

氏 名	わたなべ あかり 渡邊 明理
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	博 1 1 3 6 号
学位授与の日付	令和 6 年 9 月 25 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	共振器集積導波モード共鳴ミラーを用いた光回路表面実装レーザに関する研究
審 査 委 員	(主査)教授 裏 升吾 教授 栗辻 安浩 教授 山下 兼一 教授 山雄 健史 助教 井上 純一

論文内容の要旨

光回路への光源実装形態として、垂直共振器面発光レーザ (VCSEL) を表面実装する方法が模索されている。共振器集積導波モード共鳴ミラー (CRIGM) は、高反射性基板上の一对の分布ブラッグ反射器 (DBR) による導波路共振器と、その内部に集積されたグレーティングカップラ (GC) から構成され、空間光に対して共鳴波長で疑似的な反射位相不定性を示す。CRIGM をレーザの外部ミラーとして用いれば、共振器長変動による発振波長変化を抑制することが期待できる。また、共鳴導波モードを一部取り出すことで、結合器として機能させることもできる。しかしながら、これまで実証されてきた CRIGM の反射率は、ガウシアンビーム入射光に対して 20%程度であった。本論文では、高い反射率を実現する表面実装レーザ用 CRIGM の設計と実証実験について記述している。また、CRIGM を外部ミラーとしたレーザ発振および発振波長抑制効果の検証を行なっている。さらに、CRIGM の波長多重光源への適用可能性について論述している。

第 2 章では、反射光がガウシアンビームとなる CRIGM の設計について記述している。反射光に光強度分布を与えるため GC の結合係数を分布させる。結合係数分布の手法として、グレーティングの屈折率境界位置をずらす方法と、グレーティング凸部の占有割合 (フィルファクタ) を変化させる方法を検討している。結合係数や屈折率境界の位置、フィルファクタの分布を変化させることをアポダイゼーションと呼んでいる。ビーム径 $7.2\ \mu\text{m}$ のガウシアンビーム入射光に対して共鳴波長 $1050\ \text{nm}$ の CRIGM を設計し、二次元の有限差分時間領域法によってシミュレーションを行なっている。反射光分布は、ユニフォームな結合係数の CRIGM ではガウシアン分布と大きく異なること、フィルファクタアポダイズド CRIGM および屈折率境界位置アポダイズド CRIGM ではガウシアンビームとの一致率が高まることが予測され、GC のアポダイゼーションの有用性が示されている。一方で、クラッドモードが発生していること、反射ガウシアンビームにサイドローブが生じていることをシミュレーションにより突き止めている。

第 3 章では、クラッドモードの発生による損失は、GC/DBR 境界での不連続な実効屈折率の変化に起因すると考察し、アポダイズド DBR 領域を設けることで実効屈折率の平滑化を狙っている。また、反射ガウシアンビームのサイドローブは、ビームウェスト外での反射光とガウシアン

ビームとの不一致が原因と考察し、ビームウェストが GC 開口サイズであった従来の CRIGM からの再設計を行なっている。GC 長とチャンネル幅の二次元方向で GC 開口サイズを最適化し、表面実装レーザ用 CRIGM を設計している。解析計算により反射光のガウシアンビームとの一致率が、それぞれ 0.99、0.92 となることが予測されている。

第 4 章では、表面実装レーザ用 CRIGM を作製し、特性評価を行なっている。グレーティングパターンは電子ビームリソグラフィにて作製しており、高フィルファクタ実現のための条件出しについて詳述している。また、反射位相およびガウシアン反射率を測定する光学系の構築について述べている。反射位相が共鳴波長付近で約 2π の変化することを確認している。共鳴波長での表面実装レーザ用 CRIGM とユニフォーム CRIGM の反射率は、ガウシアン径 $7.2\ \mu\text{m}$ 用 CRIGM で 75%と 45%、ガウシアン径 $3.6\ \mu\text{m}$ 用 CRIGM で 90%と 80%を示しており、反射率の改善が実証されている。

