

ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในชั้นฟิล์มบางของ n-GaAs ที่มี QDs ฝังตัวอยู่ข้างใน



นาย ธีรศักดิ์ ปัญญาวานิชกุล

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6673-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ELECTRON MOBILITY IN THIN n-GaAs FILMS WITH EMBEDDED QUANTUM DOTS



Mr. Teerasak Panyawanichkul

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2004

ISBN 974-17-6673-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในชั้นฟิล์มบางของ n-GaAs ที่มี QDs ฝัง
ตัวอยู่ข้างใน

โดย

นาย ชีรศักดิ์ ปัญญาวานิชกุล

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทรงพล กาญจนชูชัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทรงพล กาญจนชูชัย)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภรณ์ ชีรมงคลศรี)

ธีรศักดิ์ ปัญญาวานิชกุล : ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในชั้นฟิล์มบางของ n-GaAs ที่มี QDs ฝังตัวอยู่ข้างใน. (ELECTRON MOBILITY IN THIN n-GaAs FILMS WITH EMBEDDED QUANTUM DOTS) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. ทรงพล กาญจนชูชัย, 78 หน้า. ISBN 974-17-6673-4.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของควอนตัมดอทชนิดอินเดียมอาร์เซไนด์ (InAs QDs) ที่มีต่อความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในชั้นแกเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) อินเดียมอาร์เซไนด์ควอนตัมดอทถูกฝังเข้าไปในชั้นแกเลียมอาร์เซไนด์โดยวิธีการปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล ลักษณะและขนาดทางกายภาพของควอนตัมดอทถูกวัดโดยวิธี TEM และ AFM ในขณะที่การวัดความคล่องตัวของอิเล็กตรอนและความเข้มข้นของอิเล็กตรอนกระทำโดยวิธี van der Pauw

ผลการวัดความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในชั้น GaAs ชี้ให้เห็นว่าเมื่อจำนวนชั้นของ InAs QDs เพิ่มขึ้น ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนลดลงในขณะที่ความเข้มข้นของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น สาเหตุที่ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนลดลงเกิดจากการกระเจิงอิเล็กตรอนโดย InAs QDs ซึ่งเปรียบเสมือนเส้นวทงกลมที่นำไฟฟ้าได้ดี และสาเหตุที่ความเข้มข้นของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นเกิดจากการเพิ่มขึ้นของปริมาตรรวมจากการฝังชั้น InAs QDs เข้าไปในชั้นของ GaAs และเนื่องจาก InAs นั้นมีอิเล็กตรอนอิสระมากกว่า GaAs ที่อุณหภูมิเดียวกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา.....อิเล็กทรอนิกส์..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2547..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4570361621 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: InAs /GaAs / MOLECULAR BEAM EPITAXY/ QUANTUM DOTS/ MOBILITY

TEERASAK PANYAWANICHKUL : ELECTRON MOBILITY IN THIN n-GaAs FILMS
WITH EMBEDDED QUANTUM DOTS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.
SONGPHOL KANJANACHUCHAI, D. Eng 78 pp. ISBN 974-17-6673-4.

The objective of the research is to study the effects of InAs quantum dots (InAs QDs) on electron mobility in GaAs. InAs quantum dots are incorporated into GaAs layer by molecular beam epitaxy. Quantum dot geometries are measured by TEM and AFM. Electron mobility and electron concentration are measured by van der Pauw technique.

Electron mobility measurements indicate that as the number of QD layer increases, the electron mobility decreases while the electron concentration in the structure increases. Decreasing electron mobility results from increased electron scattering by highly-conducting InAs QDs inclusions. Each QD can be considered as a clipped sphere with high conductivity. Increasing electron concentration results from increased total volume of samples by embedded InAs QDs, and because InAs has greater number of free electrons than GaAs at the same temperature.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Field of study Electronics Advisor's signature

Academic year 2004 Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทรงพล กาญจนชูชัย ซึ่งเป็นผู้ให้โอกาสแก่ผู้วิจัยในการศึกษาระดับปริญญาโท และได้นำคำแนะนำรวมทั้งข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างมากตลอดระยะเวลาที่ทำการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูง

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน อันประกอบไปด้วย ศ.ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว รศ.ดร. มนต์วีร์ สวัสดิ์ศฤงฆาร และ ผศ.ดร. อภรณ์ ธีรมงคลรัศมี

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ดร. สุวิทย์ กิระวิทยา คุณศุภโชค ไทยน้อย คุณบัณฑิตา รัษฎิเศษ คุณพรชัย ช่างม่วง ที่ให้คำแนะนำอันมีค่าในเรื่องการเรียน การทำวิจัย และการเขียนวิทยานิพนธ์แก่ผู้ทำวิจัย

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่และนิสิตปริญญาเอก โท ตรี ทุกท่านในห้องปฏิบัติการวิจัย สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ได้ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆ ด้วยความเต็มใจ

ขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำและศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) ที่เอื้อเฟื้อวัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลรอบข้างทุกท่านที่ให้ความห่วงใยและเป็นกำลังใจในการทำวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิทยานิพนธ์	2
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	3
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	4
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	4
2. พื้นฐานเกี่ยวกับควอนตัมดอต	5
2.1 พื้นฐานของโครงสร้าง Low-Dimension	5
2.2 ผลของความเครียดที่มีต่อโครงสร้าง Low-Dimension	10
2.3 วิธีสร้างควอนตัมดอต	11
2.3.1 เทคนิคลิโทกราฟีและการกัด (วิธี top-down)	11
2.3.2 การปลูกควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเอง (วิธี bottom-up)	12
3. พื้นฐานการปลูกผลึกและการวัด	17
3.1 แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) และอินเดียมอาร์เซไนด์ (InAs)	17
3.1.1 โครงสร้างและคุณสมบัติที่สำคัญ	17
3.1.2 ลักษณะสมบัติทางแสง	18
3.2 การปลูกผลึกอิมพิแทกซีจากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy: MBE)	19
3.2.1 หลักการ	19
3.2.2 เงื่อนไขสุญญากาศสำหรับการปลูกผลึกจากลำโมเลกุล	20
3.2.3 ระบบ Reflection High Energy Electron Diffraction (RHEED)	22

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.3 รูปแบบของการปลูกผลึก (Growth Modes)	24
3.3.1 Frank van-der-Merwe	26
3.3.2 Stranski-Krastanow (SK)	26
3.3.2 Volmer-Weber	27
3.4 ระบบปลูกผลึกจากลำโมเลกุล	27
3.5 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยวิธี Van der Pauw	29
3.5.1 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect)	30
3.5.2 ทฤษฎีของ van der Pauw	34
3.6 โครงสร้างของระบบวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธี van der Pauw	37
3.7 เทคนิค Atomic Force Microscopy (AFM)	38
3.7.1 ลักษณะในการเก็บข้อมูล	40
3.7.1 Contact mode	40
3.7.2 Non-Contact mode	40
3.7.3 Tapping mode	41
3.7.4 Force Modulation mode	42
3.8 เทคนิค Transmission Electron Microscopy (TEM)	43
3.8.1 ข้อมูลที่ได้จากเทคนิค TEM	43
3.8.2 ความรู้พื้นฐานในการใช้งาน TEM	45
4. การทดลองและผลการทดลอง	47
4.1 การทดลองและผลการทดลอง	47
4.1.1 โครงสร้างฟิล์มบาง n-GaAs	47
4.1.2 โครงสร้างชั้นฟิล์มบาง n-GaAs หนา 100 nm ที่มี InAs QDs ฝังอยู่	49
4.1.3 โครงสร้างชั้นฟิล์มบาง n-GaAs หนา 500 nm ที่มี InAs QDs ฝังอยู่	52

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.1.4 โครงสร้างทางกายภาพของ InAs QDs	55
4.1.4.1 การตรวจสอบความหนาโดยใช้เครื่อง TEM	55
4.1.4.2 การตรวจสอบผิวหน้าโดยใช้เครื่อง AFM	56
4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง	57
4.2.1 กลไกการกระเจิงของพาหะใน GaAs	57
4.2.2 กลไกการกระเจิงของพาหะซึ่งคำนึงถึงการใส่ควอนตัมดอต เข้าไปในชั้น GaAs	58
4.2.3 การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของอิเล็กตรอนเมื่อมีการฝัง InAs QDs เข้าไปในชั้น GaAs	64
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	66
5.1 การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของอิเล็กตรอน	66
5.2 การลดลงของความคล่องตัวของอิเล็กตรอน	66
5.3 ข้อเสนอแนะ	67
รายการอ้างอิง	68
ภาคผนวก	71
ภาคผนวก ก การสร้างผิวสัมผัสโพลีเมอร์บนผลึก GaAs ชนิดเอ็นและชนิดพี	72
ภาคผนวก ข คุณสมบัติของสารประกอบกึ่งตัวนำ	77
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	78

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	คุณสมบัติที่สำคัญของ GaAs และ InAs ที่ 300 K	18
4.1	เงื่อนไขการปลูกโครงสร้างของชิ้นงาน A0, B0, C0, D0 และ E0	48
4.2	รายละเอียดเชิงโครงสร้างของชิ้นงาน A0, A1 และ A2	50
4.3	รายละเอียดเชิงโครงสร้างของชิ้นงาน B0, B1, B2, B3, C0, C1, C2, C3 และ C4	53
4.4	ค่าตัวแปร V_{bulk} , n , f และ μ	61

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	ค่าคงที่โครงสร้างผลึกและค่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง	1
2.1	เปรียบเทียบขนาดของก้อนผลึก (bulk), ท่อนำคลื่น (waveguide), ควอนตัมดอต (quantum dot) และ อะตอม	6
2.2	โครงสร้างและความหนาแน่นสถานะ (D.O.S.) ของ (ก) ก้อนผลึก, (ข) ควอนตัมเวลล์, (ค) ควอนตัมไวร์และ (ง) ควอนตัมดอตโดย L อยู่ในระดับ μm ในขณะที่ L_x, L_y, L_z อยู่ในระดับ nm	7
2.3	วิวัฒนาการของค่ากระแสวิกฤตที่ใช้สำหรับขับแสงเลเซอร์	9
2.4	โครงสร้าง (ก) unstrained layer, (ข) compressive strained และ (ค) tensile strained	11
2.5	กระบวนการสร้างควอนตัมดอตโดยวิธีลิโทกราฟีและการกัดโครงสร้างควอนตัมเวลล์	12
2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานต่อหน่วยปริมาตรของเกาะกับขนาดของเกาะ	13
2.7	สมดุลเฟสไดอะแกรมของระบบปลูกผลึกแบบ lattice-mismatched	14
2.8	กระบวนการเกิดควอนตัมดอตโดยทฤษฎี mean-field	16
2.9	ความหนาแน่นพลังงาน ณ ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างควอนตัมดอต	16
3.1	โครงสร้างแบบ Zinc-blende	17
3.2	ลักษณะการก่อตัวของ Ga และ As โดยการปลูกผลึกจากลำโมเลกุล	19
3.3	กระบวนการการเกิดผลึกของการปลูกผลึกด้วยวิธีลำโมเลกุล	20
3.4	โครงสร้างของระบบ RHEED	23
3.5	RHEED pattern ที่ปรากฏบนจอฟอสเฟอร์ ขณะที่มีความสว่าง (ก) มาก และ (ข) น้อย	24
3.6	สภาพพื้นผิว (ซ้าย) และ RHEED oscillation (ขวา) ที่เกิดขึ้นในช่วง 2 ML แรกของการปลูกผลึก	25
3.7	รูปแบบของการเกิดผลึกอีพิแทกซีแบบ (ก) Frank van-der-Merwe (ข) Stranski-Krastanow และ (ค) Volmer-Weber	25

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8	รูปแบบของการเกิดผลึกอพิแทกซี แบบ Stranski-Krastanow 26
3.9	ระบบปลูกผลึกจากลำโมเลกุล RIBER 32P 28
3.10	ตำแหน่งของบีมชนิดต่างๆ ที่ติดตั้งอยู่ในระบบ MBE 29
3.11	ลักษณะการผลึกกันและสะสมของประจุ 31
3.12	แผนภาพโครงสร้าง Hall-bar 31
3.13	ชิ้นงานที่นำไปวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธี van der Pauw 34
3.14	วิธีการวัดแบบ van der Pauw 35
3.15	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Q กับ f 36
3.16	โครงสร้างของระบบวัดด้วยวิธี van der Pauw 37
3.17	องค์ประกอบหลักของเครื่องมือ Scanning Probe Microscope 39
3.18	ลักษณะของแรงกระทำระหว่างอะตอมที่เกิดขึ้นในระยะห่างวัตถุต่าง ๆ กัน 49
3.19	การเคลื่อนที่ของเข็มปลายแหลมไปบนผิวงาน ในเทคนิคแบบ Non-contact mode (ก) และ Contact mode (ข) 40
3.20	ลักษณะการสั่น (oscillation) คานที่มีเข็มติดอยู่ 41
3.21	หลักการทำงานของ AFM ในแบบ Force Modulation 43
3.22	ลักษณะการเกิด (ก) รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) และ (ข) ภาพขยาย (image) 44
3.23	การเกิด (ก) ภาพไปรต์ฟิลด์ (bright field image) (ข) ภาพดาร์คฟิลด์ (dark field image) ที่ไม่ชัด (ค) ภาพดาร์คฟิลด์ที่ชัด 45
3.24	ก) ไปรต์ฟิลด์ และ (ข) ดาร์คฟิลด์ 46
4.1	โครงสร้างชั้นฟิล์มบาง n-GaAs หนา (ก) 100 nm และ (ข) 500 nm 48
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความคล่องตัวกับความเข้มข้นของอิเล็กตรอนในชั้น n-GaAs ที่ความหนาและระดับการเจือสารต่างกันเมื่อเทียบกับ bulk GaAs 49
4.3	โครงสร้างชั้นฟิล์มบาง n-GaAs หนา 100 nm ที่ฝัง InAs QDs จำนวน n ชั้น โดย n มีค่า เท่ากับ 0, 1 และ 2 ชั้น 50

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความคล่องตัวและความเข้มข้นของอิเล็กตรอนของชั้น n-GaAs หนา 100 nm ที่ฝังชั้น InAs QDs n ชั้นโดย n มีค่าเท่ากับ 0 (ชิ้นงาน A0), 1 (A1) และ 2 (A2) เมื่อเทียบกับ bulk GaAs	51
4.5 โครงสร้างชั้นฟิล์มบาง n-GaAs หนา 500 nm ที่ฝัง InAs QDs จำนวน n ชั้น	52
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความคล่องตัวกับความเข้มข้นของอิเล็กตรอนของชั้น n-GaAs หนา 500 nm ที่มีและไม่มีชั้น InAs QDs ฝังอยู่	54
4.7 ภาพ TEM ของชิ้นงาน A2 ซึ่งเป็นชิ้นงานที่มีโครงสร้างเป็นชั้นฟิล์มบาง n-GaAs หนา 100 nm ที่มีชั้น InAs QDs จำนวน 2 ชั้นฝังอยู่ภายใน	55
4.8 โครงสร้างชิ้นงานสำหรับวัดสภาพผิวหน้าโดยเครื่อง AFM	56
4.9 ภาพ AFM ของชิ้นงานซึ่งปลูกตามโครงสร้างรูปที่ 4.8	56
4.10 โดอะแกรมแสดงกลไกการกระเจิงพาหะใน GaAs	57
4.11 เสี้ยวทรงกลมโดย h คือความสูง และ r คือรัศมี	59
4.12 ผลการจำลองการลดลงของความคล่องตัวของอิเล็กตรอนเมื่อเทียบกับผลการทดลองโดยสมมติให้ QDs เป็นครึ่งทรงกลมรัศมีเท่ากับ r , ครึ่งทรงกลมรัศมีเท่ากับ h , และเสี้ยวทรงกลม (ชิ้นงาน A และ B)	60
4.13 ผลการจำลองการลดลงของความคล่องตัวของอิเล็กตรอนเมื่อเทียบกับผลการทดลองโดยสมมติให้ QDs เป็นครึ่งทรงกลมรัศมีเท่ากับ r , ครึ่งทรงกลมรัศมีเท่ากับ h , และเสี้ยวทรงกลม (ชิ้นงาน C)	61
4.14 ผลการจำลองการลดลงของความคล่องตัวของอิเล็กตรอนเมื่อมีการฝังเสี้ยวทรงกลมไม่นำไฟฟ้า ($\cdots + \cdots$) และนำไฟฟ้าดี ($\cdots \bullet \cdots$) เข้าไปในชั้น GaAs เทียบกับผลการทดลอง ($\text{---}\square\text{---}$) สำหรับชิ้นงาน A และ B	62
4.15 ผลการจำลองการลดลงของความคล่องตัวของอิเล็กตรอนเมื่อมีการฝังเสี้ยวทรงกลมไม่นำไฟฟ้า ($\cdots + \cdots$) และนำไฟฟ้าดี ($\cdots \bullet \cdots$) เข้าไปในชั้น GaAs เทียบกับผลการทดลอง ($\text{---}\square\text{---}$) สำหรับชิ้นงาน C	63
4.16 ผลการจำลองการลดลงของความคล่องตัวของอิเล็กตรอนเมื่อมีการฝังเสี้ยวทรงกลมนำไฟฟ้าดีเข้าไปในชั้น GaAs ($\cdots \bullet \cdots$) เทียบกับผลการทดลอง ($\text{---}\square\text{---}$) สำหรับชิ้นงาน A, B และ C	63

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17	ผลการคำนวณการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของอิเล็กตรอนเมื่อมีการฝัง InAs QDs เข้าไปในชั้น GaAs เปรียบเทียบกับผลการทดลอง 65



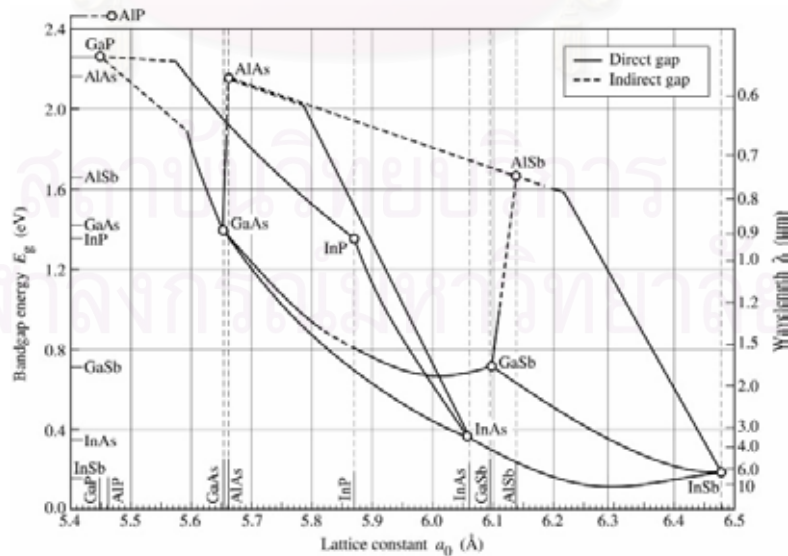
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

เทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ (semiconductor technology) ถูกพัฒนาอย่างรวดเร็ว ตั้งแต่มีการค้นพบทรานซิสเตอร์ในปี ค.ศ. 1947 เนื่องจากคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของสารกึ่งตัวนำสามารถปรับให้เข้ากับหลักการทำงานของสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม โดยเฉพาะสาขาอิเล็กทรอนิกส์ (electronics) และออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (optoelectronic) ซึ่งส่วนใหญ่ถูกสร้างมาจากวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิด Si และ GaAs

สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สร้างมาจากวัสดุชนิดเดียวกัน (homostructure) มีคุณสมบัติของวัสดุที่ตายตัว โดยเฉพาะคุณสมบัติการนำไฟฟ้าซึ่งถูกกำหนดโดยการเจือ (doping) ในขั้นตอนการปลูกอินกอต (ingot) ซึ่งจำกัดดังกล่าวนำไปสู่การพัฒนาสิ่งประดิษฐ์ซึ่งสร้างจากวัสดุต่างชนิดกัน (heterostructure) ส่งผลให้เกิดการพัฒนาคุณสมบัติของสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์โดยอาศัยหลักการวิศวกรรมแถบพลังงาน (bandgap engineering) ช่องว่างพลังงาน (energy band) ที่เหลื่อมล้ำกันของหัวต่อของวัสดุสองชนิด สามารถใช้ในการกักพาหะ ส่งผลให้สิ่งประดิษฐ์ซึ่งสร้างด้วยวัสดุสองชนิดมีคุณสมบัติในการควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะได้ การออกแบบสิ่งประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำมากกว่า 1 ชนิดได้เปรียบสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำแบบวัสดุชนิดเดียว เช่น เลเซอร์สารกึ่งตัวนำชนิด heterostructure มีกระแสเทรชโฮล (threshold current) ในการกระตุ้นที่ต่ำกว่าเลเซอร์สารกึ่งตัวนำแบบวัสดุชนิดเดียว เนื่องจากพาหะถูกกักในบ่อพลังงาน



รูปที่ 1.1 ค่าคงที่โครงผลึกและค่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง [24]

สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สร้างจากแผ่นฐาน GaAs สามารถกระทำได้ง่ายและมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการนำมาสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์ทางแสงเนื่องจากมีลักษณะช่องว่างพลังงานเป็นแบบช่องว่างพลังงานตรง (direct bandgap) อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างบนแผ่นฐาน GaAs คือจะต้องมีค่าคงที่โครงผลึก (lattice constant) ไม่ต่างไปจาก 5.66 Å มากนัก ตามรูปที่ 1.1 นั้นหมายความว่า แผ่นฐาน GaAs นั้นเหมาะสมกับวัสดุชนิดออลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) มีค่าอัตราส่วนออลูมิเนียมน้อยกว่า 0.45 ($x < 0.45$) เพียงชนิดเดียวเท่านั้น เมื่อพิจารณาช่วงความยาวคลื่นที่ใช้งานได้ของสิ่งประดิษฐ์ทางแสงที่สร้างด้วยวัสดุสองชนิดนี้ อยู่ในช่วง 625 nm ($\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$) ถึง 870 nm (GaAs) ดังนั้นสิ่งประดิษฐ์ทางแสงที่สร้างด้วยวัสดุสองชนิดนี้ สามารถทำงานได้เพียงในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นและช่วงอินฟราเรดเท่านั้น

การศึกษาการปลูกผลึก InAs บน GaAs ซึ่งมีโครงผลึกที่ต่างกัน 7% พบว่าสามารถปลูกชั้น InAs บน GaAs ได้แต่หากชั้นที่ปลูกมีความหนาที่สูงกว่าความหนาวิกฤต (critical thickness) ค่าหนึ่ง (1.6 -1.8 ML) จะเกิดจุดบกพร่องขึ้น [1] ในปี ค.ศ. 1993 Leonard et al พบว่าเมื่อปลูกอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ (InGaAs) ซึ่งมีส่วนประกอบของอินเดียม 50% บนแผ่นฐาน GaAs (001) เกินความหนาวิกฤตแล้วทำให้เกิดเกาะของ InAs [1] ขึ้นโดยไม่มีจุดบกพร่องและสามารถกักพาหะได้ เกาะที่เกิดขึ้นถูกเรียกว่าควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเอง (self-assembled quantum dot) เนื่องด้วยความสะดวกในการสร้างควอนตัมดอต (quantum dot) จึงมีกลุ่มวิจัยหลายกลุ่มให้ความสนใจและเริ่มต้นศึกษาพร้อมทั้งนำควอนตัมดอตมาประยุกต์ใช้กับสิ่งประดิษฐ์ชนิดต่างๆ การปลูกควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเองจะทำให้ได้ QD ที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้สิ่งประดิษฐ์ที่ได้มีคุณสมบัติที่ไม่แน่นอน คุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงก็เป็นอีกประเด็นหลักที่หลายกลุ่มให้ความสนใจในการศึกษาด้วยเช่นกัน

1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิทยานิพนธ์

การปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล (molecular beam epitaxy) เป็นเทคนิคการปลูกสารกึ่งตัวนำที่สามารถสร้างชั้นผลึกที่มีความสมบูรณ์ของการเรียงผลึก มีความเรียบในระดับอะตอมและสามารถควบคุมความหนาของชั้นผลึกที่สร้างขึ้นได้อย่างแม่นยำ ด้วยเทคนิคนี้เราสามารถสร้างโครงสร้างควอนตัมเวลล์ (quantum Well) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความหนาเพียง 10-20 นาโนเมตร ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และจากความสำเร็จในการนำโครงสร้างควอนตัมเวลล์มาเป็นชั้นเปล่งแสงของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำและสามารถลดกระแสเทอร์สโกลของเลเซอร์ได้ ทำให้โครงสร้างควอนตัมไวร์

(quantum wire) และควอนตัมดอต (quantum dot) ที่ได้รับการนำเสนอโดย Arakawa และ Sasaki [11] ได้รับความสนใจมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะโครงสร้างควอนตัมดอต ซึ่งมีระดับขั้นความเสรี (degree of freedom) ของพาหะเท่ากับศูนย์ ทำให้ค่าความน่าจะเป็นในการพบอิเล็กตรอนและโฮล มีการซ้อนทับกันมาก ส่งผลให้ประสิทธิภาพการรวมตัวแบบเปล่งแสง (radiative recombination) ดีขึ้น เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ที่ผ่านมามีตัวอย่างการนำควอนตัมดอตมาประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ [3] โดยทำการปลูกชั้นควอนตัมดอตในชั้นรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้ เป็นเพียงการรายงานข้อมูลการวัดประสิทธิภาพการดูดกลืนแสงที่สูงขึ้นเท่านั้น โดยยังขาดการวิเคราะห์ข้อมูลด้านไฟฟ้าอย่างอื่นเช่น ความคล่องตัวของพาหะและความเข้มข้นของพาหะในโครงสร้างเป็นต้น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ถูกจัดทำขึ้นด้วยวัตถุประสงค์หลักคือ เพิ่มความเข้าใจในกลไกการนำไฟฟ้าของพาหะในโครงสร้างที่มีควอนตัมดอตฝังอยู่ซึ่งปลูกโดยเครื่องปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล ข้อมูลหลักที่ได้จากการวิจัย คือคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้น GaAs ที่มีชั้น InAs QDs ฝังอยู่ ซึ่งเป็นผลจากการศึกษาค่าความคล่องตัวของพาหะและความเข้มข้นพาหะ การศึกษาได้ทำการเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ในการสร้างโครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์แล้วทำการเปรียบเทียบผล การตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้ากระทำด้วยวิธี van der Pauw, การตรวจสอบผิวหน้าของวัสดุกระทำโดยเทคนิค Atomic Force Microscopy (AFM) และการยืนยันความหนาของชั้นที่ปลูกและการเรียงตัวของ QD ในแนวตั้งกระทำโดยวิธี Transmission Electron Microscopy (TEM) ผลจากการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้น GaAs ที่มีชั้น InAs QDs ฝังอยู่ ทำให้เข้าใจกลไกการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์และสิ่งประดิษฐ์ที่ฝัง InAs QDs ได้ดียิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาวิธีการปลูกผลึกด้วยวิธีลำโมเลกุลและกระทำการปลูกจริง พร้อมทั้งวัดคุณสมบัติพื้นผิวด้วย AFM, ภาพตัดขวางด้วย TEM, และการนำไฟฟ้าด้วย van der Pauw
2. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอิเล็กตรอนและความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในชั้นฟิล์มบาง GaAs ที่มีโครงสร้าง InAs QDs ฝังอยู่
3. วิเคราะห์ผลการวัดทางไฟฟ้า และอธิบายถึงปัจจัยที่มีผลต่อค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในชั้นฟิล์มบาง GaAs ที่มีชั้น InAs QDs ฝังอยู่

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ขอบเขตวิทยานิพนธ์ได้แก่ ศึกษาผลการฝัง InAs QDs ในชั้นฟิล์มบาง n-GaAs ที่มีต่อค่าความคล่องตัวและค่าความเข้มข้นของอิเล็กตรอนโดยรวมของชั้นฟิล์มบาง โดยทำการเปลี่ยนจำนวนชั้น, ขนาด, และความหนาแน่นของ InAs QDs ในชั้นฟิล์มบาง

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทำให้เข้าใจคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของพาหะในชั้นฟิล์มบางที่มีชั้นควอนตัมดอตฝังตัวอยู่ได้ดีขึ้น
2. ทำให้นำความรู้ที่ได้ ไปประยุกต์ใช้กับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีการฝัง InAs QDs เข้าไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

พื้นฐานเกี่ยวกับควอนตัมดอต

เนื้อหาในบทเป็นการอธิบายพื้นฐานทางโครงสร้างของควอนตัมดอตซึ่งเป็นโครงสร้าง low-dimension และคุณสมบัติต่างๆ ของโครงสร้าง, วิธีสร้างโครงสร้างควอนตัมดอตโดยวิธีลิโทกราฟีและการกัด (lithography and etching), เทคนิคการปลูกผลึกแบบจัดเรียงตัวเอง (self-assembled growth) และทฤษฎีเกี่ยวกับควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเอง (self-assembled QDs)

2.1 พื้นฐานของโครงสร้าง Low-Dimension

เมื่อวางอะตอมใกล้กัน อะตอมจะยึดเหนี่ยวกัน ทำให้ชั้นพลังงานของอะตอมที่ยึดเหนี่ยวกันกลายเป็นแถบพลังงานที่มีความต่อเนื่องและมีจำนวนมากกว่าหนึ่งแถบ โดยมีแถบพลังงานต้องห้าม (energy gap) คั่นกลางระหว่างแถบคอนดักชัน (conduction band) และแถบวาเลนซ์ (valence band) ที่อุณหภูมิ 0 K แถบคอนดักชันปราศจากอิเล็กตรอน ในขณะที่แถบวาเลนซ์มีอิเล็กตรอนอยู่เต็ม เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 0 K แถบพลังงานทั้งสองจะมีทั้งอิเล็กตรอนและโฮลซึ่งทำหน้าที่เป็นพาหะนำไฟฟ้า การควบคุมการเคลื่อนที่ของพาหะในแถบพลังงานทั้งสองเป็นพื้นฐานสำคัญของการควบคุมการทำงานของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ในโครงสร้าง low-dimension พาหะถูกกักบริเวณในทิศทางใดทิศทางหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งทิศทาง และความยาวในการกักเป็นอัตราส่วนของความยาวคลื่นเดอบรอยล์ (de Broglie wavelength) แปรผกผันกับค่ามวลประสิทธิผลของพาหะ (carrier effective mass, m^*) และค่าอุณหภูมิ (T) ดังสมการ [4]

$$\lambda_{\text{de_Broglie}} = \frac{h}{p} = \frac{h}{3m^*k_B T} \quad (2.1)$$

โดยที่ h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant)

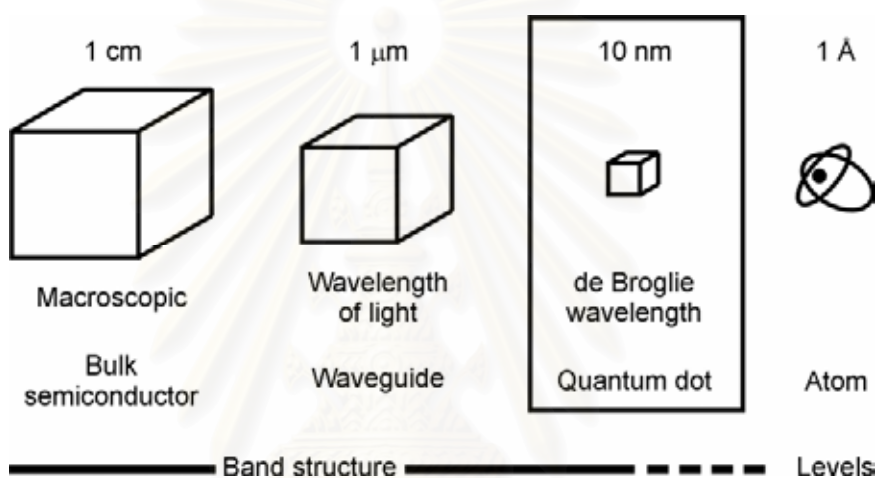
p คือ โมเมนตัมของพาหะ (carrier momentum)

k_B คือ ค่าคงตัวของโบลท์ซแมน (Boltzmann's constant)

ความยาวคลื่นเดอบรอยล์สำหรับสารกึ่งตัวนำประกอบหมู่ III-V มีค่าประมาณ 20 nm ที่อุณหภูมิ 300 K ผลของการกักพาหะที่คาดว่าจะจะเป็นประโยชน์ต่อสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำนั้นมีมากมาย เช่นการเปลี่ยนสถานะระหว่างแถบพลังงาน (intersubband transition) ในโครงสร้าง

