สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย		ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		ค
กิตติกรรมประกาศ		ง
สารบัญตาราง		ช
สารบัญภาพ		ซ
บทที่ 1	บทนำ	1
	1.1 หลักการ และเหตุผล	1
	1.2 วัตถุประสงค์	4
บทที่ 2	แหล่งกำเนิดเลเซอร์แบบควอนตัมคาสเคด	5
	2.1 ประวัติ และความเป็นมาของแหล่งกำเนิดเลเซอร์แบบควอนตัมคาสเคด	5
	2.2 บ่อศักย์แบบสี่เหลี่ยม (Square well potential)	8
บทที่ 3	จลนศาสตร์การผ่อนคลายพลังงานของอิเล็กตรอน	14
	3.1 ฟังก์ชันการแจกแจงพลังงานจลน์ (Kinetic energy distribution function)	14
	3.2 หลักการพื้นฐานของการให้กำเนิดเลเซอร์	16
	3.3 กฎทองของเฟอร์มิ (Fermi's Golden Rule)	19
	3.4 จลนศาสตร์การผ่อนคลายพลังงานของอิเล็กตรอน (Kinetics energy of electron relaxation)	22
	3.5 สมการจลนศาสตร์ภายใต้สถานะคงตัว (Kinetic equation at the steady state)	32
	3.6 อัตราการเพิ่มพูนของแสง (Spectral density of gain)	33
บทที่ 4	ผลการจำลองแบบ และการอภิปรายผล	35
	4.1 ฟังก์ชันการแจกแจงพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน (Kinetic energy distribution function)	35
	4.2 อัตราการเพิ่มพูนของแสง (Spectral density of gain)	45

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุป และข้อเสนอแนะ	52
5.1 สรุป	52
5.3 ข้อเสนอแนะ	54
เอกสารอ้างอิง	55
ภาคผนวก	58
ภาคผนวก ก ค่าพารามิเตอร์ของสารกึ่งตัวนำ GaAs และ $Al_xGa_{1-x}As$	59
ภาคผนวก ข การจำลองแบบ	62
ภาคผนวก ค แผนผังโปรแกรม	69
ภาคผนวก ง ผลงานวิจัยที่นำเสนอต่อสาธารณชน	81
ประวัติผู้เขียน	82

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ ก1	แสดงค่าพารามิเตอร์ของสารกึ่งตัวนำ GaAs	60
ตารางที่ ก2	แสดงค่าพารามิเตอร์ของสารกึ่งตัวนำ $Al_xGa_{1-x}As$	61

สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 2.1	แผนภาพแสดงอิเล็กตรอนเคลื่อนที่อิสระในกล่อง 3 มิติ ขนาด $L_x \cdot L_y \cdot L_z$ โดยที่ $V(x,y,z)=0$ ที่บริเวณในกล่อง และ $V(x,y,z)=\infty$ ที่บริเวณผิวกล่อง และนอกกล่อง	8
ภาพที่ 2.2	แสดงการปลูกผลึกของ GaAs/AlGaAs ที่ L_x และ $L_y >> L_z$	9
ภาพที่ 2.3	(ก) แสดงลักษณะฟังก์ชันคลื่นที่ n=1 และ n=2 ในบ่อศักย์สี่เหลี่ยมกว้าง L_Z ที่มีความสูงของกำแพงศักย์สูงมาก ($V_0 \to \infty$) (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน E_n กับ k_x หรือ k_y	10
ภาพที่ 2.4	แผนภาพแสดงลักษณะแถบพลังงานที่เกิดจากการปลูกฟิล์มของ GaAs สลับกับฟิล์มของ AlGaAs	11
ภาพที่ 2.5	แผนภาพแสดงพื้นที่ในปริภูมิ k (k-space) ที่ใช้ในการคำนวณหาความหนาแน่นสถานะใน 2 มิติ บนระนาบ xy	12
ภาพที่ 2.6	แผนภาพแสดงความหนาแน่นสถานะใน 2 มิติ (-เส้นทึบ) ของโครงสร้างบ่อศักย์ เปรียบเทียบกับความหนาแน่นสถานะใน 3 มิติ (--เส้นประ)	13
ภาพที่ 3.1	แผนภาพแสดงลักษณะฟังก์ชันการแจกแจงแบบเฟอร์มิ-ดิแรก ณ อุณหภูมิ 0, 10, 30, 100 และ 300 K ที่มีระดับพลังงานเฟอร์มิคงตัวที่ $E_F = 10\ meV$ [20]	15
ภาพที่ 3.2	แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบลักษณะฟังก์ชันการแจกแจงแบบเฟอร์มิ-ดิแรก กับ ฟังก์ชันการแจกแจงแบบแมกเวลเลี่ยน ณ อุณหภูมิห้อง [20]	16
ภาพที่ 3.3	แผนภาพแสดงกระบวนการให้กำเนิดแสงของอิเล็กตรอนระหว่างระดับพลังงาน E_1 และ E_2 (ก) การดูดกลืนแสง (ข) การเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง และ (ค) การเปล่งแสงแบบถูกเร้า	17
ภาพที่ 3.4	แผนภาพแสดงการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจากสถานะ E_i ไปยังสถานะ E_f (ก) การดูดกลืนโฟตอนที่มีค่าพลังงาน $\hbar\omega$ (ข) การปลดปล่อยโฟตอนที่มีค่าพลังงาน $\hbar\omega$	21
ภาพที่ 3.5	(ก) แผนภาพแสดงโครงสร้างที่ประกอบด้วยสามบ่อศักย์ ที่มี 4 ระดับพลังงานในแถบความนำไฟฟ้า (ข) แผนภาพแสดงการผ่อนคลายพลังงานของอิเล็กตรอน	23

