

THz 帯量子カスケードレーザの高温動作のための半導体材料

Semiconductor material system for high-temperature THz-QCL operation

情報通信研究機構 安田 浩朗

NICT, Hiroaki Yasuda

E-mail: yasuda@nict.go.jp

現在、テラヘルツ帯量子カスケードレーザ (THz-QCL) の最高動作温度は 200K 程度にとどまり、その向上が課題である。高温時の反転分布減少は熱励起 LO フォノン散乱が原因と考えられ、その抑制に LO フォノンエネルギー E_{LO} の大きい半導体材料系の使用が有効である。一方、材料系の変更により LO フォノンと電子との相互作用に起因するレーザ準位のブロードニング (E_{LO}/ϵ_p に依存。ここで $\epsilon_p^{-1} \equiv (\text{高周波比誘電率 } \epsilon_\infty)^{-1} - (\text{静電比誘電率 } \epsilon_s)^{-1}$) が大きくなると、利得が大幅に減少する。今回、これらの現象を取扱い可能な非平衡グリーン関数法を用いて、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ 系、GaSb/AlGaSb 系 THz-QCL の高温での性能を計算し GaAs 系 THz-QCL と比較した。

まず AlGaAs ウェル系では GaAs ($E_{LO} = 36$ meV) よりも高い AlAs-like の LO フォノンモードが存在し熱励起フォノン散乱が減少するが、ブロードニングの増大及び合金散乱により GaAs 系よりも低い利得しか得られなかった。

次に熱励起フォノン散乱の抑制を断念し、GaAs 系よりもレーザ準位をシャープにすることを試みた。GaSb の E_{LO} は 28.8 meV であるが、 E_{LO}/ϵ_p は GaAs の 0.3 倍になる。まず GaAs 系 3 ウェル THz-QCL 構造を用い、仮想的に E_{LO} のみを GaAs から GaSb の値にすると図 1 に示すように熱励起フォノン散乱が増え利得が減少した。次に ϵ_p も GaSb の値に変えるとブロードニングが減少し、レーザ上準位 3 に存在する電子が増え GaAs 系 QCL よりも大きな利得が得られた。GaSb/AlGaSb 系 3 ウェル構造を設計し (6.1/12.2/3.0/9.8/5.5/20.1 nm, 伝導帯不連続 0.1185 eV, 電界強度 9.8 kV/cm)、LO フォノン引抜き準位差 E_{21} を 40 meV 程度にすると界面粗さが GaAs 系の 2 倍であるとしても 300K で

30 cm^{-1} もの利得が得られた。このように GaSb/AlGaSb 材料系を用いることで THz-QCL の動作温度の大幅な向上が見込まれることが計算により明らかになった。

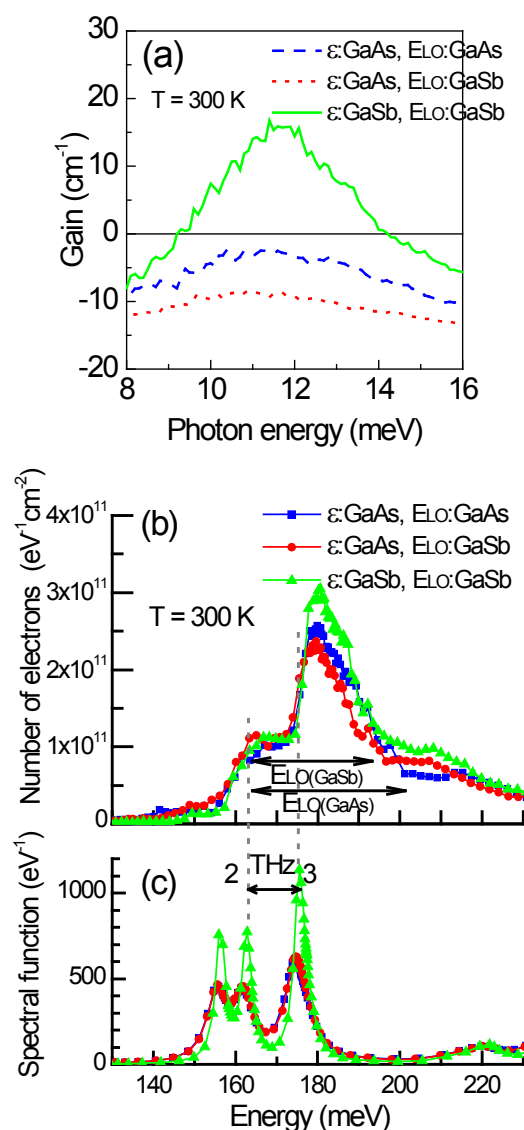


図 1: 3 ウェル構造 (5.1/9.6/2.3/7.3/4.0/15.8 nm, 太字 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 、細字 GaAs、温度 300K、電界強度 12kV/cm) の計算結果。(a) 利得、活性領域における (b) 電子分布と (c) スペクトル関数