

CaF₂/ Si ヘテロ構造を用いた近赤外波長量子カスケードレーザの低電界化に向けた構造提案

Active layer desings for near-infrared wavelength quantum cascade lasers using CaF₂/ Si heterostructure for electric field reduction

東工大工学院 ○ 杉山 裕太、鈴木 飛雄馬、范 志遠、渡辺 正裕

Tokyo Tech, Yuta Sugiyama, Hyuma Suzuki, Zhiyuan Fan, Masahiro Watanabe

E-mail: sugiyama.y.ao@m.titech.ac.jp

【はじめに】 シリコン (Si) 量子井戸中におけるサブバンド間遷移を誘導放出・光増幅の基本原理解とする量子カスケードレーザ (QCL) は、Si 集積回路技術との高い親和性を持ち、シリコンフォトニクス用光源としての可能性を有している。

Si 系 QCL の実現に向けて、本研究では量子井戸障壁材料にフッ化物系絶縁体の CaF₂ を採用している。理由は CaF₂ は Si との格子不整合が 0.6% と小さく、伝導帯不連続 (ΔE_c) が 1 ~ 2.3 eV と大きく、シリコンフォトニクスを意識した近赤外波長をもカバー可能な QCL の設計に有利な材料といえる。[1]

CaF₂/ Si による近赤外波長帯 QCL について、我々は今までに 1.65 μm , 1.70 μm の量子井戸活性層の設計例を電流注入発光特性とともに報告してきた [2, 3]。今回はこれまでの設計に対して、注入層の井戸数を増やすことで低電界化を狙った 1.76 μm の量子井戸活性層の設計例を提案し、反転分布形成の可能性について、サブバンド内・間散乱時間、共鳴トンネル時間の観点から検討を行ったので報告する。

【素子構造・活性層設計】 Fig.1 に電圧印加時の提案する CaF₂/ Si 活性層バンドプロファイル及び遷移に関与する波動関数の確率密度分布を示す。Fig.1 より活性層は、注入層・遷移層・引抜層及び遮断層・緩和層の 4 層・5 領域による 1 周期で構成され、複数周期を積層する構造となっている。そしてこの遷移層の遷移波長は 1.76 μm である。また緩和層の材料は n 型 Si であり、フリーキャリア吸収損失としきい値電流密度のトレードオフを考慮して $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (0.93 nm)

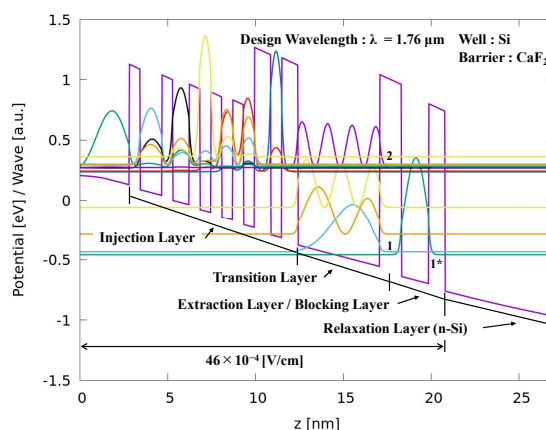


図 1: CaF₂/Si 活性層バンドプロファイル

と $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (8.37 nm) で構成されている。

提案構造は活性層に印加される電界の低電界化をねらっており、提案構造の注入層を 7 つの障壁によって構成させることでこれを達成している。注入には各量子井戸の基底準位を介したトンネル伝導を想定した。先行研究 (設計波長 1.65 μm) の $8.1 \times 10^5 \text{ V/cm}$ に対して、提案構造では、 $4.6 \times 10^5 \text{ V/cm}$ と 57% 程度に低減可能であることが分かった。

【反転分布形成】 Si 量子井戸構造中のフォノン散乱によるサブバンド間散乱 (準位 2 \leftarrow 1), 及び共鳴トンネルのブロードニングを伴う電子引き抜き (準位 1 \leftarrow 1*) を想定し散乱時間 $\tau_{21} \cong \tau_2 = 0.63 \text{ ps}$, $\tau_1 = 0.31 \text{ ps}$ と概算した。以上のことから、反転分布条件 ($\tau_{21} > \tau_1$) を満足しているサブバンド設計であると結論できる。

【参考文献】

- [1] G.Tei et al., Jpn.J.Appl.Phys.**60** SBBE03(2021)
- [2] 鄭他, 春季第 83 回応用物理学会, 22p-P05-1 (2022).
- [3] 斎藤他, 春季第 65 回応用物理学会, 19-P9-2 (2018).