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 3.6 แผนภาพแสดงกระบวนการกระเจิงของอิเล็กตรอน กับโฟนอน โดยการอนุรักษ์พลังงาน และโมเมนตัม ในระนาบ xy [20] 25

ภาพที่ 3.7 แผนภาพแสดงการกระเจิงระหว่างอิเล็กตรอนที่อยู่ ณ สถานะพลังงาน ε ในระดับพลังงานย่อย E_i กับโฟนอนที่มีพลังงาน $\hbar\omega_0$ ทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนสถานะพลังงานไปยัง ε' ในระดับพลังงานย่อย E_i เดียวกัน 27

ภาพที่ 3.8 แผนภาพแสดงการกระเจิงระหว่างอิเล็กตรอนที่อยู่ ณ สถานะพลังงาน ε กับอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาจากสถานะพลังงานโดยใช้เวลาเฉลี่ย τ_{ee} ในการผ่อนคลายพลังงาน 28

ภาพที่ 3.9 แผนภาพแสดงการที่อิเล็กตรอนหนีออกจากระดับพลังงานย่อย E_1 กับ E_2 ด้วยกระบวนการทันเนลลิ่งโดยอาศัยโฟนอน และกระบวนการเรโซแนนซ์ทันเนลลิ่ง พร้อมทั้งการที่อิเล็กตรอนหนีออกจากระดับพลังงานย่อย E_3 กับ E_4 ด้วยกระบวนการเทอร์มอลไลเซชัน 31

ภาพที่ 4.1 แผนภาพแสดงฟังก์ชันการแจกแจงพลังงานของอิเล็กตรอนที่มีการอัดฉีดอิเล็กตรอน $P_4 = P_0\delta(y-0.6)$ ณ ระดับพลังงานย่อย E_4 ที่อุณหภูมิ $T = 300\,\mathrm{K}$ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน $7.68\times10^{10}\ \mathrm{cm}^{-2}$ และ $m_4^* = m_2^* = m_1^* = m_3^* \cong m_{GaAs}^*$ (ก) ฟังก์ชันการแจกแจงพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนทั้ง 4 ระดับพลังงานย่อย (ข) แผนภาพขยายฟังก์ชันการแจกแจงพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน f_1 และ f_2 36

ภาพที่ 4.2 แผนภาพแสดงฟังก์ชันการแจกแจงพลังงานของอิเล็กตรอน เมื่อ $m_4^* = m_2^* = m_1^* = m_3^* \cong m_{GaAs}^*$ โดยมีการอัดฉีดอิเล็กตรอน $P_4 = P_0\delta(y-0.6)$ ณ ระดับพลังงานย่อย E_4 ที่อุณหภูมิของอิเล็กตรอน $T = 77\,\mathrm{K}$ และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเป็นดังนี้: (ก) $1.92\times10^{10}\ \mathrm{cm}^{-2}$ (ข) $3.84\times10^{10}\ \mathrm{cm}^{-2}$ (ค) $7.68\times10^{10}\ \mathrm{cm}^{-2}$ 37

ภาพที่ 4.3 แผนภาพแสดงฟังก์ชันการแจกแจงพลังงานของอิเล็กตรอน f_1 และ f_2 ณ สถานะพลังงานจลน์ $\varepsilon < \hbar\omega_0$ เมื่อ $m_4^* = m_2^* = m_1^* = m_3^* \cong m_{GaAs}^*$ โดยมีการอัดฉีดอิเล็กตรอน $P_4 = P_0\delta(y-0.6)$ ณ ระดับพลังงานย่อย E_4 ที่อุณหภูมิของอิเล็กตรอน $T = 77\,\mathrm{K}$ และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเป็นดังนี้: (ก) $1.92\times10^{10}\ \mathrm{cm}^{-2}$ (ข) $3.84\times10^{10}\ \mathrm{cm}^{-2}$ (ค) $7.68\times10^{10}\ \mathrm{cm}^{-2}$ 38

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.4 แผนภาพแสดงฟังก์ชันการแจกแจงพลังงานของอิเล็กตรอน ที่ $m_4^* = m_2^* = m_1^* = m_3^* \cong m_{GaAs}^*$ โดยมีการอัดฉีดอิเล็กตรอน $P_4 = P_0\delta(y-0.6)$ ณ ระดับพลังงานย่อย E_4 และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนคงที่ 3.84×10^{10} cm^{-2} ที่อุณหภูมิต่างกัน : (ก) T=10 K (ข) T=20 K (ค) T=77 K (ง) T=300 K (จ) T=420 K 39

