

奨励金No.1580

次世代超高速・大容量無線通信に向けた 室温動作テラヘルツ量子カスケードレーザーの研究

王 利

国立研究開発法人理化学研究所 客員研究員

Development of room-temperature operating terahertz quantum cascade lasers for next-generation wireless communications

Li Wang

RIKEN, Visiting Scientist



小型でコンパクト・高出力動作が可能であるテラヘルツ量子カスケードレーザー（THz-QCL）は各種透視検査、THz-LiDAR、B5G、B6G用の次世代超高速・大容量無線通信の光源として非常に幅広い応用が考えられ、その実用化・社会実装が大変期待されています。しかしTHz-QCLは、これまで低温でしか動作せず、また、レーザー発振周波数範囲が1.2～5 THzに限られているため、社会実装の妨げとなり、まだ十分には普及していません。THz-QCLにとって、「室温動作」と「未開拓周波数の実現」が大きな課題となっております。本研究は、レーザー素子の設計、半導体エピタキシャル成長、および素子作製から、レーザーの動作温度を向上させることを目指します。

The development of next-generation ultrafast wireless communication technologies (beyond 5G, 6G/7G) has become a central competition among nations. In this spectral domain, the data transmission speeds can be 10~100 times faster than 5G. The successful realization of this advancement relies on the availability of a compact THz wave radiation source that can be seamlessly integrated into network infrastructures, especially for frequencies exceeding 2 THz. The quantum cascade lasers show promises. However, the practical deployment of these lasers is still confined in laboratory due to the essential of heavy cooling packages and limited output powers. We aim to achieve micrometer-sized quantum cascade lasers that are capable of operating at room-temperature without any cooling, while deliver a substantial average output power exceeding 10 milliwatts.

1. 研究内容

1.1 非平衡グリーン関数モデルに基づく電子の量子輸送の解明

現在QCLの解析モデルは、主に従来の半導体デバイスでも用いられて来た半古典的手法に依存している。しかし、サブバンド間遷移機構を駆使するQCLは、離散的な量子状態のみを用い各量子状態の寿命が短く（ピコ秒）、複数の散乱過程に非常に敏感である点で独特である。さらに、THz-QCLは電子の非輻射遷移・輸送機構で動作しており、

半古典的手法では正確に反映できない。非平衡グリーン関数法（NEGF）による解析手法は、すべての輻射／非輻射過程を容易にモデル化導入でき物理的なメカニズムを解明する上でも信頼性が高い方法である。当研究では、GaAs系特にGaN系QCLのNEGF法の解析手法を開発し、輻射／非輻射過程・輸送機構を適宜取り込み、THz-QCLにおける信頼の於ける光利得解析手法を構築した。

Non-equilibrium green's function model in THz-QCLs

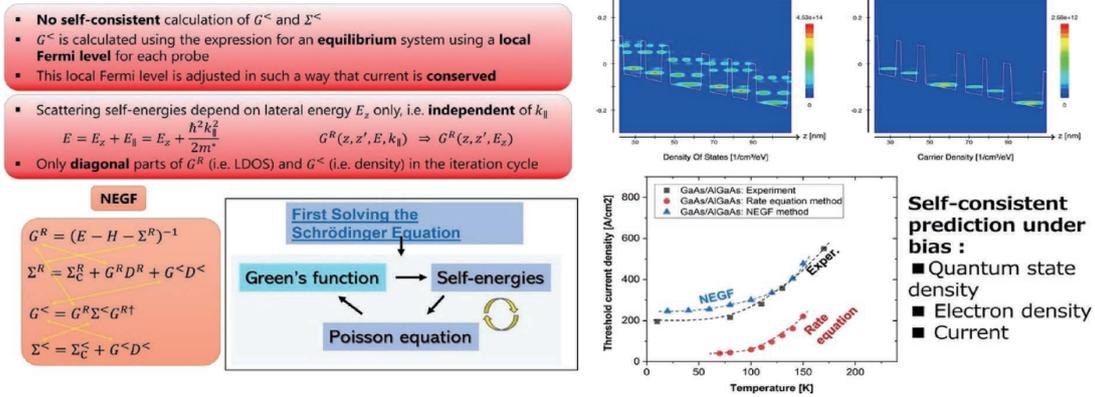


図1. THz-QCLの動作解析に用いた非平衡グリーン関数法（NEGF法）の概念と実験結果との比較例

1.2 高温における光利得低下メカニズムの解明と、 高温動作を可能にする THz-QCL 動作機構

新しいレーザーの設計を「ミニステップ間接注入」型と呼ぶこととする。この概念を図に示す。本研究では、従来まで提案されてきた「共鳴フォノン」型において見られる熱的な劣化プロセスを抑制し、① LO フォノン散乱を用いた発振上位準位への間接注入、②量子状態2と状態3の間における振動子強度の制御、③寄生リーク電流を抑制するためのミニステップ量子井戸構造、といった新しい手法を採用している。その結果、ほとんどの電子が量子状態2に保持され、それによって300 K

