

氏名	小澤 桂介
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	博 1 2 0 8 号
学位授与の日付	令和 8 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科 電子システム工学専攻
学位論文題目	導波モード共鳴を用いた発散光再帰反射の応用に関する研究
審査委員	(主査) 教授 栗辻 安浩 教授 上田 哲也 教授 山下 兼一 助教 井上 純一 京都工芸繊維大学名誉教授 裏 升吾

論文内容の要旨

本論文は、導波モード共鳴(GMR)を用いた発散光再帰反射の応用に関する課題を明らかとし、その解決策を模索した研究の成果をまとめたものである。応用可能性検証のケーススタディとして、発散光再帰反射 GMR 素子を半導体光増幅器(SOA)と近接対向して構築される、超小型外部共振器型半導体レーザを取り上げている。

第 2 章では、GMR により発散空間光を再帰反射する基本構造およびその反射効率について議論し、効率改善のための新規構造を考案、検討している。まず、基本構造に基づいてデバイスを設計、試作、評価し、実用化に向けた課題を明らかとしている。基本構造は、反射性基板上に光バッファ層を介して導波コア層を形成し、導波路共振器と集光グレーティングカップラを集積する構成であるが、高い開口数の集光グレーティングカップラを利用するケースでは、光バッファ層の存在が再帰反射率の低下を誘引することを明らかにした。そこで、再帰反射率を改善する方法として、光バッファ層を排除しブロッホ表面波を利用する新規構造を考案している。今回の応用を対象として具体設計を行い、導波光を利用する基本構造の場合と比較して、再帰反射率が 11% ほど改善されることを示している。

第 3 章では空間発散光が GMR 素子に斜めに入射する場合について考察している。GMR 素子を SOA に近接対向させる場合、SOA からの出射光が端面法線から傾斜しているため、GMR 素子には斜めに発散光が入射することになる。高効率の再帰反射を得るためには入射光電界の振幅分布とグレーティングカップラの結合係数分布を一致させることが肝要となる。本章では、結合強度の空間分布が、光バッファ層厚に著しく依存することを明らかにし、その結果、再帰反射率が 0~60%の値を取り得ることを、数値シミュレーションにより示し、最適設計の重要性を議論している。

第 4 章では、前章までの考察を踏まえて、超小型外部共振器型半導体レーザを構成する GMR 素子を設計している。斜入射に加えて、SOA の偏波方向を考慮し TM 偏光の入射を想定してい

る。試作デバイスでは導波路共振器を導波型の分布ブラッグ反射器で形成するが、一括して一工程リソグラフィでグレーティングを作製することを検討している。その場合、通常の1次元の周期構造では集光グレーティングカップラの結合係数が大きくなり過ぎるため、2次元の周期構造を検討している。また、TM 導波モードを利用するが、解析的な設計では無視できない誤差を含むため、数値シミュレーションを併用しながら具体設計を行っている。

第5章では、前章で設計した素子の作製し、特性評価を行った結果についてまとめている。グレーティングパターン形成には電子ビームリソグラフィを、チャンネル構造形成にはフォトリソグラフィを用いている。光学実験を行い、25%の再帰反射率を確認している。続けて、作製した素子を実際に SOA と近接対向させてレーザ共振器を構築している。電流-光出力特性がレーザ発振に典型的なリニアな挙動を示していることと、その発振ピーク波長が GMR 波長と一致していることを確認し、発散光再帰反射 GMR によるレーザ発振を実証している。加えて SOA と提案デバイス間のアライメントトレランスの測定結果について述べている。

第6章では、波光抽出機能について理論的・実験的に検討している。まず、具体構成を提案し、再帰反射率・鏡面反射率・導波光抽出率を理論的に導出している。続けてこれらをファブリペロレーザの解析モデルに組み込み、検討している超小型レーザの導波光出力特性を予測している。さらに、導波光抽出用に設計した提案デバイスと SOA を組み合わせてレーザ発振・導波光抽出実験を行い、GMR によるレーザ発振と導波光の抽出が同時に得られていることと、導波光出力特性が理論計算と合致することを示している。

第7章では、以上の研究で得られた成果を総括し、今後の課題と共に GMR を用いた再帰反射のレーザ応用への可能性を示している。

論文審査の結果の要旨

導波モード共鳴(GMR)は、薄膜型光導波路の表面に波長以下の周期のグレーティングを設けることで、放射モードと導波モードが結合して生じる共鳴現象であり、空間光に対して特異な反射/透過スペクトルが発現する。また、導波路構造によってそのスペクトルを自在に設計可能であるため、さまざまな光学デバイスへの応用が注目されている。さらにグレーティングパターンを変形することで平面波以外の入射光に対しても GMR の発現が可能となる。最近、発散光を集光再帰反射する GMR が考案された。本研究では、その応用可能性を理論的・実験的に検証している。具体的な応用先として、次世代波長多重光インターコネクトシステムの中核デバイスとして期待される超小型外部共振器型半導体レーザを取り上げている。本論文の成果は次のように要約される。

1)空間発散光を数十ミクロン径で再帰反射する微小 GMR 素子を設計、作製、特性評価し、再帰反射率を改善するための課題を明らかにし、一つの解決策を提案している。

2)超小型外部共振器半導体レーザを構成するための、具体仕様を検討、考案している。GMR 素子に近接して配する半導体光増幅器を入手し、その光学特性に基づき、GMR 素子を設計している。将来の生産性を考慮して、2次元周期構造を有する集光グレーティングカップラを考案し、再帰反射特性を数値シミュレーションしながら設計している。

3)電子ビーム直接描画リソグラフィおよびフォトリソグラフィを用いて素子を作製し、半導体光増幅器に近接対向させてレーザ発振特性を検証している。電流-光出力特性および出力光のスペクトルを測定し、レーザ発振を確認している。また、実用化の上で重要となる実装許容誤差も実験的に評価している。

4)波長多重素子へ応用する際の基本特性として、導波光抽出機能を詳細に検討している。導波光形態でのレーザ出力特性を予測する理論モデルを構築し、出力最大化のための最適構造を検討している。また、レーザ発振・導波光抽出実験を行い、その出力特性が理論モデルと合致することを確認している。

このように、本論文は、新規に考案された GMR 素子の有用性について、次世代光電融合システムの中核デバイスへの応用を念頭に、理論的、実験的に検討し、実用化に関する多くの知見を明らかにし、その応用可能性を示したものである。

本論文は、レフェリー制度の確立した以下の2編の学術論文を基礎としている。

[1] Keisuke Ozawa, Junichi Inoue, Kenji Kintaka, and Shogo Ura, “Bloch-surface-wave resonance in a cavity resonator for focusing retroreflection,” *Optics Letters*, Vol. 49(15), pp. 4142-4145, 2024.

[2] Keisuke Ozawa, Aika Taniguchi, Ryohei Ueda, Shunsuke Teranishi, Akari Watanabe, and Junichi Inoue, “Integrated Photonic Device for Wavelength-Stable Laser Oscillation and Simultaneous Input Coupling,” *IEEE Photonics Journal*, Vol. 15(1), pp. 1-6, 2023.

以上から、本論文の内容は十分な新規性と独創性、工学的な意義があり、博士論文として優秀であると審査員全員が認めた。