

| | |
|----------|------------------------------------|
| 氏名 | 井上 純一 |
| 学位(専攻分野) | 博士(工学) |
| 学位記番号 | 博甲第692号 |
| 学位授与の日付 | 平成26年3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 設計工学専攻 |
| 学位論文題目 | 共振器集積による導波モード共鳴素子の開口微小化に関する研究 |
| 審査委員 | (主査)教授 裏 升吾 教授 武田 実 准教授 栗辻安浩 |

論文内容の要旨

導波モード共鳴 (GMR) 素子は、基板上に薄膜導波路とサブ波長グレーティングを集積して構成され、空間光入射に対して狭帯域な反射スペクトルを示す。表面加工で作製できる利点があるが、数百 μm サイズの大きな素子開口を必要とする。したがって、導波路レーザやファイバレーザの波長選択共振ミラーなどへ応用する際、ビーム拡大光学系を必要としていた。しかしながら、光学システムの省スペース化、コスト削減、安定性向上のためには、光導波路や光ファイバと励起用半導体レーザとをレンズレスで結合することが望ましく、開口サイズの微小化が求められる。本論文では、GMR 素子開口の微小化を目指し、分布ブラッグ反射器 (DBR) ペアから成る導波路共振器を集積した共振器集積導波モード共鳴フィルタ (CRIGF) の提案、実証について記述している。また提案素子の特性の解明と応用の検討を行っている。

第2章では、CRIGFの基本構成と動作原理について述べた後、位相調整ギャップの設計アルゴリズムについて述べている。設計例を示し、有限差分時間領域 (FDTD) 法によるシミュレーションを行い、波長選択フィルタ機能を予測している。また、モード結合理論に基づいた CRIGF の特性解析モデルを検討し、FDTD シミュレーション結果との比較によってその有効性を示している。またモード結合理論の適用は FDTD 法に比較して計算時間を3桁以上短縮できることを実証している。

第3章では、波長 846 nm と 1540 nm をそれぞれ共鳴波長とする CRIGF の設計例を示し、第2章で構築した解析手法を用いて、反射・透過スペクトルの理論予測を行っている。また開口サイズと反射スペクトルの狭帯域性との関係について考察している。次に、試料の作製、反射スペクトル測定光学系について検討している。50 μm の開口サイズの CRIGF を実証している。

第4章では、CRIGF のチャネル導波路への集積を検討している。2次元的な開口微小化に伴い、発散導波光の波面湾曲により DBR 反射率が低下し、結果的に CRIGF の反射率が低下する問題がある。チャネル導波路作製における工程の複雑化を防ぐために、リッジ導波路を採用し、リッジ

構造とグレーティングを同じ高さとしてパターンの一括形成を可能としている。共鳴波長 850 nm 帯のチャネル導波路型 CRIGF を作製し、開口サイズ 10 μm の試料において最大反射率 30%、半値全幅 0.4 nm の狭帯域反射特性を確認している。

第 5 章では、シングルモード光ファイバと CRIGF の直接結合について述べている。光ファイバとの直接結合における CRIGF の機能を実証するために、モードフィールド直径が 11 μm のファイバ光入射を想定してチャネル導波路型 CRIGF を設計、作製している。波長 1540 nm 帯の空間光入射およびファイバ導波光入射を行い、それぞれに対しての CRIGF の反射スペクトルを測定し、ファイバ導波光入射においては空間光入射の場合と同様に約 60% の最大反射率を示している。

第 6 章では、CRIGF の反射位相について議論している。まず CRIGF 反射率の波長依存性および FDTD シミュレーションから、CRIGF の反射位相の波長依存性を考察している。作製した CRIGF の反射位相の波長依存性を測定するために、専用の測定光学系を設計、構築し、共鳴波長近傍での約 2π の反射位相シフトを実験的に確認している。

第 7 章では、垂直共振器型面発光レーザの発振波長制御を目指し、急峻な反射位相変化と高反射率特性とを兼ね備えたミラーとして、CRIGF と金属ミラーとを光バッファ層を介して組み合わせた共振器集積導波モード共鳴ミラー (CRIGM) を提案している。CRIGM の基本構成と動作の予測を示した後、設計例を示している。専用光学系を設計、構築し、共鳴波長近傍にて約 2π の反射位相シフトを確認している。また反射位相の光バッファ層厚依存性も確認している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、導波モード共鳴 (GMR) 素子の開口微小化のために導波路共振器の集積を提案し、理論解析法の開発、理論設計による性能予測、作製技術開発、素子の試作、特性評価について記述している。微小開口の波長フィルタの実現は、超小型光励起固体レーザシステムの開発などに大きく寄与することが期待される。

また、GMR に特徴的な Fano 効果に基づく位相変化についても、提案した共振器集積タイプにおいてその効果が発現することを、理論的、実験的に検討、実証している。さらに、その位相変化の応用として垂直共振器型面発光レーザの新たな波長制御手法の可能性を示唆し、その実現のために GMR 素子と金属反射ミラーを組み合わせた新規素子を提案し、基本特性を実証している。この提案手法は、光回路実装技術の革新を促すほどのポテンシャルを有しており、その先駆的研究は高く評価できる。

本論文は、レフェリー制度の確立した以下の 7 編の学術論文を基礎としている。

1. [J. Inoue](#), T. Majima, K. Hatanaka, K. Kintaka, K. Nishio, Y. Awatsuji, and S. Ura, "Aperture miniaturization of guided-mode resonance filter by cavity resonator integration," *Appl. Phys. Express*, **5**, paper 022201 (2012).

2. K. Kintaka, T. Majima, J. Inoue, K. Hatanaka, J. Nishii, and S. Ura, “Cavity-resonator-integrated guided-mode resonance filter for aperture miniaturization,” *Opt. Express*, **20**, pp. 1444-1449 (2012).
3. J. Inoue, T. Ogura, K. Hatanaka, K. Kintaka, K. Nishio, Y. Awatsuji, and S. Ura, “Cavity-resonator-integrated guided-mode resonance filter in channel waveguide,” *IEICE Electron. Express*, **10**, paper 20130444 (2013).
4. J. Inoue, K. Hatanaka, Y. Iwata, K. Kintaka, K. Nishio, Y. Awatsuji, and S. Ura, “Direct coupling of cavity-resonator-integrated guided-mode resonance filter to a single-mode optical fiber,” *Tech. Dig. IEEE CPMT Sympo. Japan 2013*, paper 7-4 (4 pages), 2013.
5. J. Inoue, T. Ogura, K. Hatanaka, K. Kintaka, K. Nishio, Y. Awatsuji, and S. Ura, “Cavity-resonator-integrated guided-mode resonance filter with reflection phase variation,” *Tech. Dig. IEEE CPMT Sympo. Japan 2012*, paper 9-4 (4 pages), 2012.
6. S. Ura, K. Kintaka, J. Inoue, T. Ogura, K. Nishio, and Y. Awatsuji, “Reflection-phase variation of cavity-resonator-integrated guided-mode-resonance reflector for guided-mode-exciting surface laser mirror,” *Proc. 63rd Electron. Compo. Technol. Conf.*, pp.1874-1879, 2013.
7. J. Inoue, T. Ogura, T. Kondo, K. Kintaka, K. Nishio, Y. Awatsuji, and S. Ura, “Reflection characteristics of cavity-resonator-integrated guided-mode resonance mirror,” *Tech. Dig. 10th Conf. Lasers Electro-Opt. Pacific Rim*, paper WL3-4 (2 pages), 2013.

以上から、本論文の内容は十分な新規性と独創性、さらには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。