

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔平成30年度研究進捗評価用〕

平成27年度採択分
平成30年3月16日現在

窒化物半導体を用いた未開拓波長量子カスケードレーザの研究
Research on unexplored frequency quantum-cascade lasers
using nitride semiconductors

課題番号：15H05733

平山 秀樹 (HIRAYAMA HIDEKI)

国立研究開発法人理化学研究所・平山量子光素子研究室・主任研究員



研究の概要

本研究では、窒化物半導体を用いて量子カスケードレーザ (Quantum Cascade Laser: QCL) を作製することにより、QCLの未踏周波数であった5~12 THz帯のTHz-QCLを実現する。

また、窒化物半導体の大きなバンド不連続値を用いて、QCL未踏波長領域である波長3μm以下の赤外QCLを実現することを目的とする。

研究分野：総合理工

キーワード：量子カスケードレーザ、窒化物半導体、未開拓波長、サブバンド間遷移

1. 研究開始当初の背景

これまでの量子カスケードレーザ(QCL)では、5~12 THz(テラヘルツ)帯、及び3μm以下の波長の動作は難しかった。

窒化物半導体を用いれば、未踏周波数を含む3~20 THzのテラヘルツ帯ならびに、中赤外の1~8μm帯のQCLの実現が期待される。テラヘルツ光は、各種透視・非破壊検査用の光源として注目され、その応用範囲は、各種セキュリティ検査、火傷診断や癌細胞選別などの医療、電子産業、農業、各種工業、食品検査などと幅広い。また近赤外-中赤外光は、光通信や環境計測を中心に応用範囲が広い。未開拓周波数のQCLが実現すれば、上記の応用分野が飛躍的に拡大することが期待され、我が国の経済発展への寄与が大きい。

2. 研究の目的

本研究では、窒化物半導体を用いることにより、これまで不可能だった未開拓周波数帯のQCLを実現することを目的とする。窒化物半導体のLOフォノン吸収エネルギーはGaAsの約3倍大きく、未踏周波数5~12 THzを含む3~20 THzの動作が可能となる。また、伝導帯のバンド不連続値は最大で1.9eVと大きいため1~8μm帯のQCLが可能となり、QCLの動作範囲を大幅に拡大することができる。未踏のTHz-QCLの室温発振も期待できる。我々は、世界唯一の試みとしてGa系QCLの作製に着手し、最近、世界で初めてのレーザ発振に成功した。本研究では、これまで培ってきた窒化物の高品質成長技術を進化させ、また、独自に見出した「純粹3準位量子構造」と「間接注入機構」を融合させた革新的量子設計を取り入れることにより、上記未開拓領域を含む幅広い範囲のQCL動作を実現することを目標とする。

3. 研究の方法

窒化物半導体QCLに適合する新しい量子構造を導入し、未開拓周波数のQCLを実現する。

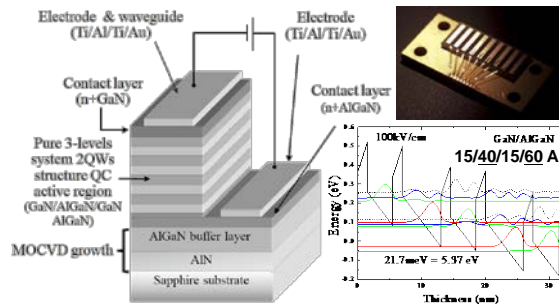


図1 GaN系THz-QCLの構造図

窒化物半導体QCLでは、ピエゾ電界のために縮退が解かれた準位間で発光が起こり、安定した動作が得られない。この問題を解決するために、THz-QCLの量子構造として、無駄な準位を排除した「純粹3準位」機構を導入する。純粹3準位機構を用いたGa系THz-QCLを実現し、動作周波数を3~20 THz領域へと拡大する。また、室温動作も実現する。さらに、高Al組成AlGa系超格子構造を導入し、大きなバンド不連続を用いて、波長が1~8μm帯の赤外QCLの実現を試みる。窒化物半導体の高精密結晶成長は、これまで

培ってきた、分子線エピタキシー (MBE) ならびに有機金属気相成長法 (MOCVD) による結晶成長技術を駆使して行う。

4. これまでの成果

GaN/AlGaIn 系 QCL の動作の高温化と周波数の拡大の研究を進めた。構造は、2 量子井戸、純粋 3 準位型構造を採用しシングルメタル導波路構造を用いた。従来まで、誘導放出発光は 6K 以下の低温でしか観測できなかったが、これまでの研究で 5.8 THz の QCL で最高動作温度 40K までの発振を実現した。また、誘導放出光の偏波面依存性を調査した結果 TM モード光であることが分かり、レーザ共振器からの誘導放出発光であることを明らかにした。

