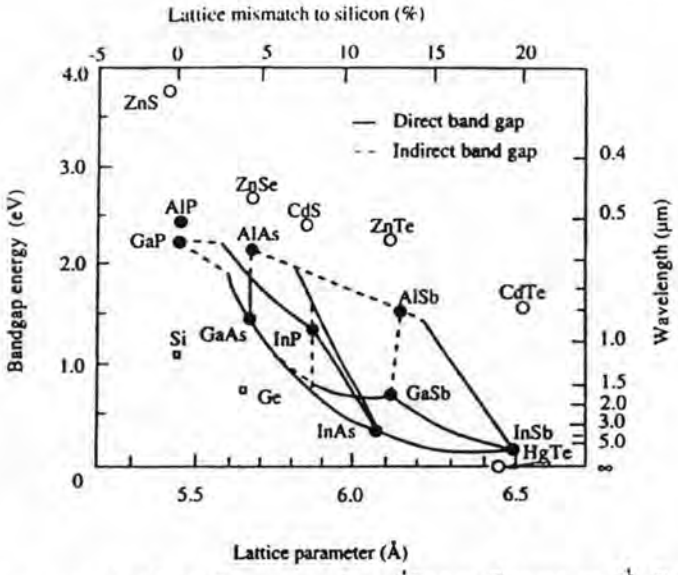
# บทที่ 1
# บทนำ

## 1.1 ประวัติและความเป็นมา

ถึงแม้ว่าสารกึ่งตัวนำจำพวกธาตุ (elemental semiconductor) อันได้แก่ ซิลิคอน (Si) จะพบมากในธรรมชาติ และถูกนำมาใช้งานในสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (optoelectronic device) มาเป็นระยะเวลานาน แต่การมีช่องว่างพลังงานที่เป็นแบบไม่ตรง (indirect bandgap) ทำให้สารกึ่งตัวนำจำพวกธาตุมีประสิทธิภาพในการเปล่งแสงและดูดกลืนแสงค่อนข้างต่ำ ดังนั้นเพื่อให้ได้สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่มีประสิทธิภาพสูง จึงจำเป็นต้องอาศัยสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบตรง (direct bandgap) สารประกอบกึ่งตัวนำ (compound semiconductor) บางชนิดมีคุณสมบัติดังกล่าว ดังนั้นจึงถูกนำมาศึกษาและใช้งานอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะอย่างยิ่งสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V อันได้แก่ แกลเลียมอาร์เซไนด์ซึ่งถูกพบขึ้นก่อน และหลังจากที่ได้มีการค้นพบปรากฏการณ์กันน์ (Gunn effect) และการค้นพบเลเซอร์สารกึ่งตัวนำแล้ว แกลเลียมอาร์เซไนด์เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V ชนิดแรกๆที่ถูกนำมาศึกษาและใช้งานทางด้านออปโตอิเล็กทรอนิกส์อันเนื่องมาจากคุณสมบัติเฉพาะ เช่น การมีช่องว่างพลังงานที่เป็นแบบตรงทำให้ มีคุณสมบัติทางด้านการเปล่งแสงและดูดกลืนแสงที่ดี และที่น่าสนใจก็คือ แกลเลียมอาร์เซไนด์เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำชนิดไบนารี (binary compound) ที่สามารถเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำชนิดเตอร์นารี (ternary compound) หรือควอเตอร์นารี (quaternary compound) ได้ด้วยการผสมธาตุที่เหมาะสม เช่น การเพิ่มอะตอมของอะลูมิเนียมเข้าไปแทนที่ในบางส่วนของตำแหน่งอะตอมแกลเลียมในแกลเลียมอาร์เซไนด์ จะทำให้เกิดเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำชนิดเตอร์นารี เรียกว่า อะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ ซึ่งมีโครงสร้างแถบพลังงาน (band structure) ที่เปลี่ยนแปลงไปจากแกลเลียมอาร์เซไนด์ แต่จะยังคงมีค่าคงที่โครงผลึก (lattice constant) ที่ใกล้เคียงกัน

รูปที่ 1.1 แสดงขนาดช่องว่างพลังงาน (energy bandgap) และค่าคงที่โครงผลึกของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ จะเห็นได้ว่าขนาดช่องว่างพลังงานของอะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์มีค่าแตกต่างจากแกลเลียมอาร์เซไนด์โดยขึ้นอยู่กับขนาดส่วนประกอบของอะลูมิเนียมใน

อะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ ในขณะที่ค่าคงที่โครงผลึกของสารกึ่งตัวนำทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันมากไม่ว่าส่วนประกอบของอะลูมิเนียมจะเป็นเท่าใดก็ตาม




**รูปที่ 1.1** ขนาดช่องว่างพลังงานและค่าคงที่โครงผลึกของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ

(จาก P. Bhattacharya, Semiconductor Optoelectronic Devices, 1994 [1])