ควอนตัมเวลล์ (quantum well) ซึ่งเป็นหลักการสำหรับสร้าง detectors ซึ่งทำงานในย่าน far-infrared ที่ความยาวคลื่นมากกว่า $9 \mu\text{m}$ [4]

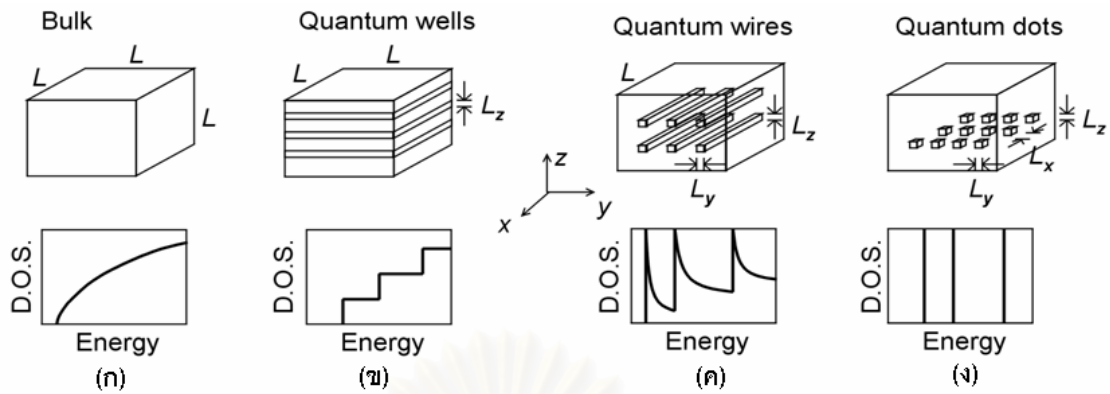
รูปที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบขนาดของ bulk, ท่อนำคลื่น (waveguide), ควอนตัมดอต (quantum dot) และ อะตอม ซึ่งขนาดของโครงสร้างควอนตัมดอตอยู่ในระดับของความยาวคลื่นเดอบรอกลี สำหรับท่อนำคลื่นอยู่ในระดับไมโครเมตร ส่วนโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของ bulk กับอะตอมนั้นแตกต่างกัน ในส่วนของ bulk นั้นอธิบายโดยทฤษฎีแถบพลังงาน ส่วนอะตอมนั้นอธิบายโดยระดับพลังงานแบบไม่ต่อเนื่อง



รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบขนาดของ bulk , ท่อนำคลื่น (waveguide), ควอนตัมดอต (quantum dot) และ อะตอม

ความหนาแน่นของสถานะ (density of states, D.O.S.) ของ bulk และของโครงสร้าง low-dimension ถูกแสดงในรูปที่ 2.2 [5] ชั้นแถบพลังงานที่ต่างกันระหว่างโครงสร้าง low-dimension กับวัสดุรอบข้างทำให้เกิดการกักพาหะ ในกรณีที่มีอิเล็กตรอนและโฮลถูกกักอยู่ในวัสดุชนิดเดียวกัน กำแพงพลังงานสูงสุดจะถูกกำหนดโดยแถบพลังงานที่ยกขึ้นในแถบคอนดักชันหรือแถบวาเลนซ์ [7] ในควอนตัมเวลล์ อิเล็กตรอนและโฮลสามารถเคลื่อนที่ได้อิสระในระนาบ x-y ในควอนตัมไวร์ อิเล็กตรอนและโฮลสามารถเคลื่อนที่ได้ในทิศทาง x และในควอนตัมดอต พาหะถูกกักอยู่กับที่ ในกรณีควอนตัมดอตเป็นการกักแบบ 3 มิติทำให้เกิดการ quantization ของพลังงานดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ง)

ในส่วนของควอนตัมเวลล์การประมาณค่ามวลประสิทธิผลถูกใช้ในการคำนวณระดับพลังงาน quantized อย่างกว้างขวาง [8]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างและความหนาแน่นสถานะ (D.O.S.) ของ (ก) bulk, (ข) ควอนตัมเวลล์, (ค) ควอนตัมไวร์และ (ง) ควอนตัมดอตโดย L อยู่ในระดับ μm ในขณะที่ L_x, L_y, L_z อยู่ในระดับ nm [5]

ในกรณีของโครงสร้างในรูปที่ 2.2 (ก) พาหะสามารถเคลื่อนที่ได้อิสระทุกทิศทาง สำหรับควอนตัมเวลล์ในรูปที่ 2.2 (ข) พาหะจะถูกจำกัดทิศทางเคลื่อนไหวเฉพาะในแนวแกน z โดยสามารถเคลื่อนที่ได้อิสระในแนวระนาบ $x-y$ สำหรับควอนตัมไวร์ในรูปที่ 2.2 (ค) พาหะถูกกักขังแบบ 2 มิติจึงเดินทางอย่างอิสระได้เพียงมิติเดียว (แกน x) สำหรับควอนตัมดอตในรูปที่ 2.2 (ง) พาหะถูกกักขังแบบ 3 มิติ พาหะจึงไม่มีมิติหรือพิกัดที่จะเคลื่อนไหวได้เลย ระดับพลังงานที่อิเล็กทรอนิกส์สามารถมีได้ในแต่ละโครงสร้างข้างต้นเป็นไปตามความสัมพันธ์

$$E_{\text{bulk}} = E(\mathbf{k}) = \frac{\hbar^2 \mathbf{k}^2}{2m^*} \quad \text{สำหรับ bulk} \quad (2.2)$$

$$E_{\text{QW}} = E(\mathbf{k}) = \frac{\hbar^2 k_{\parallel}^2}{2m^*} + E_{n,z} \quad \text{สำหรับ quantum well} \quad (2.3)$$

$$E_{\text{QWR}} = E(\mathbf{k}) = \frac{\hbar^2 k_{\perp}^2}{2m^*} + E_{m,y} + E_{n,z} \quad \text{สำหรับ quantum wire} \quad (2.4)$$

$$E_{\text{QD}} = E_{1,x} + E_{m,y} + E_{n,z} \quad \text{สำหรับ quantum dot} \quad (2.5)$$

โดย $k(k_x, k_y, k_z)$ คือ เวกเตอร์คลื่น (wave vector) ของพาหะ

$$k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$$

$$k_{\parallel}^2 = k_x^2 + k_y^2$$

$$k_{\perp}^2 = k_z^2$$

$E_{1,x}$, $E_{m,y}$ และ $E_{n,z}$ คือ พลังงานที่เป็นฟังก์ชันของตัวเลขควอนตัม (quantum number)

l , m , และ n

ความหนาแน่นสถานะต่อหน่วยปริมาตรซึ่งเป็นค่าจำนวนของสถานะ (number of states)

ระหว่างพลังงาน E และ $E + dE$ ของแต่ละโครงสร้างหาได้จาก [5]

$$D_{\text{bulk}}(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} E^{1/2} \quad (2.6)$$

$$D_{\text{QW}}(E) = \frac{m^*}{\pi \hbar^2} \sum_n \Theta(E - E_{n,z}) \quad (2.7)$$

$$D_{\text{QWR}}(E) = \frac{N_{\text{wi}}}{\pi} \frac{\sqrt{2m^*}}{\hbar} \sum_{m,n} \frac{1}{\sqrt{E - E_{m,y} - E_{n,z}}} \quad (2.8)$$

$$D_{\text{QD}}(E) = 2N_{\text{D}} \sum_{l,m,n} \delta(E - E_{1,x} - E_{m,y} - E_{n,z}) \quad (2.9)$$

โดย Θ คือ Heaviside's unit step function

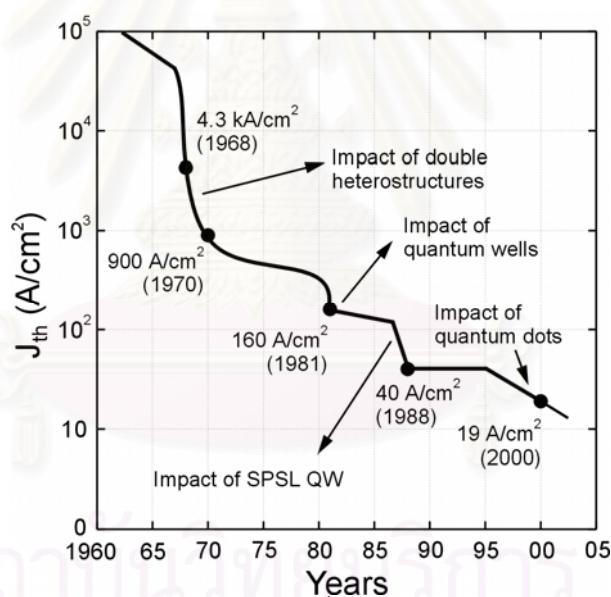
N_{wi} คือ area density ของควอนตัมไวร์

δ คือ เดลต้าฟังก์ชัน (delta function)

N_{D} คือ volume density ของควอนตัมดอต

ในกรณีของควอนตัมดอต ความหนาแน่นของสถานะเป็นเดลต้าฟังก์ชัน ซึ่งคล้ายกับระดับพลังงานไม่ต่อเนื่องของอะตอม ในส่วนซึ่งอธิบายมาด้านบนเป็นกรณีอุดมคติ แต่ในการปลูกผลึกจริงอาจเกิดข้อผิดพลาดได้ซึ่งทำให้โครงสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโครงสร้างควอนตัมดอตเปลี่ยนแปลง

เมื่อโครงสร้างนาโนเปลี่ยนจาก bulk เป็นโครงสร้าง low-dimension ดังแสดงในรูปที่ 2.2 การเปลี่ยนค่าความหนาแน่นสถานะจะมีผลต่อคุณสมบัติพื้นฐานของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่นำโครงสร้างนาโนมาประยุกต์ใช้ เช่นเลเซอร์สารกึ่งตัวนำที่นำควอนตัมดอตมาประยุกต์ใช้มีกระแสเทอร์ไฮล (threshold current) ต่ำเนื่องจากมีความหนาแน่นสถานะเป็นเดลต้าฟังก์ชัน รูปที่ 2.3 แสดงวิวัฒนาการของค่ากระแสเทอร์ไฮลของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำซึ่งมีค่าลดลงเมื่อนำโครงสร้าง low-dimension มาเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้าง



รูปที่ 2.3 วิวัฒนาการของค่ากระแสเทอร์ไฮลที่ใช้สำหรับขับแสงเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ [13]

ในหัวข้อนี้ ได้อธิบายพื้นฐานของโครงสร้าง low-dimension เช่นควอนตัมเวลล์, ควอนตัมไวร์และควอนตัมดอต ในหัวข้อถัดไปเป็นการอธิบายผลของความเครียด (strain) ที่มีต่อโครงสร้าง low-dimension

2.2 ผลของความเครียดที่มีต่อโครงสร้าง Low-Dimension

ควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเองเกิดจากการปลูกผลึกวัสดุที่มีค่าคงที่โครงสร้างผลึกแตกต่างกันไป จากค่าคงที่โครงสร้างผลึกของแผ่นฐานซึ่งทำให้เกิด lattice mismatched ดังนั้นความเข้าใจเรื่องผลของ

ความเครียดที่มีต่อคุณสมบัติของวัสดุจึงเป็นสิ่งสำคัญ รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะการจัดเรียงอะตอมของแผ่นฐาน (อะตอมที่บ) และอะตอมของชั้นที่ต้องการปลูก (อะตอมโปร่ง) ก่อน (ภาพบน) และหลัง (ภาพล่าง) การปลูกแบบอพิแทกซี ในกรณีของการปลูกผลึกอพิแทกซีแบบ lattice-matched ในรูปที่ 2.4 (ก) วัสดุที่ปลูกมีค่าคงที่โครงผลึกเท่ากับหรือเกือบเท่ากับค่าคงที่โครงผลึกของแผ่นฐาน เช่น AlGaAs/GaAs ในระบบปลูกผลึกที่ต้องการให้เกิดความเค้น/ความเครียดจะเป็นการปลูกผลึกที่มีค่าคงที่โครงผลึกต่างจากแผ่นฐาน ความเครียดแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือแบบอัด (compressive) และแบบดึง (tensile) ในระหว่างการปลูกผลึก อะตอมที่ปลูกจะมีค่าคงที่โครงผลึกเท่ากับแผ่นฐาน ดังรูปที่ 2.4(ข) และ (ค) เงื่อนไขนี้ทำให้เกิดแรงเครียดในระนาบ (in-plane strain), ϵ_{\parallel} ซึ่งมีค่าตามความสัมพันธ์

$$\epsilon_{\parallel} = \epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \frac{(a_s - a_e)}{a_e} \quad (2.10)$$

โดย a_e คือ ค่าคงที่โครงผลึกของวัสดุที่ปลูก
 a_s คือ ค่าคงที่โครงผลึกของแผ่นฐาน

ส่วนแรงเครียดในทิศตั้งฉากกับระนาบที่ปลูกหาได้จาก

$$\epsilon_{\perp} = \epsilon_{zz} = -\left(\frac{2\sigma}{1 - \sigma}\right) \epsilon_{\parallel} \quad (2.11)$$

โดย σ คือ Poisson's ratio

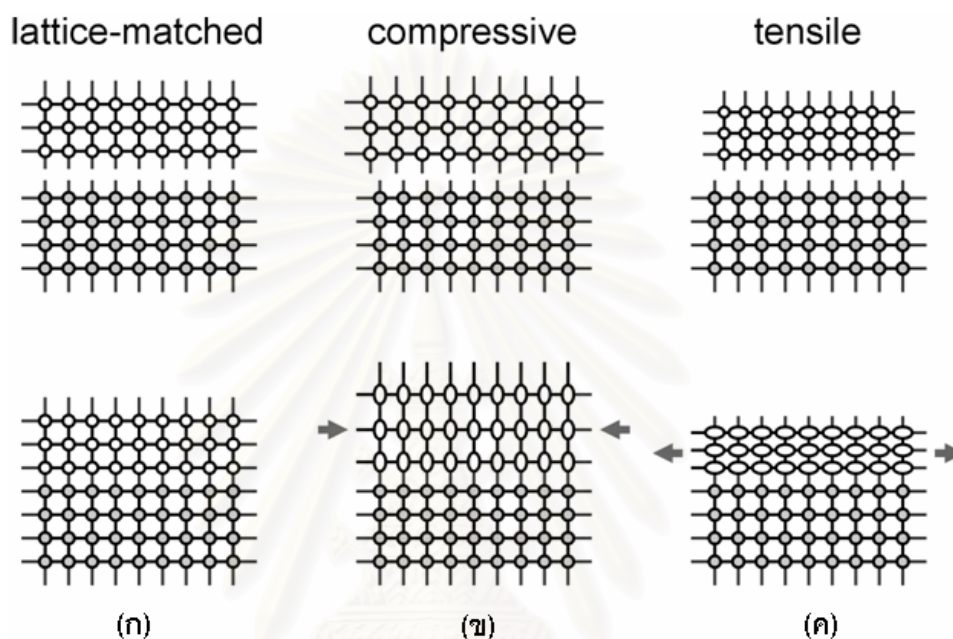
แรงเครียดรวม (uniaxial strain), ϵ_{ax} สามารถหาได้จาก

$$\epsilon_{ax} = \epsilon_{\perp} - \epsilon_{\parallel} \quad (2.12)$$

และแรง hydrostatic, ϵ_{vol} ($= \frac{\Delta V}{V}$) หาได้จาก

$$\varepsilon_{vol} = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} \approx \varepsilon_{||} \quad (2.13)$$

แรงเค้นรวมและแรง hydrostatic จะมีผลต่อความหนาวิกฤต (critical thickness) ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อการปลูกควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเอง



รูปที่ 2.4 ลักษณะการจัดเรียงอะตอมของการปลูกผลึกแบบ epitaxy แบบ (ก) lattice-matched, และแบบ lattice-mismatched ที่มีแรงเค้นในลักษณะ (ข) compressive และ (ค) tensile

2.3 วิธีสร้างควอนตัมดอต

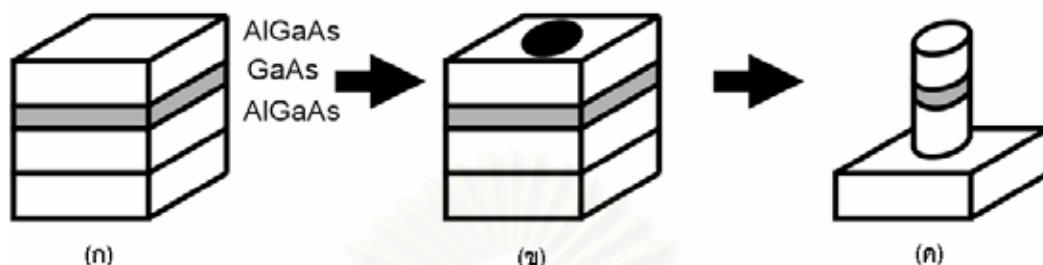
วิธีสร้างโครงสร้างควอนตัมดอตสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบใหญ่คือ แบบ top-down และแบบ bottom-up ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.3.1 เทคนิคลิโทกราฟีและการกัด (วิธี top-down)

รูปที่ 2.5 เป็นกระบวนการสร้างควอนตัมดอตซึ่งเริ่มจากการปลูกควอนตัมเวลล์ โดยวิธีการปลูกผลึกแบบอพิแทกซ์ดังรูปที่ 2.5 (ก) แล้วนำไปผ่านกระบวนการลิโทกราฟีแบบลำอิเล็กตรอน เพราะต้องการความละเอียดของรูปแบบที่สูงเพื่อให้ได้รูปแบบตามรูปที่ 2.5 (ข) สุดท้ายทำการกัดแบบแห้งหรือแบบเปียกเพื่อให้ได้โครงสร้างควอนตัมดอตดังรูปที่ 2.5 (ค)

อย่างไรก็ตาม โครงสร้างควอนตัมดอตซึ่งสร้างโดยวิธีการนี้ พื้นผิวที่ได้นั้นถูกทำลายระหว่างกระบวนการกัดทำให้ไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เชิงแสงได้ นอกจากนี้ เทคนิคดังกล่าวยัง

มีข้อจำกัดเรื่องความละเอียดของการทำลิโทกราฟีอีกด้วย ดังนั้นการสร้างควอนตัมดอตโดยวิธีนี้ จึงไม่ได้รับความนิยมนัก



รูปที่ 2.5 กระบวนการสร้างควอนตัมดอตโดยวิธีลิโทกราฟีและการกัดโครงสร้างควอนตัมเวลล์

2.3.2 การปลูกควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเอง (วิธี bottom-up)

เพื่อให้ได้ควอนตัมดอตที่มีความสม่ำเสมอมากขึ้น หลักการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการปลูกผลึกแบบจัดเรียงตัวเองเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึง เนื้อหาที่เหลือในหัวข้อนี้เป็นการอธิบายหลักการควบคุมการปลูกผลึกแบบ thermodynamically-limited growth และ kinetically-controlled growth

1) Thermodynamically-Limited Growth

ทฤษฎีเทอโมไดนามิกของการปลูกผลึกแบบจัดเรียงตัวเองถูกนำเสนอโดย Shchukin et al. [18] โดยอาศัยหลักการ energy minimization และ สมดุลของแรงเครียดภายในควอนตัมดอต ถ้าพิจารณาพลังงานรวมของควอนตัมดอตเดี่ยว, E_{island} สามารถเขียนเป็นสมการได้คือ

$$E_{\text{island}} = E_{\text{elastic}} + E_{\text{surf}} + E_{\text{edge}} \quad (2.14)$$

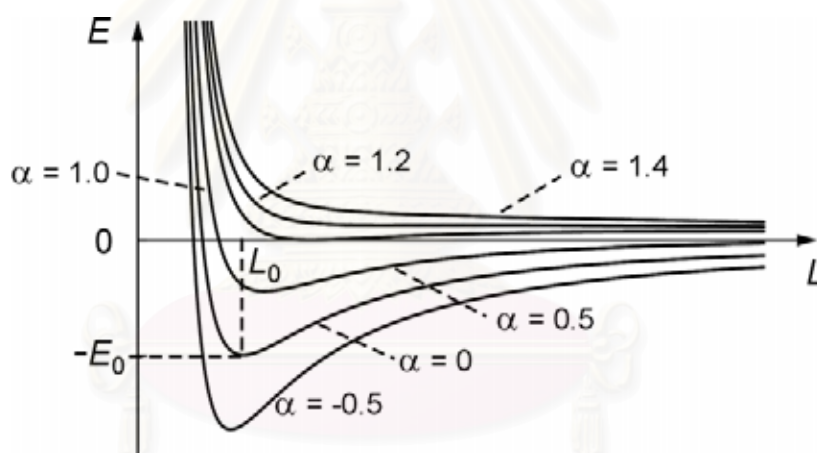
โดย E_{elastic} คือพลังงาน elastic strain
 E_{surf} คือพลังงานผิวและ
 E_{edge} คือพลังงานที่ขอบของเกาะ

สมมติให้เกาะมีรูปทรงปิรามิดซึ่งมีฐานเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสกว้าง L พลังงานต่อหน่วยปริมาตรสามารถหาได้จาก

$$E(L) = E_0 \left[-2 \left(\frac{L_0}{L} \right)^2 \ln \left(\frac{e^{1/2} L}{L_0} \right) + \frac{2\alpha}{e^{1/2}} \left(\frac{L_0}{L} \right) \right] \quad (2.15)$$

โดย α คือ ตัวแปรที่เป็นฟังก์ชันของพลังงานผิวและพลังงาน elastic strain
 E_0 คือ characteristic energy
 L_0 คือ characteristic length

ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของเกาะต่อหน่วยปริมาตรในสมการที่ (2.15) สามารถแสดงในรูปของกราฟในรูปที่ 2.6 โดย α มีค่าต่างกัน เนื่องจากไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างรูปทรงของเกาะกับพลังงานทำให้ไม่สามารถหาค่าที่แน่ชัดของ α , E_0 และ L_0 ได้ อย่างไรก็ตาม สามารถกล่าวได้ว่าขนาดของเกาะที่เสถียรที่สุด, L_{opt} จะสอดคล้องกับค่าต่ำสุดของ $E(L)$, $E_{min}(L) = E(L_{opt}) < 0$



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานต่อหน่วยปริมาตรของเกาะกับขนาดของเกาะ [15]

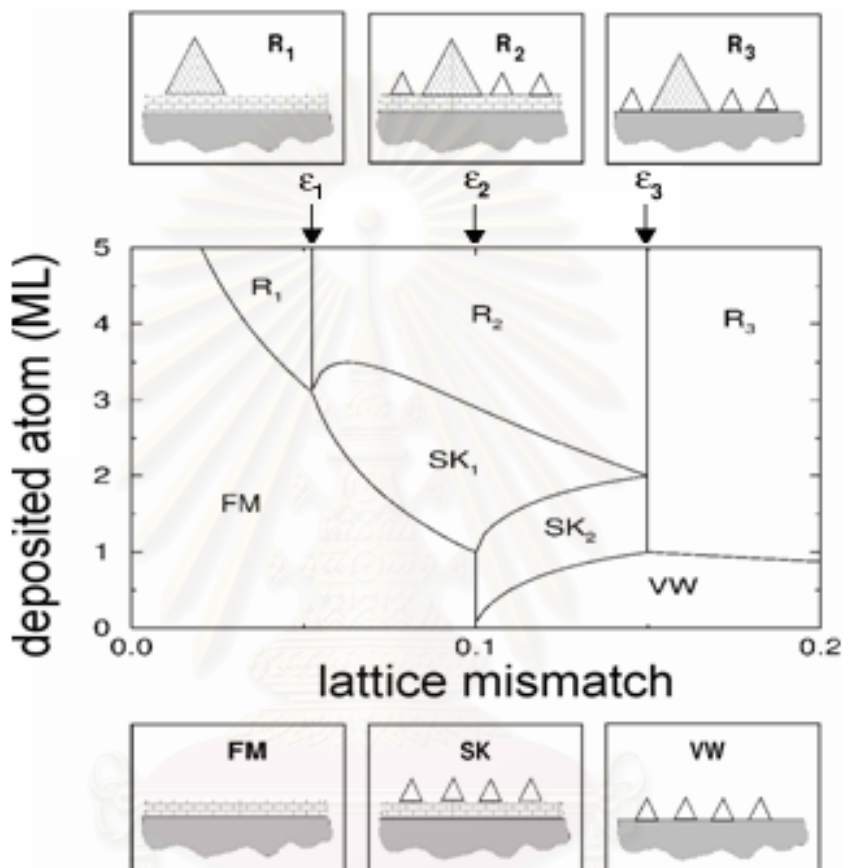
ในการปลูกควอนตัมดอตจำเป็นต้องมีชั้น wetting ดังนั้นค่าต่ำสุดของพลังงานของระบบจะต้องรวมพลังงานของชั้น wetting ด้วย ดังนั้นพลังงานรวมต่อหน่วยเซลล์ (unit cell) ของระบบคือ

$$E = E_{wL}(Q_1) + Q_2 E_{island}(Q_2) + (Q - Q_1 - Q_2) E_{rip} \quad (2.16)$$

โดย E_{wL} คือ พลังงานของชั้น wetting

จากสมการที่ (2.16) ปริมาณของสารที่ใช้ในการปลูกเท่ากับ Q monolayer เป็นส่วนของชั้น wetting Q_1 monolayer และของเกาะ Q_2 monolayer ส่วนที่เหลือเป็นส่วนเกาะ ripening ซึ่ง

พลังงาน E_{rip} หาได้จากการหาขีดจำกัด $L \rightarrow \infty$ การคำนวณหาค่าต่ำสุดของพลังงานในสมการที่ (2.16) ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า Q_1 และ Q_2 อีกวิธีหนึ่งสามารถหาได้จากสมดุลเฟสไดอะแกรมของระบบการปลูกผลึกแบบ lattice-mismatched เป็นฟังก์ชันของ lattice mismatch ϵ_0 และจำนวนวัสดุที่ปลูก, Q ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 สมดุลเฟสไดอะแกรมของระบบปลูกผลึกแบบ lattice-mismatched [19]

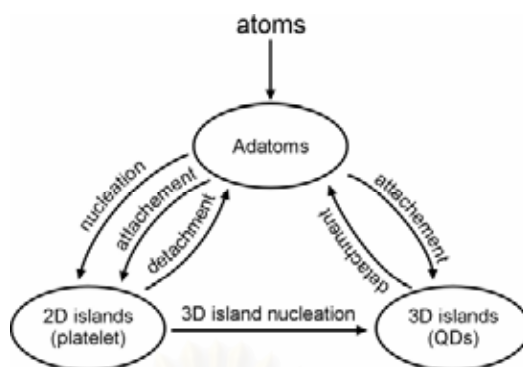
ผลที่ได้จากการปลูกผลึกในระบบ lattice-mismatched ในรูปที่ 2.7 ขึ้นกับปริมาณอะตอมที่ปลูกและค่า lattice mismatch ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น 7 สถานะ ดังนี้คือ

- 1) สถานะ FM (Frank van der Merve) ถ้าปริมาณอะตอมที่ปลูกมีค่าน้อยกว่าค่าวิกฤต H_{c1} ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า lattice mismatch และมี lattice mismatch อยู่ในช่วง 0 ถึง ϵ_2 โดยเป็นการปลูกผลึกโหมด Frank van der Merve ทำให้เกิดผลึกในระนาบแบบ 2 มิติขึ้น
- 2) สถานะ R_1 พิจารณาค่า lattice mismatch อยู่ในช่วง 0 ถึง ϵ_1 เมื่อปลูกผลึกเพิ่มจนอะตอมมีปริมาณเกินกว่าที่จะคงสถานะ FM ทำให้เกิดการก่อตัวในสถานะ R_1 ทำให้เกิดเป็นชั้น wetting และเกิดเกาะที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

- 3) สถานะ SK_1 (Stranski Krastanow) พิจารณาค่า lattice mismatch อยู่ในช่วง \mathcal{E}_1 ถึง \mathcal{E}_2 เมื่อปริมาณอะตอมเพิ่มขึ้นกว่าที่จะคงสถานะ FM ทำให้เกิดการก่อตัวเป็นชั้น wetting และมีเกาะที่มีขนาดใกล้เคียงกันเกิดขึ้น
- 4) สถานะ R_2 เป็นสถานะเมื่อปลูกปริมาณอะตอมเพิ่มขึ้นจากสถานะ SK_1 จึงทำให้เกิดเป็นชั้น wetting และมีเกาะที่มีขนาดใกล้เคียงกันพร้อมทั้งมีเกาะที่มีขนาดต่างกันเกิดขึ้น
- 5) สถานะ VW เป็นสถานะที่ปลูกผลึกโดยมีค่า lattice mismatch มากกว่า \mathcal{E}_2 ซึ่งเป็นการปลูกผลึกในโหมด Volmer Weber ทำให้เกิดเป็นเกาะที่มีขนาดใกล้เคียงกันแต่ไม่มีชั้น wetting
- 6) สถานะ SK_2 เป็นสถานะที่ปลูกผลึกเพิ่มต่อจากสถานะ VW และมีค่า lattice mismatch อยู่ในช่วง \mathcal{E}_2 ถึง \mathcal{E}_3 ทำให้เกิดเป็นชั้น wetting เพิ่มขึ้นมานอกเหนือจากเกาะ
- 7) สถานะ R_3 เป็นสถานะที่ปลูกผลึกเพิ่มต่อจากสถานะ VW และมีค่า lattice mismatch มากกว่า \mathcal{E}_3 ทำให้เกิดเป็นเกาะที่มีขนาดต่างกันมากและไม่มีชั้น wetting ดังนั้นการปลูกควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเองจำเป็นต้องคำนึงถึงปริมาณอะตอมที่ปลูกและค่า lattice mismatch ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานะที่เราต้องปลูกนั่นเอง

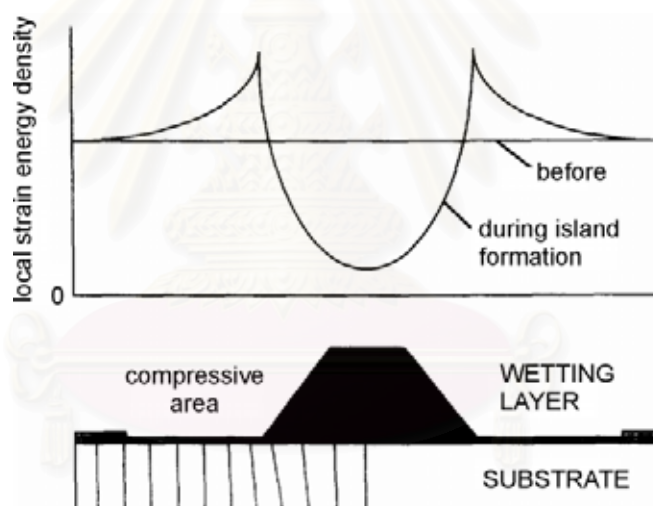
2) Kinetically-Controlled Growth

อีกวิธีที่สามารถใช้ในการคาดการณ์การเกิดของควอนตัมดอตได้คือ Kinetic theory ซึ่งเป็นการคำนวณเชิงเวลาเช่นเดียวกับ nucleation theory, kinetic Monte Carlo simulation ในหัวข้อนี้ใช้ทฤษฎี mean-field โดยแสดงในรูปที่ 2.8 เริ่มจากเมื่ออะตอมแพร่มาจนถึงที่ผิวก็กลายเป็น adatoms จำนวนของ adatoms เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงต้นเกิดการก่อตัวเป็นเกาะ 2 มิติขึ้น โดยที่อะตอมบางส่วนภายในเกาะแบบ 2 มิติ สามารถหลุดออกมาแล้วกลายเป็น adatoms ได้อีกครั้งถ้าขนาดเกาะน้อยกว่าค่าวิกฤตแต่เมื่อปลูกผลึกต่อไป เกาะแบบ 2 มิติจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากมี adatoms มาเกาะเพิ่มขึ้น ถ้าขนาดของเกาะ 2 มิติมีขนาดเกินกว่าค่าลิมิต การปลูกจะเปลี่ยนจาก 2 มิติเป็น 3 มิติ adatoms สามารถเกาะเพิ่มหรือหลุดออกในอัตราที่สอดคล้องกับการกระจายพลังงานของระบบ



รูปที่ 2.8 กระบวนการเกิดควอนตัมดอตโดยทฤษฎี mean-field [20]

ลิมิตของขนาดของควอนตัมดอตสามารถอธิบายโดย self-limiting growth โดยศึกษา strain energy รอบๆ เกาะ 3 มิติระหว่างการก่อตัวของเกาะ แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ความหนาแน่นพลังงาน ณ ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างควอนตัมดอต [20]

