

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 4 月 28 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420331

研究課題名(和文) 面発光レーザーの表面実装に関する研究

研究課題名(英文) Research on surface-mount packaging of surface-emitting laser

研究代表者

金高 健二 (KINTAKA, Kenji)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・無機機能材料研究部門・主任研究員

研究者番号：50356911

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：表面実装用光学素子として、導波モード共鳴フィルタ(GMRF)を分布ブラッグ反射器ペアで構成する光導波路共振器内に集積した、共振器集積導波モード共鳴フィルタ(CRIGF)を理論的・実験的に検討した。数ミクロン開口のCRIGF、共振器の位置制御で光学特性も制御可能であること、構造制御によりCRIGFが導波光結合器としても動作可能なことを実証した。CRIGFをミラー上に集積した新規素子を検討し、ノッチフィルタ特性を示す構造を実験的に明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Guided-mode resonance (GMR) devices were investigated as a novel kind of optical devices for optical packaging in intra-board optical interconnect. A cavity-resonator-integrated guided-mode resonance filter (CRIGF) is a new type of GMR filter, and consists of a grating coupler and a pair of distributed Bragg reflectors (DBRs) on a transparent substrate. We demonstrated a CRIGF with a micrometer-size aperture, and grating-position-shifted CRIGFs for narrower-band wavelength filter. We also demonstrated narrow-band high-reflection with guided-wave launching at the same time by using a CRIGF with a shortening DBR length. A CRIGF integrated on a high-reflection substrate was proposed, and a narrowband notch filtering was demonstrated.

研究分野：光波工学

キーワード：光集積回路 光導波路 導波モード共鳴 グレーティング 光共振器 波長フィルタ ミラー

### 1. 研究開始当初の背景

現在のユビキタスかつ持続可能な社会を維持・継続・進展させるためには情報処理システム・デバイスの高性能化が必須である。一方、その高性能化には低電力消費であることに強い社会的要請がある。次世代型情報処理システムとして、複数の情報処理チップを集積したシステムの開発が急ピッチで進められているが、システムの高性能化・低消費電力化のためには、チップ間の大容量信号接続法が重要であり、高周波化と高密度化に比例して消費電力が増加する電気配線に代わり、周波数に依存せず高密度化により低消費電力化が図れる光配線が期待されている。

光配線の光源には垂直共振器型面発光レーザ (VCSEL) が利用される。VCSEL は、活性領域が小さく消費電力が低い、2次元アレイ集積が容易、ウェーハレベルでの検査ができ生産コストに優れる、など光配線用光源として様々な利点を有していることが主な理由である。ここで、VCSEL からの信号光の光伝送路への高効率結合が重要な課題となる。現在、企業が主となって開発/一部実用化している筐体間光配線等では、10 $\mu\text{m}$ 前後径のマルチモード VCSEL と断面サイズ数十 $\mu\text{m}$ のマルチモード光導波路を用いることで、要求実装精度を機械的組立てが可能なレベルに下げ、高効率・低コストを実現している。一方、光電子融合回路に用いられる高密度光配線では、数 $\mu\text{m}$ 径の単一モード VCSEL と断面サイズ数 $\mu\text{m}$ の単一モード光導波路の結合となり、サブミクロン精度での位置合わせを必要とする。このような高精度位置合わせには、光源を駆動させながら行うアクティブアライメントが用いられるが、多数の VCSEL を多数の導波路に並列結合する場合には、安定性やコストの面から現実的ではない。機械的組立て (パッシブアライメント) で実装でき、かつ実装後も環境変化に耐性の高い結合法が必要であるが、そのような技術は現存しない。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、応募者らがこれまで研究を進めてきた、導波モード共鳴フィルタ (GMRF) を小型化する技術をさらに進展させて、VCSEL 実装に対して高い生産性と信頼性を持つ光結合法を開発することである。

GMRF は薄膜導波路に周期構造を設けた光学素子であり、高感度センサやレーザの外部共振器ミラーとして近年盛んに研究開発が進められているが、素子径、入射光径ともにサブ mm オーダを必要とする。一方、応募者らは、導波路レーザやファイバレーザの端面への直接結合可能な外部ミラーとしての応用を目指して、導波路共振器内に GMRF を集積する構造を提案・試作してきている。

本研究において、VCSEL 実装に有効な、微小開口 GMRF のさらなる開口縮小化や波長特性の急峻化を検討すると共に、GMRF の

反射位相が共鳴波長で急峻に変化する、及び GMRF の反射が導波モード励振に基づくという二つのユニークな特性の双方をいかす新たな構造 (CRIGM) を提案、設計、試作、特性評価し、理論的・実験的に提案手法 (図 1) の可能性を明らかにする。

