

1. 評価対象研究課題

(1) 研究課題名：波長・空間選択性に優れた量子カスケード素子の研究

(2) 研究代表者：株式会社東芝 斎藤 真司

(3) 研究期間：令和4年度～令和8年度（予定）

2. 中間評価の実施概要

実施日：令和6年10月29日

場所：TKP秋葉原カンファレンスセンター

評価委員：未来工学研究所 理事長、上席研究員／東京大学 名誉教授

平澤 洽（委員長）

長岡技術科学大学 副学長・教授

井原 郁夫

産業技術総合研究所 上級執行役員

兼 エネルギー・環境領域領域長

小原 春彦

東京科学大学 工学院 電気電子系 教授

梶川 浩太郎

東京農工大学 名誉教授

佐藤 勝昭

国立感染研究所 客員研究員

四ノ宮 成祥

科学技術振興機構 研究開発センター 企画運営室長、フェロー

中山 智弘

量子科学技術研究開発機構 高崎量子技術基盤研究所

先端機能材料研究部長

八巻 徹也

情報通信研究機構 電磁波研究所 総括研究員

山本 真之

（委員長以外は五十音順・敬称略）

### 3. 研究の進捗状況

#### 研究の概要

本研究では、光の波長と伝搬を制御可能なフォトニック結晶 (PC) を利用した、面型量子カスケードレーザ (QCL) ならびに面型量子カスケード検出器 (QCD) の素子を開発し、これらを組み合わせた動作を実現させ、高速・高感度な中赤外域検出を目指す。

#### 進捗状況

主な実施項目に対する進捗は以下の通り。

##### (1) 面型 QCD、QCL の対動作を実現する素子の設計と試作

QCD の受光感度に関して非平衡グリーン関数法シミュレータにて、計算を行い、受光とレーザ発振を同じ波長で行うことが可能である構造が確認できた。試作を行い、設計した活性層の動作特性より計算の検証と試作に対するフィードバックを行い、計算が正しいことが確認できた。結晶成長のシーケンスの適正化を行い、試作により作製した QCD を評価し、その特性を確認した。フォトニック結晶 (PC) を用いることで表面からの受光を可能となることが確認できた。さらに PC による波長・空間選択性を確認できた。感度は  $8\text{mA/W}$  を超える値が得られており、さらに受光感度の波長選択性は半値幅で  $5\text{nm}$  程度が確認できた。

面型量子カスケードレーザの高効率な発光を実現するため、非平衡グリーン関数法を用いた活性層の設計を行い、より設計に近い構造を実現すべく、試験を行っている。PC を高精度に作製するプロセス条件の検討を行い、再成長埋め込み工程を MBE 法 (分子線エピタキシャル法) で行うことで、PC のサイズ縮小、変形、サイズのばらつきを抑えることに成功した。また、MBE 結晶成長における条件を適正化し、ボイドや欠陥が低減できる条件を見出した。

素子評価においては、発熱に影響されない入出力特性の測定として、高電圧でも短パルスを投入できる電源や配線系の検討を行い、 $50\text{ns}$  で駆動できる電源により評価を行うことが可能となった。さらに、接合材料、接合条件から効率的な放熱経路形成の検討を行い、温度  $77\text{K}$  での最大出力は  $3.8\text{W}$  を、 $-28^\circ\text{C}$  にて  $1\text{W}$  を超える光出力を実現した。

##### (2) PC による面型発光／受光制御

PC による面型発光／受光制御について、傾斜構造による受光角制御の設計技術を確立し、 $0\text{--}13^\circ$  で受光角が可変な PC-QCD 試料の作製も完了した。波長可変レーザ光源による評価系も完成し、受光角依存性を評価中である。

MQW 層の実効的吸収係数の向上に関しては、感度スペクトルの計測が完了し、波長選択的な赤外光検出も実証できたが、比較試料 (通常の QCD) を用いた感度評価が未実施で、増強度の算出には至っていない。しかし、中間目標の増強度 3 倍、最終目標の増強度 10 倍は十分に達成可能である。さらに、高感度 EL 測定系の構築

に関しては、既設の赤外分光光度計にロックイン増幅機構を導入することで高感度化を達成した。副次的効果として、同装置を用いることで、波長可変レーザによる評価系を用いる場合よりも簡便かつ広い波長範囲にわたって、赤外光検出感度スペクトルの測定が可能になった。また、低ドーパント濃度 MQW の設計に関しては、QCL シミュレータに遺伝的アルゴリズムを適用し、ドーパント濃度の最適化計算を実施した。この計算結果とレーザ光取出し効率のドーパント濃度依存性の計算結果を突き合せたところ、後者に比べて前者のドーパント濃度依存性が相対的に大きいと、現状より濃度を減少させても、はかばかしい出力の向上が期待できないことが判明した。副次的成果として、SOI ウェハ上にトポロジカル PC を作製して一方通行導波路を実現した。これは、JPSJ に投稿した論文が注目論文に選出されるなど、高評価を得た。

### (3) センシング光学系の試作と試験・評価

既存の QCL と既存の赤外検出器 (HgCdTe, MCT) の組合せで、吸収分光の基礎試験を行える分光分析装置の試作を行った。この分光分析光学系を利用して  $N_2O$  ガスを分光し、QCL 光源の光源性能を検証し、電流・温度に対する出力・波長可変範囲・波長同調に関して定量を完了した。

遠隔ガス検出実証では、実験室環境下において、遠隔距離 3m 程度で濃度 100ppm レベルの  $N_2O$  分子をハードターゲットからの反射光を分光し、確実に  $N_2O$  分子を検出できることを示した。

$N_2O$  分子からの光熱変換信号検出試験では、100 $\mu$ Pa 未満の音圧変化を十分に検知できることが実証された。既存の QCL 出力 40mW を、 $N_2O$  分子を含む混合ガスに照射して、最小で 10 $\mu$ Pa 程度までの音圧変化があることを確認した。

## 4. 中間評価の評点

A 進捗は順調であり、研究計画に沿って進めてよい。
---------------------------

## 5. 総合コメント

新規テーマにチャレンジする研究であり、所期の設定目標に対する計画に沿っており、フォトニック結晶を用いた検出素子 (QCD の高性能化) に係る進捗は順調であると評価できる。

本デバイスは多くの応用が期待されるため、今後は  $N_2O$  検出以外のキラーアプリケーションの基礎となる点を探するなど、開発目標を見据えて将来的に意味のある研究にチャレンジすることを期待する。また、研究開発が行き着く先 (アプリケーション) が描きにくいと、熟考いただきたい。

## 6. 主な個別コメント

- ・ 所期の計画に沿って着実に研究が進められており、特段の大きな問題は無いと考える。研究成果の産業界、実社会への波及効果も期待される。
- ・ 研究は順調に進んでいる。応用分野などを十分に検討して社会実装できるようなところまで進めていただきたい。
- ・ フォトニック結晶を用いた検出素子の開発で優れた研究成果が出ている。レーザーの開発など基礎的な研究にも取り組んでおり、今後の成果に期待できる。
- ・ 総合的企業でないと取り組めない技術領域である。開発目標を見据え、将来的に意味のある研究にチャレンジしていただきたい。
- ・ 中間評価時として進捗は十分である。量子カスケード素子の応用、システム化に係る原理検証を着実に進めてほしい。
- ・ 応用先（アプリケーション）を見つけるために積極的な成果発信を期待する。
- ・ 装置の故障、廃止に係る懸念点に確実に対処いただきたい。