ความหนาแน่นพลังงานเกิดขึ้นจากการก่อตัวของควอนตัมดอต ส่งผลต่อ surface chemical potential ค่าพลังงานต่ำสุดอยู่ที่ยอดของเกาะซึ่งมีความเครียดน้อยที่สุด และมีค่ามากที่สุดที่ขอบของเกาะเพราะมีความเครียดแบบอัดสูง แรงแัดถูกส่งต่อไปยังแผ่นฐานก่อให้เกิดการ misfit ระหว่างแผ่นฐานและชั้น wetting รอบๆ เกาะ จึงเกิดเป็นกำแพงพลังงานรอบเกาะ เกิดเป็น โชนที่ไม่เหมาะสมสำหรับการก่อตัวของ adatoms

บทที่ 3

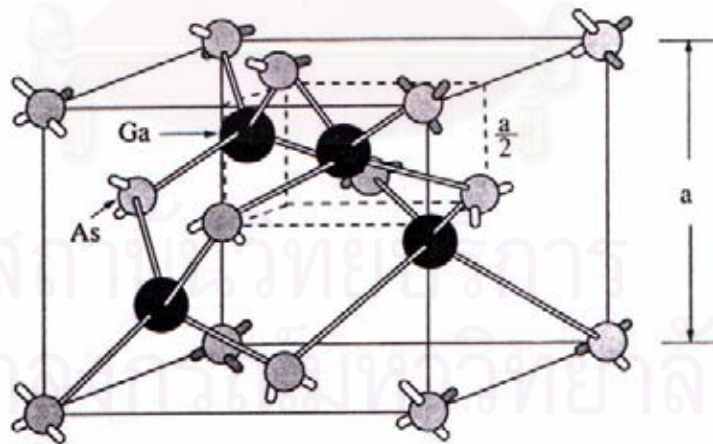
พื้นฐานการปลูกผลึกและการวัด

เนื้อหาในบทนี้เป็นการอธิบายความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิทยานิพนธ์ ได้แก่ ความรู้พื้นฐานของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V การปลูกผลึกอพิแทกซ์จากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy: MBE) กลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการปลูกผลึกอพิแทกซ์ด้วยวิธี MBE, วิธีการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธี van der Pauw, หลักการตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพของโครงสร้างระดับนาโน ทั้งการวัดพื้นผิวด้วยวิธี Atomic Force Microscopy (AFM) และภาพตัดขวางด้วยวิธี Transmission Electron Microscopy (TEM)

3.1 แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) และอินเดียมอาร์เซไนด์ (InAs)

3.1.1 โครงสร้างและคุณสมบัติที่สำคัญ

GaAs และ InAs เป็นสารประกอบในกลุ่ม III-V ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างแบบ Zinc-blende ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างแบบ Zinc-blende

คุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุทั้งสองชนิดในรูปของก้อน bulk ได้ถูกแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเมื่อเทียบกับ GaAs แล้ว InAs มีค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอน (electron mobility) ที่สูงกว่า มีแถบพลังงานต้องห้ามที่แคบกว่า และมีค่าคงที่โครงผลึก (lattice constant) ที่สูงกว่า

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติที่สำคัญของ GaAs และ InAs ที่ 300 K [21]

Properties Compound	Electron Mobility (cm ² V ⁻¹ s)	Intrinsic Carrier Concentration (cm ⁻³)	E _g (eV)	Lattice Constant (Å)
GaAs	8,500	2.1 x 10 ⁶	1.43	5.65
InAs	33,000	1.3 x 10 ¹⁵	0.36	6.06

การปลูก InAs ซึ่งมีค่าคงที่โครงผลึกสูงกว่า GaAs 7.3% โดยมี GaAs ที่เป็นแผ่นฐานจะทำให้เกิดความไม่เข้ากันของผลึก (lattice mismatch) ขึ้นที่รอยต่อ [21] การปลูกชั้น InAs เพียงบางๆ จะได้ชั้น InAs ที่มีความสมบูรณ์ของผลึก แต่หากชั้น InAs มีความหนาถึงค่าความหนาวิกฤต (critical thickness) [22] ผลึก InAs จะเริ่มเกิดความบกพร่อง (defects) ขึ้น ค่าความหนาวิกฤตสำหรับการปลูกผลึก InAs บนแผ่นฐาน GaAs อยู่ที่ 1.7-1.8 ML หรือ 5.0-5.5 Å [21] แต่เมื่อเราทำการปลูก InAs ให้มีความหนามากกว่าความหนาวิกฤตมากๆ ผลึกของ InAs จะมีความสมบูรณ์ของผลึกมากขึ้น เนื่องจากค่าความเครียดลดลง (strain relaxation)

3.1.2 ลักษณะสมบัติทางแสง

GaAs และ InAs มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง (direct bandgap) ทำให้เมื่อมีการกระตุ้นจะมีโอกาสเกิดการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับโฮลแบบเปล่งแสงมากกว่าแบบไม่เปล่งแสง วัสดุทั้งสองชนิดจึงเหมาะสำหรับสิ่งประดิษฐ์เชิงแสง ความยาวคลื่นของแสงที่เปล่งออกมาจากวัสดุขึ้นอยู่กับความกว้างของแถบพลังงานต้องห้ามดังสมการ

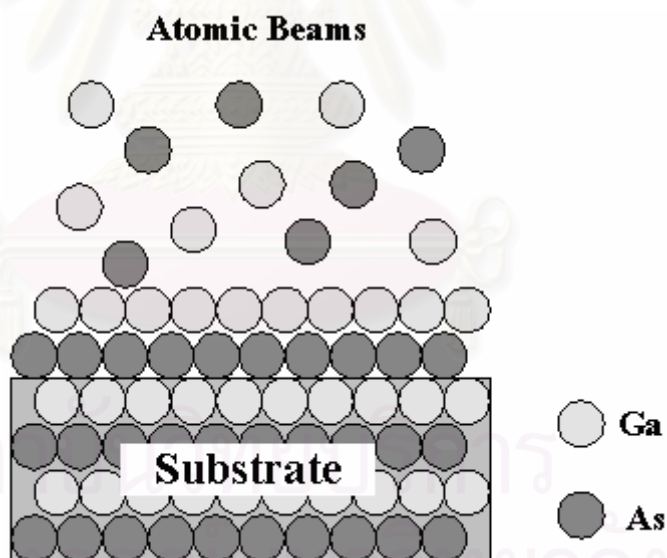
$$\lambda \text{ (nm)} = \frac{1240}{E_g \text{ (eV)}} \quad (3.1)$$

ที่อุณหภูมิ 300 K ความยาวคลื่นของแสงที่ GaAs สามารถเปล่งออกมาได้อยู่ที่ประมาณ 870 nm ในขณะที่ของ InAs อยู่ที่ประมาณ 2-5 μm

3.2 การปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy: MBE)

3.2.1 หลักการ

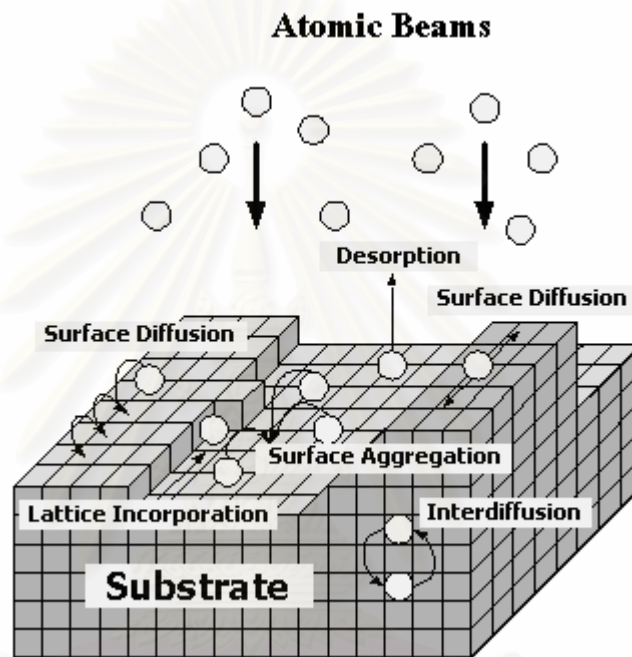
การปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุล (MBE) เป็นที่นิยมและง่ายโดยไม่จำกัดว่าจะต้องเป็นสารกึ่งตัวนำเท่านั้น แต่ยังสามารถใช้ปลูกวัสดุที่เป็นโลหะและฉนวนได้อีกด้วย การปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุลกระทำภายใต้สภาพสุญญากาศซึ่งมีความดันต่ำกว่า 10^{-9} Torr สารที่ใช้ทำการปลูกผลึกถูกทำให้ร้อนภายในเบ้า (crucible) จนกระทั่งกลายเป็นไอโมเลกุล (molecular beam) แล้วจึงพุ่งออกไปยังแผ่นฐานเพื่อทำการปลูกผลึก อุณหภูมิที่เบ้าจะเป็นตัวควบคุมปริมาณของไอโมเลกุล และจะมีชัตเตอร์ (shutters) อยู่ด้านหน้าของเบ้าในระหว่างทำการปลูก ซึ่งทำหน้าที่เป็นกลไกควบคุมเวลาในการปลูกเพื่อควบคุมความหนา หรือควบคุมอัตราส่วนของสารประกอบในกรณีที่มีการปล่อยไอโมเลกุลออกมามากกว่า 1 ลำผลึกที่ปลูกขึ้นมาโดยการปลูกผลึกอพิแทกซีจากลำโมเลกุลจะมีลักษณะเหมือนกับโครงสร้างผลึกแผ่นฐานดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นตัวอย่างการปลูก Ga และ As ได้เป็นชั้นผลึก GaAs



รูปที่ 3.2 ลักษณะการก่อตัวผลึกของ Ga และ As โดยการปลูกผลึกจากลำโมเลกุล

การเพิ่มความร้อนให้กับแผ่นฐานจะส่งผลให้อะตอมบนผิวหน้าของแผ่นฐานเกิดการเคลื่อนที่ไปมาในรูปแบบที่ต่างกันออกไปตามตำแหน่งของอะตอมดังแสดงในรูปที่ 3.3 อะตอมจะหยุดเคลื่อนที่ก็ต่อเมื่อได้เข้าไปอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม (lattice incorporation) แล้วก่อพันธะเพื่อลดพลังงานผิวหน้าแผ่นฐาน ได้ชั้นผลึกที่สมบูรณ์ อะตอมสามารถเคลื่อนไหวได้หลายรูปแบบ เช่น เคลื่อนไปบนผิวหน้าด้วยกระบวนการแพร่ (surface diffusion) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกับอะตอมที่อยู่

ด้านล่างของผิวหน้า (interdiffusion) หรือก่อตัวขึ้น (nucleation) เมื่ออะตอมมากกว่า 1 อะตอม เคลื่อนที่ไปยังจุดเดียวกันและเกิดการสร้างพันธะกันขึ้น หากอุณหภูมิของแผ่นฐานมีค่าสูงพอจะทำให้เกิดผลึกขึ้นได้ อุณหภูมิดังกล่าวขึ้นอยู่กับสารประกอบแต่ละชนิด แต่ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไป อะตอมที่เกิดพันธะที่ผิวหน้าจะกลายเป็นไออีกครั้งและสามารถหลุดออกจากผิวหน้าของแผ่นฐาน (desorption) ได้



รูปที่ 3.3 กระบวนการการเกิดผลึกของการปลูกผลึกด้วยวิธีลำโมเลกุล [4]

3.2.2 เงื่อนไขสุญญากาศสำหรับการปลูกผลึกจากลำโมเลกุล

สาเหตุหนึ่งที่ทำให้การปลูกผลึกจากลำโมเลกุลเป็นที่นิยม คือ อะตอมสามารถก่อตัวเป็นผลึกบนผิวหน้าของแผ่นฐานได้ โดยมีสารปนเปื้อน (contaminate) น้อยมากโดยอาศัยสภาวะการปลูกที่มีสภาพเป็นสุญญากาศ การที่ลำโมเลกุลจะเดินทางไปถึงผิวหน้า และมีสารปนเปื้อนน้อยหรือไม่มีเลยนั้นจะต้องทำภายในห้องปลูกผลึก (growth chamber) ด้วยสาเหตุดังกล่าวทำให้จำเป็นต้องพิจารณาระยะทางเฉลี่ยที่อะตอมในลำโมเลกุลเคลื่อนที่ก่อนที่จะชน (colliding) กับอะตอมอื่นๆ หรือถูกกระเจิง (scattering) ออกจากลำโมเลกุล ระยะทางนี้เรียกว่าระยะปลอดการชน (mean free path, L) และสามารถคำนวณได้โดยใช้ ทฤษฎีพลังงานจลน์ของก๊าซ และสมมุติฐานดังนี้

1. โมเลกุลก๊าซมีมวลเท่ากัน

2. แรงที่กระทำระหว่างโมเลกุลต่ำมากในระดับที่ละเอียดได้
3. ความเร็วของโมเลกุลเป็นไปตามโมเดลของแมกซ์เวล (Maxwell's Model)
4. ก๊าซมีคุณสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง (Isotropic)

ด้วยสมมุติฐานข้างต้น สามารถพิสูจน์ได้ว่าระยะปลอดการชนมีค่าตามสมการ [23]

$$L = \frac{1}{\sqrt{2}\pi n d^2} \quad (3.2)$$

เมื่อ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของลำโมเลกุล และ

n คือ ความหนาแน่นของโมเลกุลในสุญญากาศ

โดยค่าความหนาแน่น n มีความสัมพันธ์กับความดัน และอุณหภูมิเป็นไปตามสมการ

$$n = \frac{p}{k_B T} \quad (3.3)$$

เมื่อ p คือ ความดันของลำโมเลกุล

T คือ อุณหภูมิของเป้า และ

k_B คือ ค่าคงที่ Boltzmann

การปลูกผลึกจากลำโมเลกุลส่วนใหญ่ในห้องปลูกผลึกจะมีระยะห่างระหว่างเป้าและแผ่นฐานอยู่อย่างน้อย 0.2 เมตร ดังนั้นอะตอมในลำโมเลกุลที่จะไปถึงผิวหน้าได้จะต้องมีค่าระยะปลอดการชนมากกว่า 0.2 เมตรเช่นกัน ภายใต้อุปกรณ์นี้ ค่าความดันก๊าซสูงสุด (highest residual gas) ที่สามารถใช้ได้ในห้องปลูกผลึก สามารถคำนวณได้โดยสมมุติให้ลำโมเลกุลและก๊าซที่อยู่ภายในห้องปลูกผลึก (residual gas) รวมกัน โดยระยะปลอดการชนของลำโมเลกุลเป็นไปตามสมการ [23]

$$L_b = \sqrt{2}\pi n_b d_b^2 + \pi n_g d_{bg}^2 \sqrt{1 + v_g^2/v_b^2} \quad (3.4)$$

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

n_g , d_g และ v_g คือ ความหนาแน่น, เส้นผ่านศูนย์กลาง, และความเร็วเฉลี่ยของ residual gas ตามลำดับ

เนื่องจากความเร็วของ residual gas มักจะมีค่าต่ำกว่าความเร็วของลำโมเลกุลมาก ทำให้สามารถลดรูปสมการที่ (3.4) และจัดสมการใหม่เพื่อหาความหนาแน่นของ residual gas ได้ดังนี้

$$n_g = \frac{L_b^{-1} - \sqrt{2\pi n_b d_b^2}}{\pi d_{bg}^2} \quad (3.5)$$

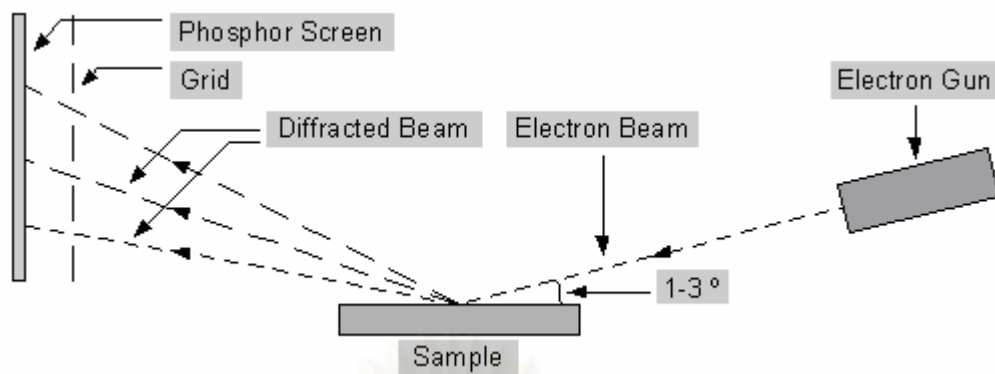
เมื่อแทนสมการที่ (3.3) ในสมการที่ (3.5) จะได้ค่าความสัมพันธ์ความดันของ residual gas ดังนี้

$$p_g = k_B T \left[\frac{L_b^{-1} - \sqrt{2\pi n_b d_b^2}}{\pi d_{bg}^2} \right] \quad (3.6)$$

ในกรณีของ GaAs ค่า p_g (max) = 7.7×10^{-2} Pa หรือ 0.58 mTorr นี้แสดงให้เห็นว่าระบบสุญญากาศภายในห้องปลูกผลึกมีค่าเพียงพอที่จะรักษาลำโมเลกุลของแก๊สเฉื่อยอาร์เซนไนต์ไว้ได้ อย่างไรก็ตามกระบวนการปลูกผลึกจากลำโมเลกุลนั้นมีอัตราการปลูกผลึกที่ช้ามาก อาจทำให้สารเจือปนในห้องปลูกผลึกเข้ามาปนเปื้อนในระหว่างทำการปลูกได้ ด้วยสาเหตุนี้จึงต้องมีสภาวะสุญญากาศไว้เพื่อป้องกันไม่ให้มีสารปนเปื้อนเข้ามาในระหว่างทำการปลูกผลึก

3.2.3 ระบบ Reflection High Energy Electron Diffraction (RHEED)

การปลูกผลึกอิพิแทกซ์จากลำโมเลกุลจะต้องไม่มีอะไรมาวางลำโมเลกุลที่เดินทางออกจากเบ้า (crucible) สู่ม้วนฐาน (substrate) ดังนั้นการวัดหลายวิธีจึงไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ผลึกในระหว่างทำการปลูกผลึกได้ อย่างไรก็ตามเทคนิคการหักเหลำอิเล็กตรอน (electron diffraction techniques) สามารถนำมาวิเคราะห์ผลึกในขณะที่ปลูกได้ ระบบ RHEED ที่ติดตั้งในเครื่องปลูกผลึกจากลำโมเลกุลมีองค์ประกอบหลักดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งประกอบไปด้วยปืนอิเล็กตรอน (electron gun) ซึ่งทำหน้าที่ยิงลำอิเล็กตรอนไปยังแผ่นฐานด้วยมุม $1-3^\circ$ กับผิวหน้าของแผ่นฐาน พลังงานที่ใช้ในการขับอิเล็กตรอนอยู่ในช่วง 15-30 keV การยิงอิเล็กตรอนด้วยมุมที่เล็กมากทำให้อิเล็กตรอนส่วนมากถูกหักเหออกแผ่นฐานไปตกกระทบบนยังจอ phosphor ลำอิเล็กตรอนที่ทะลุเข้าไปในผิวหน้าแผ่นฐานมีน้อยมาก



รูปที่ 3.4 โครงสร้างของระบบ RHEED

ความยาวคลื่น (wavelength) ของลำอิเล็กตรอน (electron beam) อยู่ที่ 0.17-0.06 Å อิเล็กตรอนจึงทะลุผ่านเข้าไปผลึกเพียงไม่กี่ชั้น ผลที่ได้จากเทคนิคนี้จะได้ข้อมูลเกี่ยวกับผิวหน้าซึ่งข้อมูลจะถูกแสดงบนฉากฟอสเฟออร์ (phosphor screen) มีลักษณะเป็นแผนภาพการแทรกสอดของลำอิเล็กตรอนซึ่งมีรูปแบบต่างๆ ข้อมูลเหล่านี้สามารถใช้ในการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงขณะปลูกและลักษณะของผิวหน้าแต่ไม่ได้ให้ข้อมูลเกี่ยวกับ โครงสร้างของผิวหน้า ข้อมูลนี้ยังสามารถนำไปหาอัตราการปลูกผลึก (growth rate) ได้ ซึ่งในขณะที่สารก่อพื้นระบนผิวหน้าของแผ่นฐาน จะสามารถสังเกตเห็นความเข้ม (intensity) ของอิเล็กตรอนที่ตกกระทบกับฉากฟอสเฟออร์ ในกรณีที่มีผิวหน้าเรียบ ความเข้มของลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบบนฉากจะมีค่ามากที่สุด แต่สำหรับผิวหน้าที่ยังไม่สมบูรณ์ ลำอิเล็กตรอนจะถูกกระเจิงแบบแพร่ซิม (diffuse scattering) ส่งผลให้ความสว่างของลำอิเล็กตรอนที่กระทบฉากฟอสเฟออร์มีค่าน้อย ข้อมูลข้างต้น ทำให้สามารถนำไปคำนวณอัตราการปลูกผลึก โดยการพล็อตค่าความเข้มของ RHEED oscillation เทียบกับเวลาที่ใช้ โดยค่าระหว่างจุดสูงสุดของ RHEED Oscillation ที่ติดกันคือ 1 ชั้นอะตอม (1ML) ดังนั้นจะสามารถคำนวณอัตราการปลูกผลึกออกมามีหน่วยเป็น ชั้นอะตอมต่อวินาที (ML/sec) ได้จากข้อมูลข้างต้นรวมถึงค่าคงที่โครงสร้างของสารที่ต้องการปลูกทำให้สามารถหาระยะเวลาที่ใช้ในการปลูกผลึกที่ความหนาหนึ่ง ๆ ได้อย่างแม่นยำ

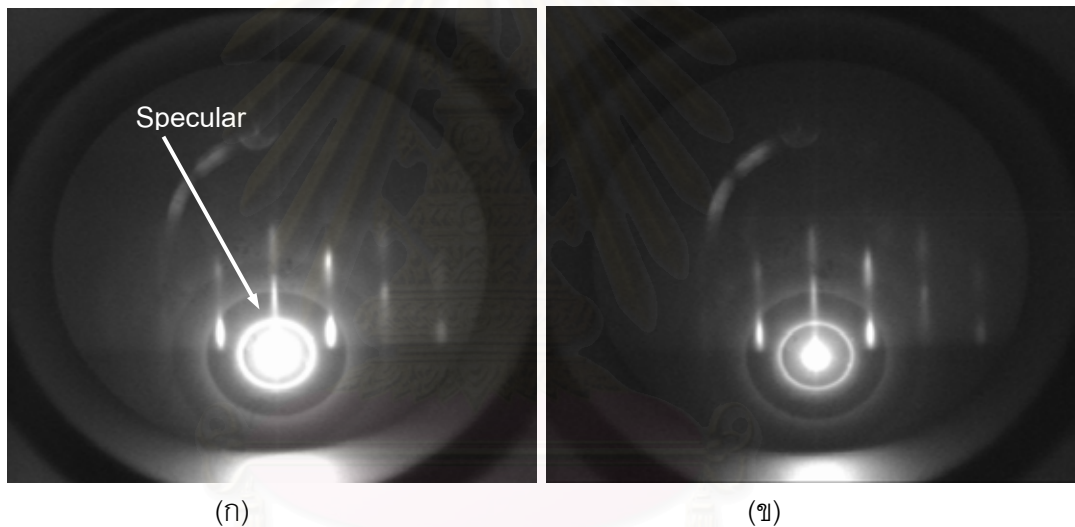
การคำนวณอัตราการปลูกผลึก GaAs สามารถใช้ข้อมูลจาก specular beam ของ RHEED pattern บน phosphor screen ดังแสดงในรูปที่ 3.5 specular beam จะมีความเข้มที่แตกต่างกันในระหว่างทำการปลูกผลึก ความเข้มที่แตกต่างกันนี้อธิบายได้จากลักษณะของผิวหน้า ถ้าผิวหน้ามีความสมบูรณ์ราบเรียบ ความเข้มของ specular beam จะสว่างมากที่สุด แต่สำหรับผิวหน้าที่ยังไม่สมบูรณ์จะทำให้ลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบผิวหน้าจะถูกกระเจิงแบบแพร่ซิม (diffuse scattering) ทำให้ความเข้มของ specular beam ต่ำ รูปที่ 3.6 แสดงความเปลี่ยนแปลงที่

เกิดขึ้นระหว่างการปลูกผลึกอีพิแทกซีและลักษณะของ RHEED oscillation ที่เกิดขึ้น จุดยอดของกราฟแสดงถึงผิวหน้าที่สมบูรณ์ราบเรียบหรือความเข้มสว่างมากที่สุด หมายความว่าจุดยอดแต่ละจุด หมายถึงชั้นอีพิแทกซีที่เพิ่มขึ้นครั้งละ 1 ML เมื่อนับจำนวน ML ที่ปลูกได้ต่อช่วงเวลาก็จะสามารถคำนวณอัตราการปลูกผลึกแบบอีพิแทกซีได้จาก

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

ตัวอย่าง จำนวนชั้นผลึกของ GaAs ที่สังเกตได้เท่ากับ 10 ML ใช้เวลา 20 วินาที

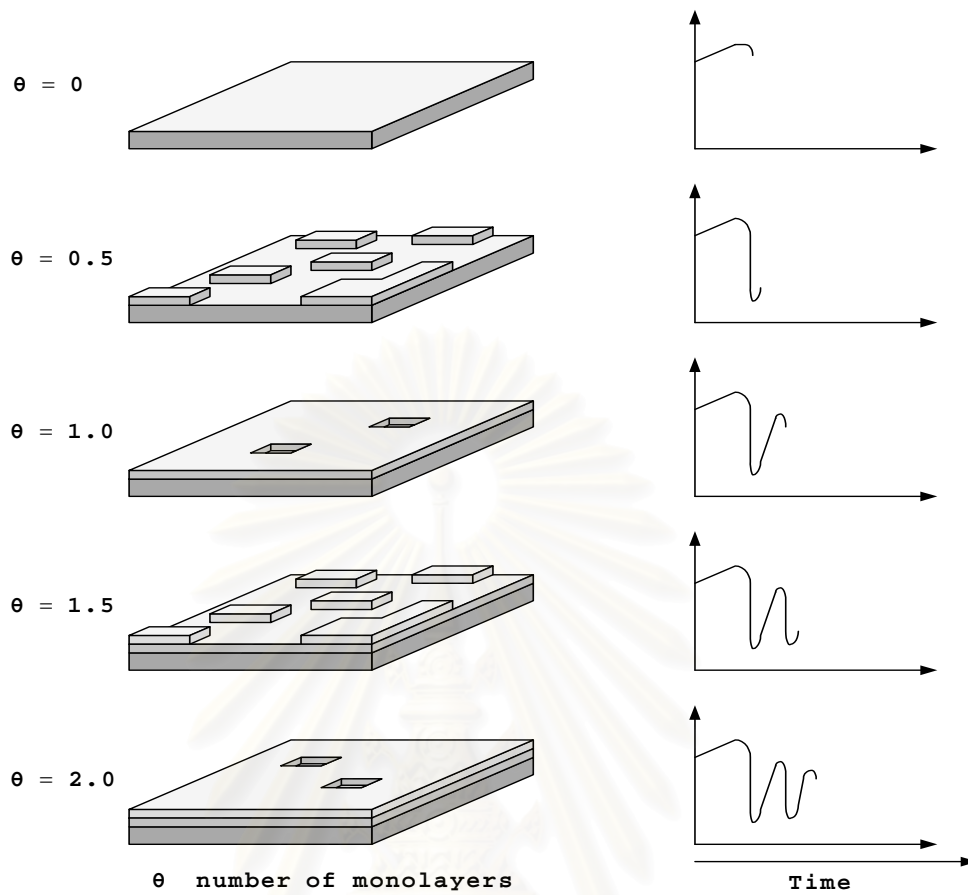
$$\text{Growth Rate of GaAs (ML/s)} = \frac{10 \text{ ML}}{20 \text{ sec}} = 0.5 \text{ ML/s}$$



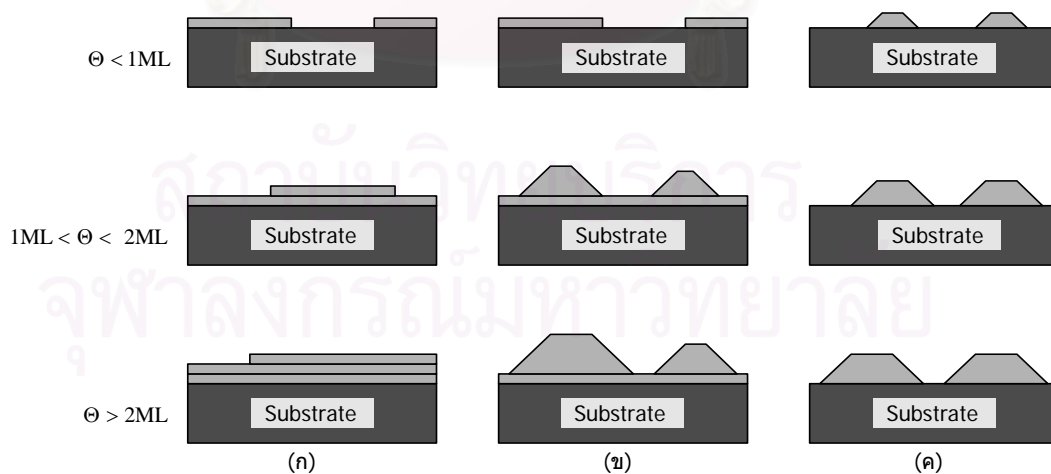
รูปที่ 3.5 RHEED pattern ที่ปรากฏบนจอฟอสเฟอร์ ขณะที่มีความสว่าง (ก) มาก และ (ข) น้อย

3.3 รูปแบบของการปลูกผลึก (Growth Modes)

การปลูกผลึกอีพิแทกซีมีรูปแบบที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ คือ Frank van-der-Merwe (layer-by-layer), Stranski-Krastanow (layer plus island) และ Volmer-Weber (island) ในรูปที่ 3.7 การเกิดผลึกที่แตกต่างกันมีสาเหตุจากคุณสมบัติของจำนวนการตกผลึกที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุที่ใช้และเงื่อนไขของการปลูกผลึก ความแตกต่างของการเกิดผลึกมีความสำคัญต่อการควบคุมการปลูกผลึกเพื่อนำความรู้ที่ได้ไปทำการวิเคราะห์หาเงื่อนไขการปลูกผลึกเพื่อให้ได้ผลึกที่มีคุณภาพตามต้องการ



รูปที่ 3.6 สภาพพื้นผิว (ซ้าย) และ RHEED oscillation (ขวา) ที่เกิดขึ้นในช่วง 2 ML แรกของการปลูกผลึก [23]



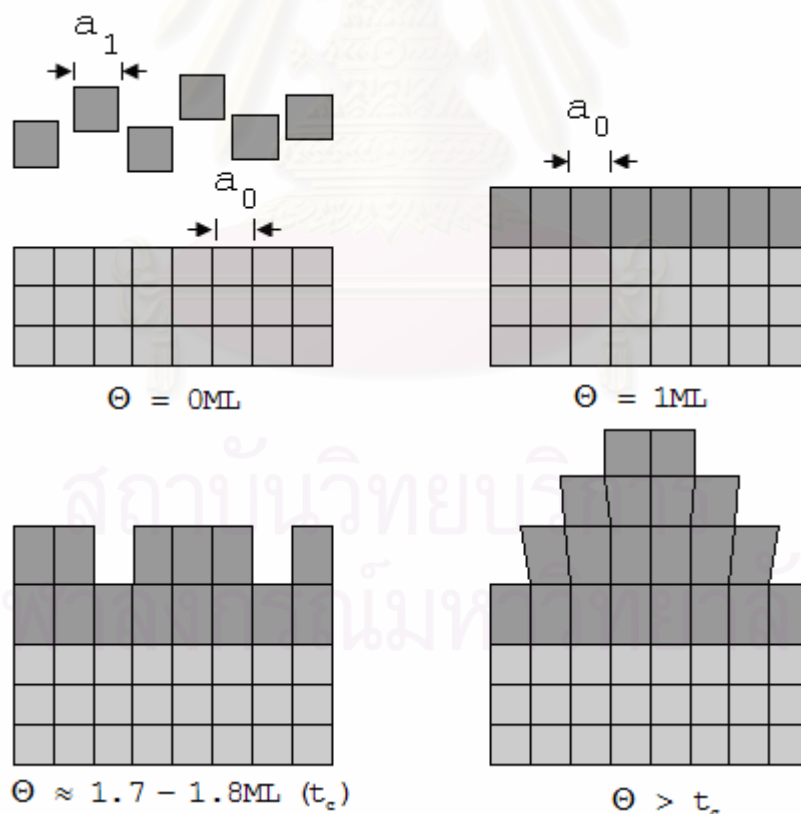
รูปที่ 3.7 รูปแบบของการเกิดผลึกอพิแทกซ์แบบ (ก) Frank van-der-Merwe (ข) Stranski-Krastanow และ (ค) Volmer-Weber [23]