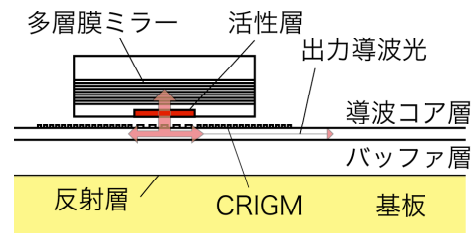


図1 実装形態の構成例

### 3. 研究の方法

本研究では、

- (1) 微小開口 GMRF (CRIGF) の性能向上
- (2) CRIGF を用いた導波光結合器の設計・試作
- (3) CRIGM の設計・試作
- (4) CRIGF/CRIGM に対する新たな解析・設計手法の確立

について研究を行った。

作製には電子ビームリソグラフィを含む薄膜プロセスを用い、導波路構成材料としては、制御性、温度安定性の高い無機誘電体材料 (シリカガラス系) を用いた。特性評価のため、専用の評価光学系を構築した。

### 4. 研究成果

- (1) 微小開口 GMRF (CRIGF) の性能向上

単一モード VCSEL の開口は数 $\mu\text{m}$ 程度が想定される。一方、これまでに実証した CRIGF では開口サイズは最小でも 10 $\mu\text{m}$  であり、さらなる微小化が必要である。そこで、波長 1.55 $\mu\text{m}$  帯で動作する開口 4 $\mu\text{m}$  の CRIGF を試作し、特性を評価した。試作した素子の SEM 写真を図 2 に示す。ストリップ装荷型チャンネル導波路であり、このストリップの中央部を GMRF 用グレーティング (GC) に、左右を導波路共振器形成用グレーティング (DBR) に加工した。開口となる GC サイズが波長の数倍程度で、入力光との結合に寄与する凹凸は 4 個しかないが、急峻な波長フィルタ特性が得られた。屈折率の低い無機誘電体材料を用いた場合でも、波長オーダのサイズの素子が動作することをはじめて実証した。

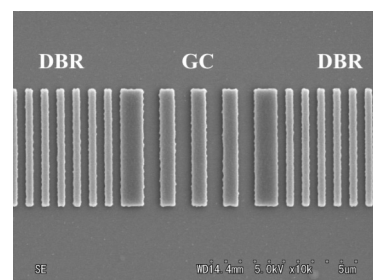


図2 試作した 4 $\mu\text{m}$  開口 CRIGF

また、CRIGFにおけるGCとDBRとの相対位置を変化させることにより、波長特性を制御できることを新たに見いだした。図3に素子の断面構造を、図4に作製した素子の反射特性を示す。GCの相対位置が中央からずれるに従い、反射波長幅が急激に狭くなることを明らかにした。さらにGC周期の1/4だけ位置シフトした場合には、導波モード共鳴(GMR)が起こらないことを実証した。

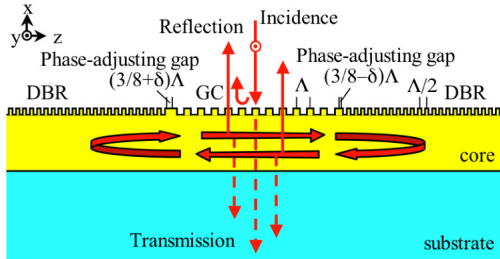


図3 GC位置シフト型CRIGF

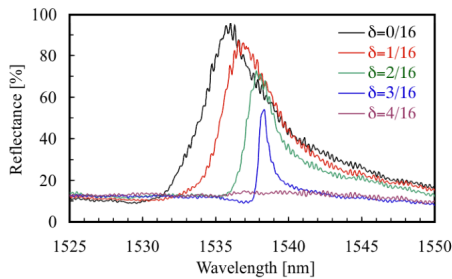


図4 GC位置シフト型CRIGFの反射特性

### (2) CRIGFを用いた導波光結合器の設計・試作

通常のCRIGFでは左右のDBRの反射率は100%で設計しており、導波光は外部へ漏洩しない。しかし、片側のDBR長を調整すれば、CRIGF内に元々存在している導波光をCRIGF外に取り出すことができ、CRIGFが導波光結合器として動作する。CRIGF反射率と導波光取り出し効率のDBR長依存性を、後述する解析手法で見積もった。その結果、95%以上の反射率と導波光励振効率1.5%が得られる構造が設計できた。設計したプロトタイプ素子を試作し、基本特性を評価した(図5)。今回は、反射と導波光励振を同一の観察光学系で測定するため、導波路に放射出力用GCも集積した素子を作製した。高反射率と導波光取り出しが、同時に得られる事を実証した。