การเปลี่ยนแปลงของอะตอมในแกลเลียมอาร์เซไนด์ข้างต้นเป็นเพียงจุดเริ่มต้นของการพัฒนาสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพสูง เนื่องจากเป็นที่ทราบกันดีว่าคุณสมบัติทางแสง และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำได้ถูกกำหนดโดยโครงสร้างผลึก (crystal structure) หรือโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดนั้น ดังนั้นจึงเกิดความพยายามในการปลูกผลึกสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกันเรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ (superlattice) เพื่อให้ได้โครงสร้างแถบพลังงานตามที่ต้องการ จนกระทั่งเมื่อมีการพัฒนาเทคโนโลยีการปลูกผลึกของสารกึ่งตัวนำต่างชนิด (hetero-epitaxy) ที่มีคุณภาพสูง เช่น Molecular Beam Epitaxy (MBE) และ Metal-Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD) ความพยายามดังกล่าวจึงประสบความสำเร็จและได้รับความสนใจอย่างมากในราว 25 ปีที่ผ่านมา เมื่อ R. Tsu และ L. Esaki แห่งบริษัท ไอบีเอ็ม ได้ค้นพบการทะลุ (tunneling) ของพาหะนำไฟฟ้าในผลึกที่มีการเรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ และผลจากงานวิจัยนี้ได้นำไปสู่สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่มีโครงสร้างควันตัมเวลล์ (quantum well structure) เป็นส่วนประกอบ [1-2]

โครงสร้างควันตัมเวลล์เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยผลึกของสารกึ่งตัวนำที่มีความแตกต่างกันของขนาดช่องว่างพลังงานเรียงสลับกันโดยอาศัยเทคโนโลยีการปลูกผลึกคุณภาพสูง และจากคุณสมบัติเฉพาะของแกลเลียมอาร์เซไนด์และอะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่มีขนาดช่องว่าง

พลังงานที่แตกต่างกันและมีค่าคงที่โครงผลึกที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้โครงสร้างควันตัมเวลล์ที่ประกอบด้วยแกลเลียมอาร์เซไนด์และอะลูเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ถูกนำมาศึกษาถึงคุณสมบัติที่เป็นพื้นฐานของโครงสร้างควันตัมเวลล์อย่างแพร่หลาย

โครงสร้างควันตัมเวลล์มีคุณสมบัติเฉพาะที่แตกต่างออกไปจากโครงสร้างผลึกทั่วๆไปที่เรียกว่า quantum-sized effects [3] เช่น การมีผลตอบสเปกตรัมที่ขึ้นกับขนาดความกว้างของชั้นเวลล์ (well) และความสูงของชั้นกำแพง (barrier) การดูดกลืนแสงของ exciton ที่อุณหภูมิห้อง (room temperature excitonic nonlinear absorption) การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นซึ่งขึ้นกับขนาดของสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับชั้นผลึก (quantum–confined stark effect) และการมีฟังก์ชันความหนาแน่นสเตทแบบขั้นบันได (steplike density of states function) เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์อย่างกว้างขวางในปัจจุบัน ทั้งในสิ่งประดิษฐ์กำเนิดแสง (light emitting device) เช่น เลเซอร์ไดโอด (laser diode) [4-5] และในสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสง (light detector) ที่ใช้ตรวจรับแสงที่ความยาวคลื่นเฉพาะค่า เช่น พินโฟโตไดโอด (PIN photodiode) [6-7] และโฟโตคอนดักเตอร์ (photoconductor) [8-12] แต่ความสำเร็จของสิ่งประดิษฐ์เหล่านี้จำเป็นต้องอาศัยการศึกษาคุณสมบัติเฉพาะที่เป็นพื้นฐานทั้งจากกระบวนการทางแสง กระบวนการทางไฟฟ้า และจากความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการทั้งสองหรือคุณสมบัติทางด้านออปโตอิเล็กทรอนิกส์ [13-14] เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิจัยและพัฒนาเพื่อให้ได้สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่มีประสิทธิภาพสูงต่อไปในอนาคต