第 5 章では、CRIGM を外部ミラーとしたレーザ発振を実証し、発振波長変化抑制効果の検証を行なっている。VCSEL の片側ミラーを取り外した Half-VCSEL と CRIGM を対向させ、垂直外部共振器型面発光レーザ (VECSEL) を構成している。Half-VCSEL には、電気配線が不要で位置合わせが容易な光励起半導体レーザのゲインミラーを使用し、CRIGM には第 4 章で作成した表面実装レーザ用 CRIGM を使用している。実装トレランス評価のため、ナノメートルの精度でレーザ共振器長変化特性を測定可能な光学系を構築している。多層膜ミラーを外部ミラーとした VECSEL では、発振波長が共振器長に対して線形に変化する様子を確認している。CRIGM を外部ミラーとした VECSEL では、発振波長が共鳴波長付近で固定化している様子を確認している。

第 6 章では、CRIGM の波長多重光源への適用可能性について論述している。複数の CRIGM をカスケード接続させ、各 CRIGM の上部に Half-VCSEL を集積させレーザアレイを構成する。導波光は他の波長で動作する CRIGM 中を伝搬させる必要がある。挿入損失の原因となる DBR 領域での反射と GC 領域での放射を低減させる構造を設計している。4 波長多重で波長間隔を $20\ \text{nm}$ としたときの各 CRIGM の特性について見積もりを行っており、全ての波長において挿入損失が $1\ \text{dB}$ 未満となることを予測している。

論文審査の結果の要旨

集積光回路は基板上光導波路に光学素子を集積したもので、バルク光学システムに比して、高効率で光制御が可能となり、光ファイバ通信システムや光センサシステムの重要な構成要素となっている。しかしながら、光回路基板と半導体レーザは異なる材料で構成されるため、半導体レーザの集積化が常に実用化の大きな課題となっている。モノリシック集積、異種基板接合集積、ハイブリッド集積などが、用途に応じて、研究開発されている。本論文では、実用化が最も容易なハイブリッド集積の中で、半導体レーザの集積位置や 2 次元配列の自由度および結合パラメータ（結合方向、波長特性、偏光特性、開口数整合など）の自由度に優れる表面実装法として、導波モード共鳴現象を導入した全く新規な実装法の可能性を理論的および実験的に検証している。まず、提案手法の基盤となる共振器集積導波モード共鳴ミラーを、理論、数値シミュレーションに

基づき具体設計し、高精度成膜技術、微細加工技術を駆使して素子を作製し、独自の評価光学系を構築し、基本特性を実証している。さらに、半導体光増幅器と組み合わせる垂直共振器型表面実装レーザの評価光学系を構築し、実際にレーザ発振を実証し、レーザ発振スペクトルが光回路に集積した共鳴ミラーの共振波長で制御できることを示している。

これらの成果は、集積光回路が提唱されてから半世紀に渡り大きな課題となっていた光源集積に関して、画期的な新方式の可能性を示すものである。今後の光回路集積技術およびデバイスの普及におおきく貢献できることが期待できる。

本論文は、レフェリー制度の確立した以下の4編の学術論文を基礎としている。

- [1] A. Watanabe, K. Ozawa, R. Ueda, J. Inoue, K. Kintaka, and S. Ura, “An apodization method for guided-mode resonance grating with waveguide cavity,” *Japanese Journal of Applied Physics*, **61**, SK1008 (2022).
- [2] A. Watanabe, K. Ozawa, S. Teranishi, A. Taniguchi, J. Inoue, K. Kintaka, and S. Ura, “Demonstration of small-aperture cavity-resonator-integrated guided-mode resonance mirror with grating apodization for vertical-external-cavity surface-mounted laser,” *Proceedings on 11th IEEE CPMT Symposium Japan*, pp. 164-167, (2022).
- [3] A. Watanabe, K. Ozawa, S. Teranishi, A. Taniguchi, J. Inoue, K. Kintaka, and S. Ura, “Reflection characteristics of a cavity-resonator-integrated guided-mode resonance mirror for a microdiameter Gaussian beam,” *Applied Optics*, **62**, pp. 3496-3501 (2023).
- [4] A. Watanabe, S. Teranishi, K. Ozawa, A. Taniguchi, J. Inoue, K. Kintaka, and S. Ura, “Cavity-resonator-integrated guided-mode-resonance mirrors for hybrid integration of wavelength-multiplexed light source,” *Proceedings on 73rd Electronic Components and Technology Conference*, pp. 761-766 (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。