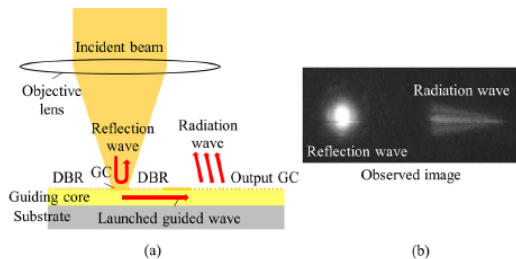


図5 CRIGFによる導波光結合  
(a) 実験光学系 (b) 観察結果の一例

### (3) CRIGMの設計・試作

CRIGMは図6に示すように、高反射性基板とCRIGFを集積した素子である。本素子ではCRIGFと高反射性基板とで垂直共振器を形成するため、その間の光バッファ層厚に素子特性が大きく依存する。後述する解析手法により特性を見積もった所、ほぼ波長依存性がなく高反射率を保つ場合、ノッチフィルタリング特性を示す場合、等がある事を明らかにした。種々の光バッファ層厚の素子を試作し特性評価を行ったところ、非常に狭帯域なノッチフィルタ特性(図7)が得られた。このノッチフィルタ特性のCRIGMは当初予期していなかった新しい素子である。また、CRIGMの特性は素子内の損失に大きく依存することが明らかになった。損失原因の特定とその低減化に思いの外に時間を費やしたために、本研究期間内に「高反射率を維持するCRIGM」の実験データを得るには至らなかったが、実験は継続しており、データが得られ次第、学会発表及び論文発表を行う予定である。

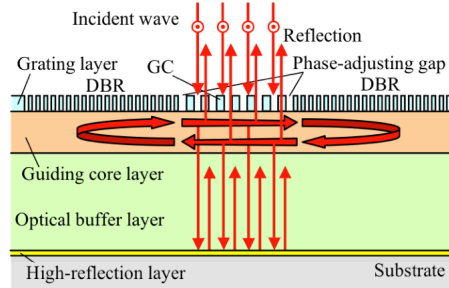


図6 CRIGMの断面構造

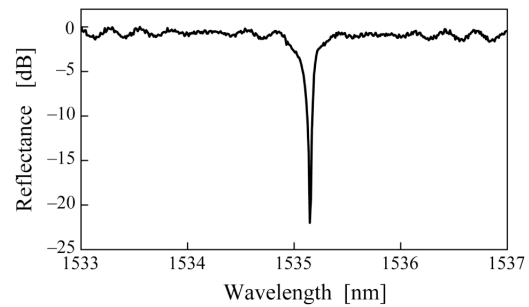


図7 CRIGMのノッチフィルタリング特性

### (4) CRIGF/CRIGMに対する新たな解析・設計手法の確立

検討している素子を直接的に解析できる手法はなく、無限長の周期構造に利用される厳密結合波解析法(RCWA)や、膨大な解析リソースを必要とする時間領域有限差分(FDTD)法での計算結果から特性を類推するしかなかった。本研究において、時間領域のモード結合理論と空間領域のモード結合理論とを統合し、新たな時空間モード結合理論に基づく解析モデルを構築した。

図4に示すような特性を計算するためには、所有しているPC環境の場合、FDTD法であれば1曲線に対して1週間以上の計算時間を必要としたが、新たな解析モデルに基づくシミ

ュレーションでは数分で結果を得る事ができた。得られた計算結果は、実験結果と定性的な矛盾はなく、さらに解析モデル内に損失項を組み込むことで、より正確(定量的)に実験結果を再現することが可能となった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 18 件)

- (1) Junichi Inoue, Hiroki Okuda, Kenji Kintaka, Kenzo Nishio, and Shogo Ura, "Reflection-phase spectra of cavity-resonator-integrated guided-mode resonance devices," Jpn. J. Appl. Phys., (in press). 査読有
- (2) Kenji Kintaka, Kosuke Asai, Katsuaki Yamada, Junichi Inoue, and Shogo Ura, "Grating-position-shifted cavity-resonator-integrated guided-mode resonance filter," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 29, No. 2., pp. 201-204, 2017. 査読有 DOI: 10.1109/LPT.2016.2636229
- (3) Shogo Ura, Masahiro Nakata, Kenichi Yanagida, Junichi Inoue, and Kenji Kintaka, "Cavity-resonator-integrated guided-mode resonance band-stop reflector," Opt. Exp., Vol. 24, No. 13, pp. 15120-15127, 2016. 査読有 DOI: 10.1364/OE.24.015120

[学会発表] (計 15 件)