3.3.1 Frank van-der-Merwe

เป็นการเกิดผลึกใน 2 มิติ (2D layers) ในระบบนี้ ความเครียดจากการไม่เข้ากันของโครงผลึกจะเกิดขึ้นเพียงไม่กี่ชั้นของการปลูกผลึก ชั้นแรกจะมีการยึดแน่น โดยค่าของโครงผลึกจะถูกบังคับให้เท่ากับค่าโครงผลึกแผ่นฐาน อย่างไรก็ตาม สำหรับชั้นต่อมา แรงอัดระหว่างอะตอมจะมีค่าลดลง กระทั่งสารที่ทำการปลูกมีค่าคงที่โครงผลึกเท่ากับสารที่ทำการปลูกนั่นเอง โดยปราศจากความเครียด การเกิดผลึกรูปแบบนี้จะเกิดในกรณีที่ค่าคงที่โครงผลึกมีความแตกต่างกันน้อยมาก

3.3.2 Stranski-Krastanow (SK)

การเกิดผลึกมีลักษณะเป็นเกาะ 3 มิติ (3D island) สาเหตุมาจากค่าคงที่ของโครงผลึกของชั้นที่ต้องการปลูกและของแผ่นฐานมีความแตกต่างกันมากเช่น การปลูก InAs บนแผ่นฐาน GaAs ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญของการเตรียมวัสดุสำหรับการทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รูปที่ 3.8 แสดงให้เห็นถึงขั้นตอนการเกิดผลึก คือ ในตอนเริ่มต้นนั้นเริ่มทำการปลูกผลึกอพิแทกซีที่มีค่าคงที่โครงผลึก a_1 บนแผ่นฐานที่มีค่าคงที่โครงผลึก a_0 ซึ่งมีต่ำกว่า ผลึกที่ปลูกได้จะมีความเครียดอยู่ในตัว



รูปที่ 3.8 รูปแบบของการเกิดผลึกอพิแทกซี แบบ Stranski-Krastanow

เมื่อการปลูกดำเนินต่อไปกระทั่งถึงความหนาวิกฤต (critical thickness, t_c) ความเครียดจะมีค่ามากเกินกว่าจะรักษาความเป็นชั้นผลึก 2 มิติต่อไปได้ ชั้นสารที่ทำการปลูกผลึกจะเกิดการโค้งงอขึ้น (buckles) เพื่อลดค่าความเครียดลงส่งผลให้เกิดการก่อตัวเป็นเกาะ 3 มิติ (3D island)

3.3.3 Volmer-Weber

เป็นการเกิดผลึกในรูปแบบของเกาะ 3 มิติเพียงชนิดเดียว เนื่องจากอะตอมที่ตกผลึกต่างยึดกันแน่นมากกว่าแผ่นฐาน การเกิดผลึกในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นเมื่อสารที่ตกผลึกนั้นเป็นสารที่ต่างชนิดกับแผ่นฐานโดยสิ้นเชิง เช่น การปลูกโลหะบนออกไซด์

3.4 ระบบปลูกผลึกจากลำโมเลกุล

ระบบปลูกผลึกจากลำโมเลกุลที่ใช้ในการวิจัยดังแสดงในรูปที่ 3.9 ถูกสร้างขึ้นโดยบริษัท Riber ซึ่งประกอบไปด้วยห้องบรรจุแผ่นฐาน (Loading chamber) ห้องเตรียมแผ่นฐาน (Introduction chamber) ห้องเคลื่อนย้าย (Transfer chamber) และห้องปลูกผลึก (Growth chamber) โดยแต่ละห้องจะมีประตูเปิด-ปิด (gate valve) เพื่อแยกบรรยากาศของแต่ละห้อง และมีปั๊มชนิดไอออน (ion pump) และชนิดติตาเนียมซับลิเมชัน (Titanium sublimation pump) ห้องละหนึ่งคูยกเว้นห้องบรรจุแผ่นฐาน แต่ละห้องจะมีความดันบรรยากาศแตกต่างกันขึ้นกับประสิทธิภาพการทำงานของปั๊มและสภาพของห้อง ห้องปลูกผลึกจะถูกเชื่อมต่อกับ K cells ที่ใช้บรรจุสารที่ใช้ในการปลูกผลึกได้แก่ Ga, In, As, Al, Si, และ P โดยในห้องปลูกผลึกยังเชื่อมต่อกับระบบ RHEED ดังที่ได้อธิบายไปในหัวข้อ 3.2.4 ข้างต้นแล้ว

การควบคุมกระบวนการสร้างชั้นผลึกสามารถทำได้ผ่านระบบควบคุมการปลูกแบบ FIC11 ของบริษัท EUROTHERM ซึ่งเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ตอนุกรม RS232 ระบบควบคุม FIC11 ทำหน้าที่ต่าง ๆ ดังนี้ 1) ควบคุมหน่วยจ่ายกำลัง (Power Supply Unit) ของเซลล์ของธาตุแต่ละชนิดเพื่อให้เข้าแต่ละอันมีอุณหภูมิคงที่ตามที่กำหนดไว้ 2) ควบคุมอุณหภูมิของหัวจับบอล (manipulator) ในห้องปลูกผลึก 3) ควบคุมการเปิด-ปิดชัตเตอร์ และ 4) วัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น อุณหภูมิและความดัน การปลูกผลึกให้เป็นไปตามโครงสร้างที่ต้องการสามารถกระทำได้โดยการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ควบคุมอุณหภูมิและชัตเตอร์ของเซลล์แต่ละเซลล์ให้เปิด-ปิดตามเวลาที่ถูกกำหนดไว้

เครื่องมือวัดอื่นๆ ที่ประกอบอยู่ในระบบปลูกผลึกรุ่นนี้ได้แก่

เครื่องวิเคราะห์มวล (mass spectroscopy) สำหรับตรวจดูบรรยากาศของห้องปลูกผลึกว่าประกอบไปด้วยธาตุอะไรบ้างที่ตกค้างอยู่

ระบบสร้างแผนภาพ (RHEED pattern system) สำหรับตรวจดูสภาพพื้นผิวของผลึกขณะทำการปลูกว่ามีความเป็นผลึกดีหรือไม่ อุปกรณ์ของระบบนี้ประกอบด้วยปืนอิเล็กตรอนพร้อมระบบโฟกัส และฉากรับแผนภาพการแทรกสอดของลำอิเล็กตรอน

ปั๊มที่ใช้อยู่ในระบบการปลูกผลึกนี้ประกอบด้วย

ปั๊มไดอะแฟรม (diaphragm pump) เป็นปั๊มที่ทำงานโดยปราศจากน้ำมันหล่อลื่นเพื่อป้องกันมิให้อิอน้ำมันพลัดเข้าไปในระบบสุญญากาศ ใช้สร้างสภาวะสุญญากาศจากความดันบรรยากาศสู่ระดับประมาณ 10^{-1} Torr เป็นปั๊มที่สามารถเคลื่อนย้ายไปมาเพื่อใช้กับห้องทั้งสี่ได้ จะใช้ในกรณีที่ต้องการเริ่มสร้างสภาวะสุญญากาศจากความดันบรรยากาศหลังจากปล่อยอากาศเข้าไปในแต่ละห้อง

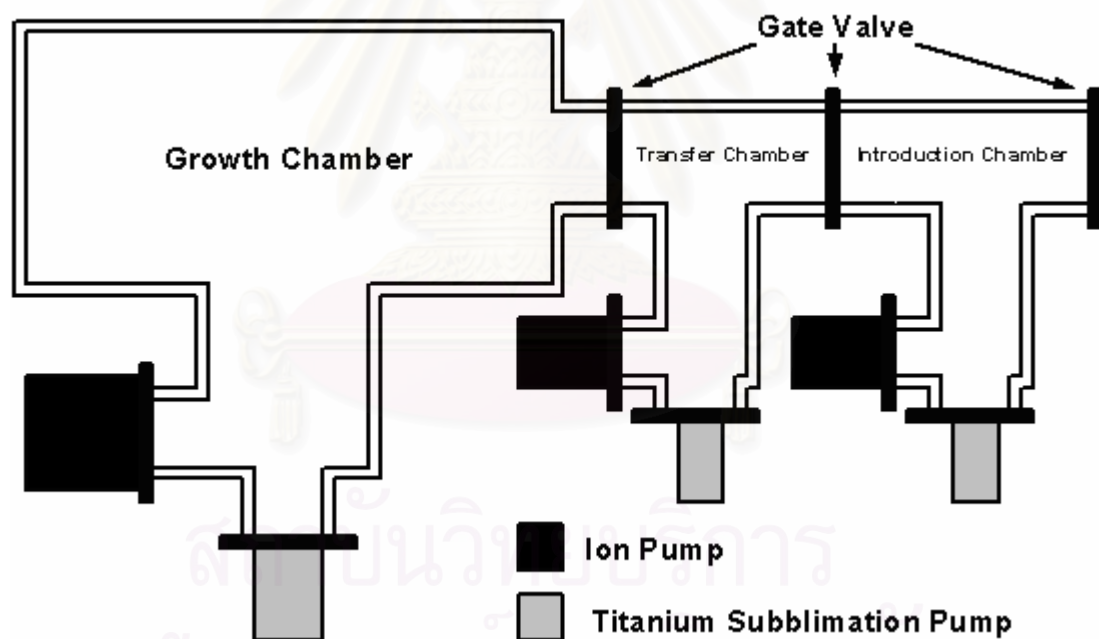
ปั๊มดูดซับ (absorption pump) เป็นปั๊มที่ใช้สร้างสภาวะสุญญากาศต่อจากปั๊มไดอะแฟรม ปั๊มนี้อาศัยวัสดุดูดซับอะตอมของก๊าซซึ่งจะทำงานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นจึงต้องเติมไนโตรเจนเหลวให้แก่ปั๊มตลอดเวลาที่ใช้งาน ปั๊มนี้สร้างสภาวะสุญญากาศได้ตั้งแต่ 10^{-1} ถึง 10^{-3} Torr



รูปที่ 3.9 ระบบปลูกผลึกจากลำโมเลกุล RIBER 32P

ปั๊มไอออน (ion pump) จะทำให้อะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซแตกตัวเป็นไอออน และถูกดึงดูดมากักไว้ด้วยสนามไฟฟ้า ปั๊มนี้สร้างสภาวะสุญญากาศได้ตั้งแต่ 10^{-5} ถึง 10^{-12} Torr อย่างไรก็ตาม อัตราการดูดก๊าซน้อยมาก ทำให้ดึงอากาศออกได้ช้า หากใช้ที่ความดันใกล้เคียง 10^{-5} Torr กับห้องที่มีปริมาตรใหญ่ๆ จะใช้เวลานานมากและจะทำให้ปั๊มได้รับความเสียหาย ดังนั้นจึงต้องใช้ปั๊มดูดซับดึงความดันบรรยากาศให้ได้มากที่สุดก่อนจะเปิดใช้ปั๊มไอออน

ปั๊มติตาเนียมซับลิเมชัน (Titanium sublimation pump) จะปล่ยอะตอมของติตาเนียมออกไปด้วยลวดความร้อนติตาเนียม อะตอมของติตาเนียมจะไปจับเอาอะตอมของก๊าซอื่นๆ เกิดเป็นสารประกอบ และเคลื่อนไปเกาะที่อุณหภูมิต่ำ เช่น ที่ผนังห้องปลูกผลึก หรือ ถูกดูดออกโดยปั๊มไอออน เพื่อให้ปั๊มนี้ทำงานได้ดีจำเป็นจะต้องบ่อนไนโตรเจนเหลวแก่ผนังห้องปลูกผลึก ปั๊มนี้จะถูกปิดในขณะที่ทำการปลูกชั้นผลึก การติดตั้งปั๊มติตาเนียมซับลิเมชันและปั๊มไอออนข้างต้นได้ถูกแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ตำแหน่งของปั๊มชนิดต่างๆ ที่ติดตั้งอยู่ในระบบ MBE

3.5 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยวิธี van der Pauw

การวิจัยหรือพัฒนาสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำจำเป็นต้องทราบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ หากเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่จะถูกนำไปประยุกต์ใช้งาน พารามิเตอร์ที่สำคัญที่ควรจะรู้ ได้แก่ ค่าสภาพ

ต้านทานไฟฟ้า (resistivity : ρ) ค่าความคล่องตัว (mobility : μ) และค่าความหนาแน่นพาหะ (carrier concentration : n) ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้มีวิธีวัดหลายวิธี ในจำนวนนั้นวิธีการวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์เป็นที่นิยมมากที่สุดวิธีหนึ่ง [24] แต่การวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ให้ได้ค่าที่ถูกต้องกับความเป็นจริงยังมีวิธีการ และข้อควรระวัง อาทิ เช่น กระบวนการสร้างโครงสร้างที่จะนำมาทดสอบ ขนาดของขั้วไฟฟ้า รูปทรงชิ้นงาน และอื่นๆ เทคนิคของ L.J. van der Pauw เป็นที่ยอมรับกันว่าให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องเป็นที่น่าพอใจ และยังสามารถใช้วัดชิ้นงานที่ไม่จำกัดรูปทรง (arbitrary shape) ได้ดี เนื้อหาในหัวข้อนี้จะเป็นการอธิบายพื้นฐานของปรากฏการณ์ฮอลล์ตามด้วยเทคนิคการวัดค่าความคล่องตัวและความหนาแน่นพาหะด้วยวิธีของ van der Pauw

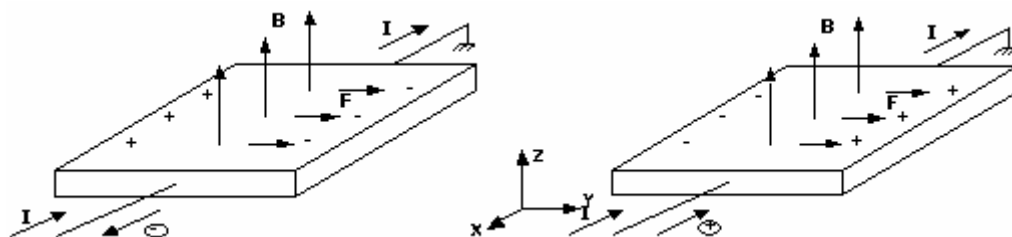
3.5.1 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect)

ปรากฏการณ์ฮอลล์ได้ถูกพบครั้งแรกในปี 1879 เมื่อ Edwin H. Hall พบว่าเกิด แรงดันขึ้นที่วัสดุเมื่อป้อนกระแสไหลผ่านวัสดุนั้นในสภาพที่มีสนามแม่เหล็ก แรงที่มากกระทำกับประจุที่เดินทางด้วยความเร็ว \vec{v} ในสนามแม่เหล็กที่มีความเข้ม \vec{B} เป็นไปตามความสัมพันธ์

$$\vec{F} = e (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (3.7)$$

เมื่อ	e	คือ ประจุ	(C)
	\vec{v}	คือ ความเร็วของประจุที่เคลื่อนที่	(m/s)
	\vec{B}	คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก	(T)
	\vec{F}	คือ แรงลอเรนซ์ (Lorentz Force)	

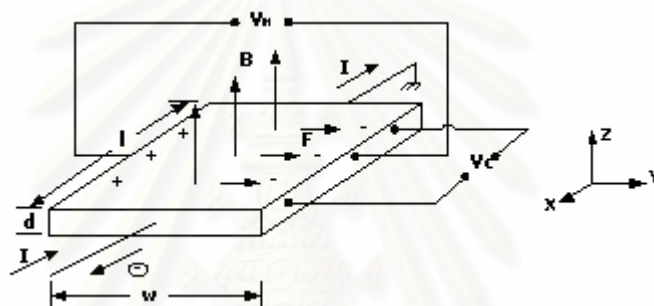
ซึ่งจะทำให้เกิดการผลักและออกกันของประจุที่อยู่ในวัสดุ โดยทำให้ประจุบวก และประจุลบ แยกออกจากกันอันเนื่องมาจากสนามไฟฟ้าเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.11 (ก) ในกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิด n พาหะนำไฟฟ้าหลักคืออิเล็กตรอน แรงผลักลอเรนซ์ ตามความสัมพันธ์ที่ (3.7) ที่กระทำบนอิเล็กตรอนจะส่งผลให้ อิเล็กตรอนเกิดการสะสมที่ด้านขวาของสารกึ่งตัวนำ ในกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิด p พาหะนำไฟฟ้าคือโฮล ซึ่งจะถูกรวมผลักลงในทิศทางตรงกันข้าม ส่งผลให้เกิดการสะสม (pile up) โฮลที่ด้านซ้ายของสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูป 3.11 (ข) ปรากฏการณ์ข้างต้นนอกจากจะทำให้ทราบชนิดของประจุในชั้นสารกึ่งตัวนำแล้วยังสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการคำนวณหาค่าความคล่องตัว (mobility) กับค่าความหนาแน่นพาหะ (carrier concentration) ได้ตั้งขั้นตอนต่อไป



ก) Negative charge

ข) Positive charge

รูปที่ 3.11 ลักษณะการผลักกันและสะสมของประจุ



รูปที่ 3.12 แผนภาพโครงสร้าง Hall-bar

อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v ในทิศทางบวก x ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก B ในทิศทางบวก z จะมีแรงผลักลอเรนทซ์ (Lorentz force) มากกระทำในทิศทางบวก y ดังความสัมพันธ์

$$\vec{F} = -e (\vec{v}_x \times \vec{B}_z) \tag{3.8}$$

$$\vec{F} = ev_x B_z \vec{a}_y \tag{3.9}$$

เมื่อ \vec{F} คือ แรง (N)

\vec{v}_x คือ ความเร็ว (cm/s)

B คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Wb/cm^2) และ

\vec{a}_y คือ Unit vector ของแกน y

ต่อไปพิจารณา ความหนาแน่นของกระแสมีค่าตามความสัมพันธ์

$$\vec{J}_x = - ne\vec{v}_x \quad (3.10)$$

$$\vec{v}_x = \frac{-\vec{J}_x}{ne} \quad (3.11)$$

ดังนั้นสนามไฟฟ้าในแกน y สามารถอยู่ในรูปของความสัมพันธ์

$$\vec{E}_y = \frac{\vec{F}}{e} = v_x B_z \vec{a}_y \quad (3.12)$$

กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall coefficient)

$$R_H = \frac{-1}{ne} \quad (3.13)$$

เมื่อแทนค่า v_x จากสมการที่ (3.11) ลงในสมการที่ (3.12) จะได้

$$R_H = \left(\frac{E_y}{J_x B_z} \right) \quad (3.14)$$

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

E_y คือ สนามไฟฟ้า (V/m)

J_x คือ ความหนาแน่นกระแส (A/cm^2)

ค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในทิศทางบวก x เป็นไปตามความสัมพันธ์

$$\mu = \frac{v_x}{E_x} \quad (3.15)$$

เมื่อแทนค่า \vec{v}_x จากสมการที่ (3.11) ลงไปจะได้

$$\bar{v}_x = \frac{-J_x}{ne} \bar{a}_x \quad (3.16)$$

ดังนั้น

$$\mu = \left(\frac{-J_x}{ne} \right) \left(\frac{1}{E_x} \right) \quad (3.17)$$

$$\mu = \left(\frac{J_x}{E_x} \right) \left(\frac{E_y}{J_x B_z} \right) = \left(\frac{E_y}{E_x} \right) \left(\frac{1}{B_z} \right) \quad (3.18)$$

จากรูปที่ 3.13 ความต่างศักย์ที่คร่อมชิ้นสารในแกน x คือ

$$V_c = E_x l \quad (3.19)$$

และแกน y คือ

$$V_H = E_y w \quad (3.20)$$

ดังนั้นสามารถคำนวณค่าความคล่องตัวได้จาก

$$\mu = \left(\frac{V_H}{V_c} \right) \left(\frac{1}{w} \right) \left(\frac{1}{B_z} \right) \quad (3.21)$$

เมื่อ V คือ ศักย์ไฟฟ้า (Volt)

l คือ ความยาว (cm)

w คือ ความกว้าง (cm)

โดยสรุป สามารถคำนวณหา Hall mobility ได้จาก

$$\mu_H = \mu \quad (3.22)$$

นอกจากนี้สัมประสิทธิ์ของฮอลล์จากการพิจารณาสมการที่ (3.13) และ (3.20) ควบคู่กัน

$$R_H = \frac{-1}{n_H e} = \frac{E_y}{J_x B_z} = \frac{V_H d}{B_z I_x} \quad (3.23)$$

จะทำให้สามารถคำนวณหาค่าความเข้มข้นของอิเล็กตรอน (electron concentration) ได้จาก

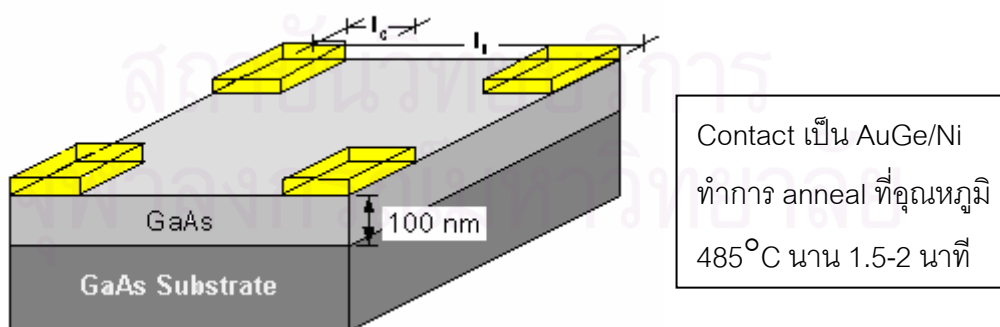
$$n_H = - \frac{B I x}{V_H d e} \quad (3.24)$$

3.5.2 ทฤษฎีของ van der Pauw

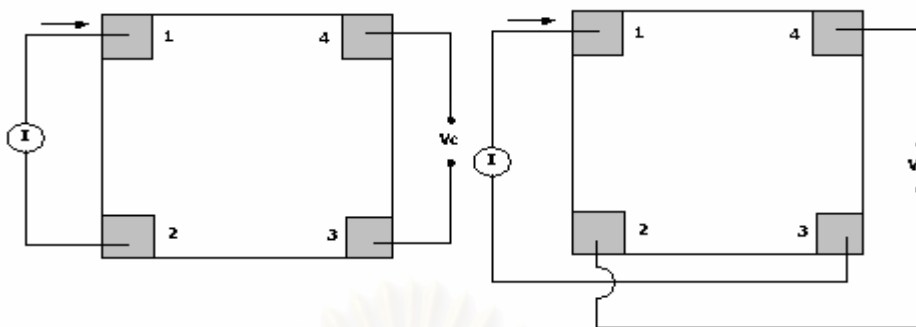
วิธีการวัดใช้วิธีของ van der Pauw ในการแก้ปัญหาเรื่องของชิ้นงานที่ทำขั้วโลหะ ไม่สมมาตรกัน (arbitrary shape) เนื่องจากการทำขั้วโลหะให้สมมาตรนั้นทำได้ไม่ถนัดนัก ซึ่งวิธีนี้ยังเหมาะกับการใช้วัดชิ้นงานที่เป็นฟิล์มบาง (Thin Film) แบบอพิแทกซีที่ปลูกบนแผ่นฐานได้ อีกด้วย ข้อควรคำนึงในวิธีของ van der Pauw มีดังนี้

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

วิธีวัดแบบนี้ใช้คำนวณหาค่าสภาพต้านทานแผ่น (sheet resistivity) หรือ ความหนาแน่นพาหะแผ่น (sheet carrier concentration) แต่วิธีนี้ต้องการผิวหน้าที่เรียบดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ชิ้นงานที่นำไปวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธี van der Pauw



ก) การวัดสภาพต้านทาน

ข) ปรากฏการณ์ฮอลล์

รูปที่ 3.14 วิธีการวัดแบบ van der Pauw

พิจารณารูปที่ 3.14(ก) เริ่มแรกในสภาพที่ยังไม่ป้อนสนามแม่เหล็ก ป้อนกระแสไฟฟ้า I_{12} ไหลผ่านระหว่างขั้วต่อ 1 ไปสู่ 2 และวัดแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วต่อ 3 และ 4 ได้ค่า V_{34} จะสามารถคำนวณค่า R_{12} ได้เช่นเดียวกัน หากป้อนกระแสไฟฟ้า I_{34} ไหลผ่านขั้วต่อ 3 ไปสู่ 4 แล้ววัดแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วต่อ 1 และ 2 ได้ค่า V_{12} จะสามารถคำนวณ R_{34} ได้ โดยให้นิยามของความต้านทาน R_{12} และ R_{34} ดังนี้

$$R_{12} = V_{34}/I_{12} \tag{3.25}$$

และ $R_{34} = V_{12}/I_{34} \tag{3.26}$

ดังนั้นค่าสภาพต้านทานแผ่นหาได้จากสมการที่ 3.27 ส่วนค่า f คือ ตัวเลขที่ใช้คูณเพื่อแก้ไขความไม่สมมาตรหรือสมมาตรของชิ้นงาน f เป็นฟังก์ชันของ R_{12} และ R_{23} ดังความสัมพันธ์

$$\rho = \left(\frac{\pi d}{\ln 2} \right) \left[\frac{R_{12} + R_{23}}{2} \right] f \tag{3.27}$$

$$\left[\frac{(Q-1)}{(Q+1)} \right] = \left(\frac{f}{\ln 2} \right) \cosh^{-1} \left[\left(\frac{1}{2} \right) \exp \left(\frac{\ln 2}{f} \right) \right] \tag{3.28}$$

ซึ่ง $Q = \frac{R_{12}}{R_{23}} \tag{3.29}$

$$f = \left(\frac{\ln 0.25}{\left[\ln(0.5 + \alpha) + \ln(0.5 - \alpha) \right]} \right) \quad (3.30)$$

และ

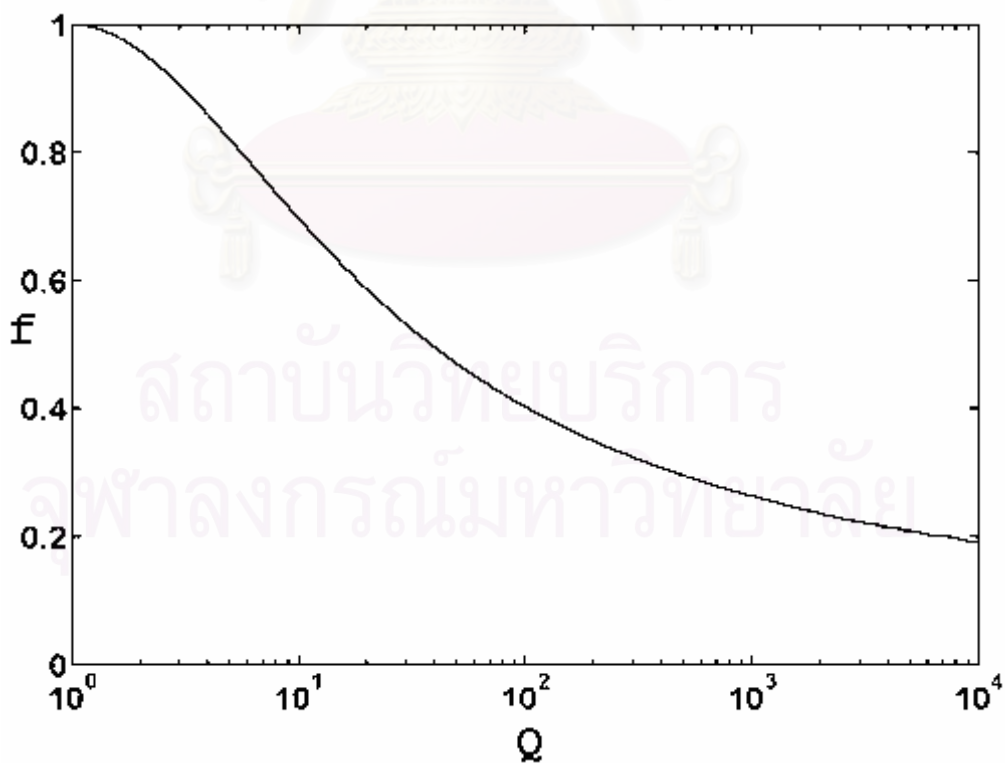
$$Q = \left(\frac{\ln(0.5 - \alpha)}{\ln(0.5 + \alpha)} \right) \quad (3.31)$$

เมื่อ

$$-\frac{1}{2} < \alpha < \frac{1}{2} \quad (3.32)$$

- เมื่อ ρ คือ สภาพต้านทานแผ่น (Ω -cm)
 d คือ ความหนาของชั้นอิพิแทกซี (cm)
 R คือ ความต้านทานของชั้นอิพิแทกซี (Ω)
 α คือ ค่าคงตัวที่ทำให้สมการที่ (3.30), (3.31) เป็นจริง

จะได้กราฟความสัมพันธ์ Q กับ f ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Q กับ f [24]

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) เป็นไปตามความสัมพันธ์

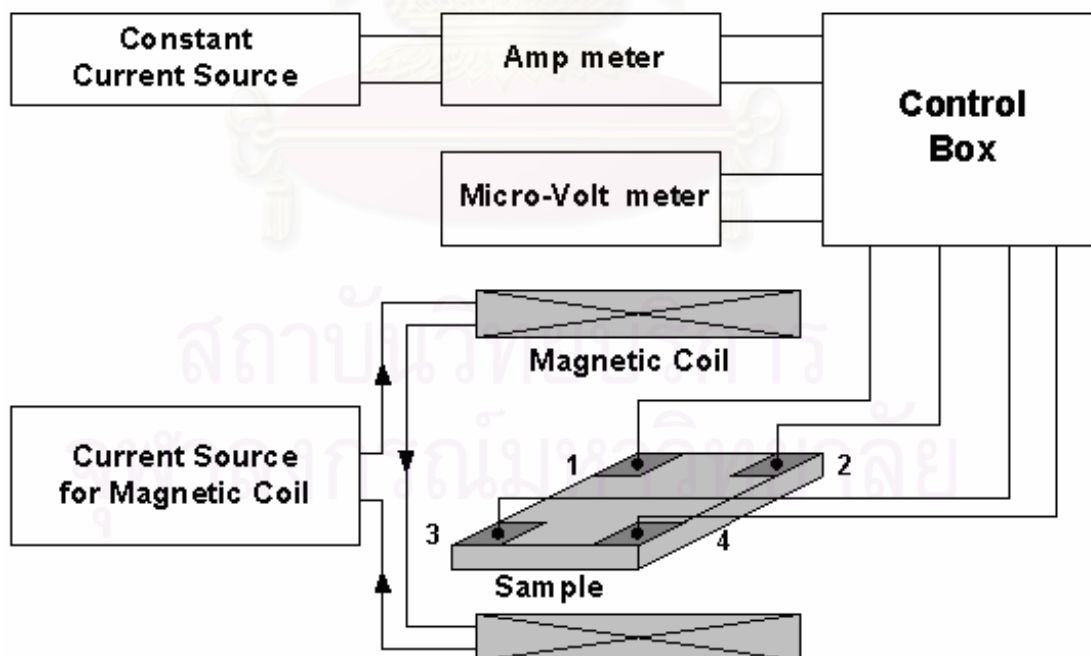
$$\text{Hall coefficient} \quad R_H = \frac{d}{B} \left[\frac{R_{13,24} + R_{24,13}}{2} \right] \quad (3.33)$$

$$\text{Hall mobility} \quad \mu_H = \left[\frac{R_H}{\rho} \right] \quad (3.34)$$

$$\text{Hall carrier concentration} \quad n_H = \frac{1}{eR_H} \quad (3.35)$$

3.6 โครงสร้างของระบบวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธี van der Pauw

โครงสร้างของระบบวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ถูกแสดงดังรูปที่ 3.16 ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนสำคัญดังนี้