สำหรับงานวิจัยทางด้านโครงสร้างควันตัมเวลล์ ของห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้เริ่มขึ้นในปี พ.ศ. 2535 หลังจากที่ได้ทำการติดตั้งเครื่อง molecular beam epitaxy (MBE) อย่างเสร็จสมบูรณ์โดยมีโครงการวิจัยทางด้านสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่มีโครงสร้างควันตัมเวลล์เป็นส่วนประกอบ งานวิจัยในระยะเริ่มต้นจึงเป็นการปลูกผลึกโครงสร้างควันตัมเวลล์ของแกลเลียมอาร์เซไนด์/อะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ ทั้งแบบควันตัมเวลล์เดี่ยว (single quantum well หรือ SQW) และแบบควันตัมเวลล์ที่มีชั้นเวลล์หลายชั้นหรือมัลติควันตัมเวลล์ (multiquantum well หรือ MQW) และทำการตรวจสอบคุณภาพผลึกของโครงสร้างโดยใช้เทคนิคโฟโตลูมิเนส-เซนซ์ (photoluminescence) [15] ตัวอย่างของโครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์ที่ได้ถูกนำมาตรวจสอบคุณภาพผลึกด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์ คือ โครงสร้างที่ประกอบด้วยชั้นเวลล์มากกว่าหนึ่งชั้นที่มีขนาดความกว้างแตกต่างกัน เช่น โครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์ที่ประกอบด้วยชั้นเวลล์ 2 ชั้นที่มีความกว้างแตกต่างกัน (2 MQW) โครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์ที่ประกอบด้วยชั้นเวลล์ 6 ชั้นที่มีความกว้างแตกต่างกัน (6 MQW) และโครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์ที่ประกอบด้วยชั้นเวลล์ที่มีความกว้างแตกต่างกัน 6 ค่า โดยที่แต่ละค่าประกอบด้วยจำนวนชั้นเวลล์ 4 ชั้น (4×6 MQW) [16]

อย่างไรก็ดี การศึกษาถึงแนวคิด ทฤษฎี และความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการทางแสงและกระบวนการทางไฟฟ้าหรือคุณสมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ของโครงสร้างควันตัมเวลล์เป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการนำไปสู่พื้นฐานความเข้าใจในการประยุกต์ใช้งาน และออกแบบโครงสร้างควันตัมเวลล์ในสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพสูงต่อไปในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์

1 เพื่อศึกษาทฤษฎี และคุณสมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นพื้นฐานของโครงสร้างควันตัมเวลล์

2 เพื่อศึกษาผลตอบสเปกตรัมจากโครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์ของแกลเลียมอาร์เซไนด์/อะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์

## 1.3 โครงสร้างวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎี คุณสมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นพื้นฐานของโครงสร้างควันตัมเวลล์ และผลตอบสเปกตรัมที่ได้จากโครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์ของแกลเลียมอาร์เซไนด์/อะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่ปลูกขึ้นโดย molecular beam epitaxy โดยแบ่งออกเป็น 5 ส่วน อันประกอบไปด้วย

บทที่ 1 กล่าวถึงประวัติความเป็นมา วัตถุประสงค์ และโครงสร้างของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงเทคโนโลยีการปลูกผลึก และขั้นตอนการปลูกผลึกโดยสังเขปของแกลเลียมอาร์เซไนด์และอะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์โดย molecular beam epitaxy

บทที่ 3 เป็นการอธิบายถึงทฤษฎีทางกลศาสตร์ควันตัม สมการโชรดิงเจอร์ (Schrödinger equation) ภายใต้พลังงานศักย์แบบ infinite square well และ finite square well เพื่อเป็นพื้นฐานความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างควันตัมเวลล์ จากนั้นจะกล่าวถึงคุณสมบัติเฉพาะของแกลเลียม-อาร์เซไนด์และอะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ รวมทั้งคุณสมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ของโครงสร้างควันตัมเวลล์ที่ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำทั้งสอง

บทที่ 4 ประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นผลการคำนวณฟังก์ชันคลื่นและความน่าจะเป็นของการพบอนุภาคภายใต้พลังงานศักย์แบบต่างๆ โดยการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางกลศาสตร์ควันตัม ส่วนที่สองเป็นผลตอบสเปกตรัมจากโครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์ที่ได้จาก

กระบวนการทางแสง อันได้แก่ โฟโตลูมิเนสเซนซ์ และการทะลุผ่านแสง (transmittance) และที่ได้จากคุณสมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ภายใต้สนามไฟฟ้าที่ผิวหน้าและภายใต้สนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับชั้นผลึก

และบทที่ 5 เป็นการสรุปเกี่ยวกับงานวิจัยที่ได้ทำทั้งหมด

ในส่วนท้ายสุดของวิทยานิพนธ์กล่าวถึง ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นฐานแกลเลียม-อาร์เซไนด์ที่นำไปใช้ในการปลูกผลึก ผลตอบสนองต่อแสงของพินโฟโตไดโอดมาตรฐาน PH302 ที่ได้ทำการวัดโดยใช้ระบบการวัดผลตอบสนองต่อแสงชุดเดียวกันกับที่จัดเตรียมขึ้นสำหรับการวัดผลตอบสนองต่อแสงของโครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์ เพื่อเป็นการทดสอบความคลาดเคลื่อนของระบบการวัด และผลการคำนวณระดับพลังงานควันไตซ์จาก finite square well เพื่อหาค่าระดับพลังงานควันไตซ์ $E_1 - E_{hh1}$ ที่ได้จากโครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์ที่เตรียมขึ้นจาก molecular beam epitaxy