ภาพที่ 4.5 แผนภาพแสดงฟังก์ชันการแจกแจงพลังงานของอิเล็กตรอน f_1 และ f_2 ณ สถานะพลังงานจลน์ $\varepsilon < \hbar\omega_0$ เมื่อ $m_4^* = m_2^* = m_1^* = m_3^* \cong m_{GaAs}^*$ โดยมีการอัดฉีดอิเล็กตรอน $P_4 = P_0\delta(y-0.6)$ ณ ระดับพลังงานย่อย E_4 และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนคงที่ 3.84×10^{10} cm^{-2} ที่อุณหภูมิต่างกัน : (ก) T=10 K (ข) T=20 K (ค) T=77 K (ง) T=300 K (จ) T=420 K 40

ภาพที่ 4.6 แผนภาพแสดงฟังก์ชันการแจกแจงพลังงานของอิเล็กตรอน ที่มีการอัดฉีดอิเล็กตรอน $P_4 = P_0\delta(y-0.6)$ ณ ระดับพลังงานย่อย E_4 ที่อุณหภูมิ $T = 300\text{K}$ และความหนาแน่นของอิเล็กตรอน 7.68×10^{10} cm^{-2} เมื่อ $m_4^* = m_2^* = m_1^* \cong m_{GaAs}^*$ และ m_3^* มีค่าเป็นดังนี้ คือ (ก) $m_3^* \cong m_{GaAs}^*$ (ข) $m_3^* \cong 1.2m_{GaAs}^*$ (ค) $m_3^* \cong 1.4m_{GaAs}^*$ 42

ภาพที่ 4.7 แผนภาพแสดงฟังก์ชันการแจกแจงพลังงานของอิเล็กตรอน ที่ $m_4^* = m_2^* = m_1^* = m_3^* \cong m_{GaAs}^*$ ณ อุณหภูมิคงที่ $T = 300\text{K}$ และความหนาแน่นของอิเล็กตรอน 7.68×10^{10} cm^{-2} โดยมีการอัดฉีดอิเล็กตรอน $P_4 = P_0\delta(y-y_{\text{pump.}})$ ณ ระดับพลังงานย่อย E_4 ที่สถานะพลังงานจลน์ดังต่อไปนี้ : (ก) $y_{\text{pump.}} = 0.2$ (ข) $y_{\text{pump.}} = 0.6$ (ค) $y_{\text{pump.}} = 1.4$ (ง) $y_{\text{pump.}} = 1.8$ 43

ภาพที่ 4.8 แสดงผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเพิ่มพูนของแสง ที่ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนต่ำ $n_s = 1.92\times10^{10}\,cm^{-2}$ โดย $P_4 = P_0\delta(y-0.2)$ เมื่อ $m_4^* = m_2^* = m_1^* = m_{GaAs}^*$ และ m_3^* มีค่าเป็นดังนี้ คือ (ก) $m_3^* = m_{GaAs}^*$ (ข) $m_3^* = 1.2m_{GaAs}^*$ (ค) $m_3^* = 1.4m_{GaAs}^*$ 46

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.9 แสดงผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเพิ่มพูนของแสง ที่ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูง $n_s = 7.68\times10^{10}\,\mathrm{cm}^{-2}$ โดย $P_4 = P_0\delta(y-0.2)$ เมื่อ $m_4^* = m_2^* = m_1^* = m_{GaAs}^*$ และ m_3^* มีค่าเป็นดังนี้ คือ (ก) $m_3^* = m_{GaAs}^*$ (ข) $m_3^* = 1.2m_{GaAs}^*$ (ค) $m_3^* = 1.4m_{GaAs}^*$ 47

ภาพที่ 4.10 แผนภาพแสดงผลของพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่อัดฉีดเข้าไปที่ระดับพลังงานย่อย E_4 ต่ออัตราการเพิ่มพูนของแสง ที่ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนต่ำ $n_s = 1.92\times10^{10}\,cm^{-2}$ ณ อุณหภูมิ $T = 20\mathrm{K}$ เมื่อ $m_4^* = m_2^* = m_1^* = m_{GaAs}^*$ และ m_3^* มีค่าเป็นดังนี้ คือ (ก) $m_3^* = m_{GaAs}^*$ (ข) $m_3^* = 1.2m_{GaAs}^*$ (ค) $m_3^* = 1.4m_{GaAs}^*$ 49

ภาพที่ 4.11 แผนภาพแสดงผลของพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่อัดฉีดเข้าไปที่ระดับพลังงานย่อย E_4 ต่ออัตราการเพิ่มพูนของแสง ที่ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูง $n_s = 7.68\times10^{10}\,cm^{-2}$ ณ อุณหภูมิ $T = 20\mathrm{K}$ เมื่อ $m_4^* = m_2^* = m_1^* = m_{GaAs}^*$ และ m_3^* มีค่าเป็นดังนี้ คือ (ก) $m_3^* = m_{GaAs}^*$ (ข) $m_3^* = 1.2m_{GaAs}^*$ (ค) $m_3^* = 1.4m_{GaAs}^*$ 50