รูปที่ 3.16 โครงสร้างของระบบวัดด้วยวิธี van der Pauw

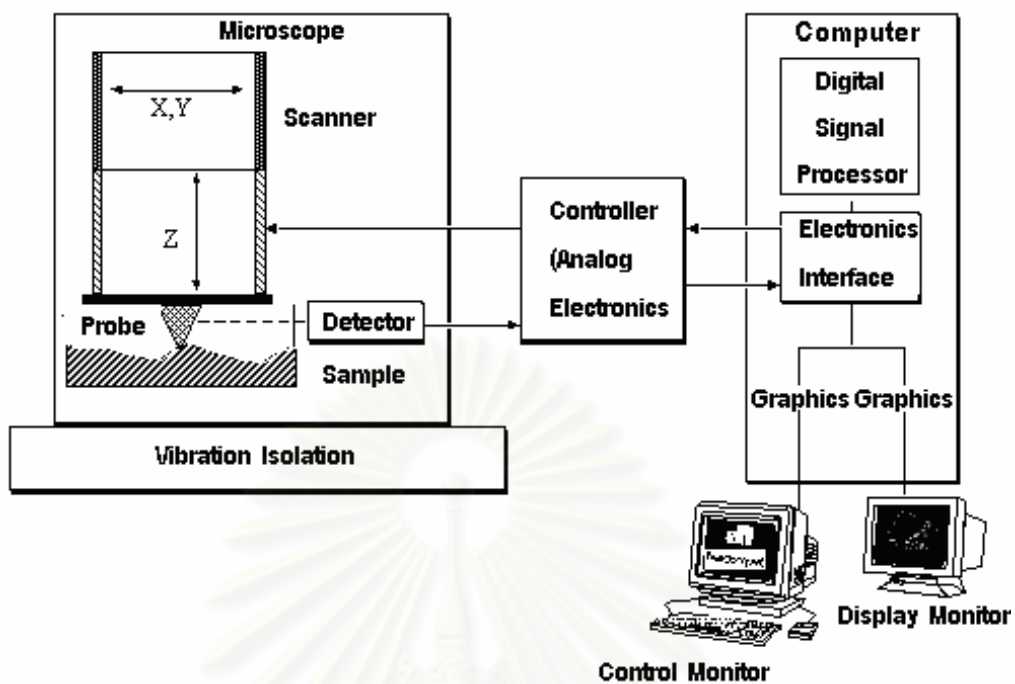
1. ชุดกำเนิดสนามแม่เหล็ก (magnetic Coil) สามารถควบคุมความเข้มของสนามแม่เหล็กด้วยกระแสไฟตรง ปรับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กได้ระหว่าง 0-3,000 Gauss มีจ่านใส่ชิ้นงาน และ probe ปรับตำแหน่งได้อิสระ 4 เข็มสำหรับกดลงบนขั้วต่อไฟฟ้าของชิ้นงาน
2. กล่องควบคุม (control box) ภายในมีแหล่งจ่ายกระแสคงที่ (constant current) สูงสุด 1 mA มีปุ่มปรับสวิตช์ควบคุมการฉีดกระแส และวัดแรงดันไปสู่อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ บนชิ้นงาน
3. แหล่งจ่ายไฟตรง (DC power supply) 2 ตัว ตัวหนึ่งจ่ายศักย์ไฟฟ้า 9 โวลต์ให้กับกล่องควบคุมและอีกตัวหนึ่งจ่ายศักย์ไฟฟ้า 0-40 โวลต์ให้กับชุดกำเนิดสนามแม่เหล็ก
4. Amp meter ใช้วัด constant current
5. Micro-volt meter ใช้วัด แรงดันที่ตกคร่อมชิ้นงาน เมื่อมีการฉีดกระแสให้กับชิ้นงาน

3.7 เทคนิค Atomic Force Microscopy (AFM) (เรียบเรียงจาก จตุพร วุฒิกนกกาญจน์ [26])

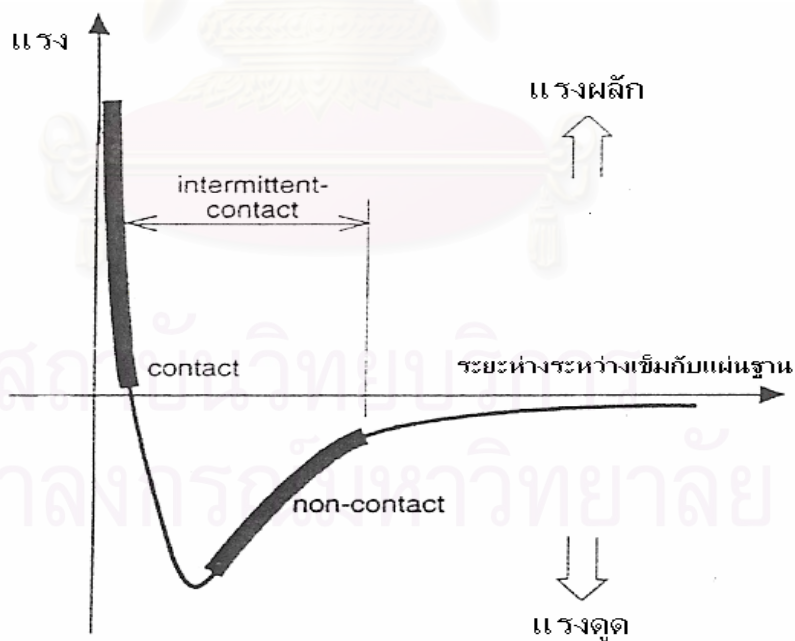
AFM เป็นเทคนิคหนึ่งในกลุ่ม Scanning Probe Microscopy (SPM) [15] ซึ่งเป็นกลุ่มเทคนิคที่สามารถใช้ในการศึกษาสภาพผิวของวัสดุประเภทต่าง ๆ ได้ หลักการพื้นฐานคือ ใช้เข็มตรวจวัดขนาดเล็กที่ทำจากซิลิคอนไนไตรด์ (silicon nitride, Si_3N_4) เคลื่อนที่กราด (scan) ไปทั่วบริเวณต่างๆ ของผิววัสดุ โดยมีเพียโซอิเล็กทริกสแกนเนอร์ (piezoelectric scanner) เป็นตัวควบคุม สภาพผิวของวัสดุที่สูง-ต่ำแตกต่างกันจะส่งผลให้ตัวคานที่มีเข็มเกาะติดอยู่เกิดการโค้งงอ (bending) โดยปริมาณการโค้งงอนี้จะถูกตรวจวัดได้โดยโฟโตดีเทคเตอร์ (photodetector) ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ภาพที่ได้จะสอดคล้องตามสภาพพื้นผิวในแต่ละบริเวณที่ทำการตรวจสอบ

สาเหตุที่ทำให้คานที่มีเข็มเกาะอยู่เกิดการโค้งงอคือ แรงกระทำระหว่างอะตอม ซึ่งอาจจะ เป็นแรงดึงดูดหรือแรงผลักก็ได้ขึ้นอยู่กับระยะระหว่างเข็มปลายแหลมกับพื้นผิว ดังแสดงใน Force curve ในรูปที่ 3.18

เทคนิค AFM สามารถแบ่งออกได้หลายวิธีตามลักษณะการเก็บข้อมูล ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป อย่างไรก็ตามไม่ว่าจะเป็นการใช้ AFM ในวิธีใดก็ตาม แรงกระทำที่เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพพื้นผิว (topography) ของแผ่นฐาน



รูปที่ 3.17 องค์ประกอบหลักของเครื่องมือ Scanning Probe Microscope [26]

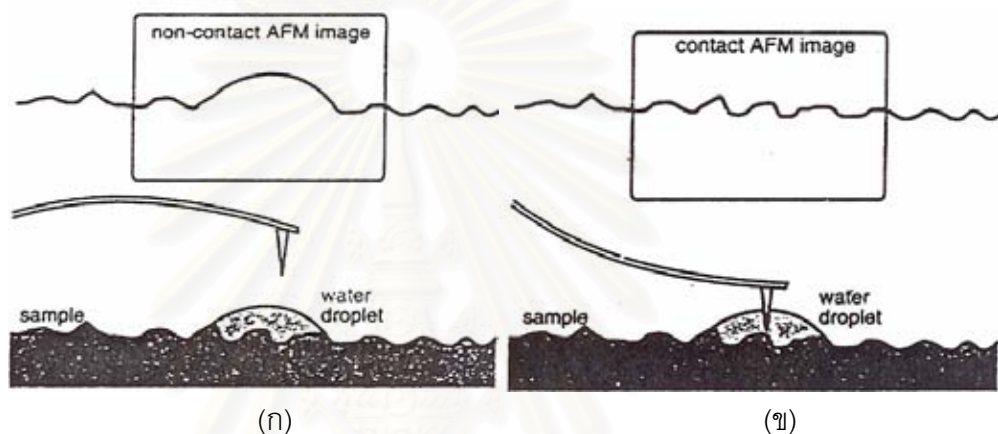


รูปที่ 3.18 ลักษณะของแรงกระทำระหว่างอะตอมที่เกิดขึ้นในระยะห่างวัตถุต่าง ๆ กัน [26]

3.7.1 ลักษณะในการเก็บข้อมูล

เทคนิค AFM จะสามารถใช้เก็บข้อมูลได้ 4 ลักษณะ (mode) ที่สำคัญคือ

3.7.1.1 **Contact mode** เป็นการศึกษาสภาพผิวชิ้นงานโดยการขยับให้เข็มไทดิล (slide) ไปบนผิวงานซึ่งจะทำให้มีแรงผลักรู้สึกขึ้น เนื่องจากว่าเข็มกับผิวงานจะอยู่ใกล้กันมาก (ประมาณ 1-2 Angstrom) ซึ่งแรงผลักรู้สึกนี้จะเปลี่ยนไปตามสภาพผิว (ดูรูปที่ 3.19 (ข)) ซึ่งจะทำให้มีการโก่งงอ (deflection) ของคานยื่น (cantilever) ที่มีเข็มยึดเกาะอยู่ที่ปลาย โดยปริมาณการโก่งงอจะเปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับความสูง-ต่ำของผิวงาน



รูปที่ 3.19 การเคลื่อนที่ของเข็มปลายแหลมไปบนผิวงาน ในเทคนิคแบบ Non-contact mode (ก) และ Contact mode (ข) [26]

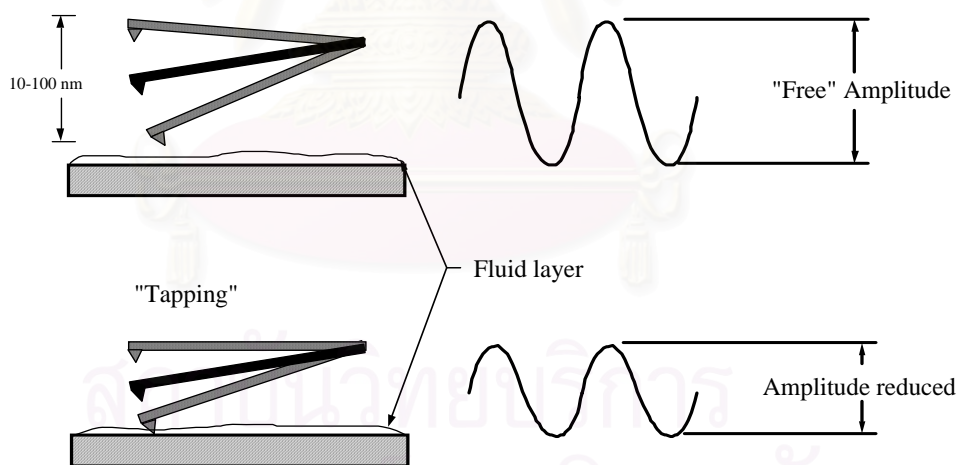
อย่างไรก็ตาม เทคนิคแบบ Contact mode นี้จะมีข้อเสียคือ ในการที่จะลากให้เข็มตรวจวัดเคลื่อนที่ไทดิลเข้าไปยังบริเวณต่าง ๆ บนผิวงาน อาจจะทำให้พื้นผิววัสดุที่กำลังศึกษาต่างไปจากสภาพเดิมที่แท้จริง หรือ อาจเกิดความเสียหายขึ้นแก่ผิวงานได้ยกตัวอย่างเช่น ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติซึ่งมีอากาศและความชื้นในอากาศ อาจจะทำให้เกิดหยดน้ำหรือสิ่งสกปรกบนผิวงาน ซึ่งเมื่อเข็มวัดเคลื่อนที่ไปสัมผัสที่มีชั้นบาง ๆ ของหยดน้ำและสิ่งสกปรกดังกล่าว จะทำให้มีแรงดึงไฟฟ้าสถิตและแรงดึงผิวดึงให้ตัวคานที่มีเข็มยึดอยู่ที่ปลายเคลื่อนที่ลงมาสัมผัสกับชั้นดังกล่าวทำให้แรงระหว่างเข็มกับผิวงานที่เกิดขึ้นโดยรวมเปลี่ยนแปลงไปนอกจากนี้ ยังอาจทำให้ผิวงานถูกทำลาย เช่น เกิดการฉีกขาดจากการลากเข็มไปบนผิวงาน

3.7.1.2 **Non-Contact mode** เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวข้างต้น จึงได้มีการพัฒนาเทคนิค Non-Contact mode ขึ้นมา โดยในที่นี้ ตัวเข็มปลายแหลมจะถูกยกขึ้นมาให้มีระยะห่างเหนือผิวงานสูงมากขึ้นคือประมาณ 10-100 angstrom จึงไม่มีปัญหาเรื่องการทำลายโครงสร้างผิวงาน โดยในกรณีนี้ แรงกระทำระหว่างตัวคานที่มีเข็มปลายแหลมยึดเกาะอยู่กับผิวงานจะเป็น

ลักษณะแรงดึงดูด (รูปที่ 3.18) ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามภาพทางของสภาพผิวเช่นเดียวกัน (รูปที่ 3.19 (ก))

อย่างไรก็ตาม วิธีนี้มีข้อจำกัดเกี่ยวกับความละเอียดของภาพที่เกิดขึ้น นั่นคือ แรงดึงดูดประเภทแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ที่เกิดขึ้นในกรณีนี้จะเป็นแรงที่อ่อนกว่าเมื่อเทียบกับแรงผลักรวมที่เกิดขึ้นในกรณีของ Contact mode ดังนั้นการตรวจสอบอาจจะไว (sensitive) ต่อสิ่งแปลกปลอมที่อยู่บนผิวงาน เช่น หยดน้ำที่เกาะอยู่บนผิว

3.7.1.3 Tapping mode เทคนิค Tapping mode เป็นเทคนิคที่รวมเอาลักษณะของการวัดทั้งในแบบของ Contact mode และ Non-Contact mode เข้าด้วยกัน กล่าวคือ ยังคงให้มีการสัมผัสกันระหว่างเข็มกับผิวงานในระยะที่ใกล้กันมาก เหมือนกับกรณีของ Contact mode เพื่อให้เกิดภาพที่ชัดเจน ในขณะเดียวกัน ก็ยังมีการสั่นหรือขยับเข็มปลายแหลมให้เคลื่อนที่ขึ้นลงไปพร้อม ๆ กับการเคลื่อนที่สแกนไปยังบริเวณต่าง ๆ บนผิวงาน ดังนั้น จึงเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาการลากไถลเข็มปลายแหลม ซึ่งจะทำให้เกิดการทำลายสภาพของผิวงานได้ ดังที่เคยเป็นปัญหาใน Contact mode



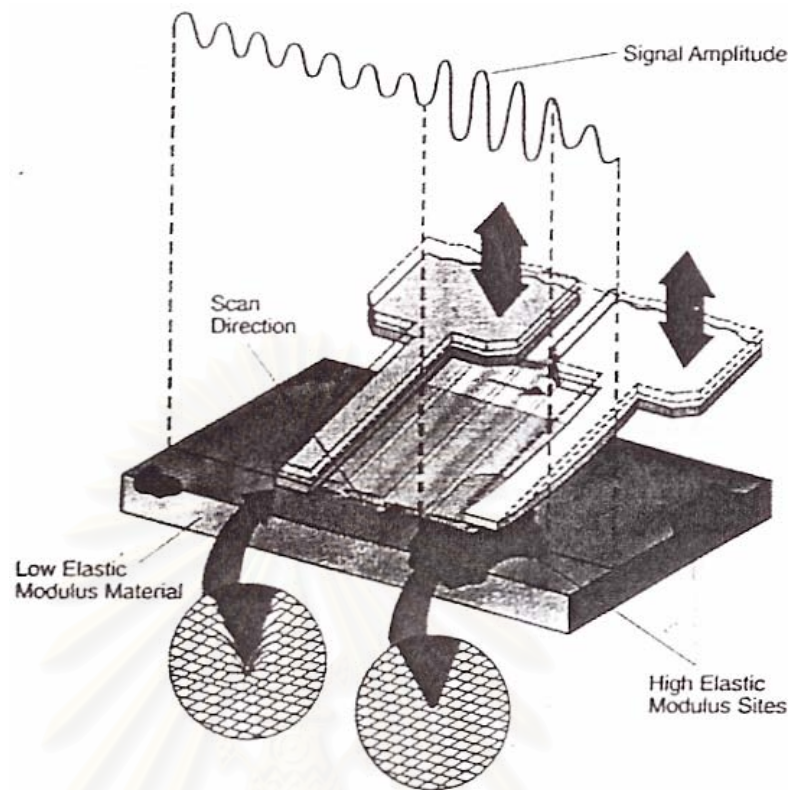
รูปที่ 3.20 ลักษณะการสั่น (oscillation) คานที่มีเข็มติดอยู่ [26]

รูปที่ 3.20 ด้านบนแสดงการสั่นของคานในสภาวะอิสระหรือตอนเริ่มต้นที่ยังไม่เกิดการสัมผัสและขยับเคลื่อนที่ไปบนผิวงานจะเห็นได้ว่าแอมพลิจูดจะยังสูงอยู่เมื่อเทียบกับแอมพลิจูดที่เกิดจากการสั่นของคานเมื่อมีการแตะสัมผัส (tapping) ลงบนผิวงานเนื่องจากว่าในการสัมผัสกันนั้นจะมีการสูญเสียพลังงานของการสั่นทำให้แอมพลิจูดสั่น (oscillation amplitude) ลดลง ซึ่งค่าที่

ลดลงนี้จะใช้เป็นตัววัดและบอกลักษณะของสภาพพื้นผิวที่มีความสูงต่ำแตกต่างกันไป ยกตัวอย่าง เช่น เมื่อเข็มตรวจวัดเคลื่อนที่ผ่านบริเวณผิวงานที่มีความนูนสูงขึ้นมา ตัวคานก็จะมีพื้นที่หรือแอมพลิจูดในการสั่นลดลง ในทางตรงกันข้าม เมื่อเข็มปลายแหลมเคลื่อนที่ผ่านบริเวณผิวที่มีการยุบตัวลงหรือมีความลึกลงไป ตัวคานก็จะมีพื้นที่ในการสั่นเพิ่มขึ้น และมีแอมพลิจูดสูงขึ้น (เข้าใจแอมพลิจูดสูงสุดในสภาพที่ยังไม่มีการทำการสแกน) แอมพลิจูดของการสั่นที่เปลี่ยนแปลงไปก็จะถูกวัดโดยแอมพลิจูดดีเทคเตอร์ (amplitude detector) แล้วส่งผลเข้าไปยังตัวควบคุม ซึ่งจะทำการวัดสัญญาณพร้อมทั้งปรับระยะระหว่างเข็มกับผิวงาน เพื่อรักษาให้ค่าแอมพลิจูดของการสั่นให้คงที่ต่อไป จนกว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดของการสั่นตามสภาพพื้นผิวในบริเวณถัดไป

3.7.1.4 Force Modulation mode สำหรับพื้นผิวของวัสดุที่มีองค์ประกอบหลายเฟส เช่น โพลีเมอร์คอมโพสิต (polymer composite) และโพลีเมอร์ผสม (polymer blends) พบว่า เทคนิค AFM ในวิธีแบบ Force Modulation mode จะเป็นที่ยอมรับใช้มาก โดยเทคนิคนี้จะเป็นการวัดและสร้างภาพของพื้นผิวชิ้นงานที่มีความแตกต่างของความแข็งเกร็ง (stiffness) ในแต่ละเฟสสูง โดยในกรณีนี้ตัวเข็มจะสแกนไปในลักษณะที่มีการสั่นในแนวตั้งฉากกับผิววัสดุด้วยแอมพลิจูดเล็กน้อย แต่จะมีความเร็วในการสั่นที่สูงกว่าการเคลื่อนที่สแกนของเข็ม และเมื่อตัวเข็มถูกนำเข้ามาแตะสัมผัสกับผิววัสดุก็จะเกิดแรงต่อต้านจากผิวของวัสดุที่เกิดจากการสั่นและทำให้ตัวคานงอ และถ้าหากว่าเราให้แรงที่ทำให้ตัวคานสั่งคงที่ พื้นผิวบริเวณที่แข็งกว่าจะทำให้เกิดการต่อต้านต่อการสั่นในแนวตั้งของตัวคานมากกว่า และจึงทำให้ตัวคานงอมากกว่า ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดที่เกิดจากการโก่งงอ (deflection) ของตัวคานจึงนำมาใช้วัดเปรียบเทียบความแข็งที่บริเวณต่างๆ ของผิวงาน

หลักการของวิธี Tapping Mode กับ Force Modulation mode จะคล้าย ๆ กัน ตรงที่มีการสั่นของตัวเข็มในแนวตั้งพร้อม ๆ กับมีการสแกนไปบนผิวชิ้นงาน อย่างไรก็ตามทั้ง 2 เทคนิค จะมีความแตกต่างกันตรงที่ ในกรณีของ Force Modulation mode นั้น จะมีการสั่นด้วยความเร็วสูงกว่า (สูงกว่าความเร็วในการสแกน) และการวัดแอมพลิจูดที่เกิดจากการบิดงอของคาน จะเป็นการวัดเนื่องจากผลของแรงต้านของการสั่น เมื่อมีการสัมผัสของเข็มกับผิวงาน ในขณะที่ Tapping mode จะเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของการสั่นของคานที่เปลี่ยนแปลง (ลดลง) เนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานไปเมื่อมีการสัมผัสผิวงานที่มีระดับความสูงต่ำแตกต่างกัน



รูปที่ 3.21 หลักการทำงานของ AFM ในแบบ Force Modulation [26]

รูปที่ 3.21 จะเห็นว่าเมื่อตัวเข็มวัดที่กำลังเคลื่อนที่กวาดไปบนผิวของวัสดุ จากทางด้านซ้าย ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความแข็งสูงกว่า จะทำให้ขนาดของแอมพลิจูดที่เกิดขึ้นจากการโค้งของคานสูง กว่า ดังนั้นภาพที่เกิดขึ้นจึงเกิดเป็นเฟสคอนทราสต์ (phase contrast) แปรไปตามความแข็งของผิว วัสดุที่บริเวณต่าง ๆ

3.8 เทคนิค Transmission Electron Microscopy (TEM) (เรียบเรียงจาก ชัญชนา ธนชยานนท์ และคณะ [27])

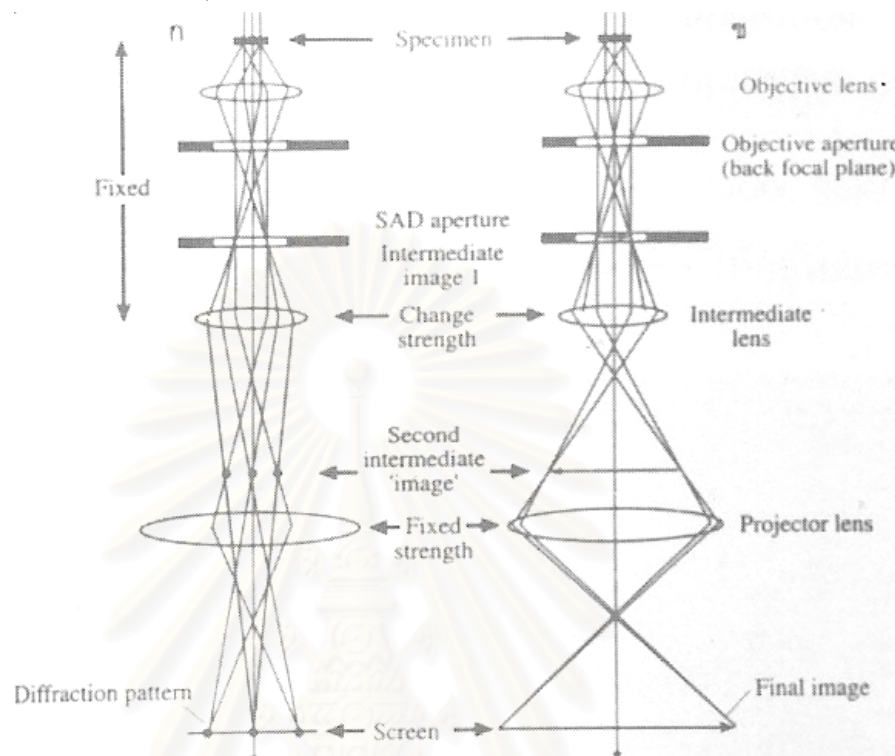
เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและโครงสร้างผลึกของวัสดุ โดยยิง ลำอิเล็กตรอนผ่านชิ้นงานซึ่งได้รับการเตรียมให้มีลักษณะบาง แล้วศึกษาอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่าน ชิ้นงานหรือเลี้ยวเบนจากระนาบต่าง ๆ ในชิ้นงาน

3.8.1 ข้อมูลที่ได้จากเทคนิค TEM

เทคนิค TEM จะให้ข้อมูลภาพใน 2 ลักษณะ ได้แก่

1. ภาพขยาย (image) ซึ่งให้รายละเอียดของโครงสร้างจุลภาคในช่วงกำลังขยายตั้งแต่ 10,000 ถึง 1,000,000 เท่า

2. รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ซึ่งให้รายละเอียดโครงสร้างการจัดเรียงตัวของอะตอมในวัสดุ



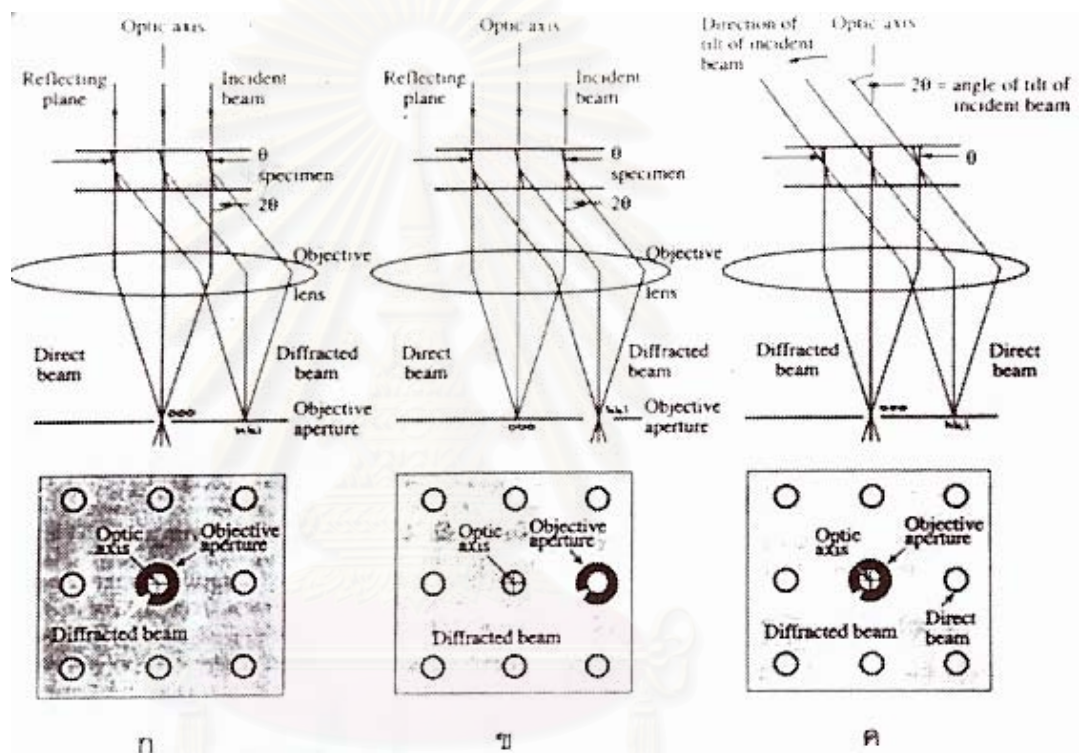
รูปที่ 3.22 ลักษณะการเกิด (ก) รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) และ (ข) ภาพขยาย (image) [27]

รูปที่ 3.22 แสดงลักษณะการเกิดภาพทั้ง 2 ชนิด จากภาพที่ได้ ผู้ใช้จะสามารถแปลข้อมูลที่ได้ได้อย่างกว้างขวางเช่น หากชิ้นงานมีข้อบกพร่องในโครงสร้าง (structural defects) ข้อมูลที่ได้จาก TEM ทั้งภาพขยายและรูปแบบการเลี้ยวเบนจะแสดงตำแหน่งและลักษณะการเกิดข้อบกพร่องดังกล่าวให้เห็นอย่างชัดเจน

นอกจากการถ่ายภาพแล้ว กล้อง TEM สามารถใช้ร่วมกับเทคนิคสเปกโตรสโคปี (spectroscopy) อื่น ๆ เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ/หรือ Electron Energy Loss Spectrometry (EELS) เทคนิคเหล่านี้สามารถใช้ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ ซึ่งจะให้ข้อมูลเสริมที่สำคัญในหลายกรณีการถ่ายภาพ TEM ขึ้นอยู่กับกลไกสำคัญ 2 ลักษณะ ได้แก่

1. กลไกเฟสคอนทราสต์ที่มีกำลังแยกแยะสูง (high-resolution phase contrast mechanism) ที่ใช้ในการถ่ายภาพที่มีกำลังแยกแยะน้อยกว่า 10 Å

2. กลไกดิฟแฟรกชันคอนทราสต์ (diffraction contrast mechanism) ที่ใช้ในการถ่ายภาพที่มีกำลังแยกแยะสูงกว่า 10 Å แต่ไม่ว่าจะเป็นการถ่ายภาพโดยใช้กลไกแบบใด ผู้ใช้ TEM จำเป็นต้องเริ่มการทำงานจากรูปแบบการเลี้ยวเบน แล้วใส่แอฟเพอร์เจอร์ วัตถุประสงค์ (objective aperture) รอบ ๆ จุดเลี้ยวเบน (diffraction spot) ที่ต้องการศึกษา ทั้งนี้กลไกหลักที่ใช้กันโดยทั่วไปคือกลไกดิฟแฟรกชันคอนทราสต์ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป



รูปที่ 3.23 การเกิด (ก) ภาพโปรตีฟิลด์ (bright field image) (ข) ภาพดาร์คฟิลด์ (dark field image) ที่ไม่ชัด (ค) ภาพดาร์คฟิลด์ที่ชัด [27]

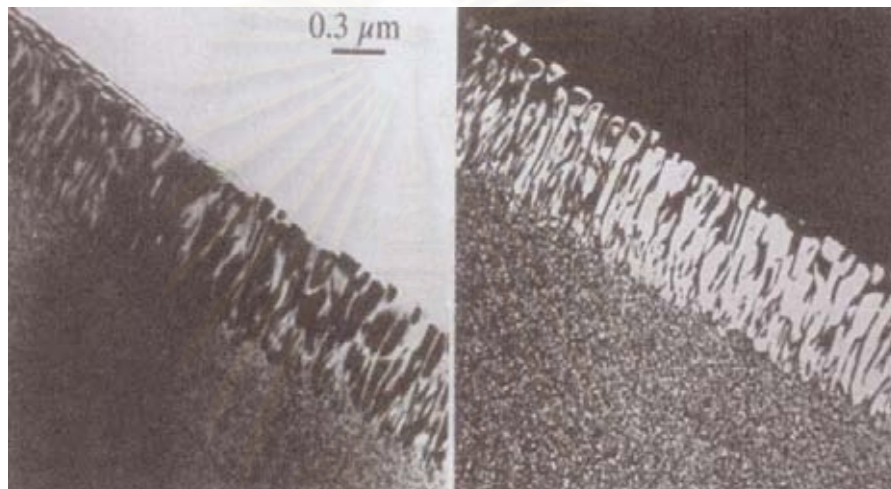
3.8.2 ความรู้พื้นฐานในการใช้งาน TEM

การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน (electron diffraction) ใน TEM เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนตกกระทบบระนาบหนึ่ง ๆ ในแผ่นชิ้นงานและเกิดการเลี้ยวเบนเป็นมุมเท่า ๆ กัน เมื่อลำอิเล็กตรอนที่เกิดการเลี้ยวเบนจากระนาบหนึ่ง ๆ ผ่านชิ้นงานออกมาก็จะถูกโฟกัสโดยเลนส์วัตถุให้มารวมกันที่จุดดิฟแฟรกชัน การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนใน TEM เป็นไปตามสมการของแบรกก์ (Bragg's equation) ดังนี้

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (3.36)$$

โดยที่ d_{hkl} คือระยะห่างระนาบระนาบ (hkl), θ คือมุมตกกระทบ, λ คือความยาวคลื่น และ n คือเลขจำนวนเต็ม (1,2,3,...) สำหรับภาพดิฟแฟรกชันที่ศึกษากันโดยทั่วไปในกล้อง TEM จะใช้ค่า $n = 1$