においても量子状態2と状態3の間において高い反転分布が維持される。本研究では、分子線エピタキシー（MBE）法を用いて、GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As量子カスケード構造（変形2量子井戸×600周期＝1200層）の高品質成長を達成し、ウェファーボンディング・リフトオフプロセスによる両面金属導波路構造作製、エッチングによるレーザーメサ形成でTHz-QCL共振器構造を作製した。現在、動作温度230 K超までの高温動作に成功している。今後、ドライエッチングによる垂直メサ導波路構造の作製を行えば、予測した350 K程度のレーザー発振が可能と考えられる。

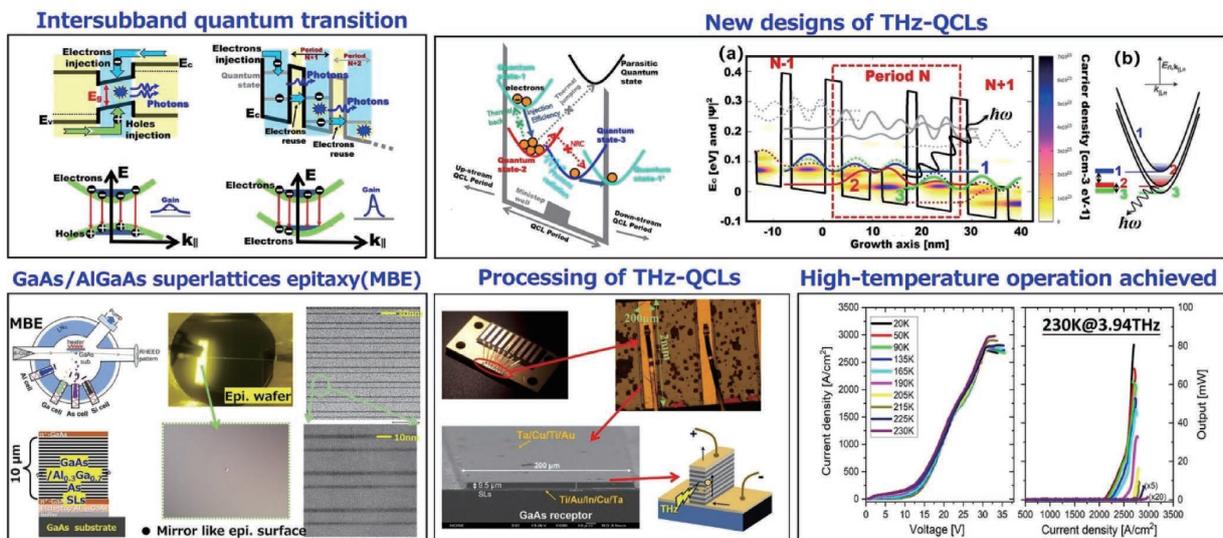


図2. 室温以上の動作温度を可能とする GaAs THz-QCL 構造の提案と作製、230 K レーザー発振の実現

1.3 窒化物 GaN 系未開拓周波数 THz-QCL の研究

THz-QCL の成果は主に GaAs 系半導体で実現されているが、残念ながら 5~12 THz の周波数範囲が未開拓である。これは、従来の III-V 系半導体の Reststrahlen バンドにおける小さな光学フォノン (LO フォノン) エネルギー (~36 meV) が、この THz 発振範囲 (5~12 THz) と重なっているため主に起こる。III 族窒化物半導体は、約 3 倍の大きな LO フォノンエネルギー (~90 meV) を持つため、未開拓周波数 (THz ギャップ) を埋める事が可能である。GaN 系 THz-QCL はまだレーザー発振が実現されていないが、私は、GaN/AlGaN 系の物理的な制限要因を体系的に克服した、新しい「Strain-balanced Step-well」スキームを提案した。その結果、GaN 系 QCL で 1.5~15.5 THz の幅広い領域で室温発振が可能であることが理論計算から示された。GaN 系 THz-QCL の導波路プロセスを実施して試作を行い、9 THz 付近の電流注入発光を実現した。今後、QCL 作製構造を最適化する事により未開拓周波数におけるレーザー発振が可能になると考えられる。

2. 発表（研究成果の発表）

なし