- (1) Atsushi Tsuji, Junichi Inoue, Kenji Kintaka, Kenzo Nishio, and Shogo Ura, "Integrated optic device for narrow-band reflection and guided-wave launching," IEEE CPMT Sympo. Japan 2016, 13-03, Kyoto Univ., Kyoto, Japan, Nov. 7-9, 2016.
- (2) Kenichi Yanagida, Kazuki Mori, Masahiro Nakata, Kenji Kintaka, Junichi Inoue, and Shogo Ura, "Characterization of CRIGF integrated on DBR substrate," IEEE CPMT Sympo. Japan 2016, 13-02, Kyoto Univ., Kyoto, Japan, Nov. 7-9, 2016.
- (3) Kenji Kintaka, Junichi Inoue, and Shogo Ura, "Cavity-resonator-integrated guided-mode resonance filter with position-shifted grating coupler," 18th Intern'l Conf. Trans. Optical Networks, We.B5.1 (invited), Trento, Italy, July 10-14, 2016.
- (4) Shogo Ura, Masahiro Nakata, Kenichi Yanagida, Kenji Kintaka, and Junichi Inoue, "Narrowband-stop reflector using guided-mode resonance in waveguide cavity for WDM optical

interconnects," IEEE Electron. Compon. and Technol. Conf. 2016, 40-7, Las Vegas, Nevada, USA, May 31 - June 3, 2016.

- (5) 浅井鴻佑, 山田克明, 金高健二, 井上純一, 西尾謙三, 裏升吾, "共振器変位集積導波モード共鳴フィルタ," 第3回集積光デバイスと応用技術研究会, IPDA15-P06, 東レ総合研修センター, 三島, 2016年3月3-4日.
- (6) Kenji Kintaka, Junichi Inoue, and Shogo Ura, "Quality-factor control of cavity-resonator-integrated guided-mode resonance filter," 10th Intern'l Conf. on Optics-photonics Design & Fabrication, IS2-06 (Invited), Weingarten, Germany, Feb. 28 - March 2, 2016.
- (7) 中田昌宏, 近藤知明, 金高健二, 井上純一, 裏升吾, "共振器集積導波モード共鳴反射型ノッチフィルタリング," 光エレクトロニクス研究会, 神戸市産業振興センター, 神戸, 2016年1月28-29日.
- (8) 奥田弘樹, 井上純一, 金高健二, 西尾謙三, 裏升吾, "共振器集積導波モード共鳴フィルタの複素応答," 光エレクトロニクス研究会, 神戸市産業振興センター, 神戸, 2016/1/28-29.
- (9) Junichi Inoue, Hiroki Okuda, Kenji Kintaka, Kenzo Nishio, and Shogo Ura, "Experimental study on reflection phase rotation of cavity-resonator-integrated guided-mode resonance filter," IEEE CPMT Sympo. Japan, 15-02, Kyoto Research Park, Kyoto, Japan, Nov. 9-11, 2015.
- (10) Kosuke Asai, Kenji Kintaka, Junichi Inoue, and Shogo Ura, "Couple-mode analysis of grating-position-shifted cavity-resonator-integrated guided-mode resonance filter," 10th Microoptics Conf., H-4, Fukuoka International Congress Center, Fukuoka, Japan, Oct. 25-28, 2015.
- (11) Shogo Ura, Tomohiro Kondo, Kenji Kintaka, Junichi Inoue, and Robert Magnusson, "Guided-mode Resonance Mirror for Vertical Cavity," 17th Intern'l Conf. Trans. Optical Networks, Th. A5.5 (Invited), Budapest, Hungary, July 5-9, 2015.
- (12) Kenji Kintaka, Kosuke Asai, Tomohiro Kondo, Junichi Inoue, and Shogo Ura, "Reflectance change by grating-position shifting in cavity-resonator-integrated guided-mode resonance filter," Integrated Photon. Research, Silicon and Nano Photon. 2015, IM2A.3, Boston, Massachusetts, USA, June 27-July 1, 2015.

- (13) Masahiro Nakata, Tomohiro Kondo, Kenji Kintaka, Junichi Inoue, and Shogo Ura, "Reflection optical notch filtering behavior of cavity-resonator-integrated guided-mode resonance mirror," Intern' l Conf. on Electron. Packaging 2015, FC1-3, Kyoto Terrsa, Kyoto, Japan, April 14-17, 2015.
- (14) 中田昌宏, 近藤知明, 金高健二, 井上純一, 裏升吾, "共振器集積導波モード共鳴ミラーの反射型ノッチフィルタリング," 第29回エレクトロニクス実装学会春季講演会, 17E2-2, 東京大学, 東京都文京区, 2015年3月16-18日.
- (15) Kenji Kintaka, Junichi Inoue, Tomohiro Kondo, and Shogo Ura, "Cavity-resonator-integrated guided-mode resonance filter with several grating lines in aperture," IEEE Photonics Conf. 2014, WF3.4, San Diego, California, Oct. 12-16, 2014.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

金高 健二 (KINTAKA, Kenji)  
国立研究開発法人産業技術総合研究所・無機機能材料研究部門・主任研究員  
研究者番号：50356911

### (2) 研究分担者

裏 升吾 (URA, Shogo)  
京都工芸繊維大学・電気電子工学系・教授  
研究者番号：10193955