量子カスケードレーザーの実用化研究と室温テラヘルツ光源への展開

Engineering research on Quantum Cascade Lasers and its development to room temperature terahertz semiconductor source

浜松ホトニクス 中央研究所　°藤田 和上

Hamamatsu Photonics Central Research Lab., °Kazuue Fujita

E-mail: kfujita@crl.hpk.co.jp

量子カスケードレーザー(Quantum Cascade Laser: QCL)は量子井戸構造内のサブバンド間遷移を用いた中赤外～テラヘルツ(Terahertz: THz)領域の高性能半導体レーザーである．バンド間遷移を用いて電子と正孔の再結合により光を放出する従来の半導体レーザーとは異なり，QCL より放出されるフォトンのエネルギーは活性層内の量子サブバンド準位構造により決定される．また，各サブバンド準位における電子の散乱時間なども同様に，それら量子構造内の波動関数の状態に依存している．すなわち，QCL ではこれらをデザインすることによりレーザー特性をエンジニアリングし，新たな機能を付加することも可能である．特に，InGaAs/InAlAs/InP 系や GaAs/AlGaAs 系などの材料系において，確立した結晶成長技術やデバイス作製技術を用いることができる場合，レーザー特性はこれら量子構造設計によってほぼ決定される．このため，QCL における開発研究では，数多くの活性層構造の提案および試作が為されてきた．一方，Ⅲ－Ⅴ族半導体中においては，縦光学フォノン散乱を介した高速の非発光緩和過程が存在する．そのため，一般に QCL では反転分布を形成し高い利得係数を得ることは容易ではない．結果として，中赤外 QCL にて室温連続動作が可能な良好なレーザー特性は，限られた活性層構造コンセプトに対してのみ達成されている．本講演ではこれまでに著者らが取り組んできた中赤外 QCL の研究において，半導体量子井戸・超格子構造の波動関数の精密設計による電子伝導・光学遷移状態の工学的な制御を利用し実現したユニークなレーザー特性について紹介する．特に，従来，全く検討されることのなかったレーザー上位準位の波動関数と電子状態を制御した活性層構造である結合二重上位準位構造では，際立った発光波長の広帯域性を有し，温度変化に対して極めて高い安定性のある世界最高性能の QCL の実現に成功した．現在，これらの高性能中赤外 QCL は製品化されるに至っている．

また，結合二重上位準位構造に基づき，QCL 内サブバンド間遷移の極めて高い２次の非線形感受率 $\chi^{(2)}$を利用した室温動作 THz-QCL 光源において，量子準位の共鳴状態と波動関数の精密制御により差周波混合の $\chi^{(2)}$を飛躍的に向上させることができることを見出した．その結果，THz-QCL 光源の大幅な高性能化とともに動作周波数帯域の拡大を達成し，軸モード間隔が均一な超広帯域マルチモード動作の発見などの新機能の付加にも成功した．さらに，長年の QCL 技術における低周波数動作の限界を克服し，サブテラヘルツ帯域での動作に成功して， いわゆる THz ギャップの最深部をカバーする室温動作半導体レーザー光源を実現した．講演では，これら新しい THz 半導体光源について紹介するとともに，今後の展開のために必要な研究開発についても触れる予定である．

© 2023年 応用物理学会