บทที่ 1
บทนำ

1.1 หลักการ และเหตุผล

ปัจจุบันการวิจัย และพัฒนาแหล่งกำเนิดเลเซอร์สารกึ่งตัวนำในย่านความยาวคลื่นใต้แดง (Long-wavelength infra-red region; $\lambda \approx 20\text{-}100$ ไมโครเมตร) กำลังได้รับความสนใจจากนักวิจัยอย่างแพร่หลาย สาเหตุสำคัญเนื่องมาจากเลเซอร์ในย่านความยาวคลื่นดังกล่าวมีความเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านอุตสาหกรรม รวมถึงการนำไปใช้สำหรับการศึกษาวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างเช่นการนำไปทำเป็นเครื่องมือตรวจวัดรังสีใต้แดง (Infra-red counter measures) หรือพัฒนาเป็นเครื่องมือวินิจฉัยโรคทางการแพทย์ (Medical diagnostics) เป็นต้น

โดยทั่วไปแหล่งกำเนิดเลเซอร์สารกึ่งตัวนำแบบดั้งเดิมจะเป็น *แหล่งกำเนิดเลเซอร์สารกึ่งตัวนำชนิดสองขั้ว* (Conventional bipolar semiconductor lasers) ซึ่งอาศัยกระบวนการเปลี่ยนสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในแถบความนำไฟฟ้า (Conduction band; CB) ไปยังสถานะพลังงานอีกสถานะหนึ่งในแถบวาเลนซ์ (Valence band; VB) โดยมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนในกรณีนี้เรียกว่า *การเปลี่ยนสถานะระหว่างแถบพลังงาน* (Interband transitions) ด้วยเหตุนี้ความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลดปล่อยออกมาจึงถูกกำหนดด้วยค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Energy gap) ระหว่างแถบพลังงานทั้งสอง ดังนั้นเพื่อให้ได้แสงที่มีความยาวคลื่นใต้แดงจึงมีความจำเป็นต้องเลือกใช้สารกึ่งตัวนำที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงานแคบ ๆ ซึ่งโดยทั่วไปการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน หรือโฮลในสารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้มักจะไวต่อการคายพลังงานในรูปของความร้อนซึ่งทำให้เกิดการสั่นของผลึกของสารมากกว่าการที่จะคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นจึงมีผลทำให้แหล่งกำเนิดเลเซอร์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการนำแหล่งกำเนิดเลเซอร์ชนิดนี้ไปใช้งานที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการศึกษาวิจัย และพัฒนาแหล่งกำเนิดเลเซอร์สารกึ่งตัวนำชนิดใหม่ที่สามารถลดอัตราการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนขึ้นมา และเรียกแหล่งกำเนิดเลเซอร์สารกึ่งตัวนำแบบใหม่นี้ว่า *แหล่งกำเนิดเลเซอร์สารกึ่งตัวนำชนิดขั้วเดียว* (Unipolar lasers) โดยที่การให้กำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดเลเซอร์ชนิดนี้เกิดจากการที่อิเล็กตรอนในแถบความนำไฟฟ้า

(หรือโฮลในแถบวาเลนซ์) มีการเปลี่ยนสถานะจาก *ระดับพลังงานย่อย*[1] (Subband energy) หนึ่งไปยังระดับพลังงานย่อยอีกสถานะหนึ่ง เรียกว่า *การเปลี่ยนสถานะระหว่างระดับพลังงานย่อย* (Intersubband transitions) โดยระดับพลังงานย่อยทั้งสองนี้อยู่ในแถบความนำไฟฟ้า (หรืออยู่ในแถบวาเลนซ์สำหรับกรณีของโฮล) แล้วปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือโฟตอน (Photon) อย่างไรก็ดีเนื่องจากระดับพลังงานย่อยทั้งสองนี้อยู่ในแถบความนำไฟฟ้า (หรืออยู่ในแถบวาเลนซ์สำหรับกรณีของโฮล) ทำให้การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน (หรือโฮล) ยังคงอยู่ในแถบพลังงานงานเดียวกัน บางที่จึงเรียกการเปลี่ยนสถานะในกรณีนี้ว่า *การเปลี่ยนสถานะในแถบพลังงานเดียวกัน* (Intraband transitions) และความยาวคลื่นของโฟตอนที่ปลดปล่อยออกมาจะไม่ขึ้นกับค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานทั้งสอง แต่จะถูกกำหนดด้วยความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานย่อยของอิเล็กตรอน (หรือระดับพลังงานย่อยของโฮล) ซึ่งมีค่าขึ้นกับการออกแบบโครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำดังกล่าว เพื่อให้ได้ลักษณะของแถบพลังงานย่อย หรือระดับพลังงานย่อยที่ให้ความยาวคลื่นตามต้องการ ดังนั้นในกรณีที่ต้องการโฟตอนที่มีความยาวคลื่นในย่านของคลื่นใต้แดง เราสามารถเลือกใช้สารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานกว้างเพื่อลดอัตราการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนเนื่องจากการรวมกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล ตัวอย่างเช่นการปลูกฟิล์มของ GaAs ซึ่งมีค่าช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 1.424 eV สลับกับฟิล์มของ $Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ ซึ่งมีค่าช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 1.923 eV จะทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของแถบพลังงานขึ้น โดยแถบความนำไฟฟ้าจะมีค่าความแตกต่างระหว่างแถบพลังงาน (Conduction band off-set) ประมาณ 300 meV ในขณะที่แถบวาเลนซ์จะมีค่าความแตกต่างของแถบพลังงาน (Valence band off-set) ประมาณ 200 meV ดังนั้นเมื่อทำการปลูกฟิล์มหลาย ๆ ชั้นจะทำให้ได้โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นควอนตัมเวลล์ (Quantum well structures) ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้อิเล็กตรอน (หรือโฮล) ในโครงสร้างที่ประกอบด้วยควอนตัมเวลล์ หรือบ่อพลังงานศักย์ดังกล่าวมีระดับพลังงานไม่ต่อเนื่อง และเรียกระดับพลังงานเหล่านี้ว่าที่เรียกว่า*ระดับพลังงานย่อย* (ดังที่กล่าวไว้ในตอนต้น) โดยระดับพลังงานย่อยนี้จะมีค่าขึ้นอยู่กับความกว้าง และความลึกของควอนตัมเวลล์ รวมถึงจำนวนบ่อพลังงานศักย์ของโครงสร้างเป็นสำคัญ โดยอาศัยหลักการการให้กำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าดังกล่าวนี้ นำไปสู่การพัฒนาแหล่งกำเนิดเลเซอร์สารกึ่งตัวนำชนิดขั้วเดียวที่เรียกว่า *แหล่งกำเนิดเลเซอร์แบบควอนตัมคาสเคด* (Quantum Cascade Laser; QCL) ซึ่งมีลักษณะพิเศษแตกต่างไปจากแหล่งกำเนิดเลเซอร์สารกึ่งตัวนำแบบดั้งเดิมโดยสิ้นเชิง กล่าวคือแหล่งกำเนิดเลเซอร์แบบควอนตัมคาสเคดโดยทั่วไปประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 หน่วย ได้แก่

---

[1] ระดับพลังงานย่อย (Subband energy) คือสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน (หรือโฮล) ในแถบความนำไฟฟ้า (หรือในแถบวาเลนซ์) ซึ่งเป็นผลจากการที่อิเล็กตรอน (หรือโฮล) ถูกกักในควอนตัมเวลล์ (Quantum well) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของพลังงานศักย์ในแถบพลังงานทั้งสอง

- *หน่วยให้กำเนิดแสง* (Lasing unit) เป็นหน่วยที่ทำหน้าที่ในการให้กำเนิดโฟตอน โดยทั่วไปมักจะเป็นโครงสร้างควอนตัมเวลล์ที่ออกแบบเพื่อให้ได้ระดับพลังงานย่อยของอิเล็กตรอน (หรือโฮล) ที่เหมาะสมในการให้กำเนิดโฟตอนที่มีพลังงานตามความต้องการในการนำไปใช้งานในเชิงประยุกต์

- *หน่วยส่งผ่านอิเล็กตรอน* (Bridging unit) เป็นหน่วยที่ทำหน้าที่ส่งผ่านอิเล็กตรอน (หรือโฮล) จากหน่วยให้กำเนิดแสงหน่วยหนึ่งไปยังอีกหน่วยหนึ่งที่อยู่ถัดไปหลังจากที่อิเล็กตรอนได้ปลดปล่อยโฟตอนออกมาแล้ว โดยทั่วไปหน่วยส่งผ่านอิเล็กตรอนมักจะเป็นโครงสร้างที่ได้จากการปลูกฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำต่างชนิด สลับกันเป็นชั้น ๆ อย่างเป็นระเบียบ ซึ่งเรียกว่า *โครงสร้างที่มีความเป็นระเบียบยวดยิ่ง* (Superlattices)

แหล่งกำเนิดเลเซอร์แบบควอนตัมคาสเคดมีความพิเศษกว่าแหล่งกำเนิดเลเซอร์ชนิดอื่นตรงที่สามารถนำอิเล็กตรอน (หรือโฮล) ที่ให้กำเนิดโฟตอนแล้ว มาทำให้กำเนิดโฟตอนได้อีก กล่าวคือขณะที่อิเล็กตรอนตัวหนึ่ง ๆ เคลื่อนที่ไปในโครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์เลเซอร์แบบควอนตัมคาสเคดนี้จะสามารถให้กำเนิดโฟตอนได้มากกว่า 1 โฟตอน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะแปรตามจำนวนของหน่วยให้กำเนิดแสงในแหล่งกำเนิดเลเซอร์ชนิดนี้ ดังนั้นถ้าพิจารณาในเชิงทฤษฎีพบว่า ประสิทธิภาพของแหล่งกำเนิดเลเซอร์ชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะการออกแบบโครงสร้างแถบพลังงานที่ประกอบกันเป็นหน่วยให้กำเนิดแสง และหน่วยส่งผ่านอิเล็กตรอน (หรือโฮล) เป็นสำคัญ อย่างไรก็ดีประสิทธิภาพของเลเซอร์ชนิดนี้ยังคงถูกจำกัดด้วยกระบวนการที่อิเล็กตรอนมีการเปลี่ยนระดับพลังงานโดยสูญเสียพลังงานในรูปอื่นแทนที่จะปลดปล่อยโฟตอนออกมาเช่นเดียวกับเลเซอร์แบบอื่น ๆ ตัวอย่างเช่นอิเล็กตรอนมีการเปลี่ยนสถานะพลังงานโดยการรับหรือคายพลังงานให้กับโฟนอน (Electron-phonon scattering) การชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอน (Electron-electron scattering) และการสูญเสียพลังงานในรูปความร้อน (Electron thermalization) เป็นต้น อย่างไรก็ดีเนื่องจากกระบวนการเหล่านี้มักจะขึ้นกับลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะออกแบบโครงสร้างให้เหมาะสมต่อการลดอัตราการสูญเสียพลังงานของอิเล็กตรอนเนื่องจากกระบวนการเหล่านี้ได้

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเชิงทฤษฎี โดยทำการจำลองแบบจลนศาสตร์การผ่อนคลายพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนในหน่วยให้กำเนิดแสงของแหล่งกำเนิดเลเซอร์แบบควอนตัมคาสเคดที่เป็นโครงสร้างซึ่งประกอบด้วยสามควอนตัมเวลล์ของระบบวัสดุสารกึ่งตัวนำ $GaAs/Al_xGa_{1-x}As$ ที่มีระดับพลังงานย่อย 4 ระดับพลังงาน ในที่นี้ x คือปริมาณของอลูมิเนียมที่เจือใน GaAs โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0-0.5 สำหรับวัตถุประสงค์หลักของการจำลองแบบนี้คือ การคำนวณฟังก์ชันการแจกแจงพลังงานจลน์ (Kinetic energy distribution function) ของอิเล็กตรอน ณ ระดับพลังงานย่อยทั้ง 4 โดยเน้นการวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน และพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่อัดฉีดเข้าสู่ระบบ ต่อลักษณะฟังก์ชันการแจกแจงพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนดังกล่าว เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์

ประชากรผกผัน (Population inversion) ระหว่างระดับพลังงานย่อยอันดับที่สาม กับระดับพลังงานย่อยอันดับที่สอง (ดูรายละเอียดในหัวข้อ 3.4) จากนั้นจึงนำฟังก์ชันการแจกแจงพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่ได้ไปทำการคำนวณอัตราการเพิ่มพูนแสง (Spectral density of gain) ของหน่วยให้กำเนิดแสงในแหล่งกำเนิดเลเซอร์แบบควอนตัมคาสเคดที่ประกอบด้วยโครงสร้างที่มีระดับพลังงานย่อยทั้งสี่ในลักษณะต่างกัน นอกจากนี้ได้ทำการวิเคราะห์ผลของตัวแปรสถานะที่สำคัญ ๆ ได้แก่อุณหภูมิ และความหนาแน่นของอิเล็กตรอน เป็นต้น ต่อประสิทธิภาพของการให้กำเนิดเลเซอร์ ในแหล่งกำเนิดเลเซอร์แบบควอนตัมคาสเคดนี้

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษา และสร้างแบบจำลองเชิงทฤษฎีการผ่อนคลายพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนในโครงสร้างซึ่งประกอบด้วยสามควอนตัมเวลล์ที่มี 4 ระดับพลังงานย่อย ของระบบสารกึ่งตัวนำ $GaAs/Al_xGa_{1-x}As$ ในหน่วยให้กำเนิดแสงของแหล่งกำเนิดเลเซอร์แบบควอนตัมคาสเคด และทำการคำนวณค่าฟังก์ชันการแจกแจงพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนในแต่ละระดับพลังงานย่อยเหล่านั้น

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน และพลังงานของอิเล็กตรอนที่อัดฉีดเข้าสู่ระบบ ต่อลักษณะฟังก์ชันการแจกแจงพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน

1.2.3 เพื่อคำนวณค่าอัตราการเพิ่มพูนของแสง (Spectral density of gain) ในหน่วยให้กำเนิดแสงของแหล่งกำเนิดเลเซอร์แบบควอนตัมคาสเคด พร้อมทั้งพิจารณาผลของความแตกต่างของมวลยังผล (Effective mass) ของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานย่อยทั้ง 4 ต่อค่าอัตราการเพิ่มพูนของแสงในหน่วยให้กำเนิดแสงของแหล่งกำเนิดเลเซอร์ควอนตัมคาสเคด