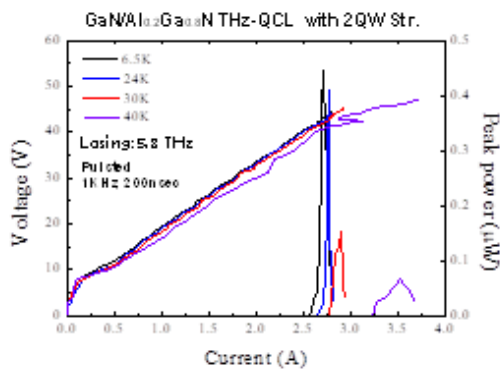


図 2、GaN 系 THz-QCL 動作の温度依存性

GaN 系 QCL の高性能化実現のためには、動作解析による詳細な構造設計は必要不可欠である。本研究では、非平衡グリーン関数法 (NEGF 法) を用いた GaN 系 QCL の光利得の解析を行い、GaN 系 QCL の最適構造の検討を行った。解析では、不確定性原理に基づくレベルブロードニング効果を適切に取り入れるため、電子・LO フォノン散乱、電子・電子散乱、電子・不純物散乱の効果を取り入れ、また、発光の際のレベルブロードニングにおける相関効果を自己整合的に計算に取り入れて光利得を算出した。

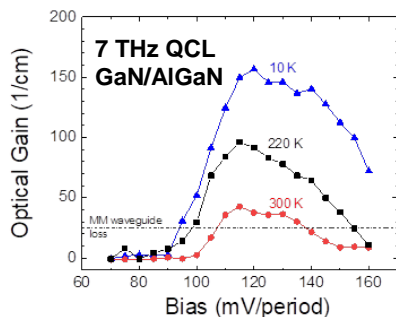


図 3、NEGF 法による GaN 系 QCL 光利得の解析

その結果、7 THz 帯 GaN 系 QCL において、10K で 110 cm^{-1} 以上、室温で 36 cm^{-1} の光利得が算出され、GaN 系 QCL の室温発振が可能であることが示された。

さらに、本研究において用いている、サブファイア基板上に作製したシングルメタル導波路 GaN 系 QCL において、80% 以上の高い光閉じ込め係数と、 30 cm^{-1} 以下の導波路損失が得られることを解析的に示した。また、ダブルメタル導波路 GaN 系 QCL の実現を目指し、Si (シリコン) 基板上に GaN/AlGaIn 系 QCL 構造作製し良好な結晶を実現した。

5. 今後の計画

- ・ 現在、低出力動作しか得られていないので、光閉じ込め係数を高くすることで 1mW 程度の高出力動作を試みる。また、発振周波数の構造依存性から QCL 発振を実証する。
- ・ GaN 系 QCL の最適構造を導入することで、QCL の 40K~室温動作を試みる。
- ・ 発振周波数領域を 5~7 THz から 3~12 THz へ拡大を試みる。
- ・ Si 基板上 GaN 系 QCL を製膜し、基板リフトオフによりダブルメタル導波路 QCL の実現を試みる。
- ・ 1~8 μm 帯 GaN 系 QCL の動作解析を行い、その実現を試みる。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- ・ K. Wang, T. T. Lin, L. Wang, W. Terashima and H. Hirayama: "Controlling loss of waveguides for potential GaN terahertz quantum cascade lasers by tuning the plasma frequency of doped layers", Japanese Journal of Applied Physics, to be published
- ・ W. Terashima and H. Hirayama: "Terahertz frequency emission with novel quantum cascade laser designs", SPIE Newsroom, URL: <http://spie.org/x115009.xml>, August 19, 2015.
- ・ 平山秀樹: "テラヘルツ量子カスケードレーザーの進展", レーザー研究, Vol. 44, No. 8, pp. 520-526, 2016.
- ・ 平山秀樹, 寺嶋亘, 林宗澤, 佐々木美穂: "テラヘルツ量子カスケードレーザーの進展と今後の展望", 応用物理, Vol. 84, No. 10, pp. 918-923, 2015.
- ・ T. T. Lin and H. Hirayama: "Variable Barrier Height AlGaAs/GaAs Quantum Cascade Laser Operating at 3.7 THz", physica status solidi (a), pp. 1700424, 2017.
- ・ B. T. Tran, H. Hirayama, N. Maeda, M. Jo, S. Toyoda and N. Kamata: "Direct growth and controlled coalescence of thick AlN template on micro-circle patterned Si substrate", Scientific Report, Vol. 5, pp. 14734, 2015.

ホームページ等

<http://www.riken.jp/lab/THz-device/>