สอดคล้องกับโครงสร้างลูกบาศก์ (Cubic) ระนาบ (200) ดังตารางที่ 4.4 เช่นเดียวกัน เมื่อแทนค่าคงที่โครงผลึก (a_{GaAs}) และ d_{hkl} ของแกลเลียมอาร์เซไนด์ลงในสมการที่ 41 ก็ได้ค่า $h^2 + k^2 + l^2$ เท่ากับ 4 ซึ่งก็จะได้เป็นระนาบ (200) เหมือนกัน นั้นหมายความว่าระนาบของชั้นอินเดียมอาร์เซไนด์ที่ปลูกบนแผ่นฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์ ที่ตรวจสอบโดยการวัด X-ray Diffraction เป็นระนาบเดียวกันกับแผ่นฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์

ตารางที่ 4.4 รูปแบบของค่า $h^2+k^2+l^2$ สำหรับลูกบาศก์ทั้ง 4 แบบ

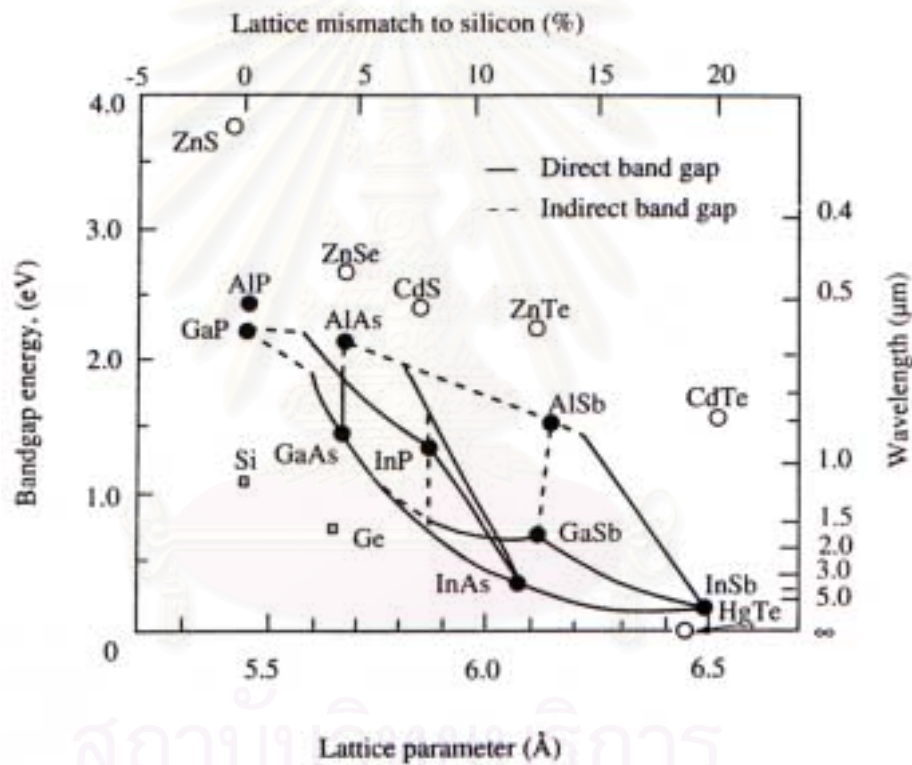
{hkl}	$h^2+k^2+l^2$	Cubic			
		Simple	Body-centered	Face-centered	Diamond
{100}	1	/			
{110}	2	/	/		
{111}	3	/		/	/
{200}	4	/	/	/	
{210}	5	/			
{211}	6	/	/		
{220}	8	/	/	/	/
{221}	9	/			
{222}	12	/	/	/	
{300}	9	/			
{310}	10	/	/		
{311}	11	/		/	/
{320}	13	/			
{321}	14	/	/		
{322}	17	/			
{330}	18	/	/		
{331}	19	/		/	/
{332}	22	/	/		
{333}	27	/		/	/
{400}	16	/	/	/	/

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การทดลองปลูกผลึกอพิแทกซีอินเดียมอาร์เซไนด์บนแผ่นฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์นั้นก่อนอื่นจะต้องศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของสารประกอบกึ่งตัวนำทั้งแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่ใช้เป็นแผ่นฐาน และอินเดียมอาร์เซไนด์ที่ต้องการปลูก จากการศึกษาพบว่าค่าคงที่โครงผลึกแตกต่างกันถึง 7.4 % ซึ่งค่านี้เรียกว่าความไม่เข้ากันของโครงผลึก (Lattice Mismatch) ดังในรูปที่ 5.1 ในรูปนี้ยังแสดงค่าแถบพลังงานต้องห้าม และความยาวคลื่นอีกด้วย



