

## 「THz 量子カスケードレーザ」

枝村忠孝\*、藤田和上\*、秋草直大\*\*、山西正道\*  
浜松ホトニクス（株）中央研究所\*、開発本部\*\*

## 1. はじめに

量子カスケードレーザ（Quantum Cascade Laser; QCL）は半導体量子井戸中に形成される量子準位（サブバンド）間の光学遷移を利用した中赤外から THz 領域の広い波長範囲をカバーする半導体レーザである。サブバンド間で光増幅が可能であることは GaAs/AlGaAs ダブルヘテロ構造で室温連続発振が達成<sup>1)</sup>された翌年の 1971 年に R.Kazarinov と R.Suris によって示された<sup>2)</sup>。しかしながら超高速で起こる非発光遷移過程との競合が不可避であり、レーザ発振に必要な反転分布を形成することが極めて困難であることから、長らく実現は不可能と考えられていた。ところが 1994 年、J.Faist、F.Capasso らは InGaAs/InAlAs を用いて波長 4.2 $\mu\text{m}$  で初めてレーザ発振に成功し<sup>3)</sup>、これを量子カスケードレーザと名付けた。彼らは共鳴トンネル効果を用いて効率的に発光上位準位に電子を注入し、且つ極性縦光学（LO）フォノン散乱を利用して超高速に発光下位準位から電子を引き抜くことにより実効的な反転分布を実現し、レーザ発振に成功した。当初は液体窒素温度の低温動作に限られていたが、2002 年に J.Faist らにより室温 CW 発振が達成された<sup>4)</sup>。一方、発振波長が LO フォノンのエネルギー以下となるような THz 領域の量子カスケードレーザは 2002 年に波長 4.4THz（ $\sim 68\mu\text{m}$ ）で初めてレーザ発振に成功した<sup>5)</sup>。現在では 2.6 $\mu\text{m}$ <sup>6)</sup>から 1.2THz<sup>7)</sup>という中赤外から THz 領域まで非常に広い波長範囲でレーザ発振が達成されている。特に波長 4 $\sim$ 10 $\mu\text{m}$  の中赤外領域では既に研究開発のフェーズを脱し、図 1 に示すように実用的汎用半導体レーザとして浜松ホトニクスを含む複数のメーカーから販売されており、各種分析装置への実装<sup>8)</sup>も行われている。

## 2. 量子カスケードレーザの特徴

図 2 に典型的な三つのサブバンドからなる量子カスケードレーザの活性領域の伝導帯におけるバンド図を示す。発振波長は E3-E2 で決定され、E2-E1 は電子を高速緩和させるために多くの場合、LO フォノンのエネルギーに共鳴（35 $\sim$ 40meV）するように設計される。このような構造が多段に直列に結合（カスケード結合）して活性層が構成される。通常の pn 接合を利用したレーザダイオードでは電子正孔対の発光再結合によりキャリアは消滅するが、量子カスケードレーザではサブバンド間の電子の発光遷移であるため、理想的には注入電子 1 個当たりカスケード結合の段数分だけ光子を放出するという特徴がある。量子カスケードレーザではサブバンド間の光学遷移を利用することで以下に示すような利点が上げられる。

- 1) 発振波長は材料のバンドギャップに制限されない、同一材料系で中赤外から THz 領域まで設計可能。
- 2) GaAs や InGaAs といったこれまで実績のある材料で実現でき、既存の結晶成長技術およびプロセス、組立技術をそのまま利用できる。
- 3) カスケード結合を利用することで注入電子 1 個当たり複数の光子を放出することが可能であり、高出力動作が期待できる。
- 4) 活性層を構成する材料のバンドギャップよりも遥かに小さいエネルギーの光子を放出