บทที่ 5
สรุป และข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาจลนศาสตร์การผ่อนคลายพลังงานของอิเล็กตรอนที่ได้จากการวิเคราะห์ลักษณะฟังก์ชันการแจกแจงพลังงานของอิเล็กตรอน พร้อมทั้งคำนวณหาค่าอัตราการเพิ่มพูนของแสง โดยทำการเปรียบเทียบผลของความหนาแน่นของอิเล็กตรอน อุณหภูมิของระบบ มวลยังผลของอิเล็กตรอน และพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่อัดฉีดเข้าสู่ระบบ ณ ระดับพลังงานย่อย E_4

5.1 สรุป

1. พิจารณาผลของความหนาแน่นของอิเล็กตรอน พบว่าที่ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนต่ำ (n_s=1.92×10^{10} cm^{-2}) จะพบพีคของฟังก์ชันการแจกแจงพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่เกิดจากการกระเจิงระหว่างอิเล็กตรอนกับโฟนอนมีความเด่นชัด แต่เมื่อความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น (n_s=7.68×10^{10} cm^{-2}) จะพบพีคของกระบวนการกระเจิงระหว่างอิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอนมีความเด่นชัดมากขึ้น และพีคมีการแผ่ขยายมากขึ้น โดยเมื่อพิจารณาฟังก์ชันการแจกแจงพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานย่อย E_1 และ E_2 ณ บริเวณสถานะพลังงานจลน์ต่ำ $\varepsilon < \hbar\omega_0$ ดังแสดงในภาพที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าฟังก์ชันการแจกแจงพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนจะมีลักษณะเข้าใกล้การแจกแจงแบบแมกเวลเลี่ยน และมีลักษณะเข้าใกล้มากที่สุดที่ความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูง ซึ่งหมายความว่า อัตราการกระเจิงระหว่างอิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอนมีค่ามาก [14, 20, 21]

2. พิจารณาผลของอุณหภูมิของระบบ พบว่า ณ อุณหภูมิของระบบต่ำ (จำนวนโฟนอนน้อย) อัตราการกระเจิงระหว่างอิเล็กตรอนกับโฟนอนจึงมีค่าต่ำ ทำให้การกระเจิงระหว่างอิเล็กตรอนกับโฟนอนเกิดขึ้นได้หลายครั้ง ลักษณะฟังก์ชันการแจกแจงพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนจึงมีลักษณะไม่สมดุล (Non-equilibrium) [20-21] นั่นคือจะพบพีคของฟังก์ชันการแจกแจงพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่สถานะพลังงานจลน์สูง $\varepsilon > \hbar\omega_0$ และพบว่าที่สถานะพลังงานจลน์ต่ำ $\varepsilon < \hbar\omega_0$ อัตราการกระเจิงระหว่างอิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอนจะเด่นชัดกว่าอัตราการกระเจิงระหว่างอิเล็กตรอนกับโฟนอน โดยสังเกตได้จากลักษณะฟังก์ชันการแจกแจงพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานย่อย E_1 และ E_2 มีลักษณะเข้าใกล้การแจกแจงแบบแมกเวลเลี่ยนดังแสดงในภาพที่ 4.5 แต่เมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้น ทำให้มีจำนวนโฟนอนมากขึ้น อิเล็กตรอนจึงผ่อนคลายพลังงานกับโฟนอนด้วยอัตราการกระเจิงระหว่างอิเล็กตรอนกับโฟนอนที่สูง จึงสรุปได้ว่าอัตราการกระเจิงระหว่างอิเล็กตรอนกับโฟนอนมีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของระบบ

3. พิจารณาลักษณะโครงสร้างที่มีมวลยังผลของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานย่อย E_3 มีค่าแตกต่างกัน พบว่าระบบที่มีมวลยังผลมาก อิเล็กตรอนจะสามารถครอบครองอยู่ในสถานะพลังงานของระดับพลังงานย่อย E_3 ได้มาก เนื่องจากความหนาแน่นสถานะในระดับพลังงานย่อย E_3 มีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่ามวลยังผลของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานย่อย E_3

4. พิจารณาผลของพลังงานจลน์เริ่มต้นของอิเล็กตรอนที่อัดฉีด (Pumping) เข้าสู่ระบบ พบว่าระบบที่ถูกอัดฉีดเข้าไปด้วยอิเล็กตรอนที่มีพลังงานจลน์ต่ำ $\varepsilon < \hbar\omega_0$ การกระเจิงระหว่างอิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอนในระดับพลังงานย่อย E_4 ด้วยกันเองมีความเด่นชัดมากกว่ากรณีที่อิเล็กตรอนมีพลังงานจลน์เริ่มต้นอัดฉีดเข้าสู่ระบบ ซึ่งจะเกิดการกระเจิงระหว่างอิเล็กตรอนกับโฟนอนในระดับพลังงานย่อย E_4 ด้วยกันเอง มากขึ้นตามพลังงานจลน์เริ่มต้นของอิเล็กตรอนที่อัดฉีดเข้าสู่ระบบ