รูปที่ 5.1 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงผลึก ค่าความกว้างแถบพลังงานต้องห้าม และค่าความยาวคลื่นของสารประกอบกึ่งตัวนำ

ดังนั้นจะมีปัญหาเกิดขึ้นเมื่อทำการปลูกผลึกอพิแทกซีอินเดียมอาร์เซไนด์ซึ่งมีค่าคงที่โครงผลึก (6.06 อังสตรอม) ที่มีขนาดใหญ่กว่าลงบนแผ่นฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่มีค่าคงที่โครงผลึก (5.65 อังสตรอม) น้อยกว่า ปัญหาที่เกิดขึ้น คือ จะเกิดความเครียดขึ้น เมื่อปลูกชั้นผลึกหนาถึงประมาณ 1.7-1.8 ML/s หรือ 5.0-5.5 อังสตรอม ซึ่งความหนานี้เป็นความหนาที่เรียกว่า

ความหนาวิกฤต (Critical Thickness) ซึ่งความเครียดที่เกิดขึ้นสามารถทำให้ลดลงได้ โดยไม่ทำให้ผลึกที่ปลูกเกิดความเสียหาย คือ การปลูกจะต้องใช้เงื่อนไขที่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิแผ่นฐาน, อัตราส่วนความดันไอของอาร์เซนิกต่ออินเดียม และอัตราการปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนต์

จากการทดลองหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสามารถสรุปเป็นข้อ ๆ ดังนี้

5.1 การทดลองหาเงื่อนไขอุณหภูมิแผ่นฐานที่ใช้ปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนต์

จากการทดลองหาอุณหภูมิแผ่นฐานที่เหมาะสมนั้นพบว่าการใช้อุณหภูมิแผ่นฐานน้อยเกินไปจะทำให้เกิดความไม่สมดุลขึ้นของการเกิดผลึก คือ การปลูกที่อุณหภูมิต่ำ อะตอม และโมเลกุลของธาตุต่างๆจะมีระยะปลอดการชนน้อย และมีพลังงานกระตุ้นที่ใช้ในการสร้างพันธะต่ำกว่า ดังนั้นการปลูกผลึกที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้มีโอกาสเกิดข้อบกพร่องได้สูง เช่น เกี่ยวกับการปลูกผลึกที่ใช้อุณหภูมิแผ่นฐานสูงก็จะเกิดความบกพร่องเช่นกัน แต่สาเหตุนี้มาจากเกิดความไม่สมดุลขึ้นระหว่างการเกิดผลึกกับการคายอะตอมออกจากผิวหน้าของผลึก เพราะเวลาที่อุณหภูมิแผ่นฐานสูงนี้มีอัตราการคายอะตอมออกจากผิวหน้าสูงกว่าอัตราการเกิดผลึกทำให้ไม่สามารถปลูกได้ เพราะฉะนั้นการปลูกผลึกอิพิแทกซ์อินเดียมอาร์เซไนต์จึงมีช่วงของอุณหภูมิที่สามารถใช้ได้อยู่ในช่วง 440-480 องศาเซลเซียส จากการทดลองที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส นี้จะได้ค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าดีที่สุด

5.2 การทดลองหาค่าอัตราส่วนความดันไอของอาร์เซนิกต่ออินเดียม

จากการทดลองเป็นการปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความดันไอของอาร์เซนิกต่ออินเดียมโดยการปรับเปลี่ยนนั้นจะปรับจากความดันไอของอาร์เซนิก และให้ความดันไอของอินเดียมคงที่ที่ค่า 3.8×10^{-7} Torr ที่ค่าความดันไอของอินเดียมค่านี้จะเท่ากับการใช้ค่าอัตราการปลูกผลึกประมาณ 0.34 ML/s ในการทดลองนี้ใช้อุณหภูมิแผ่นฐาน 480 องศาเซลเซียส ปลูกที่ความหนา 1 ไมครอน ผลที่ได้จากการทดลองจะพิจารณาจากค่าความคล่องตัวของพาหะกับลักษณะของผิวหน้าที่ได้ ที่ค่าอัตราส่วนความดันไอของอาร์เซนิกต่ออินเดียมในช่วง 22 เท่าถึง 32 เท่า เป็นค่าที่เหมาะสม คือ ให้ค่าความคล่องตัวของพาหะที่สูง และยังมีผิวหน้าที่ดีอีกด้วย แต่ถ้าปรับค่าอัตราส่วนความดันไอของอาร์เซนิกต่ออินเดียมลดลง สังเกตเห็นว่าค่าความคล่องตัวของพาหะลดลงด้วยเป็นผลอันเนื่องมาจากความดันอาร์เซนิกน้อยเกินไป ทำให้เสถียรภาพของอาร์เซนิกไม่ดีพอ จึงเกิดความไม่สมดุลขึ้นระหว่างการเกิดผลึกกับการคายอะตอมออกจากผิวหน้าของผลึก ในกรณีนี้การคายอะตอมจะมากกว่าการเกิดผลึกซึ่งจะทำให้ผิวหน้าที่ได้มีความไม่สมบูรณ์ของผลึกทำให้ค่าความคล่องตัวต่ำ เมื่อเราปรับให้ค่าอัตราส่วนความดันไอของอาร์เซนิกต่ออินเดียมเพิ่มขึ้นนั้น

หมายความว่าเราเพิ่มค่าความดันอาร์เซนิกมากขึ้น จะทำให้ระยะเวลาปลดการชนของอะตอมอินเดียมน้อยลง และทำให้เกิดความบกพร่องของผลึกขึ้น เช่น เดียวกับการใช้ความดันไออาร์เซนิกน้อยเกินไป คือ ทำให้ได้ค่าความคล่องตัวพาหะลดลง

5.3 การทดลองหาค่าอัตราการปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนต์

ในการทดลองนี้จำเป็นต้องศึกษาเกี่ยวกับการปลูกผลึกที่มีค่าคงที่โครงสร้างผลึกแตกต่างกัน ซึ่งการปลูกผลึกที่มีค่าคงที่โครงสร้างผลึกของชั้นที่ทำการปลูกมากกว่าค่าคงที่โครงสร้างผลึกที่เป็นแผ่นฐานนั้นจะก่อให้เกิดความเครียดที่ผิวหน้าซึ่งความเครียดนี้เป็นตัวแปรที่สำคัญในการพิจารณาหาเงื่อนไขการปลูกที่เหมาะสม จากการทดลองพบว่าเมื่อชั้นผลึกที่ทำการปลูกใช้อัตราการปลูกผลึกที่เหมาะสมจะทำให้ได้ค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าสูง และลักษณะของผิวหน้าที่ดีอีกด้วย แต่เมื่อใช้ค่าอัตราการปลูกผลึกน้อยเกินไปในการทดลองนี้ใช้ค่าอัตราการปลูกผลึกที่ 0.2 ML/s จะตรงกับค่าความดันไออินเดียมที่ 1.8×10^{-7} Torr ซึ่งค่าความดันไอนี้จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าความดันบรรยากาศภายในห้องปลูกผลึก (Background Pressure) ซึ่งมีค่าประมาณ 1×10^{-7} Torr ในระหว่างทำการปลูกผลึก การที่ความดันมีความแตกต่างกันน้อยนั้นในระหว่างทำการปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนต์จะทำให้สารเจือปนที่อยู่ในห้องปลูกผลึกเข้ามาปนเปื้อนทำให้ผลึกที่ได้ไม่มีผลึกที่ไม่สมบูรณ์ทำให้ค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าลดลง และการปลูกผลึกโดยใช้อัตราการปลูกผลึกสูงที่ค่า 0.6 ML/s ตรงกับค่าความดันไอของอินเดียมเท่ากับ 7×10^{-7} Torr ซึ่งจะทำให้ระยะเวลาผ่อนคลายความเครียด (Strain Relaxation) ของผลึกสั้นลงจึงเป็นผลให้เกิดจุดบกพร่องขึ้นที่ผลึก เพราะฉะนั้นอัตราการปลูกผลึกสำหรับการปลูกอินเดียมอาร์เซไนต์จะอยู่ในช่วง 0.34-0.48 ML/s ที่ค่าอัตราการปลูกผลึกที่ได้ทั้งคุณสมบัติทางไฟฟ้าสูงและผิวหน้าของผลึกที่ดีที่สุดจะอยู่ที่ 0.4 ML/s

5.4 การทดลองศึกษาความหนาของผลึกอินเดียมอาร์เซไนต์

การทดลองนี้ทำหลังจากการได้ค่าอุณหภูมิแผ่นฐานที่เหมาะสม และช่วงของอัตราส่วนความดันไอของอาร์เซนิกต่ออินเดียมแล้ว โดยจะศึกษาผลของความหนาของชั้นผลึกที่ทำการปลูกต่อค่าความคล่องตัวของพาหะโดยที่ทุกชั้นงานมีลักษณะของผิวหน้าที่ดี การทดลองนี้ได้ทำการปลูกผลึกที่มีความหนา 0.3, 0.5, 1.0, 2.6, 3 และ 4 ไมครอน จากการทดลองพบว่าที่ความหนาน้อยๆ จะได้ค่าความคล่องตัวต่ำ เป็นผลอันเนื่องมาจากเกิดการกระเจิงที่ผิวหน้า และที่รอยต่อระหว่างชั้นอินเดียมอาร์เซไนต์ที่ทำการปลูกกับแผ่นฐานแกลเลียมอาร์เซไนต์เกิดเป็นชั้นอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนต์บางๆ ขึ้นซึ่งชั้นนี้มีค่าความคล่องตัวต่ำ และเมื่อเราปลูกความหนามากขึ้นจะเห็นได้ว่าค่าความคล่องตัวก็จะมากขึ้นตาม อธิบายได้จากค่าความหนาของชั้นอินเดียมอาร์เซไนต์มีค่ามากกว่าระยะปลดการชน (Mean free path : L_{mfp}) ของอิเล็กตรอน จากการ

ศึกษาพบว่าระยะปลดการชนของอิเล็กตรอนประมาณ 0.3 ไมครอน จะเห็นว่าค่าความหนาของชั้นอินเดียมอาร์เซไนด์มากกว่า 0.3 ไมครอน ค่าความคล่องตัวของพาหะจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าความหนาประมาณ 3 ไมครอน ค่าความคล่องตัวจะอิ่มตัว ซึ่งค่าความคล่องตัวนี้ถูกจำกัดโดยการกระเจิง (Scattering) ที่เกิดขึ้น การกระเจิงที่เกิดขึ้นนั้นมี 2 อย่างด้วยกัน คือ Lattice Scattering หรือ Phonon Scattering และ Surface Scattering



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์ชนิดหนานบนแผ่นฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์ โดยวิธีการปลูกผลึกจากลำโมเลกุล ซึ่งข้อมูลที่ได้นับว่าเป็นประโยชน์ สำหรับการนำไปพัฒนาสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์ เช่น การนำไปทำเป็นสิ่งประดิษฐ์ทางแม่เหล็ก (Magnetic Devices) และสิ่งประดิษฐ์ที่ให้ผลสนองที่ความถี่สูง (High Frequency Devices) เพราะผลึกที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าคุณสมบัติที่ดี ทั้งคุณสมบัติทางไฟฟ้า คือ มีค่าความคล่องตัวของประจุพาหะสูง (High Carrier Mobility) และมีเสถียรภาพทางอุณหภูมิที่ดี (Good Temperature Stability) ข้อมูลที่ได้จากการทำวิจัยทั้งหมดนี้เป็นค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้า และลักษณะทางกายภาพของผิวหน้า ซึ่งข้อมูลเหล่านี้เพียงพอที่จะนำไปสร้างสิ่งประดิษฐ์ทางแม่เหล็ก ซึ่งทำจากผลึกชนิดหนาได้ อย่างไรก็ตาม สำหรับกรวิจัยนี้ยังมีประเด็นที่น่าสนใจเพิ่มเติมอยู่อีกมาก แบ่งเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

1. การศึกษาโครงสร้างของผลึกโดยละเอียด โดยอาศัยเครื่องวัดทรานสมิทชันอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Transmission Electron Microscope : TEM) เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นการปลูกผลึกซึ่งมีความไม่เข้ากันของผลึก (Lattice Mismatch) เกิดขึ้นมาก ถ้าได้ทำการศึกษาจากการวัดนี้จะทำให้ทราบถึงปรากฏการณ์ของการเกิดผลึกตรงรอยต่อที่เงื่อนไขการปลูกต่างๆ กันได้เป็นอย่างดี

2. การนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างสิ่งประดิษฐ์ที่เป็นโครงสร้าง เช่น โครงสร้างที่ใช้ปรากฏการณ์ก๊าซอิเล็กตรอนแบบ 2 มิติ (Two Dimensional Electron Gas : 2DEG) โดยสร้างจาก อลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์กับอินเดียมอาร์เซไนด์ โครงสร้างที่เป็นควอนตัมเวลล์ซ้อน (Multi-Quantum Well : MQW) โดยสร้างจากอลูมิเนียมแกลเลียมแอสไนด์กับอินเดียมอาร์เซไนด์ เป็นต้น

3. การนำผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์ชนิดหนาที่ปลูกโดยเงื่อนไขต่างๆ ไปศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางแสง โดยอาศัยการวัดด้วยวิธีโฟโตลูมิเนสเซนส์ (Photoluminescence : PL) เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์ทางไฟฟ้า-แสง

4. การประยุกต์ใช้งานของผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์ที่ได้ทำการวิจัยนี้ สามารถนำไปผลิตเป็นตัวอุปกรณ์ที่ใช้งานได้จริง และนำผลที่ได้จากการใช้งานจริง เปรียบเทียบกับของที่มีจำหน่ายอยู่ในท้องตลาดว่ามีข้อดีข้อเสียอย่างไรเพื่อนำมาพัฒนา และปรับปรุงต่อไป

รายการอ้างอิง

1. Ichiro Shibusaki. Mass Production of InAs Hall Elements by MBE. Journal of Crystal Growth 175/176 (1997) : 13-21.
2. Gu Hyun Kim, Jung Bum Choi, Jae Young Leem, Joo In Lee, Sam Kyu Noh, Jong Su Kim, Jin Soo Kim, Se Kyung Kang, Seung Il Ban. Optical Properties of InAs Epilayers Grown on GaAs by Molecular Beam Epitaxy. Journal of Crystal Growth 234 (2002) : 110-114.
3. Max Epstein. Hall Effect Devices. IEEE Transaction on Magnetics 3 (1967) : 352-359.
4. M. Behet, J. De Boeck, and G. Borghs. InAs Quantum Well Magnetic Sensors with High Sensitivity and Excellent Temperature Stability. International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems (1998) : 323-326.
5. S.Kalem. Molecular Beam Epitaxial Growth and Transport Properties of InAs Epilayers. Journal Appl. Phys 66 (1989) : 3097-3103.
6. M. A. Herman, H. Sitter. Molecular Beam Epitaxy Fundamentals and Current Status. Springer-Verlay Berlin Heidelberg, 1989.
7. Mitsuaki Yano, Masaharu Nogami, Yuichi Matsushima, and Morihiko Kimata. Molecular Beam Epitaxial Growth of InAs. Japanese Journal of Applied Physics 16 (1977) : 2131-2137.
8. Pallab Bhattacharya. Properties of Lattice-Matched and Strained Indium Gallium Arsenide. INSPEC, 1993.
9. T. Nakayama and H. Miyamoto. Dependence of Critical Thickness of Strained InAs Layer on Growth Rate. Kansai Electronics Research Laboratories, NEC, Japan.
10. David G. Look. Electrical Characterization of GaAs Materials and Devices. John Wiley & Sons, 1989.
11. A. S. Bracker, M. J. Yang, B. R. Bennett, J. C. Culbertson, and W. J. Moore. Surface Reconstruction Phase Diagrams for InAs, AlSb, and GaSb. Journal of Crystal Growth 220 (2000) : 384-392.

12. A. N. Alexeev, S. Yu Karpov, Yu V. Pogorelsky, and I.A. Sokolov. RHEED Study of c(4x4) to (2x4) Transition on GaAs (001) Surface. Journal of Crystal Growth 166 (1996) : 72-77.
13. O. Madelung. Semiconductors Group IV Elements and III-V Compounds. Springer-Verlay Berlin Heidelberg, 1991.
14. Pallab Bhattacharya. Semiconductor Optoelectronic Devices. Prentice-Hall International, Inc., 1994.
15. Ben G. Streetman and Sanjay Banerjee. Solid State Electronic Devices. Prentice-Hall International, Inc., 2000.
16. John R. Arthur. Molecular Beam Epitaxy. Elsevier Science, 2001.
17. Robert F. Pierret. Semiconductor Device Fundamentals. Addison Wesley Publishing Company, Inc., 1996.
18. Dieter K. Schroder. Semiconductor Material and Device Characterization. John Wiley & Sons, Inc., 1990.
19. มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร, สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว, บรรยง ไตประเสริฐพงษ์. สมบัติของวัสดุทางวิศวกรรมไฟฟ้า. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
20. ดุสิต เครื่องงาม. โซลิตสเททฟิสิกส์. บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, 2521.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

คุณสมบัติของสารประกอบกึ่งตัวนำ

1. คุณสมบัติที่สำคัญของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V

สารกึ่งตัวนำ	ขนาดช่องว่างพลังงาน (eV)		ความคล่องตัวที่ 300 K (cm ² /V-s)		ชนิดของช่องว่างพลังงาน	มวลประสิทธิผล m*/m ₀	
	300 K	0 K	Electron	Hole		Electron	Hole
	AlSb	1.58	1.68	200	420	I	0.12
BN	7.5	-	-	-	I	-	-
GaN	3.36	3.50	380	-	-	0.19	0.60
GaSb	0.72	0.81	5000	850	D	0.042	0.40
GaAs	1.42	1.52	8500	400	D	0.067	0.082
GaP	2.26	2.34	110	75	I	0.82	0.60
InSb	0.17	0.23	80000	1250	D	0.0145	0.40
InAs	0.36	0.42	33000	460	D	0.023	0.40
InP	1.35	1.42	4600	150	D	0.077	0.64

2. ค่าคงที่โครงสร้างผลึกของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V

สารกึ่งตัวนำ	โครงสร้างผลึก	ค่าคงที่โครงสร้างผลึก (Å)	มวล (g/cm ³)	ε _r	จุดหลอมเหลว (°C)
AlAs	Z	5.66	3.60	10.9	1740
AlP	Z	5.46	2.40	9.8	2000
AlSb	Z	6.14	4.26	11	1080
GaAs	Z	5.65	5.31	13.2	1238
GaN	W	4.5	6.1	12.2	2530
GaP	Z	5.45	4.13	11.1	1467
GaSb	Z	6.09	5.61	15.7	712
InAs	Z	6.06	5.67	14.6	943
InP	Z	5.87	4.79	12.4	1070
InSb	Z	6.48	5.78	17.7	525

ภาคผนวก ข.

การปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์จากลำโม่เลกุล

ขั้นตอนการปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์บนแผ่นฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์มีดังนี้

1. การเตรียมแผ่นฐาน

แผ่นฐานที่ได้นำมาทำการวิจัยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว โดยทำการตัดแบ่งออกเป็น 4 ส่วนเท่าๆ กัน ในการทดลองครั้งหนึ่งจะใช้เพียง 1 ส่วนเท่านั้น ติดลงบนบล็อกโมลิบดีนัม โดยใช้อินเดียมหลอมเหลวเป็นตัวยึดติดแผ่นฐานบนบล็อกด้วยแรงตึงผิวของอินเดียม ต่อไปนำแผ่นฐานที่ติดอยู่บนบล็อกเข้าสู่ระบบปลูกผลึก

2. การเตรียมแผ่นฐานภายในห้องเตรียมแผ่นฐาน

ก่อนการทำการปลูกผลึกทุกครั้งจะต้องมีการทำความสะอาดก่อน ในครั้งแรกนี้จะอยู่ในห้องเตรียมแผ่นฐาน เป็นการทำความสะอาดด้วยความร้อน โดยจะนำบล็อกที่มีแผ่นฐานไปใส่ไว้ที่ตัวทำความร้อน การทำความสะอาดแผ่นฐานนี้ทำได้ด้วยการเพิ่มความร้อนแก่บล็อกที่มีแผ่นฐานอย่างช้าๆ จนกระทั่งอุณหภูมิสูงถึง 450 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง การทำความสะอาดนี้ เพื่อให้อนุภาคต่างๆ ที่ติดอยู่กับบล็อก และแผ่นฐานหลุดออกไป จากนั้นก็ลดอุณหภูมิลงแล้วทำขั้นตอนต่อไป

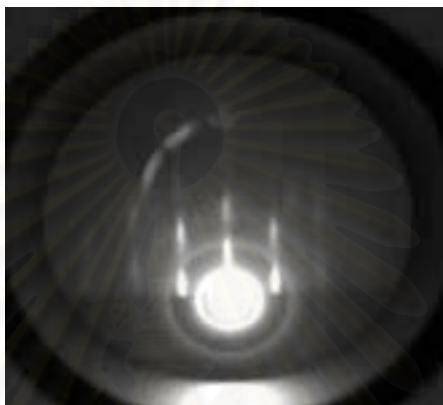
3. การนำแผ่นฐานเข้าสู่ห้องปลูกผลึก

เมื่อทำความสะอาดแผ่นฐานในครั้งแรกเสร็จแล้วก็นำบล็อกที่มีแผ่นฐานเข้าห้องปลูกผลึก โดยการนำบล็อกไปใส่ไว้ที่รถเลื่อนที่อยู่ในห้องเคลือบก่อน จากนั้นก็ใช้ก้านจับแม่เหล็กจับเอาบล็อกที่มีชิ้นงานที่ต้องปลูกไปไว้ที่หัวจับบล็อก (Manipulator) ที่อยู่ภายในห้องปลูกผลึก

4. การเตรียมแผ่นฐาน และห้องปลูกผลึก

ในขั้นตอนนี้จะทำการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นฐานและอุณหภูมิที่จะใช้ทำการปลูก อุณหภูมิแผ่นฐานจะเพิ่มขึ้นไปที่ 250 องศาเซลเซียส ส่วนอุณหภูมิของสารที่ใช้ปลูก คือ แกลเลียม จะเพิ่มขึ้นไปที่ 940 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ 10 นาที แล้วลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิที่ใช้ปลูก 890 องศาเซลเซียส การทำเช่นนี้ เพื่อทำความสะอาดสารที่จะปลูกเรียกว่า Degas Cell และอินเดียม เพิ่มขึ้นไปที่ 850 องศาเซลเซียส แล้วลดลงมาที่ 800 องศาเซลเซียส ต่อไปก็ทำการวัดค่าความดันไอของ

ถ้าโมเลกุล ที่ต้องการใช้ทั้งแกเลียม และอินเดียม ได้ค่าความดันไอที่ต้องการแล้ว ทำการเพิ่มอุณหภูมิอาร์เซนิก การที่เพิ่มอุณหภูมิของอาร์เซนิกที่หลัง เพราะว่า การเพิ่มอุณหภูมิให้แก่อาร์เซนิก นั้นมีผลกับความดันภายในห้องปลูกผลึกมาก คือ จะทำให้ความดันภายในห้องปลูกผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสาเหตุทำให้ไม่สามารถวัดค่าความดันไอของแกเลียม และอินเดียมได้ หลังจากเพิ่มอุณหภูมิของอาร์เซนิกจนได้ความดันไอของอาร์เซนิกที่ต้องการแล้วก็จะเปิด Shutter ของอาร์เซนิก

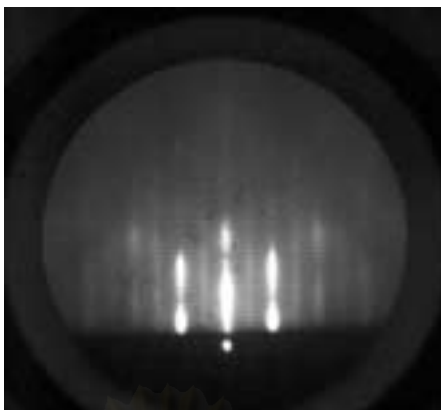


รูปที่ 1 แผนภาพ RHEED เมื่อจำกัดออกไซด์ออกจากผิวหน้าแผ่นฐานแกเลียมอาร์เซไนด์

เพื่อให้ความดันไอของอาร์เซนิกรักษาเสถียรภาพของผิวหน้าแผ่นฐานไว้มิให้เกิดการคายอะตอมมากเกินไปจนทำให้ผิวหน้าเกิดความเสียหาย เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นฐานมากขึ้น ก็จะมีอุณหภูมิแผ่นฐานขึ้นไปจนถึงอุณหภูมิที่ทำให้ออกไซด์หลุด ประมาณ 600 องศาเซลเซียส ออกไซด์นี้เกิดมาจากกระบวนการผลิตแผ่น Wafer ของผู้ผลิต เพื่อรักษาผิวหน้าของ Wafer ก่อนการจัดจำหน่าย แนใจแล้วว่าออกไซด์หลุดออกจากผิวหน้าหมดแล้วสังเกตได้จากแผนภาพ RHEED มีความคมชัด ดังรูปที่ 1 ต่อไปก็จะทำการปลูกชั้นแกเลียมอาร์เซไนด์บัพเฟอร์

5. การปลูกแกเลียมอาร์เซไนด์บัพเฟอร์

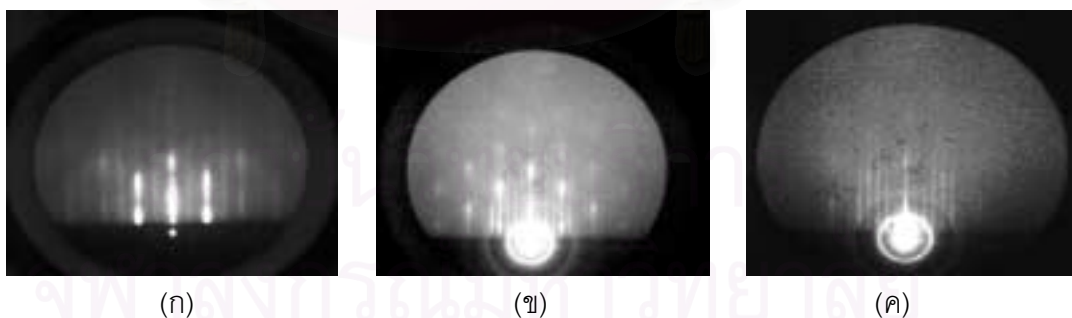
การปลูกชั้นแกเลียมอาร์เซไนด์บัพเฟอร์ในงานวิจัยนี้จะปลูกที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่กำหนดออกไซด์อยู่ 20 องศาเซลเซียส ใช้อัตราความเร็วในการปลูก 0.5 ML/s ปลูกหนา 0.5 ไมครอน การที่ต้องทำการปลูกชั้นแกเลียมอาร์เซไนด์บัพเฟอร์นี้ ก็เพื่อปรับปรุงให้ผิวหน้ามีความสมบูรณ์มากขึ้นก่อนทำการปลูกชั้นอินเดียมอาร์เซไนด์ที่ต้องการ ดังในรูปที่ 2 จากรูปจะเห็นว่าแผนภาพ RHEED มีลักษณะเป็นเส้นนั้นหมายความว่าได้เป็นแกเลียมอาร์เซไนด์ที่เป็นผลึกเดี่ยวสมบูรณ์



รูปที่ 2 แผนภาพ RHEED เมื่อปลูกแกลเลียมอาร์เซไนด์บัฟเฟอร์

6. การปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์

หลังจากการทำชั้นตอนข้างต้น แผ่นฐานก็มีความพร้อมที่จะปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์ที่ต้องการศึกษาแล้ว โดยทำการศึกษาที่ความหนา 1 ไมครอน จากที่ได้ศึกษาพบว่า การปลูกผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์บนแผ่นฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์ จะเกิดความไม่เข้ากันของผลึกถึง 7.4 เปอร์เซ็นต์ ยิ่งถ้าปลูกความหนามากกว่าความหนาวิกฤตแล้ว จะทำให้เกิดจุดบกพร่องขึ้น เนื่องจากความเครียด แต่จุดบกพร่องจะลดลง เมื่อความหนาของผลึกมากขึ้น นั่นหมายถึงค่าความเครียดนั้นก็ลดลง ลักษณะนี้เรียกว่าการผ่อนคลายความเครียด (Strain Relaxation) ผลึกที่ได้จะเป็นผลึกเดี่ยวอินเดียมอาร์เซไนด์ ดังในรูปที่ 3 เป็นรูปขั้นตอนการปลูกอินเดียมอาร์เซไนด์ โดยแสดงด้วยแผนภาพ RHEED



รูปที่ 3 แผนภาพ RHEED ของขั้นตอนการเกิดผลึกอินเดียมอาร์เซไนด์

รูปที่ 3(ก) เป็นแผนภาพ RHEED ที่แสดงลักษณะของผิวหน้าแกลเลียมอาร์เซไนด์สังเกตเห็นว่าแผนภาพ RHEED เป็นเส้นที่มีความคมชัด แสดงว่าผิวหน้าของแกลเลียมอาร์เซไนด์มีความเป็นผลึกเดี่ยวราบเรียบสมบูรณ์

รูปที่ 3(ข) เป็นแผนภาพ RHEED มีลักษณะเป็นเส้น และจุด หมายความว่าผิวหน้าเกิดความไม่ราบเรียบขึ้น เนื่องจากความเครียดของการไม่เข้ากันของผลึก จะทำให้เกิดเป็นดอทของอินเดียมอาร์เซไนด์บนผิวหน้า ลักษณะเช่นนี้จะเกิดขึ้นเมื่อทำการปลูกอินเดียมอาร์เซไนด์ถึงความหนาวิกฤต

รูปที่ 3(ค) เป็นแผนภาพ RHEED หลังจากความหนาของอินเดียมอาร์เซไนด์มีค่ามากขึ้น สังเกตเห็นว่ามีลักษณะเป็นเส้นคมชัด นั้นหมายถึงว่าได้เป็นผลึกเดี่ยวอินเดียมอาร์เซไนด์

7. การนำชิ้นงานออกจากระบบการปลูกผลึก

เมื่อปลูกผลึกเรียบร้อยแล้วก็จะนำเอาบล็อกลอกออกโดยทำย้อนจากระบวนการนำบล็อกเข้า



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายไมตรี ไพศาลภาณุมาศ เกิดเมื่อวันที่ 1 พฤศจิกายน พ.ศ. 2521 ที่อำเภอบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี สำเร็จการศึกษาระดับระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2543 ต่อจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทบริหารบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2544 เนื่องจากมีความสนใจด้านสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ จึงได้เลือกทำวิทยานิพนธ์เรื่องการปลูกชั้นอิมิตีฟิแทกซีอินเดียมอาร์เซไนด์บนแผ่นฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์โดยวิธีปลูกผลึกอิมิตีฟิแทกซีจากลำไมเลกุล



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย