

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理論解析 Analysis of near-infrared wavelength quantum cascade laser using CaF₂/Si heterostructures

東工大工学院 ○鄭 源幸, 大野 綜一郎, 劉 龍, 渡辺 正裕
Tokyo Tech, Gensai Tei, Soichiro Ono, Liu Long, and Masahiro Watanabe
E-mail: tei.g.ab@m.titech.ac.jp

【はじめに】シリコン(Si)量子井戸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。本研究で用いるフッ化物系絶縁体 CaF₂ は、Si と積層エピタキシャル成長が可能で Si との界面における伝導帯バンド不連続(ΔE_c)が大きい(1~2.3[eV])ため、近赤外波長領域までをカバーする量子井戸サブバンドの設計が可能となる。

我々はこれまでに、CaF₂ 単一障壁トンネルダイオードの電流電圧特性や CaF₂/Si 共鳴トンネルダイオードの室温微分負性抵抗特性等の評価から、数原子層厚における CaF₂ と Si の界面の障壁高さ ΔE_c 及び CaF₂ の有効質量の補正の必要性を報告し[1]、その知見を適用して、発光波長 3.4[μm]の量子井戸活性層を設計し、その EL 発光について報告してきた [3]。今回は近赤外領域($\lambda < 2[\mu\text{m}]$)の量子井戸設計とレーザの閾値電流密度の理論解析を行ったので報告する。

【素子構造・準位設計】素子構造の模式図を Fig.1 に示す。CaF₂/Si 活性領域を厚さ 100 [nm]の n-Si 光閉じ込め層(OCL)で挟み、スラブ型導波路を形成する。ここで、OCL は活性領域への電流注入の役割も同時に担っている。活性領域は、注入層・遷移層・引抜層と緩和層からなる。この4つの領域を合わせて1周期とし、複数周期を積層する構造である。Fig.3 に電圧印加時の 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。バンドプロファイル解析にはシュレーディンガー方程式とポアソン方程式を連立する自己無撞着法を用いた。緩和層を除く1周期の膜厚構成は

(0.62/1.24/0.62/2.48/0.62/1.86/0.93/1.55/0.93/0.93

/0.93)[nm](CaF₂/Si)である。この設計例では遷移層における発振波長は 1.70[μm]とした。また、共鳴トンネル電流の概算から、遷移層に供給可能な電流密度を 81.1[kA/cm²]と見積もった。閾値電流密度はこれを下回る必要がある。

【閾値電流密度解析】導波路のモード解析 (Fig.2)、及び、光利得、n-Si のフリーキャリア吸収、及び、伝搬損失等を考慮してレーザ発振に必要な閾値電流密度の計算を行い、周期数 N=25 で 1.31 [kA/cm²]と見積もった。注入層を3つの Si 量子井戸で構成することで印加電界を緩和しつつ、必要な電流密度を確保するサブバンド設計が可能であることがわかった。

【参考文献】

- [1] K.Suda et al., Jpn. J. Appl. Phys. 54 04DJ05 (2015).
- [2] 田辺他, 春季第 63 回応用物理学会, 20a-S223-7 (2016).
- [3] 齋藤他, 春季第 65 回応用物理学会, 19p-P9-2(2018).

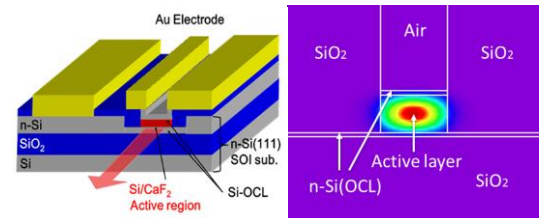


Fig.1 レーザ素子構造模式図

Fig.2 二次元導波路モード解析図

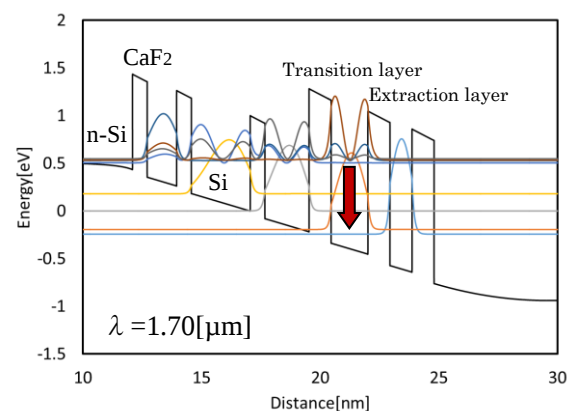


Fig.3 CaF₂/Si 活性層伝導帯バンドプロファイル