(ในขั้นต่อไปพิจารณาอัตราการเพิ่มพูนของแสง)

5. สำหรับระบบวัสดุที่เป็นแบบพาราโบลิกนั้น จะได้อัตราการเพิ่มพูนของแสงที่บริเวณพลังงานเท่ากับ 155 meV ซึ่งเป็นค่าความแตกต่างของระดับพลังงานย่อย $E_3(0)$ และ $E_2(0)$ (ดังภาพที่ 3.5) โดยอัตราการเพิ่มพูนของแสงมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากอัตราการกระเจิงระหว่างอิเล็กตรอนกับโฟนอนมีค่ามากกว่าอัตราการผ่อนคลายพลังงานของอิเล็กตรอนโดยการให้กำเนิดโฟตอน แต่พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่อัดฉีดเข้าไปที่ระดับพลังงานย่อย E_4 และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมีผลต่ออัตราการเพิ่มพูนของแสงน้อยมาก

6. สำหรับระบบวัสดุที่เป็นแบบนอนพาราโบลิกที่มี $m_3^* = 1.2m_{GaAs}^*$ และ $m_3^* = 1.4m_{GaAs}^*$ จะได้อัตราการเพิ่มพูนของแสงที่บริเวณพลังงานประมาณ 85 meV และ 16 meV ตามลำดับ การที่ได้โฟตอนที่มีค่าพลังงานน้อยลงนั้น เนื่องจากอิเล็กตรอนมาอยู่ที่สถานะพลังงานจลน์สูงขึ้นได้ ดังนั้นในการผ่อนคลายพลังงานจึงให้โฟตอนที่มีค่าพลังงานดังกล่าวออกมา อย่างไรก็ตามยังคงพบพีคของอัตราการเพิ่มพูนของแสงที่บริเวณพลังงานประมาณ 140 meV ซึ่งคาดว่าเป็นการเลื่อนของพีคที่บริเวณพลังงาน 155 meV เป็นผลมาจากการกระเจิงระหว่างอิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอน แต่อัตราการเพิ่มพูนของแสงมีค่าลดลง เพราะมีอิเล็กตรอนบางส่วนไปอยู่ที่สถานะพลังงานจลน์อื่น

7. เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการเพิ่มพูนของแสงที่บริเวณพลังงานประมาณ 85 meV และ 16 meV มีค่าลดลงเช่นเดียวกันกับกรณีของระบบวัสดุที่เป็นแบบพาราโบลิก และมีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่าของพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่อัดฉีดเข้าไปที่ระดับพลังงานย่อย E_4 อีกด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการเพิ่มพูนของแสงจะมีค่าลดลงอย่างมากในระบบที่มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูง เพราะมีอัตราการกระเจิงระหว่างอิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอนสูง จึงทำให้อิเล็กตรอนหนีออกไปจากระบบ

5.2 ข้อเสนอแนะ

ผลการคำนวณที่ได้นำเสนอไปแล้วในบทที่ 4 แสดงให้เห็นว่ารูปแบบเฉพาะของโครงสร้าง (Structural parameters) และลักษณะเฉพาะของวัสดุ (Material parameters) ที่เป็นส่วนประกอบของหน่วยให้กำเนิดแสงในแหล่งกำเนิดเลเซอร์ที่ประกอบด้วย 4 ระดับพลังงานย่อย มีผลต่อสมบัติในการให้กำเนิดแสงของแหล่งกำเนิดเลเซอร์ดังกล่าว จากการศึกษาเชิงทฤษฎีโดยการจำลองแบบในงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าสมบัติความเป็นนอนพาราโบลิก (Non-parabolic effect) ของวัสดุที่นำมาใช้เป็นส่วนประกอบของโครงสร้างในหน่วยให้กำเนิดแสงของแหล่งกำเนิดเลเซอร์ดังกล่าว มีผลต่อประสิทธิภาพของการให้กำเนิดแสง และค่าพลังงานของแสงที่ถูกปลดปล่อยออกมาด้วยความเข้มสูงที่สุดค่อนข้างเด่นชัด [31] นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิสำหรับการใช้งาน รวมถึงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในระบบมีผลต่อการผ่อนคลายพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนในขณะที่มีการให้กำเนิดเลเซอร์เช่นกัน ดังนั้นในการออกแบบโครงสร้างวัสดุเพื่อให้ได้แหล่งกำเนิดเลเซอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องคำนึงถึงตัวแปรดังกล่าวในตอนต้นเหล่านี้ สำหรับพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่ถูกอัดฉีดเข้าสู่ระบบนั้น พบว่ามีผลต่อค่าอัตราการเพิ่มพูนแสงของระบบ หรือประสิทธิภาพของแหล่งกำเนิดเลเซอร์ดังกล่าวนี้น้อยมาก จนไม่มีความจำเป็นที่จะต้องคำนึงในการออกแบบแหล่งกำเนิดเลเซอร์ดังกล่าว