ผู้ใช้งานกล้อง TEM สามารถเลือกศึกษารายละเอียดของผลึกในระนาบต่าง ๆ ในชิ้นงานได้โดยการใส่แอฟเพอร์เจอร์วัตถุ หรือ จุด 000 (transmitted spot) ก็จะได้ภาพที่เรียกว่า ภาพไบรตฟิลด์ (bright field image) เช่นรูปที่ 3.23 (ก) และ 3.24 (ก)



รูปที่ 3.24 ตัวอย่างภาพ TEM ชนิด (ก) ไบรตฟิลด์ และ (ข) ดาร์คฟิลด์ [27]

สำหรับการศึกษาจุดดิฟแฟรกชัน hkl อื่น ๆ การเลื่อนแอฟเพอร์เจอร์วัตถุไปหาจุด hkl ที่ไม่ได้อยู่ในแกนออปติก (optic axis) จะทำให้ได้ภาพดาร์คฟิลด์ (dark field image) ที่ไม่คมชัด (เช่นรูปที่ 3.23 (ข)) การถ่ายภาพดาร์คฟิลด์ที่คมชัดจะทำได้โดยการเลื่อนจุด hkl ให้อยู่ในแกนออปติก เช่น รูปที่ 3.23 (ค) และ 3.24 (ข) เป็นต้น

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

การศึกษาโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งมีการฝัง QDs นั้น ส่วนใหญ่เป็นการวัดคุณสมบัติ photovoltaic โดยเฉพาะค่าประสิทธิภาพ (efficiency, η) เป็นหลัก [3] แต่ยังขาดการศึกษาด้านคุณสมบัติพื้นฐาน โดยเฉพาะความสัมพันธ์ระหว่างความคล่องตัวของพาหะและความเข้มข้นของพาหะ การทดลองในบทนี้จึงไปเสริมในข้อมูลที่ขาดหายไปซึ่งมีความสำคัญในการศึกษาการเคลื่อนที่ของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์

เนื้อหาในบทนี้ประกอบไปด้วย โครงสร้างที่ใช้ในการทดลอง, เงื่อนไขการปลูกผลึก, ขั้นตอนการสร้างชิ้นงานและผลการวัดความคล่องตัวและความเข้มข้นของพาหะ โดยมีเทคนิค TEM และ AFM ที่ใช้ในการยืนยันขนาดและลักษณะทางกายภาพของ QDs

4.1 การทดลองและผลการทดลอง

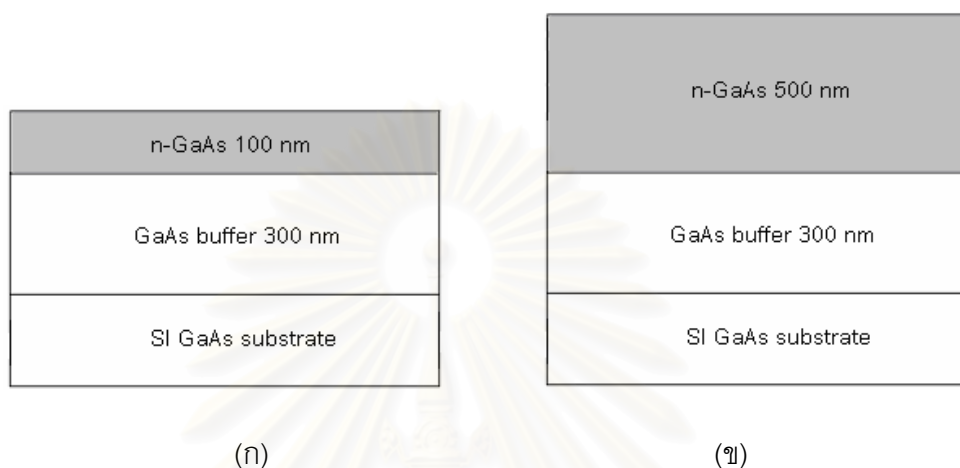
การทดลองในวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นในการศึกษาผลของการฝัง InAs QDs เข้าไปในชั้น GaAs โดยการปลูกโครงสร้างที่ใกล้เคียงกับโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้าง QDs ฝังอยู่ [3] ซึ่งมีเพียงการศึกษาค่าประสิทธิภาพเพียงอย่างเดียว หลังจากนั้นนำโครงสร้างดังกล่าวมาวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยใช้วิธี van der Pauw โครงสร้างในการทดลองได้แก่ โครงสร้างฟิล์มบาง n-GaAs ชนิด bulk และโครงสร้างฟิล์มบาง n-GaAs ที่มี InAs QDs ฝังอยู่

โครงสร้างที่กล่าวถึงทั้งหมด ทำการปลูกโดยใช้เครื่องปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุลภายใต้สภาวะบรรยากาศของอาร์เซนิกที่ความดัน 5×10^{-6} torr เริ่มต้นโดยใช้แผ่นฐาน GaAs ชนิด Semi-Insulator หลังจากที่ทำ oxide desorption ที่อุณหภูมิ 600°C เพื่อขจัด oxide ออกจากผิวหน้า ทำการปลูกชั้นบัฟเฟอร์ undoped-GaAs ที่อุณหภูมิ 580°C เพื่อทำให้ผิวหน้าของชิ้นงานเรียบในระดับอะตอม โดยอัตราเร็วในการปลูก GaAs เท่ากับ 0.6 ML/s คงที่ตลอด ความหนาของชั้นบัฟเฟอร์คือ 300 nm หลังจากนั้นทำการปลูกโครงสร้างที่ได้ออกแบบไว้บนบัฟเฟอร์ดังกล่าว โดยทุกโครงสร้างที่มี QDs ฝังอยู่นั้นเป็นชนิด InAs โดยใช้อัตราเร็วในการปลูก InAs เท่ากับ 0.01 ML/s ที่อุณหภูมิ 500°C

4.1.1 โครงสร้างฟิล์มบาง n-GaAs

หลังจากที่ปลูกชั้นบัฟเฟอร์ชนิด GaAs แล้วก็ทำการปลูกชั้นฟิล์มบาง GaAs ชนิด n (n-GaAs) ที่อุณหภูมิเท่าเดิม (580°C) ด้วยความหนา 100 nm ดังรูปที่ 4.1 (ก) หรือความหนา

500 nm ดังรูปที่ 4.1 (ข) โครงสร้างทั้งสองถูกสร้างขึ้นเพื่อวัดความคล่องตัวของพาหะเทียบกับความเข้มข้นของพาหะ การปลูกชั้น n-GaAs ให้มีความหนาต่างกันนั้นเพื่อเป็นการเปรียบเทียบความคล่องตัวของพาหะในชั้นฟิล์มบางที่มีความหนาต่างกัน



รูปที่ 4.1 โครงสร้างชั้นฟิล์มบาง n-GaAs หนา (ก) 100 nm และ (ข) 500 nm

4.1.1.1 เงื่อนไขการปลูกโครงสร้าง

เงื่อนไขการปลูกของแต่ละชั้นงานที่แตกต่างกันคือปริมาณสารเจือและความหนาของชั้นฟิล์มบาง n-GaAs ซึ่งปริมาณสารเจือถูกกำหนดโดยอุณหภูมิของเป้า Si โดยรายละเอียดถูกแสดงในตารางที่ 4.1

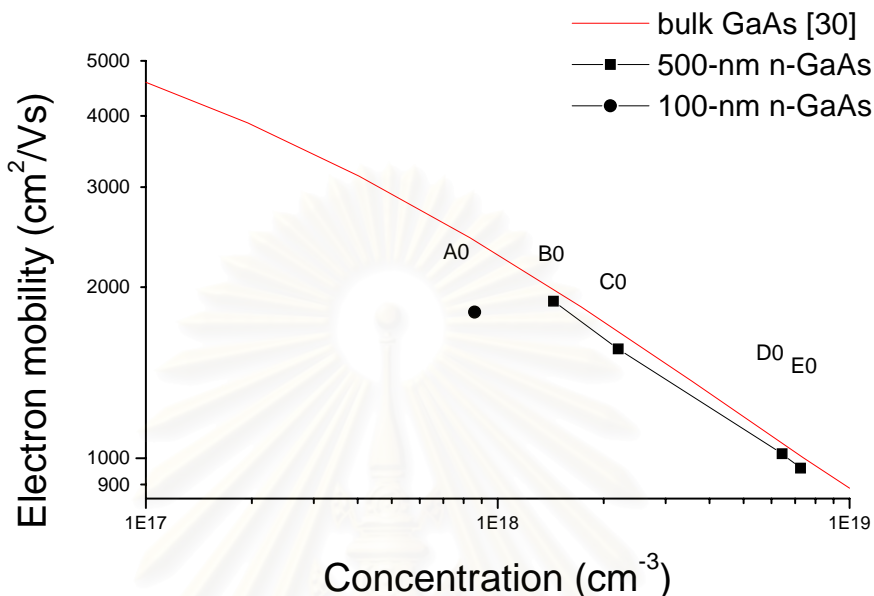
ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการปลูกโครงสร้างของชั้นงาน A0, B0, C0, D0 และ E0

ชั้นงาน	ชั้น n-GaAs (nm)	อุณหภูมิของเป้า Si ($^{\circ}\text{C}$)
A0	100	960
B0	500	950
C0	500	975
D0	500	1,000
E0	500	1,030

4.1.1.2 ผลการวัดความคล่องตัวและความเข้มข้นของอิเล็กตรอน

การปลูกผลึกตามโครงสร้างด้านบนใช้วิธีปลูกผลึกด้วยลำไมเลกุล กระบวนการต่อไปเป็นการทำขั้วโลหะชนิด ohmic โดยใช้ AuGe/Ni ต่อจากนั้น เป็นการวัดความคล่องตัวและความ

เข้มข้นของอิเล็กตรอนด้วยวิธี van der Pauw ผลการวัดได้ถูกเปรียบเทียบกับ GaAs ชนิด bulk ดังแสดงในรูปที่ 4.2

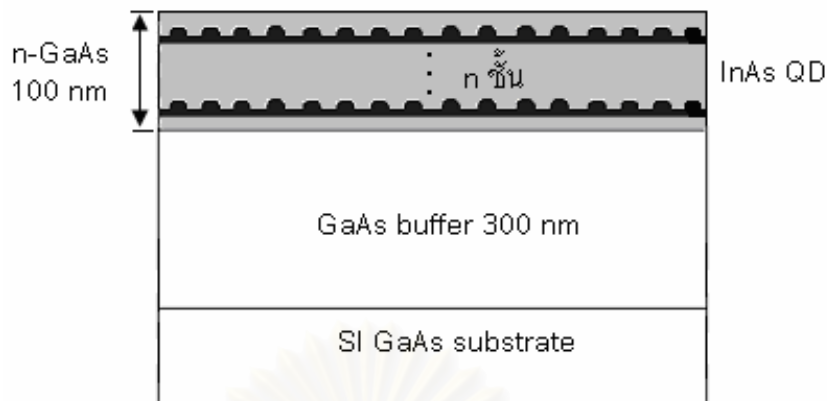


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความคล่องตัวกับความเข้มข้นของอิเล็กตรอน ในชั้น n-GaAs ที่ความหนาและระดับการเจือสารต่างกันเมื่อเทียบกับ bulk GaAs

จากรูปจะเห็นได้ว่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนของโครงสร้าง A0 ซึ่งเป็นชั้น n-GaAs หนา 100 nm มีความแตกต่างจากของ bulk GaAs มากกว่าโครงสร้าง B0 ซึ่งเป็นชั้น n-GaAs หนา 500 nm ซึ่งเกิดเนื่องจากอิเล็กตรอนในชั้น n-GaAs หนา 100 nm เกิดการกระเจิงกับผิวหน้าและขอบ (surface/boundary scattering) มากกว่าอิเล็กตรอนในชั้น n-GaAs หนา 500 nm และเมื่อเปลี่ยนคุณสมบัติของเบ้า Si ความเข้มข้นของอิเล็กตรอนก็เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มคุณสมบัติของเบ้า Si เป็นการเพิ่มปริมาณสารเจือ หัวข้อต่อไปเป็นการศึกษาผลของการฝัง InAs QDs เข้าไปในชั้น n-GaAs หนา 100 nm และ 500 nm ที่มีต่อความคล่องตัวและความเข้มข้นของอิเล็กตรอน

4.1.2 โครงสร้างชั้นฟิล์มบาง n-GaAs หนา 100 nm ที่มี InAs QDs ฝังอยู่

หลังจากที่ปลูกชั้นบัฟเฟอร์แล้ว ก็ทำการปลูกชั้นฟิล์มบาง n-GaAs ด้วยความหนา 100 nm ระหว่างทำการปลูกชั้นฟิล์มบาง n-GaAs ได้ทำการฝัง InAs QDs เข้าไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งแต่ละชั้นงานมีจำนวนชั้น InAs QDs ต่างกัน



รูปที่ 4.3 โครงสร้างชั้นฟิล์มบาง n-GaAs หนา 100 nm ที่ฝัง InAs QDs จำนวน n ชั้น โดย n มีค่าเท่ากับ 0, 1 และ 2 ชั้น

4.1.2.1 เงื่อนไขการปลูกโครงสร้าง

โครงสร้างที่ใช้ในการทดสอบแตกต่างกันที่จำนวนชั้นของ InAs QDs ที่ถูกฝังเข้าไปในชั้น n-GaAs โดยจำนวนชั้นของ InAs QDs ที่ฝังเข้าไปในชั้น n-GaAs มี 1 ชั้นในชิ้นงาน A1 และ 2 ชั้นในชิ้นงาน A2 ดังรายละเอียดในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 รายละเอียดเชิงโครงสร้างของชิ้นงาน A0, A1 และ A2

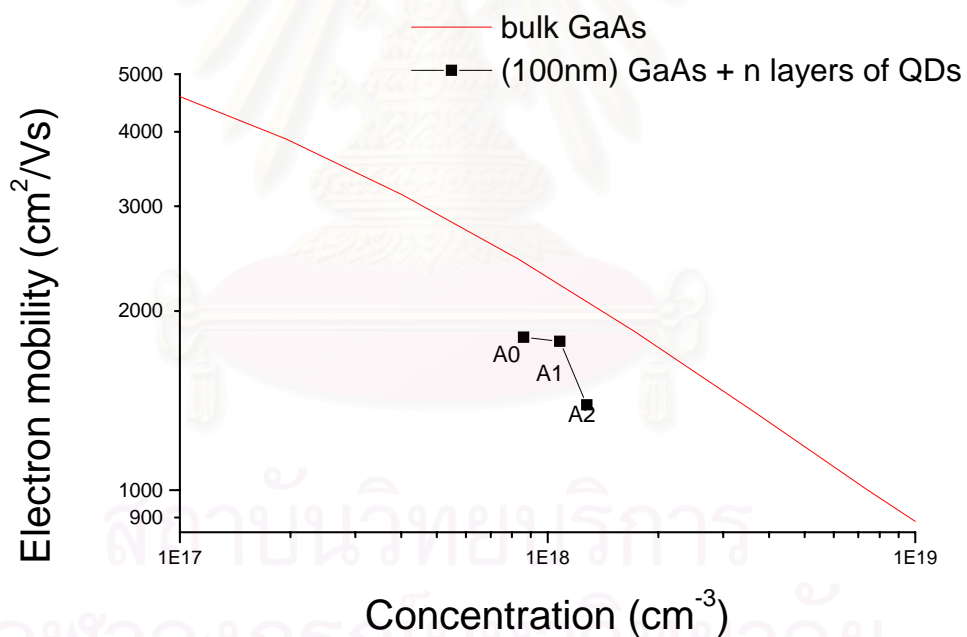
ชิ้นงาน	จำนวนชั้น InAs QDs (n)	ภาพตัดขวางโดยคร่าวของโครงสร้างที่ปลูก
A0	0	<p>n-GaAs 100 nm 300 nm GaAs Buffer SI GaAs</p>
A1	1	<p>n-GaAs 100 nm n-GaAs 50 nm InAs QD n-GaAs 50 nm 300 nm GaAs Buffer SI GaAs</p>
A2	2	<p>n-GaAs 100 nm InAs QD 300 nm GaAs Buffer SI GaAs</p>

การเจือสารของชิ้นงานใช้อุณหภูมิของเบ้า Si เท่ากับ 960°C ทุกชิ้นงานและความหนาโดยรวมของชั้น n-GaAs คือ 100 nm เท่ากันทุกชิ้นงาน การฝังชั้น InAs QDs จะฝังในตำแหน่งที่ระยะห่างของชั้น InAs QDs มีค่าเท่ากัน โดยในชิ้นงาน A1 ซึ่งฝัง InAs QDs จำนวน 1 ชั้น มี

ขั้นตอนการปลูกดังนี้ หลังจากปลูกชั้นบัฟเฟอร์ GaAs ทำการปลูกชั้นฟิล์ม n-GaAs หนา 50 nm แล้วทำการปลูก InAs QDs ต่อจากนั้นปลูก n-GaAs จนได้ความหนาโดยรวมของชั้นฟิล์มบาง n-GaAs เท่ากับ 100 nm และในชั้นงาน A2 ซึ่งฝัง InAs QDs จำนวน 2 ชั้นมีขั้นตอนการปลูกดังนี้ หลังจากปลูกชั้นบัฟเฟอร์ GaAs ทำการปลูกชั้นฟิล์ม n-GaAs หนา 33 nm แล้วทำการปลูก InAs QDs ต่อจากนั้นปลูก n-GaAs ต่อจนได้ความหนารวมของชั้นฟิล์ม n-GaAs เท่า 66 nm แล้วทำการปลูก InAs QDs จากนั้นปลูก n-GaAs ต่อจนได้ความหนารวมของชั้นฟิล์ม n-GaAs เท่า 100 nm

4.1.2.2 ผลการวัดความคล่องตัวและความเข้มข้นของอิเล็กตรอน

ผลการวัดความคล่องตัวและความเข้มข้นของอิเล็กตรอนของชั้นงาน A0, A1 และ A2 ข้างต้นโดยวิธี van der Pauw เป็นดังแสดงในรูปที่ 4.4



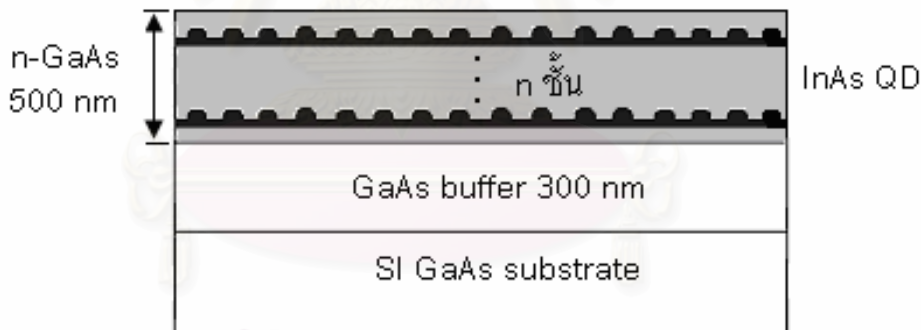
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความคล่องตัวและความเข้มข้นของอิเล็กตรอนของชั้น n-GaAs หนา 100 nm ที่ฝังชั้น InAs QDs n ชั้นโดย n มีค่าเท่ากับ 0 (ชั้นงาน A0), 1 (A1) และ 2 (A2) เมื่อเทียบกับ bulk GaAs

จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนชั้นของ InAs QDs เพิ่มขึ้น ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น ซึ่งการที่ความเข้มข้นของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นเกิดจากการเพิ่มขึ้นของปริมาตรรวมจากการฝังชั้น InAs QDs เข้าไปในชั้นของ GaAs ทั้งนี้เนื่องจาก InAs ($E_g=0.36$ eV) มีอิเล็กตรอนอิสระมากกว่า GaAs ($E_g=1.43$ eV) ที่อุณหภูมิเดียวกัน จึงทำให้ความเข้มข้นของอิเล็กตรอนรวมเพิ่มขึ้น สำหรับค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนที่ลดลงจะได้อธิบายต่อไปในหัวข้อ 4.2

หัวข้อต่อไปเป็นผลการศึกษาความคล่องตัวของอิเล็กตรอนของโครงสร้างชั้นฟิล์มบาง n-GaAs หนา 500 nm ซึ่งมีการฝัง InAs QDs

4.1.3 โครงสร้างชั้นฟิล์มบาง n-GaAs หนา 500 nm ที่มี InAs QDs ฝังอยู่

หลังจากปลูกชั้นบัฟเฟอร์ GaAs แล้วทำการปลูกชั้นฟิล์ม n-GaAs หนา 500 nm ระหว่างปลูกชั้น n-GaAs ทำการฝัง InAs QDs เข้าไป ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งแต่ละชั้นงานมีจำนวนชั้น InAs QDs ต่างกัน



รูปที่ 4.5 โครงสร้างชั้นฟิล์มบาง n-GaAs หนา 500 nm ที่ฝัง InAs QDs จำนวน n ชั้น

4.1.3.1 เงื่อนไขการปลูกโครงสร้าง

เงื่อนไขที่แตกต่างกันในการปลูกแต่ละชั้นงานคือปริมาณสารเจือและจำนวนชั้นของ InAs QDs ปริมาณสารเจือจะถูกกำหนดโดยอุณหภูมิของเบ้า Si ซึ่งถูกกำหนดไว้ที่ 950°C หรือ 975°C จำนวนชั้นของ InAs QDs ที่ถูกฝังเข้าไปในชั้น GaAs มีจำนวนแตกต่างกันดังรายละเอียดในตารางที่ 4.3

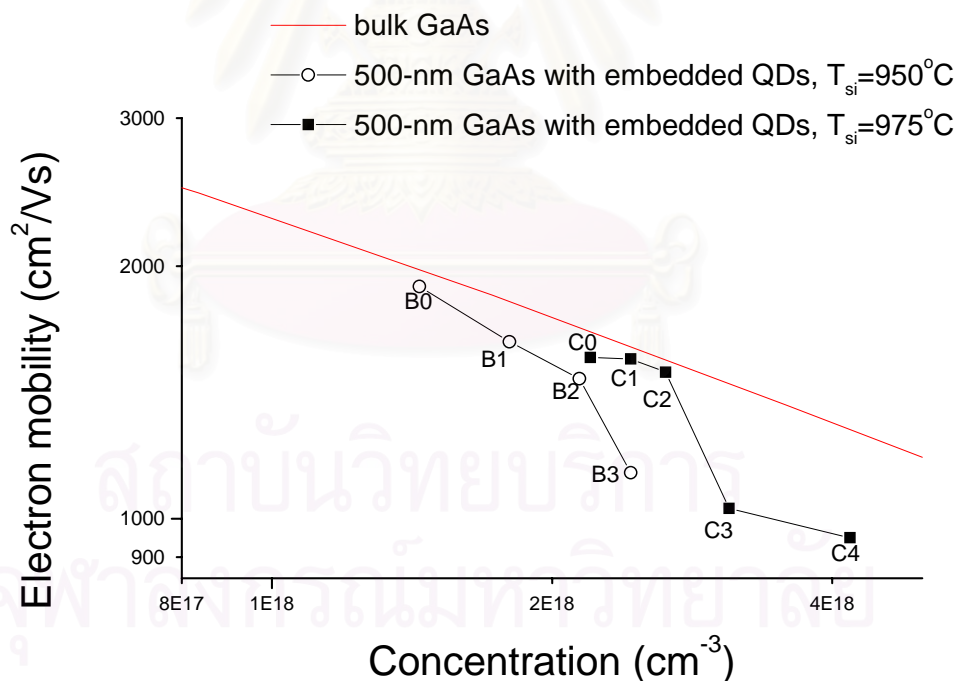
ตารางที่ 4.3 รายละเอียดเชิงโครงสร้างของชั้นงาน B0, B1, B2, B3, C0, C1, C2, C3 และ C4

ชั้นงาน	จำนวนชั้น InAs QDs (n)	T_{Si} ($^{\circ}C$)	ภาพตัดขวางโดยคร่าวๆของโครงสร้างที่ปลูก
B0	0	950	
B1	1	950	
B2	3	950	
B3	5	950	
C0	0	975	
C1	1	975	
C2	2	975	
C3	3	975	
C4	9	975	

โครงสร้างที่ปลูกแม้จะมี InAs QDs หลายชั้นถูกฝังเข้าไปในชั้น n-GaAs แต่ความหนาโดยรวมของชั้น n-GaAs คือ 500 nm ทุกชั้นงาน และตำแหน่งในการปลูกชั้น QDs คือตำแหน่งที่มีระยะห่างของชั้น QDs เท่ากับ $\frac{500}{n+1}$ nm ทุกชั้นงานเช่น ชั้นงาน B2 ซึ่งฝัง InAs QDs จำนวน 3 ชั้น มีขั้นตอนการปลูกคือหลังจากปลูกชั้นบัฟเฟอร์ ทำการปลูกชั้น n-GaAs หนา 125 nm แล้วทำการปลูก InAs QDs จากนั้นปลูก n-GaAs ต่อจนได้ความหนาโดยรวมของชั้นฟิล์ม n-GaAs เท่ากับ 250 nm ต่อจากนั้นทำการปลูก InAs QDs แล้วปลูก n-GaAs ต่อจนได้ความหนาโดยรวมของชั้น n-GaAs เท่ากับ 375 nm แล้วจึงปลูก InAs QDs แล้วทำการปลูก n-GaAs จนได้ความหนาโดยรวมของชั้น n-GaAs เท่ากับ 500 nm

4.1.3.2 ผลการวัดความคล่องตัวและความเข้มข้นของอิเล็กตรอน

ผลการวัดความคล่องตัวและความเข้มข้นของอิเล็กตรอนของชั้นงาน B0, B1, B2, B3, C0, C1, C2, C3 และ C4 ถูกแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความคล่องตัวกับความเข้มข้นของอิเล็กตรอนของชั้น n-GaAs หนา 500 nm ที่มีและไม่มีชั้น InAs QDs ฝังอยู่

จากรูปที่ 4.6 เมื่อจำนวนชั้นของ InAs QDs เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของอิเล็กตรอนมี

ที่มาจากปริมาตรที่เพิ่มขึ้นของชั้น InAs เช่นเดียวกับชุดของชั้นงาน A ในหัวข้อที่แล้ว สำหรับการลดลงของความคล่องตัวของอิเล็กตรอนจะอธิบายโดยละเอียดในหัวข้อ 4.2

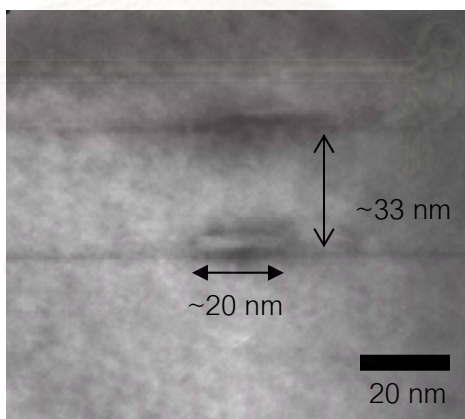
เพื่อยืนยันความหนาและลักษณะทางกายภาพ (ความสูง, เส้นผ่านศูนย์กลาง) ของ InAs QDs จึงนำชั้นงานมาตรวจสอบโดยเทคนิค TEM และ AFM ซึ่งผลการตรวจสอบจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

4.1.4 โครงสร้างทางกายภาพของ InAs QDs

4.1.4.1 การตรวจสอบความหนาโดยเทคนิค TEM

เทคนิคการถ่ายภาพ TEM สามารถยืนยันความถูกต้องของโครงสร้างได้ เพื่อให้มั่นใจได้ว่าโครงสร้างของชั้นงาน A, B และ C ข้างต้นมีความหนาดังต้องการจึงนำชั้นงาน A2 ซึ่งเป็นโครงสร้างชั้นฟิล์มบาง n-GaAs หนา 100 nm ซึ่งมีชั้น InAs QDs จำนวน 2 ชั้นฝังอยู่ภายในมาตรวจสอบ การออกแบบโครงสร้าง A2 มีความประสงค์ที่จะให้ชั้น QDs มีระยะห่างกัน 33 nm โดยประมาณ

การเตรียมชั้นงานมีขั้นตอนหลักคือ 1) ตัดชั้นงานให้มีขนาด $2 \times 2 \text{ mm}^2$ จำนวน 2 ชิ้น 2) ประกอบชั้นงานทั้งสองโดยใช้กาว M-Bond610 ซึ่งเป็นกาวสำหรับติดชั้นงานโดยเฉพาะ 3) ขัดชั้นงานให้มีความบาง 100-200 nm 4) ถ่ายภาพตัดขวางโดยใช้เครื่อง TEM ภาพ TEM ของชั้นงาน A2 ถูกแสดงในรูปที่ 4.7

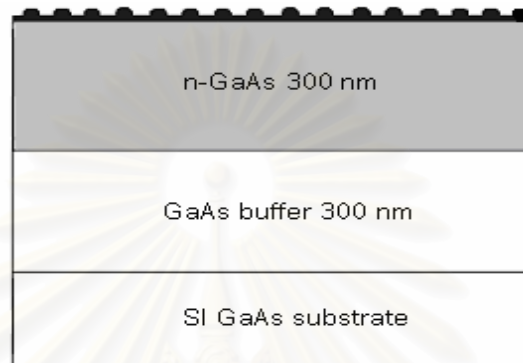


รูปที่ 4.7 ภาพ TEM ของชั้นงาน A2 ซึ่งเป็นชั้นงานที่มีโครงสร้างเป็นชั้นฟิล์มบาง n-GaAs หนา 100 nm ซึ่งมีชั้น InAs QDs จำนวน 2 ชั้นฝังอยู่ภายใน

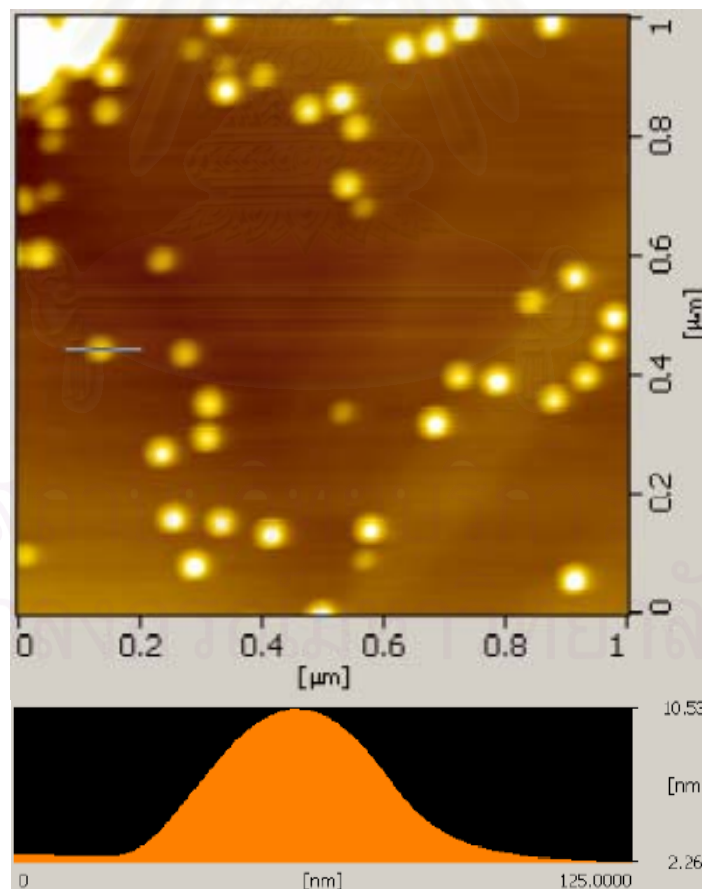
ภาพ TEM ข้างต้นสามารถยืนยันได้ว่าชั้นงาน A2 มีโครงสร้างตามทีออกแบบจริงคือระยะห่างระหว่างชั้น QDs $\approx \frac{100}{3} \text{ nm}$ และเมื่อชั้นของ QDs อยู่ใกล้กันจะมีการเรียงตัวตามแนวตั้ง (vertical alignment) ซึ่งมีสาเหตุมาจากแรงเครียด (strain) ของชั้น QDs ที่อยู่ต่ำกว่า

4.1.4.2 ผลการตรวจสอบผิวหน้าโดยเทคนิค AFM

เพื่อยืนยันลักษณะทางกายภาพของ QDs จึงทำการปลูกชั้นงานสำหรับการวัดลักษณะทางกายภาพของ QDs โดยเฉพาะ ชั้นงานดังกล่าวถูกออกแบบให้มี InAs QDs อยู่บนผิวหน้าดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งผลการวัดโดยเทคนิค AFM ถูกแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 โครงสร้างชั้นงานสำหรับวัดสภาพผิวหน้าโดยเครื่อง AFM



รูปที่ 4.9 ภาพ AFM ของชั้นงานที่ปลูกตามโครงสร้างรูปที่ 4.8

ภาพ AFM รูปที่ 4.9 ซึ่งให้เห็นว่า InAs QDs มีความหนาแน่นโดยเฉลี่ย $\approx \frac{45}{1 \times 10^{-8}} \text{cm}^{-2}$ ($4.5 \times 10^9 \text{cm}^{-2}$) และ QDs มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงเฉลี่ยเท่ากับ 50 nm และ 8 nm ตามลำดับ

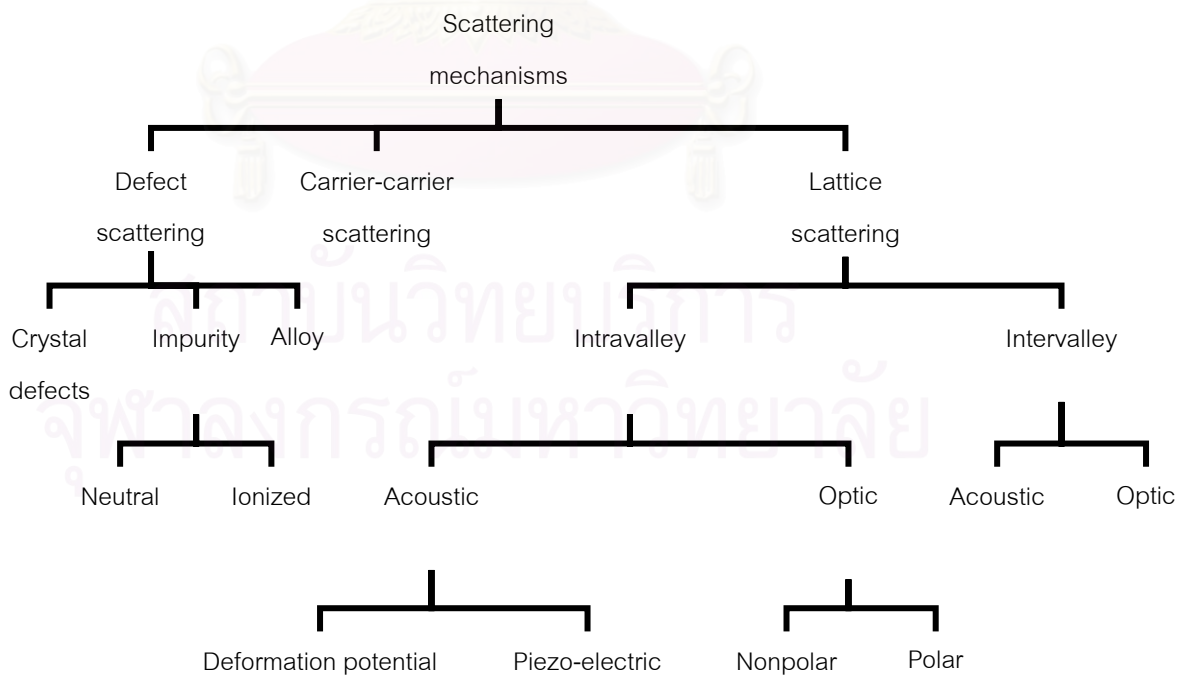
หัวข้อต่อไปเป็นการอธิบายถึงสาเหตุว่าเหตุใดความคล่องตัวของพาหะจึงลดลงเมื่อมีการฝัง InAs QDs เข้าไปในชั้น GaAs

4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการทดลองในหัวข้อ 4.1 ต่างขึ้นไปในแนวทางเดียวกันว่า เมื่อความเข้มข้นของพาหะเพิ่มขึ้นแล้วความคล่องตัวของพาหะลดลง ซึ่งแม้จะเป็นแนวโน้มที่ปรากฏในสารกึ่งตัวนำชนิด bulk ทุกชนิดก็ตาม แต่ผลจากการฝัง QDs เข้าไปใน bulk แนวโน้มดังกล่าวทำให้ความคล่องตัวของพาหะลดลงมากกว่าปกติ เนื่องมาจากมีกลไกการกระเจิงโดย QDs เพิ่มเติมขึ้นมา รายละเอียดในหัวข้อนี้กล่าวถึงกลไกการกระเจิงพาหะใน GaAs (bulk) และ GaAs ที่มี InAs QDs ฝังอยู่ข้างใน

4.2.1 กลไกการกระเจิงของพาหะใน GaAs [24]

กลไกการกระเจิงพาหะ (scattering mechanisms) ใน GaAs ชนิด bulk เป็นดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งสามารถสรุปกลไกการกระเจิงพาหะที่สำคัญได้ดังนี้



รูปที่ 4.10 ไดอะแกรมแสดงกลไกการกระเจิงพาหะใน GaAs

- 1) กลไกการกระเจิงพาหะเนื่องจาก Ionized impurities ภายในสารกึ่งตัวนำ ถ้ามี donor ที่เป็นไอออนบวกหรือถ้ามี acceptor ที่เป็นไอออนลบ อิเล็กตรอนและโฮลจะได้รับอิทธิพลและถูกกระเจิงด้วยแรงคูลอมบ์จากไอออนเหล่านี้
- 2) กลไกการกระเจิงพาหะเนื่องจาก Neutral impurities เมื่ออิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่เข้าไปใกล้กับอะตอมที่เป็นกลาง ทำให้เกิดการถ่ายทอดโมเมนตัมระหว่างอิเล็กตรอนอิสระและอิเล็กตรอนที่อยู่วงโคจรนอกสุดของอะตอมที่เป็นกลางซึ่งทำให้เกิดการกระเจิงของอิเล็กตรอนขึ้น
- 3) กลไกการกระเจิงพาหะเนื่องจาก acoustic phonons การสั่นแบบ acoustic ของอะตอมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของโครงผลึก การเปลี่ยนแปลงระยะห่างของโครงผลึกส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงช่องว่างพลังงานจากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่ง การกระเจิงของคลื่น de broglie ของอิเล็กตรอนในผลึกอันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของพลังงานศักย์นี้ก่อให้เกิดการชนระหว่างอิเล็กตรอนและ phonons
- 4) กลไกการกระเจิงพาหะเนื่องจาก optical phonon เช่นเดียวกับกรณี acoustic phonon ถ้าคลื่น optical phonon แบบตามยาวเคลื่อนที่เดินทางในผลึก จะทำให้อิทธิพลพลังงานศักย์เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งทำให้อิเล็กตรอนและโฮลถูกกระเจิงด้วยพลังงานศักย์ที่เปลี่ยนแปลงนี้และทำให้เกิดการชนระหว่างอิเล็กตรอนและ phonons เช่นเดียวกับกรณีของ acoustic phonons
- 5) กลไกการกระเจิงพาหะเนื่องจาก crystal defects การเกิดจุดบกพร่องของโครงผลึกทำให้พลังงานศักย์เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นช่วงสั้นๆ ส่งผลให้เกิดกลไกการกระเจิงพาหะขึ้น
- 6) กลไกการกระเจิงระหว่างพาหะกับพาหะ (carrier-carrier scattering) จะมีความสำคัญเมื่อความเข้มข้นพาหะสูง ($n > 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) ซึ่งกลไกดังกล่าวนี้เกิดจากการชนกันระหว่างพาหะกับพาหะ

4.2.2 กลไกการกระเจิงพาหะเมื่อมีการฝัง QDs เข้าไปในชั้น GaAs

ผลการทดลองข้างต้นชี้ให้เห็นว่าการฝัง InAs QDs เข้าไปในชั้น GaAs ส่งผลให้ความสัมพันธ์ระหว่างความคล่องตัวของพาหะกับความเข้มข้นของพาหะต่างไปจากของ GaAs ตามปกติ ซึ่งกลไกการกระเจิงที่กล่าวไปข้างต้นยังไม่เพียงพอในการอธิบายความแตกต่างดังกล่าว ดังนั้นกลไกการกระเจิงพาหะซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป จะช่วยให้เข้าใจกลไกการกระเจิงพาหะของชั้น GaAs ที่มีชั้น InAs QDs ฝังอยู่มากยิ่งขึ้น

เมื่อทรงกลมถูกฝังเข้าไปในชั้นงานจะส่งผลให้ความคล่องตัวของพาหะ (μ) ของชั้นงานลดลง ความคล่องตัวของพาหะที่ลดลงมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนปริมาตรของทรงกลมต่อ

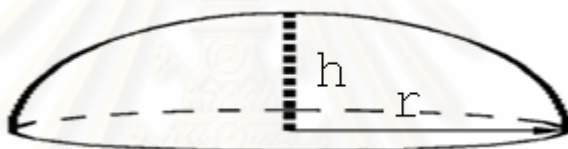
ปริมาณของชิ้นงานทั้งหมด (f) โดยความคล่องตัวของพาหะที่ลดลงแบ่งออกเป็น 2 กรณีดังนี้ [31]

1) ทรงกลมไม่นำไฟฟ้า (nonconducting inclusions) ความคล่องตัวของพาหะลดลงตามความสัมพันธ์

$$\mu_{\text{app}} = \mu \frac{1 - 9f / 4}{1 - 3f / 4} \quad (4.1)$$

2) ทรงกลมนำไฟฟ้าได้ดี (high-conducting inclusions) ความคล่องตัวของพาหะลดลงตามความสัมพันธ์

$$\mu_{\text{app}} = \frac{\mu}{1 + 3f} \quad (4.2)$$



รูปที่ 4.11 เสี้ยวทรงกลมโดย h คือความสูง และ r คือรัศมี

ความสัมพันธ์ข้างต้นเป็นความคล่องตัวของพาหะที่ลดลงเมื่อฝังทรงกลมไม่นำไฟฟ้าและนำไฟฟ้าเข้าไปในชั้น GaAs แต่การทดลองในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการฝัง QDs เข้าไปในชั้น GaAs โดยลักษณะทางกายภาพของ QDs ซึ่งได้จากการวัดโดยเทคนิค AFM ซึ่งให้เห็นว่ามึลักษณะคล้ายเสี้ยวทรงกลมดังแสดงในรูปที่ 4.11 ดังนั้นเพื่อให้สอดคล้องกับการทดลองจึงจำลองโดยสมมติให้ QDs เป็นครึ่งทรงกลมรัศมีเท่ากับ r , ครึ่งทรงกลมรัศมีเท่ากับ h และเสี้ยวทรงกลม แล้วทำการเปรียบเทียบ โดยสามารถประมาณค่า f ตามความสัมพันธ์

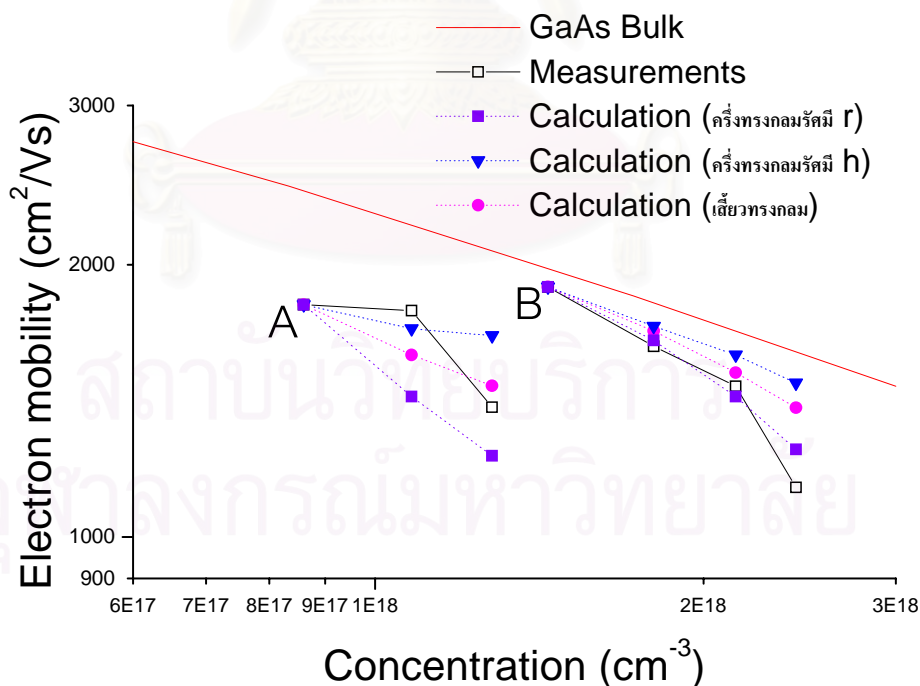
$$f = \frac{(\frac{2}{3} \pi \cdot r^3)}{V_{\text{bulk}}} \cdot D \cdot A \cdot n \quad \text{สำหรับครึ่งทรงกลมรัศมีเท่ากับ } r \quad (4.3)$$

$$f = \frac{(\frac{2}{3} \pi \cdot h^3)}{V_{\text{bulk}}} \cdot D \cdot A \cdot n \quad \text{สำหรับครึ่งทรงกลมรัศมีเท่ากับ } h \quad (4.4)$$

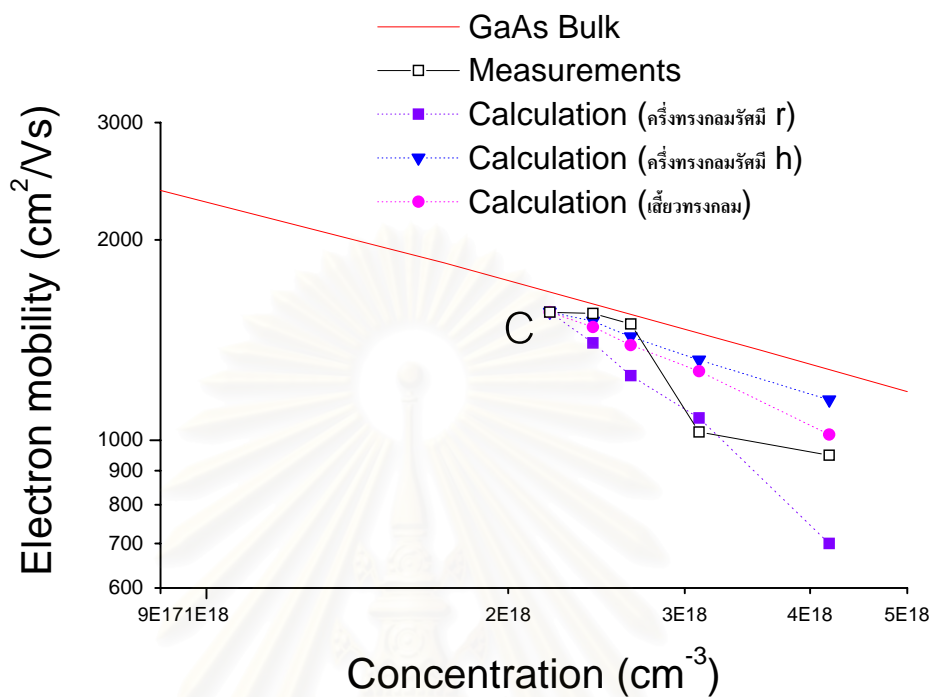
$$f = \frac{\left(\frac{2}{3} \pi \cdot h \cdot r^2\right)}{V_{\text{bulk}}} \cdot D \cdot A \cdot n \quad \text{สำหรับเดี่ยวทรงกลม} \quad (4.5)$$

เมื่อ	r	คือ รัศมีของ QDs (จากภาพ AFM)
	D	คือ ความหนาแน่นของ QDs ต่อหนึ่งชั้น (จากภาพ AFM)
	V_{bulk}	คือ ปริมาตรของชั้น GaAs
	n	คือ จำนวนชั้นของ QDs ในแต่ละชั้นงาน
	A	คือ พื้นที่ของชั้นงาน
	h	คือ ความสูงของ InAs QD

ความคล่องตัว μ เป็นความคล่องตัวของอิเล็กตรอนเริ่มต้นซึ่งหาได้โดยการ fit curve เส้นกราฟผลการทดลองในรูปที่ 4.2 จากนั้นความคล่องตัวของอิเล็กตรอนที่ได้ถูกนำมาเป็นความคล่องตัวของอิเล็กตรอนเริ่มต้นของแต่ละจุดของการจำลอง เนื่องจากรูปที่ 4.2 เป็นกราฟความคล่องตัวของอิเล็กตรอนของชั้น GaAs ซึ่งทำการเจาะสารที่ความเข้มข้นต่างกันจึงเหมาะสำหรับนำมาเป็นค่าเริ่มต้นของการจำลองเพื่อเปรียบเทียบผลของการฝัง InAs QDs เข้าไปในชั้น GaAs



รูปที่ 4.12 ผลการจำลองการลดลงของความคล่องตัวของอิเล็กตรอนเมื่อเทียบกับผลการทดลอง โดยสมมติให้ QDs เป็นครึ่งทรงกลมรัศมีเท่ากับ r , ครึ่งทรงกลมรัศมีเท่ากับ h , และเดี่ยวทรงกลม (ชั้นงาน A และ B)



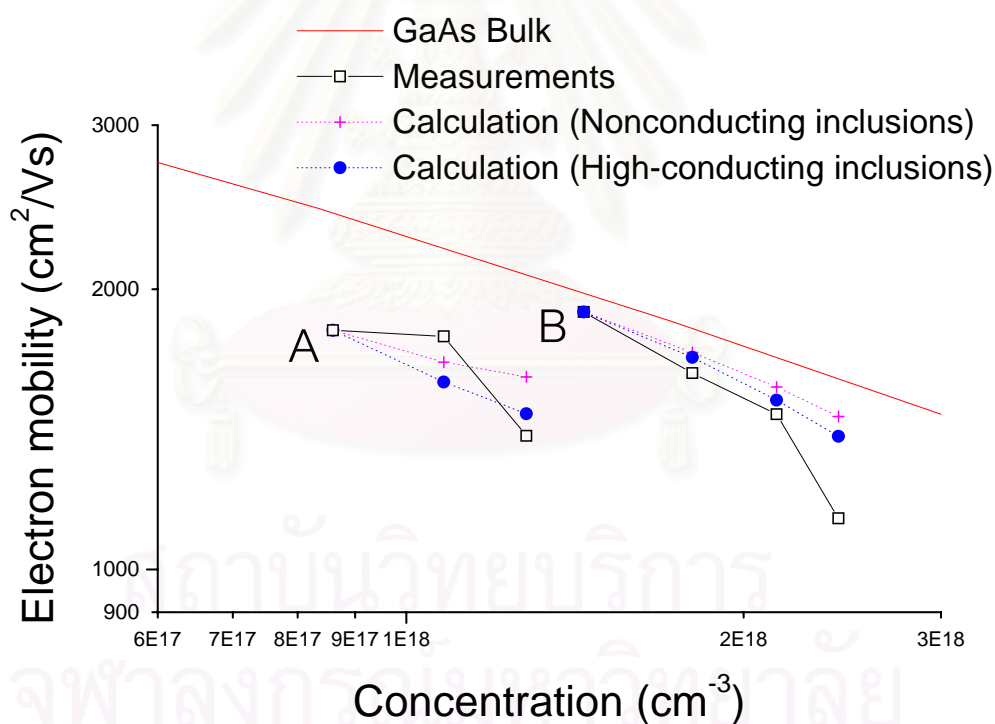
รูปที่ 4.13 ผลการจำลองการลดลงของความคล่องตัวของอิเล็กตรอนเมื่อเทียบกับผลการทดลอง โดยสมมติให้ QDs เป็นครึ่งทรงกลมรัศมีเท่ากับ r , ครึ่งทรงกลมรัศมีเท่ากับ h , และเสี้ยวทรงกลม (ชั้นงาน C)

ตารางที่ 4.4 ค่าตัวแปร V_{bulk} , n , f และ μ

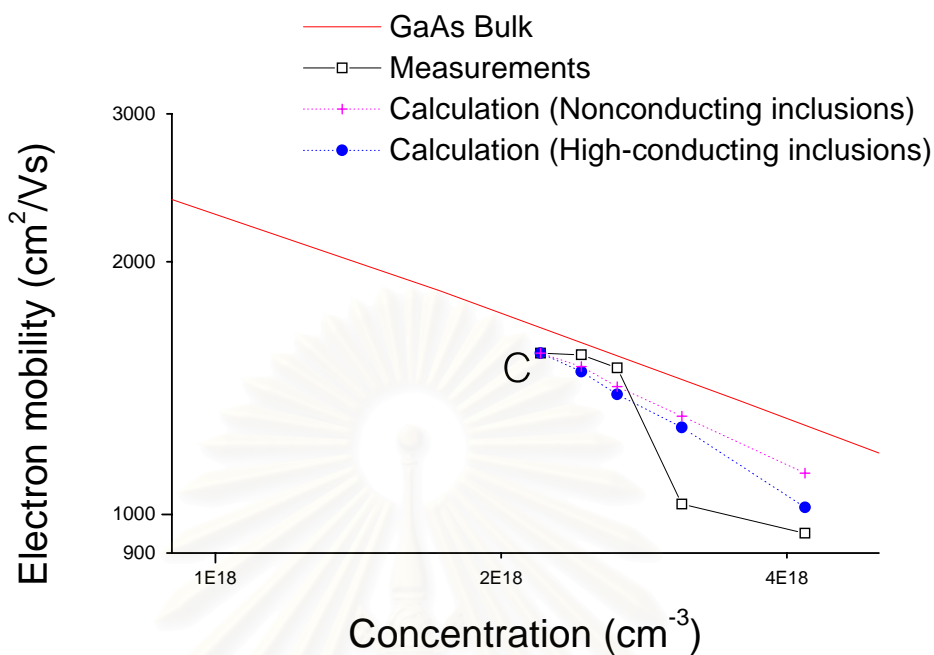
ชั้นงาน	V_{bulk} (m^3)	n	f	μ (cm^2/Vs)
A1	2.50E-12	1	0.0241	1790
A2	2.50E-12	2	0.0482	1700
B1	1.25E-11	1	0.0048	1715
B2	1.25E-11	3	0.0145	1588
B3	1.25E-11	5	0.0241	1486
C1	1.25E-11	1	0.0048	1506
C2	1.25E-11	2	0.0096	1428
C3	1.25E-11	3	0.0145	1320
C4	1.25E-11	9	0.0434	1156

ผลการจำลองการลดลงของความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในกรณีที่เป็นการฝังรูปทรงนำไฟฟ้า โดยสมมติให้ QDs เป็นครึ่งทรงกลมรัศมีเท่ากับ r , ครึ่งทรงกลมรัศมีเท่ากับ h , และเสี้ยวทรงกลม แสดงในรูปที่ 4.12 (ชิ้นงาน A และ B) และ 4.13 (ชิ้นงาน C) จากผลการจำลอง ซึ่งให้เห็นว่าการสมมติให้ QDs มีลักษณะเป็นเสี้ยวทรงกลมมีความใกล้เคียงกับผลการทดลองและความเป็นจริงมากที่สุด ดังนั้นในการจำลองในขั้นต่อไปจึงสมมติให้ QDs มีลักษณะเป็นเสี้ยวทรงกลม ซึ่งตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองถูกแสดงในตารางที่ 4.4

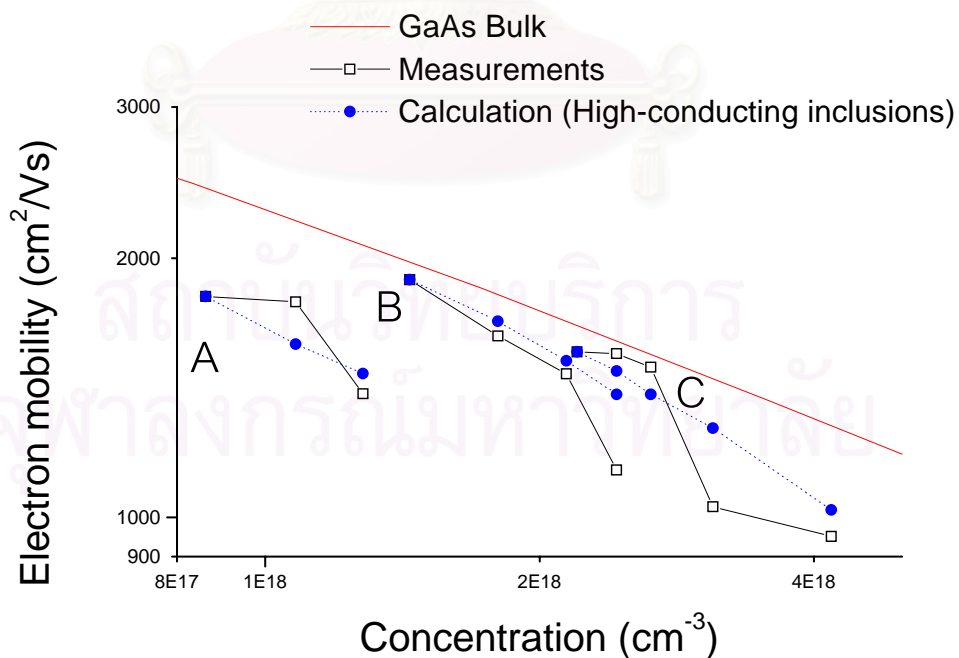
เมื่อนำความสัมพันธ์ (4.1), (4.2) และ (4.5) มาจำลองเพื่อหาความคล่องตัวของอิเล็กตรอนเมื่อมีการฝังเสี้ยวทรงกลมไม่นำไฟฟ้าและนำไฟฟ้าดีเข้าไปในชั้น GaAs แล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลการวัดความคล่องตัวของอิเล็กตรอนจากการทดลอง จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.14 (ชิ้นงาน A และ B) และ 4.15 (ชิ้นงาน C)



รูปที่ 4.14 ผลการจำลองการลดลงของความคล่องตัวของอิเล็กตรอนเมื่อมีการฝังเสี้ยวทรงกลมไม่นำไฟฟ้า (· + ···) และนำไฟฟ้าดี (· ● ···) เข้าไปในชั้น GaAs เทียบกับผลการทดลอง (—□—) สำหรับชิ้นงาน A และ B



รูปที่ 4.15 ผลการจำลองการลดลงของความคล่องตัวของอิเล็กตรอนเมื่อมีการฝังเส้นใยทรงกลมไม่นำไฟฟ้า ($\cdot + \cdot$) และนำไฟฟ้าดี ($\cdot \bullet \cdot$) เข้าไปในชั้น GaAs เทียบกับผลการทดลอง ($-\square-$) สำหรับชิ้นงาน C



รูปที่ 4.16 ผลการจำลองการลดลงของความคล่องตัวของอิเล็กตรอนเมื่อมีการฝังเส้นใยทรงกลมนำไฟฟ้าดีเข้าไปในชั้น GaAs ($\cdot \bullet \cdot$) เทียบกับผลการทดลอง ($-\square-$) สำหรับชิ้นงาน A, B และ C

จากรูปที่ 4.14 และ 4.15 ซึ่งให้เห็นว่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนซึ่งคำนวณโดยอาศัยสมมติฐานว่า มีการฝังเลี้ยวทรงกลมนำไฟฟ้าดีเข้าไปในชั้น GaAs มีค่าสอดคล้องกับผลการทดลองมากกว่า สมมติฐานว่ามีการฝังเลี้ยวทรงกลมไม่นำไฟฟ้าเข้าไปในชั้น GaAs จึงอาจกล่าวได้ว่าการฝัง InAs QDs เข้าไปในชั้น GaAs เปรียบเสมือนการฝังเลี้ยวทรงกลมนำไฟฟ้าเข้าไปในชั้น GaAs สอดคล้องกับความจริงที่ว่า InAs มี E_g ที่แคบกว่า GaAs และสามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่า ณ สภาวะ อุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งผลการจำลองการลดลงของความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในชั้น GaAs ที่ฝัง เลี้ยวทรงกลมนำไฟฟ้าเทียบกับผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.16 สามารถอธิบายแนวโน้ม ความสัมพันธ์ระหว่างความคล่องตัวของอิเล็กตรอนกับความเข้มข้นของอิเล็กตรอนได้ในระดับหนึ่ง แต่ก็ยังมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ 23% ทั้งนี้สาเหตุที่ทำให้การจำลองไม่เท่ากับผลการทดลอง อาจมีสาเหตุมาจากปริมาตรของ QDs ที่ใช้ในการจำลองเป็นปริมาตรซึ่งได้จากการประมาณจาก ข้อมูลทางกายภาพของ QDs โดยเทคนิค AFM ซึ่งอาจคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงอยู่บ้าง

4.2.3 การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของอิเล็กตรอนเมื่อมีการฝัง InAs QDs เข้าไป ในชั้น GaAs

ผลการทดลองข้างต้นชี้ให้เห็นว่าความเข้มข้นของอิเล็กตรอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในขณะที่ ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนมีแนวโน้มลดลงเมื่อจำนวนชั้นของ InAs QDs เพิ่มขึ้น สาเหตุซึ่งทำ ให้ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนลดลงเกิดจากกลไกกระเจิงเนื่องจากการฝัง InAs QDs เข้าไปใน ชั้น GaAs ดังอธิบายข้างต้น ส่วนการเพิ่มความเข้มข้นของอิเล็กตรอนเกิดจากการเพิ่มขึ้นของ ปริมาตรรวมจากการฝังชั้น InAs QDs เข้าไปในชั้นของ GaAs เพื่อสนับสนุนเหตุผลดังกล่าวจึงได้ คำนวณปริมาตรของ InAs QDs ที่เพิ่มขึ้นโดยอาศัยข้อมูลทางกายภาพของ QDs จากภาพ AFM และอาศัยความสัมพันธ์

$$n_{\text{total}} = \frac{(V_{\text{InAs}} \cdot n_{\text{InAs}}) + (V_{\text{GaAs}} \cdot n_{\text{GaAs}})}{(V_{\text{InAs}} + V_{\text{GaAs}})} \quad (4.6)$$

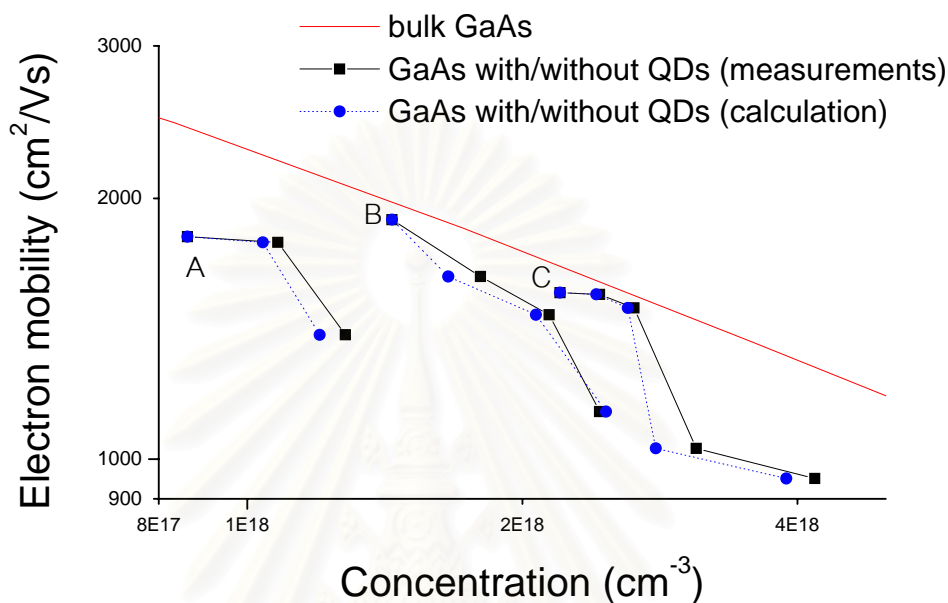
โดย V_{InAs} คือ ปริมาตรของ InAs ที่เพิ่มขึ้น

n_{InAs} คือ electron concentration ของ InAs

V_{GaAs} คือ ปริมาตรของชั้น GaAs

n_{GaAs} คือ Electron concentration ของ GaAs

โดย n_{GaAs} เป็นความเข้มข้นของอิเล็กตรอนของชั้นงานซึ่งไม่มีการฝัง InAs QDs เข้าไปซึ่งการคำนวณในชั้นงานกลุ่ม A, B และ C จะใช้ค่า n_{GaAs} เป็นความเข้มข้นของอิเล็กตรอนของชั้นงาน A0, B0 และ C0 ตามลำดับ



รูปที่ 4.17 ผลการคำนวณการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของอิเล็กตรอนเมื่อมีการฝัง InAs QDs เข้าไปในชั้น GaAs เปรียบเทียบกับผลการทดลอง

ผลการคำนวณการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของอิเล็กตรอนโดยอาศัยความสัมพันธ์ที่ (4.6) แสดงในรูปที่ 4.17 ผลการจำลองชี้ให้เห็นว่าจากการที่ไม่มีการได้ไป QDs จึงทำให้คาดเดาว่าค่า electron concentration ของ InAs QDs น่าจะมีค่าเท่ากับ $1.03 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ซึ่งเป็นค่า intrinsic electron concentration ของ InAs ที่อุณหภูมิห้อง แต่เมื่อนำค่าดังกล่าวมาคำนวณหาค่าความเข้มข้นของอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้น ปรากฏว่าผลที่ได้มีค่าไม่สอดคล้องกับผลการทดลอง โดยการจำลองแบบเบื้องต้นชี้ให้เห็นว่าค่า effective electron concentration ของ InAs QDs ที่แท้จริงมีค่าขึ้นอยู่กับความหนาของชั้น n-GaAs โดยในกรณีของชั้นงานในกลุ่ม A ซึ่ง n-GaAs มีความหนา 100 nm จะสามารถคำนวณค่า effective electron concentration ได้ $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ในขณะที่ค่าที่ได้สำหรับชั้นงานในกลุ่ม B และ C จะได้ค่า $1.95 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ สาเหตุที่ค่าความเข้มข้นของอิเล็กตรอนใน InAs ที่ใช้ในการคำนวณมีค่าสูงกว่า background electron concentration ของ GaAs ถึง 5-15 เท่า อาจเป็นเพราะว่าอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้น n-GaAs ได้เคลื่อนที่เข้ามาอยู่ใน InAs QDs เนื่องจากอาจมองได้ว่าการได้ไป GaAs รอบข้าง ซึ่งมีแถบช่องว่างพลังงานสูงกว่า InAs ส่งผลให้เหมือนกับการ modulation doping ให้กับ InAs นั้นเอง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

โครงสร้างในการทดลองคือชั้น GaAs ที่ถูกโด๊ปด้วย Si และมีชั้น InAs QDs ฝังอยู่ถูกปลูก โดยเทคนิคการปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล การวัดความคล่องตัวและความเข้มข้นของอิเล็กตรอนใน ชั้นดังกล่าวกระทำโดยวิธี van der Pauw ผลการทดลองที่อุณหภูมิห้องชี้ให้เห็นว่า เมื่อจำนวนชั้น ของ InAs QDs ที่ถูกฝังใน GaAs เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนลดลงในขณะที่ ความเข้มข้นของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น ซึ่งสาเหตุที่ทำให้เกิดผลดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของอิเล็กตรอน

การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของอิเล็กตรอนเกิดขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของปริมาตรรวม ปริมาตรที่เพิ่มขึ้นมาจากการปลูก InAs QDs ฝังเข้าไปในชั้นของ GaAs และเนื่องจาก InAs มี พหุอะตอมมากกว่า GaAs ที่อุณหภูมิเดียวกัน จึงทำให้ความเข้มข้นของอิเล็กตรอนรวมเพิ่มขึ้น โดยการจำลองแบบเบื้องต้นชี้ให้เห็นว่าค่า effective electron concentration ของ InAs QDs ที่ แท้จริงมีค่าขึ้นอยู่กับความหนาของชั้น n-GaAs โดยในกรณีของชั้นงานในกลุ่ม A ซึ่ง n-GaAs มีความหนา 100 nm จะสามารถคำนวณค่า effective electron concentration ได้ $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ในขณะที่ ค่าที่ได้สำหรับชั้นงานในกลุ่ม B และ C จะได้ค่า $1.95 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ สาเหตุที่ค่าความ เข้มข้นของอิเล็กตรอนใน InAs ที่ใช้ในการคำนวณมีค่าสูงกว่า background electron concentration ของ GaAs ถึง 5-15 เท่า อาจเป็นเพราะว่าอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้น n-GaAs ได้ เคลื่อนที่เข้ามาอยู่ใน InAs QDs เนื่องจากอาจมองได้ว่าการโด๊ป GaAs รอบข้าง ซึ่งมีแถบช่องว่าง พลังงานสูงกว่า InAs ส่งผลให้เหมือนกับ modulation doping ให้กับ InAs นั้นเอง

5.2 การลดลงของความคล่องตัวของอิเล็กตรอน

ผลการทดลองต่างชี้ไปในแนวทางเดียวกันว่า เมื่อความเข้มข้นของอิเล็กตรอนเพิ่มแล้ว ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนลดลง ซึ่งแม้จะเป็นแนวโน้มในสารกึ่งตัวนำชนิด bulk ทุกชนิดก็ ตามแต่ผลการฝัง QDs เข้าไปใน bulk ซึ่งทำให้ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนลดลงมากกว่าปกติ เนื่องจากมีกลไกการกระเจิงโดย QDs เพิ่มเติมขึ้น ซึ่งผลจากการจำลองการฝังเดี่ยวทรงกลมนำ

ไฟฟ้าเข้าไปในชั้น GaAs มีผลสอดคล้องกับผลการทดลองซึ่งความคล่องตัวของอิเล็กตรอนลดลงตามความสัมพันธ์

$$\mu_{\text{app}} = \frac{\mu}{1 + 3f} \quad (5.1)$$

โดย QDs ที่ปลูกได้สามารถประมาณได้ว่าเป็นเส้นทรงกลม ซึ่งจะทำให้สามารถประมาณค่า f ได้ตามความสัมพันธ์

$$f = \frac{\left(\frac{2}{3} \pi \cdot h \cdot r^2\right)}{V_{\text{bulk}}} \cdot D \cdot A \cdot n \quad (5.2)$$

เมื่อ	r	คือ รัศมีของควอนตัมดอต (จากภาพ AFM)
	D	คือ ความหนาแน่นของควอนตัมดอตต่อหนึ่งชั้น (จากภาพ AFM)
	V_{bulk}	คือ ปริมาตรของชั้น GaAs
	n	คือ จำนวนชั้นของควอนตัมดอตในแต่ละชั้นงาน
	A	คือ พื้นที่ของชั้นงาน
	h	คือ ความสูงของ InAs QD

และจากการจำลองโดยใช้สมการทั้ง 2 ข้างต้นพบว่ามีความสอดคล้องกับผลการทดลองจริงโดยมีความผิดพลาดสูงสุด 23% ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการฝัง InAs QDs เข้าไปในชั้น GaAs เปรียบเสมือนเป็นการฝังเส้นทรงกลมนำไฟฟ้าเข้าไปในชั้น GaAs

5.3 ข้อเสนอแนะ

นอกเหนือจากการศึกษาผลของการฝัง QDs เพียงอย่างเดียว อาจสร้างโครงสร้างควอนตัมเวล (quantum well) เข้าไปในชั้นงานด้วย แล้วทำการศึกษาความคล่องตัวของพาหะและความเข้มข้นของพาหะของโครงสร้างดังกล่าว นอกจากนี้ควรมีการเปลี่ยนวัสดุในการปลูกโครงสร้างโดยการนำสารประกอบกึ่งตัวนำชนิดอื่นมาทดลองและปรับเปลี่ยนชนิดวัสดุที่ใช้ปลูก QDs เช่น เปลี่ยนจาก InAs QDs เป็น InGaAs QDs เป็นต้น เพื่อศึกษาผลของการฝัง QDs ต่อความคล่องตัวของพาหะและความเข้มข้นของพาหะซึ่งปลูกโดยใช้วัสดุต่างกัน

รายการอ้างอิง

- [1] Leonard, D., Krishnamurthy, M., Reaveas, C. M., Denbaars, S. P., and Petroff, P. M. 1993. Direct formation of quantum-sized dots from uniform coherent islands of InGaAs on GaAs surfaces. Applied Physics Letters 63: 3203-3205.
- [2] Bottomley, D. J. 1998. The physical origin of InAs quantum dots on GaAs(001). Applied Physics Letters 72: 783-785.
- [3] Suraprapich, S., Thainoi, S., Kanjanachuchai, S. and Panyakeow, S. 2004. "Quantum Dot Integration in Heterostructure Solar Cell". 14th International Photovoltaic Science and Engineering Conference 1: 509-510.
- [4] Cheng, K.-Y. 1997. Molecular beam epitaxy technology of III-V compound semiconductors for optoelectronic applications. Proceeding of IEEE 85: 1694-1714.
- [5] Sugawara, M. 1999. Theoretical based of the optical properties of semiconductor quantum nano-structures. In M. Sugawara (ed.), Semiconductors and Semimentals: Self-assembled InGaAs/GaAs quantum dots, 60:1-116, San Diego: Academic Press.
- [6] Weisbuch, C., and Vinter, B. 1991. Quantum semiconductor structures fundamentals and applications. San Diego: Academic Press.
- [7] Wolfe, C. M., Holonyak, N., Jr., and Stillman, G. E. 1989. Physical properties of semiconductors. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.
- [8] Bastard, G., and Brum, J. A. 1986. Electronic states in semiconductor heterostructures. IEEE Journal of Quantum Electronics QE-22: 1625-1644.
- [9] Weisbuch, C., and Vinter, B. 1991. Quantum semiconductor structures fundamentals and applications. San Diego: Academic Press.
- [10] ศุภโชค ไทยน้อย. "การพัฒนาห้รังสีชนิด GaAs p-i-n สำหรับวัดรังสีเอกซ์" (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542), หน้า 80-84.
- [11] Arakawa, Y., and Sakaki, H. 1982. Multidimensional quantum well laser and temperature dependence of its threshold current. Applied Physics Letters 40: 939-941.

- [12] Asada, M., Miyamoto, Y., and Suematsu, Y. 1986. Gain and the threshold of three-dimensional quantum-box lasers. IEEE Journal of Quantum Electronics QE-22: 1915-1921.
- [13] Alferov, Z. I. 2001. Nobel Lecture: the double heterostructure concept and its applications. Reviews of Modern Physics 73: 767-782.
- [14] O'Reilly, E. P. 1989. Valence band engineering in strained-layer structures. Semiconductors Science and Technology 4: 121-137.
- [15] Bimberg, D., Grundmann, M., and Ledentsov, N. N. 1999. Quantum dot heterostructures. Chichester: Wiley.
- [16] Rajkumar, K. C. et al. 1992. Optically active three-dimensionally confined structures realized via molecular beam epitaxial growth on nonplanar GaAs (111)B. Applied Physics Letters 63: 2905-2907.
- [17] Grundmann, M., and Bimberg, D. 1997. Formation of quantum dots in twofold cleaved edge overgrowth. Physical Review B 55: 4054-4056.
- [18] Shchukin, V. A., et al. 1995. Spontaneous ordering of arrays of coherent strained islands. Physical Review Letters 75: 2968-2971.
- [19] Daruka, I., and Barabási, A. L. 1997. Dislocation-free island formation in heteroepitaxial growth: a study at equilibrium. Physical Review Letters 79: 3708-3711.
- [20] Dobbs, H. T., and Vvedensky, D. D. 1997. Mean-field theory of quantum dot formation. Physical Review Letters 79: 897-900.
- [21] Bhattacharya, P. 1993. Properties of Lattice-Matched and Strained Indium Gallium Arsenide. INSPEC.
- [22] Nakayama, T. and Miyamoto H. 1995. Dependence of Critical Thickness of Strained InAs Layer on Growth Rate. Kansai Electronics Research Laboratories, NEC, Japan.
- [23] Herman, M. A., and Sitter, H. 1989. Molecular Beam Epitaxy Fundamentals and Current Status. Springer-Verlay Berlin Heidelberg.
- [24] Look, G. D. 1989. Electrical Characterization of GaAs Materials and Devices. (n.p.): John Wiley & Sons.

- [25] "A Practical Guide to Scanning Probe Microscopy". 1996. (n.p.): Park Scientific Instrument.
- [26] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. 2542. การศึกษาสภาพพื้นผิวของโพลีเมอร์โดยใช้เทคนิค Atomic Force Microscopy. วารสาร Materials Characterization 6: 40-43.
- [27] ชัชวณัฐ ธนชยานนท์ และคณะ. 2546. การประยุกต์ TEM ในงานด้านวัสดุศาสตร์และวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- [28] Kwok, K. Ng. Complete Guide To Semiconductor Devices. (n.p.): McGraw-Hill, 1995.
- [29] Sorab, K. G. 1983. VLSI Fabrication Principles Silicon and Gallium Arsenide. (n.p.): John Wiley&Sons.
- [30] Streetman, G. B. 1995. Solid State Electronic Devices. New Jersey: Prentice Hall.
- [31] Voronkov, V. V., Voronkova, G. I. and Iglitsyn, M. I. 1971. "Influence of second-phase inclusions on electrical conductivity and Hall effect". Sov. Phys. Semicond 4: 1949-52.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

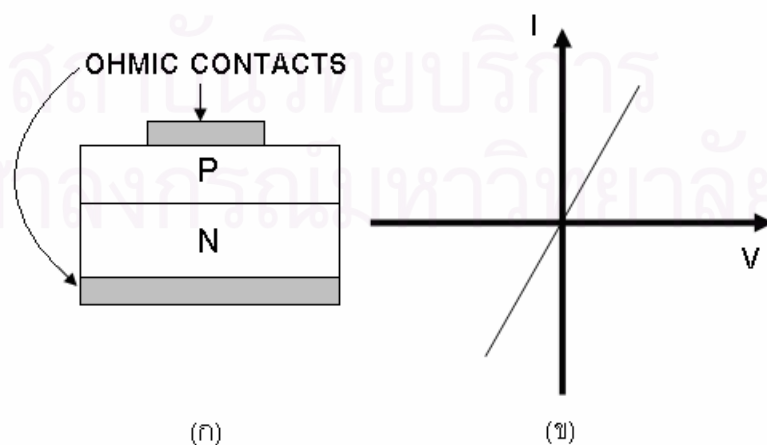
ภาคผนวก ก

การสร้างผิวสัมผัสโอห์มมิกบนผลึก GaAs ชนิดเอ็นและชนิดพี

(เรียบเรียงจาก ศุภโชค ไทยน้อย [10])

จากข้อเด่นหลายประการของสารประกอบกึ่งตัวนำตระกูล GaAs เช่นมีช่องว่างแถบพลังงานที่กว้าง มีความเร็วของพาหะสูง และที่สำคัญคือมีคุณสมบัติทางแสง ทำให้ความสนใจที่พัฒนาเทคนิคการผลิตสิ่งประดิษฐ์จากสารประกอบตระกูลนี้มีสูงขึ้น แต่อุปสรรคสำคัญในเบื้องต้นของการพัฒนาสิ่งประดิษฐ์สารประกอบกึ่งตัวนำ GaAs ก็คือความยากในการสร้างผิวสัมผัสโอห์มมิกทั้งนี้เนื่องจาก การเกิดอ็อกไซด์โดยธรรมชาติที่ผิวของแวนผลึก GaAs เอง

ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำนั้น คุณภาพของสิ่งประดิษฐ์จะขึ้นอยู่กับขั้นตอนพื้นฐาน 2 ขั้นตอน คือ การสร้างโครงสร้างหลัก สำหรับสารประกอบกึ่งตัวนำเราใช้ Expitaxy เป็นเทคโนโลยีในการสร้าง และการสร้างผิวสัมผัสโอห์มมิก ซึ่งวิธีการนั้นทำได้โดยการสร้างชั้นโลหะบางๆ ลงบนผิวหน้าของชั้นของโครงสร้างหลักแล้วต่อเส้นโลหะเพื่อนำสัญญาณไฟฟ้าเข้าออกดังรูปที่ ก.1 (ก) ถ้าลักษณะสมบัติของผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำไม่มีผลกระทบต่อลักษณะสมบัติของโครงสร้างหลัก กล่าวคือ มีความเป็นเชิงเส้นสูง ดังรูปที่ ก.1 (ข) ซึ่งแสดงลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของผิวสัมผัส ผิวสัมผัสนี้จะถูกเรียกว่า ผิวสัมผัสโอห์มมิก ซึ่งความเป็นผิวสัมผัสโอห์มมิกจะมากหรือน้อยถูกกำหนดโดยชนิดของสารกึ่งตัวนำ ความเข้มข้นของสารเจือปนและชนิดของโลหะ ซึ่งแสดงในตารางที่ 1 โลหะที่ใช้สร้างผิวสัมผัสโอห์มมิกสำหรับสารกึ่งตัวนำต่างๆ [28]

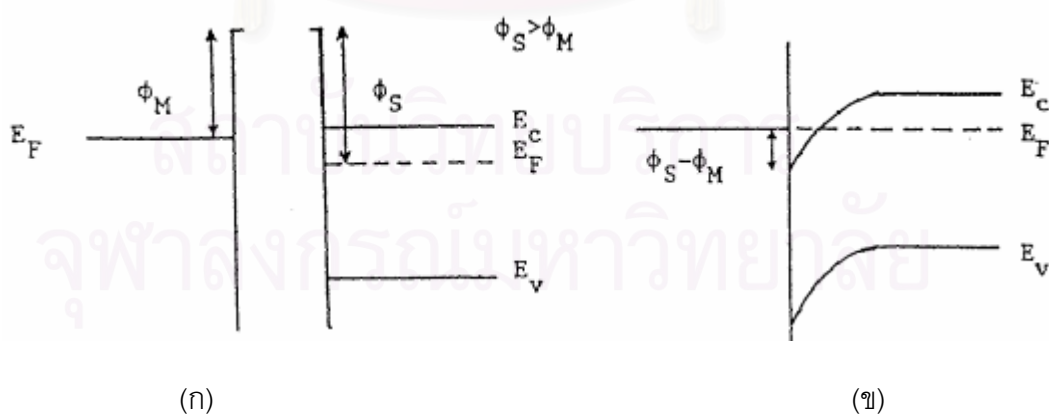


รูปที่ ก.1 (ก) แสดงตำแหน่งผิวสัมผัสโอห์มมิกด้าน P+ และด้าน N+

(ข) ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของผิวสัมผัสโอห์มมิก

ตารางที่ ก.1 ชนิดของโลหะที่ใช้ในการสร้างผิวสัมผัสโหนดอิมมิกสำหรับสารกึ่งตัวนำ [28]

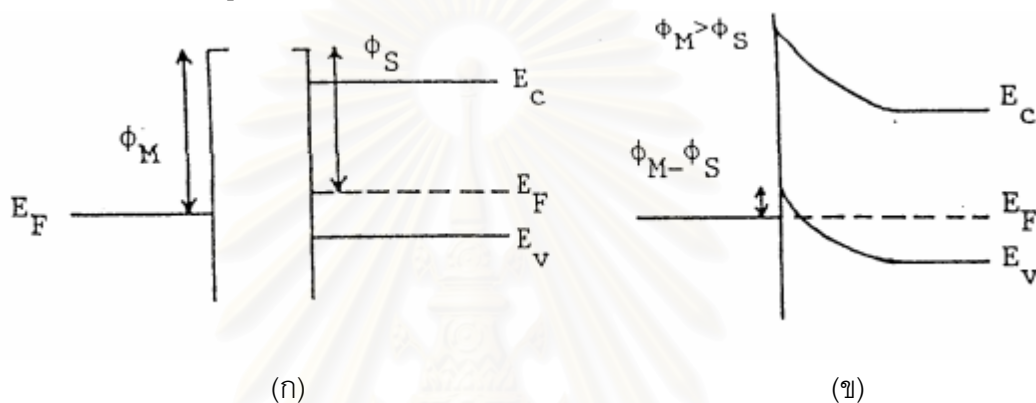
Semiconductor	Metal	Semiconductor	Metal
n-Ge	Ag-Al-Sb, Al, Al-Au-P, Au, Bi, Sb, Sn, Pb-Sn	p-Ge	Ag, Al, Au, Cu, Ga, Ga-In, In, Al-Pd, Ni, Pt, Sn
n-Si	Ag, Al, Al-Au, Ni, Sn, In, Ge-Sn, Sb, Au-Sb, Ti, TiN	p-Si	Ag, Al, Al-Au, Au, Ni, Pt, Sn, In, Pb, Ga, Ge, Ti, TiN
n-GaAs	Au(.88)Ge(.12)-Ni, Ag-Sn, Ag(.95)In(.05)-Ge	p-GaAs	Au(.84)Zn(.16), Ag-In-Zn, Ag-Zn
n-GaP	Ag-Te-Ni, Al, Au-Si, Au-Sn, In-Sn	p-GaP	Au-In, Au-Zn, Ga, In-Zn, Zn, Ag-Zn
n-GaAsP	Au-Sn	p-GaAsP	Au-Zn
n-GaAlAs	Au-Ge-Ni	p-GaAlAs	Au-Zn
n-InAs	Au-Ge, Au-Sn-Ni, Sn	p-InAs	Al
n-InGaAs	Au-Ge, Ni	p-InGaAs	Au-Zn, Ni
n-InP	Au-Ge, In, Ni, Sn		
n-InSb	Au-Sn, Au-In, Ni, Sn	p-InSb	Au-Ge
n-CdS	Ag, Al, Au, Au-In, Ga, In, Ga-In		
n-CdTe	In	p-CdTe	Au, In-Ni, Indalloy 13, Pt, Rh
n-ZnSe	In, In-Ga, Pt, InHg		
n-SiC	W	p-SiC	Al-Si, Si, Ni



รูปที่ ก.2 โครงสร้างแถบพลังงานของผิวสัมผัสแบบอิมมิกระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำแบบเอ็น (ก) ก่อน และ (ข) หลังทำผิวสัมผัส

ทฤษฎีผิวสัมผัสไอห่มมิกโดยทั่วไปแสดงด้วยแถบพลังงานในรูปที่ ก.2 และรูปที่ ก.3 พิจารณาในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยรูปที่ ก.2 (ก) เป็นแถบพลังงานก่อนทำผิวสัมผัส ส่วนรูปที่ ก.2 (ข) เป็นแถบพลังงานหลังจากทำผิวสัมผัสแล้ว ผิวสัมผัสเป็นผิวสัมผัสไอห่มมิกได้ก็ต่อเมื่อ $\phi_s > \phi_m$ โดย ϕ_s คือค่า work function ของสารกึ่งตัวนำ และ ϕ_m คือ work function ของโลหะ [28]-[29]

ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะมีลักษณะแถบพลังงานตรงข้ามกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นคือ $\phi_m > \phi_s$ ดังแสดงในรูปที่ ก.3 (ก) และ (ข)



รูปที่ ก.3 โครงสร้างแถบพลังงานของผิวสัมผัสแบบไอห่มมิกระหว่างโลหะ กับสารกึ่งตัวนำชนิดพี (ก) ก่อน และ (ข) หลังทำผิวสัมผัส

เงื่อนไขที่เอื้ออำนวยการสร้างผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำในทางปฏิบัติ ให้ได้ตามความต้องการข้างต้นนั้น ขึ้นกับองค์ประกอบ 2 อย่าง กล่าวคือ

1. โลหะที่ใช้ และวิธีการฉาบผิว
2. ระดับความเข้มข้นของชั้นกึ่งตัวนำ

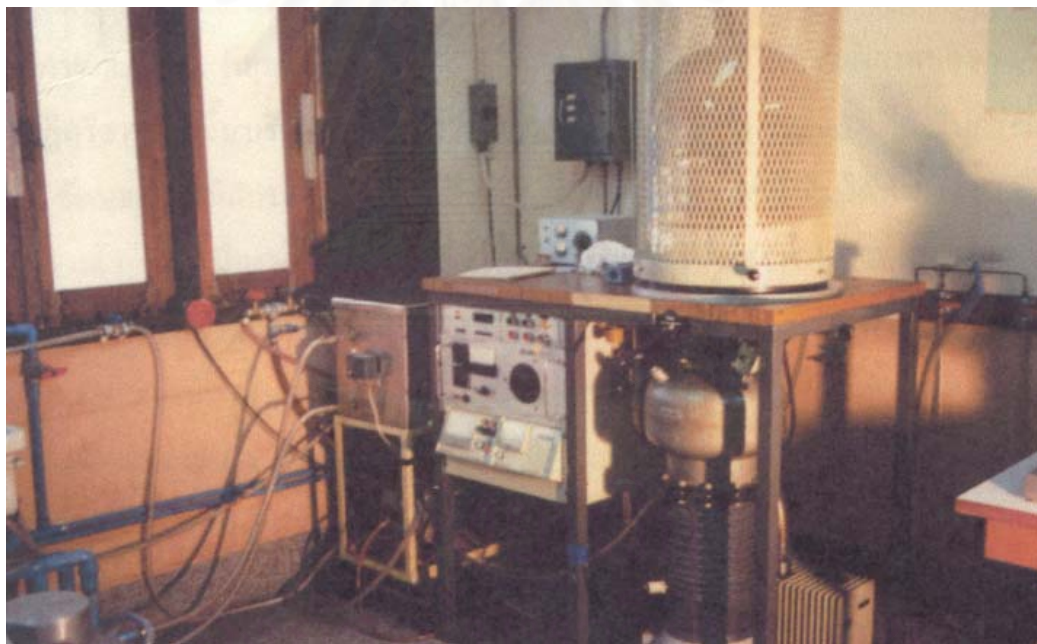
โลหะที่ใช้ และวิธีฉาบผิว

โลหะที่ใช้ในการสร้างผิวสัมผัสไอห่มมิก (แสดงในตารางที่ ก.1) จะเป็นโลหะผสมประกอบด้วย 2 ส่วน คือ โลหะที่เป็นตัวทำละลาย รวมกับโลหะที่ทำหน้าที่เป็นสารเจือปน โลหะที่เป็นตัวทำละลาย ตัวอย่างเช่น ทอง (Au) และเงิน (Ag) ส่วนโลหะที่เป็นสารเจือปนจะขึ้นกับชนิดของสารกึ่งตัวนำ ถ้าเป็นชนิดเอ็น โลหะที่ใช้จะเป็น Te, Se, Si, Ge หรือ Sn ส่วนชนิดพี โลหะที่ใช้จะเป็น Zn หรือ Be นอกจากนี้อัตราส่วนการผสมระหว่างโลหะหลักกับโลหะสารเจือปนก็เป็นองค์ประกอบหนึ่งที่สำคัญ สำหรับวิธีการฉาบผิวโลหะที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ Filament

Evaporation ดังรูปที่ ก.4 ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ในห้องปฏิบัติการวิจัยสารกึ่งตัวนำ ส่วนวิธีการฉาบผิวโลหะแบบอื่นที่นิยมรองลงมาได้แก่ Electron Beam Evaporation และ Sputtering เป็นต้น

ระดับความเข้มข้นของสารกึ่งตัวนำ

ชั้นสารกึ่งตัวนำที่จะนำมาสร้างผิวสัมผัสโอห์มมิก ควรจะเลือกเฉพาะที่มีความเข้มข้นสารเจือปนสูงๆ เพื่อให้กำแพงพลังงานศักย์บางที่สุด แต่ในทางปฏิบัตินั้นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำมักจะใช้ Active Layer ที่มีความเข้มข้นของสารเจือปนต่ำประมาณ 10^{16} - 10^{17} cm^{-3} ซึ่งไม่เพียงพอที่จะทำผิวสัมผัสโอห์มมิกได้ ดังนั้นจึงต้องสารชั้นสารกึ่งตัวนำที่มีความเข้มข้นของสารเจือปนมากกว่า 10^{18} cm^{-3} ก่อนที่จะฉาบผิวด้วยโลหะ ส่วนวิธีการนั้นอาจจะใช้ Diffusion, Ion Implantation หรือ Epitaxy ก็ได้ แล้วแต่ความเหมาะสม หลังจากฉาบผิวโลหะลงบนชั้นสารกึ่งตัวนำที่สร้างขึ้นแล้ว ผิวสัมผัสจะต้องการ Anneal เพื่อให้สารกึ่งตัวนำที่ผิวสัมผัสมีความเข้มข้นของสารเจือปนมากกว่า 5×10^{18} cm^{-3} แล้วแต่ความเข้มข้นของสารเจือปน



รูปที่ ก.4 ภาพถ่ายของเครื่อง evaporator สำหรับการฉาบผิวโลหะ (Metallization)

ผิวสัมผัสโอห์มมิกของแวนผลึก GaAs ชนิดเอ็น โลหะที่ใช้คือ AuGe+Ni โดย AuGe มี Ge ผสม 12% แวนผลึกเริ่มต้นมีความเข้มข้นสารเจือปนประมาณ 10^{18} cm^{-3} ความหนาของ AuGe ประมาณ 3,000 Å และ Ni 500 Å ทำการ Anneal ที่อุณหภูมิ 500 °C ใช้เวลา 2:30 นาที ภายใต้บรรยากาศของ forming gas ($\text{N}_2 + \text{H}_2$) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าแวนผลึก

GaAs ขณะทำการ Anneal คือ ทอง (Au) ซึ่งเป็นตัวทำละลาย จะเริ่มทำการละลายผิวหน้าของ GaAs เปลี่ยนสถานะภาพของ GaAs จากของแข็งมาเป็นของเหลว Ga จะเริ่มแพร่ซึม (diffusion) จากแวนผลึกวิ่งเข้าสู่ชั้นโลหะ ในขณะที่เดียวกัน Ge ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเจือปนจะแพร่ซึมเข้าแทนที่ของ Ga ทำให้เกิดชั้นของ GaAs ความเข้มข้นของสารเจือปนสูง (n^{++}) ในขณะที่ Ge แพร่ซึม As ก็แพร่ซึมแต่เลยหลุดลอยเป็นไอออกมา โดยสรุปจะเห็นว่าชั้น GaAs n^{++} เกิดจากการที่ Au ละลาย GaAs Ga และ As แพร่ซึมขึ้นข้างบน Ge แพร่ซึมเข้าแทนที่ที่ของ Ga ปฏิกริยานี้จะต้องเกิดอย่างพอเหมาะพอเจาะ ถ้าเกิดปฏิกริยาน้อยเกินไป ชั้น GaAs n^{++} ที่เกิดขึ้นจะมีความเข้มข้นสารเจือปนไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดกำแพงพลังงานศักย์ที่บาง แต่ถ้าเกิดปฏิกริยามากเกินไป จะเหลือที่ว่างของ Ga มากซึ่งทำให้เกิดชั้นความต้านทานสูงได้ผิวสัมผัส ทำให้ค่าสภาพต้านทานผิวสัมผัสโดยรวมมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นปริมาณ Au (ควบคุมโดยความหนา) จะช่วยควบคุมปริมาณของปฏิกริยาได้อีกชั้นหนึ่งนอกจากอุณหภูมิและเวลา หลังการ Anneal ได้ค่าสภาพต้านทานผิวสัมผัสมีค่าต่ำสุดประมาณ $2.9 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}^2$

ผิวสัมผัสโอห์มมิกของแวนผลึก GaAs ชนิดพี โลหะที่ใช้คือ AuZn มี Zn ผสม 50% แวนผลึกเริ่มต้นมีความเข้มข้นสารเจือปนประมาณ 10^{18} cm^{-3} ความหนาของ AuZn ประมาณ 2,000-3,000 Å ทำการ Anneal ที่อุณหภูมิ 500 °C ใช้เวลา 2 นาที ภายใต้บรรยากาศของ forming gas ($\text{N}_2 + \text{H}_2$) ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าแวนผลึก GaAs ขณะทำ Anneal คือ ในกรณีแวนผลึก GaAs ชนิดพี ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันมีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ยังไม่ได้ทำการ Anneal และที่ทำการ Anneal แล้ว ทั้งนี้เนื่องจาก Zn มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึมสูง (High Diffusion Coefficient) สามารถแพร่ซึมได้ทันทีที่สัมผัสกับผิวหน้าแวนผลึก GaAs และเมื่อทำการ Anneal ค่าสภาพต้านทานผิวสัมผัสจะยังมีค่าต่ำลงไปอีก ทั้งนี้เนื่องจากเกิดชั้น p^{++} ขึ้น ด้วยเหตุผลที่ว่า Zn แพร่ซึมลงไปแทนที่ตำแหน่งของ Ga หลังการ Anneal ได้ค่าสภาพต้านทานผิวสัมผัสต่ำสุดประมาณ $2.9 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}^2$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

คุณสมบัติของสารประกอบกึ่งตัวนำ [28]

1. คุณสมบัติที่สำคัญของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V

สารกึ่งตัวนำ	ขนาดช่องว่างพลังงาน (eV)		ความคล่องตัวที่ 300 K (cm ² /V-s)		ชนิดของ ช่องว่าง พลังงาน	มวลประสิทธิผล m*/m ₀	
	300 K	0 K	Electron	Hole		Electron	Hole
	AlSb	1.58	1.68	200		420	I
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	โครงสร้าง ผลึก	ค่าคงที่โครงสร้างผลึก (Å)	มวล (g/cm ³)	ε _r	จุดหลอมเหลว (°C)
AlAs	Z	5.66	3.60	10.9	1740
AIP	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

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธีรศักดิ์ ปัญญาวานิชกุล เกิดเมื่อวันที่ 28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2522 ที่โรงพยาบาล นครปฐม อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม ศึกษาชั้นประถมที่โรงเรียนวัดไผ่ล้อม, ชั้นมัธยมต้นและ มัธยมปลายที่โรงเรียนพระปฐมวิทยาลัย จังหวัดนครปฐม ได้รับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น เมื่อปี พ.ศ. 2541



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย