

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630152

研究課題名(和文) 超高解像ビーム掃引と大規模波長選択光スイッチの新展開

研究課題名(英文) Advance in high-resolution beam steering and large-scale wavelength switch

研究代表者

小山 二三夫 (Koyama, Fumio)

東京工業大学・精密工学研究所・教授

研究者番号：30178397

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：周期構造の超高反射率ミラーから構成される低損失Bragg反射鏡導波路を形成し、その巨大な構造分散と高密度アレイ化技術を活用することで、数百のスイッチングポート数を可能とする大規模・小型波長選択光スイッチング技術の創成を目的とした。波長選択スイッチを設計、作製し、ビーム掃引デバイスを30ミクロン間隔でアレイ状に集積し、液晶空間変調器によるスイッチング素子からなる空間光学系を用いて、182出力ポートを搭載可能な波長選択スイッチの実現に成功した。また、1550nm帯波長分散素子も製作し、外部光の波長を1400～1500nmまで変えた場合に偏向角度19～38°、ビーム拡がり角0.2～0.5°を得た。

研究成果の概要(英文)：A wavelength selective switch (WSS) was proposed based on a Bragg reflector waveguide array, which has a small footprint. We demonstrated arbitrary switching among 182 output-ports by using a liquid crystal on silicon (LCOS) as a switching engine. Wavelength selective switching of 60 channels was carried out, exhibiting the device's excellent capability in providing ultra-large number of port-count and wavelength-channel operations at the same time. The crosstalk between adjacent ports are below -20dB by a suitable alignment, which can be further improved by optimizing the module optics and alignments. The flexible lithography-defined waveguide array design also reveals versatile potentials in integrating with other functional components. We also fabricated a 1550nm-band wavelength selective element, exhibiting a beam deflection angle from 19 to 38° with a beam divergence of 0.2-0.5° for wavelength changes of 1400-1500nm.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：光通信 光インターコネク ト 波長分割多重方式 光スイッチ

### 1. 研究開始当初の背景

光ビーム掃引 (スキャナー) デバイスは、光センサー、ディスプレイ、プリンター、光スイッチなど様々な光情報処理機器の基幹要素デバイスである。現在、ポリゴンミラー (多面体ミラー) などを機械的に高速回転することで高分解能ビーム掃引が実用デバイスとして使用されているものの、掃引速度が遅いこと (数 kHz 以下) や小型化について限界がある。非機械的な光ビーム掃引の取り組みとして、電気光学結晶を用いたもの、フェーズドアレイ、位相同期レーザアレイ、フォトニック結晶レーザなどの研究が行われている。特に最近では、光センサー応用で、北米 DARPA による高速ビーム掃引プロジェクト "SWEPPER" がスタートするなど、世界的にも新たな局面に入りつつある。しかし、ビーム掃引の性能指数を示す解像点数 (遠方で観測したときにいくつのビームに分解してビームを掃引できるかの性能指数) は、わずかに数十のレベルである。研究代表者は、これまで面発光レーザの先導的な研究を進め、そこで蓄積された超高反射率 ( $R > 99.999\%$ ) の Bragg 反射鏡技術により光を閉じ込めるブラッグ反射鏡導波路の研究を推進してきた。この導波路原理は、1970 年代にカリフォルニア工科大学で理論的に議論されたものだが、研究代表者は、巨大構造波長分散により大きなビーム掃引角を可能とする掃引デバイスを提案し、1,000 を越える解像点数 (非機械式では世界最高性能) を実現している。

### 2. 研究の目的

本研究では、Bragg 反射鏡導波路の巨大構造分散に着目し、従来技術では到達不可能な高分解能特性を有する電氣的な光ビーム掃引デバイスを実現することを着想の基点としている。本研究では、周期構造の超高反射率ミラーから構成される低損失 Bragg 反射鏡導波路を形成し、その巨大な構造分散と高密度アレイ化技術を活用することで、従来の非機械式 (電氣的制御) の光ビーム掃引の限界を打破する高分解能光ビーム掃引デバイスを実現するとともに、数百のスイッチングポート数を可能とする大規模・小型波長選択光スイッチング技術の創成を目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究では、Bragg 反射鏡導波路のスローライト伝搬を利用した超解像度光ビーム掃引デバイスの極限性能追究を理論、実験両面から進めるとともに、波長可変面発光レーザとの集積化によるビーム掃引集積光源の製作を行う。さらに、ビーム掃引デバイスの高密度アレイ集積化と自由空間光学系を用いて、従来技術では到達不可能な数百ポート規模の大規模光スイッチング回路へ展開した。

具体的には、以下の研究項目を実施した。

#### 1) Bragg 反射鏡導波路の低損失化による高

#### 解像度ビーム掃引デバイスの極限性能追究

電磁界シミュレータを用いて、半導体多層膜/誘電体多層膜からなる Bragg 反射鏡導波路におけるスローライトの挙動を解析し、群速度低下率、伝搬損失、偏光依存性、波長帯域、などの基本的な伝搬特性を理論的に明らかにした。さらに、高解像度化に向けた設計指針を確立していく。980nm 帯、1550nm 帯の 2 つ波長帯で角度分散、広がり角の制御を行った。

#### 2) 高解像度ビーム掃引デバイスの製作と評価

有機金属気相成長法により、Bragg 反射鏡と GaAs コア層からなる半導体ウェハを成長し、980nm 帯素子の製作を行うとともに、電子ビーム蒸着法により Si/SiO<sub>2</sub> 超高反射率反射鏡を形成して、Bragg 反射鏡導波路を形成し、1550nm 素子の製作を行った。さらに、ドライエッチングを用いて上部反射鏡の微細加工を行い、スローライトを励振するための構造を形成して、ビーム掃引デバイスの性能評価を行い、極限性能実現のための資料を収集した。

#### 3) 空間光学系により波長選択光スイッチの製作と評価

本デバイスの 2 次元高密度アレイを製作し、自由空間光学系との組み合わせで、従来技術では実現困難な 100 チャンネル規模の波長選択光スイッチの製作と評価を行った。

### 4. 研究成果

提案するデバイスを従来の回折格子と比べると角度波長分散量で 1 桁以上大きいこと、また、伝搬損失低減により、出射ビームの回折限界で決まる解像点数は理論的には、数千点にも及ぶことが明らかにした。また、本デバイスは、半導体技術により高密度アレイ集積化が可能であり、本デバイスの実現により、小型で数百ポート規模のポート数を有する波長選択スイッチなどの光回路の実現が期待できる。

#### A) 980nm 帯素子の製作と大規模波長選択光スイッチの実現

上記の高性能ビーム掃引技術をベースに高性能波長選択スイッチを設計・作製した。波長感度に優れたビーム掃引デバイスを 30 ミクロン間隔でアレイ状に集積し、液晶空間変調器によるスイッチング素子からなる空間光学系を用いて、従来技術より出力ポート数が大幅に大きな 182 出力ポートを搭載可能な波長選択スイッチを製作した。本研究で実現された巨大な角度波長分散素子は、さらに高密度のアレイ化も可能であり、自由空間光学系との組み合わせによるスケラビリティの優れた大規模波長数に対応する超小型光合分波器・波長選択スイッチの可能性も理論的に明らかにした。波長スイッチング特性については、182 ポート、60 チャンネルの選択スイッチングを実現した。(図 1~図 3)

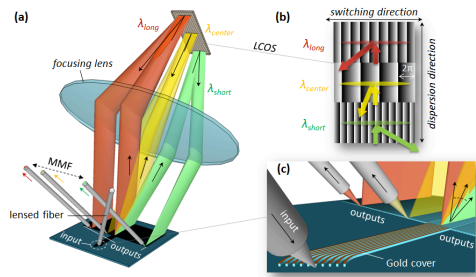


図 1 980nm 帯波長選択スイッチの概略図

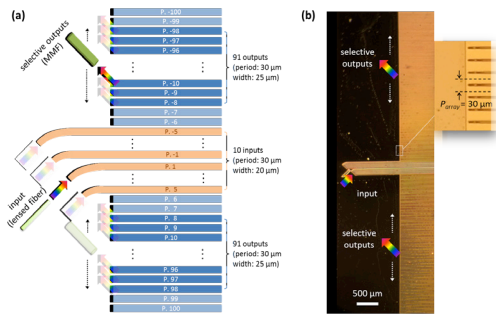


図 2 Bragg 反射鏡導波路アレイ

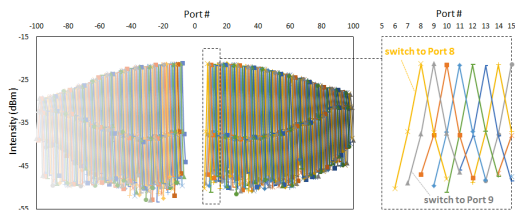


図 3 波長選択スイッチの 182 ポート動作実験

### B) 1550nm 帯 Bragg 反射鏡分散素子の製作

近年増大するトラフィック量に対応するため、大都市間や大陸間などの長距離網を中心に WDM の導入が進められてきた。WDM 技術においては、波長選択スイッチ (WSS) が必要不可欠である。現在では、多くの WSS は分散素子として回折格子を利用している。しかし、回折格子は角度分散値が小さいという問題点があり、結果として WSS サイズの巨大化を招いてしまう。このような問題点を解決するために、分散素子として Bragg 反射鏡導波路を用いた WSS の研究を行ってきた。しかし、動作波長は前節で述べたように 980nm 帯を中心としたものであった。ここでは、Bragg 反射鏡導波路による 1550nm 帯ビーム掃引デバイスを作製し、波長選択スイッチへ応用することを目標とした。

1550nm 帯ビーム掃引デバイスを作製するために、DBR には Si/SiO<sub>2</sub> を使用し、コアとなる部分には SiO<sub>2</sub> を利用する。この材料は従来の 0.98 μm 帯ビーム掃引デバイスで使われていた半導体 DBR に比べて屈折率の温度係数が小さいため、温度依存性の低減が見込める。温度差を与えた場合の計算では、偏向特性にほとんど変化はなく、偏向角の角度差の平均は 0.46° であった。偏向角の温度依存性は、980nm 帯ビーム掃引デバイスよりも 1/10

小さく、特性改善が見られた。デバイスの構造は、横方向に光を閉じ込めるため、そして外部光を結合させるためにリッジ構造とする。DBR は上部 5.5 ペア、下部 7.0 ペアとした。デバイス製作のプロセスとしてはドライエッチングによって数 μm のメサを形成する。シミュレーションによる外部光結合効率、上部 DBR を 4.5 ペア除去し、入射角度 40 度の場合において -3dB であった。

実際に製作したデバイスのビーム掃引特性は、導波路幅 8 μm、入射光波長 1550nm において、偏向角度 29 度、ビーム拡がり角 0.4° であった。外部光の波長を 1400~1500nm まで変えた場合では、偏向角度 19~38°、ビーム拡がり角 0.2~0.5° であり、解像点数は 50 を得た。この結果は、上下の DBR のペア数を増やし、導波路の伝搬損失を低減することでビーム拡がり角が小さくなり更なる高解像度化が見込める。(図 4)

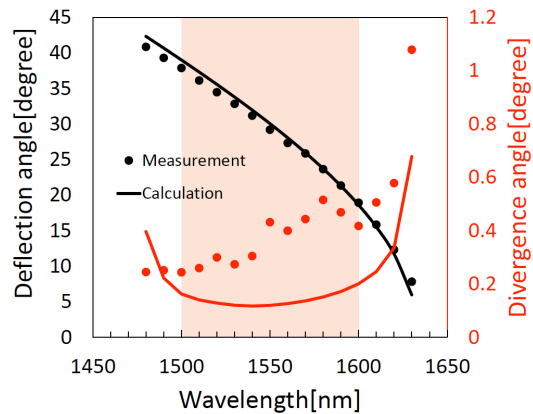


図 4 Si/SiO<sub>2</sub> Bragg 反射鏡導波路分散素子における偏向特性

ビーム掃引デバイスを分散素子として使用し、レンズ、空間光変調器 (LCOS) を組み合わせる。波長選択スイッチとしての応用を検討した。実験では、外部光がデバイス表面で反射し、LCOS に干渉してしまい放射光をスイッチングすることが出来なかった。これを改善するために、外部光結合効率を改善し、放射光を抑制する必要がある。

### 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 2 件)

1) Xiaodong Gu, Kenya Suzuki, Yuichiro Ikuma, Kazunori Seno, Hiromasa Tanobe, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, "Compact Wavelength Selective Switch Using a Bragg Reflector Waveguide Array with Ultra-Large Number (>100) of Output-Ports, Journal of Lightwave Technology," Invited Paper, vol. 33, no. 7, pp. 1358-1364, Apr. 2015, 査読有り, DOI : <http://dx.doi.org/10.1109>.

2) Fumio Koyama, “Advances and New Functions of VCSEL Photonics, Optical Review,” Invited Paper, Vol. 21, No. 6, pp. 893-904, Dec. 2014, 査読有り, <http://link.springer.com/article/10.1007/s10043-014-0142-6>.

[学会発表] (計 14 件)

1) Fumio Koyama, “Beam steering and vortex beam creation in VCSEL photonics,” SPIE. Photonics West 2016, 9766-3, San Francisco, Feb. 2016.

2) Fumio Koyama, “Beam engineering of VCSELs using high-contrast grating and coupled cavities,” SPIE. Photonics West 2016, 9757-14, San Francisco, Feb. 2016.

3) 小林 拓貴, 中濱 正統, 小山二三夫. 横方向結合共振器を用いた面発光レーザーの横モード制御, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 20a-S321-10, 東京, Mar. 2016.

4) 森 裕之, 顧 曉冬, 松谷 晃宏, 小山二三夫. スローライト導波路アレイを用いた二次元ビーム掃引, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 21a-S321-11, 東京, Mar. 2016.

5) 小山二三夫. 面発光レーザーによる高速ビームスイッチングと高解像ビーム掃引, 第 3 回集積光デバイスと応用技術 (IPDA) 時限研究専門委員会研究会, 静岡, Mar. 2016.

6) 小山俊泰, 顧 曉冬, 松谷 晃宏, 坂口 孝浩, 小山二三夫. ビーム掃引/波長選択スイッチのための  $1.5\mu\text{m}$  帯 Si/SiO<sub>2</sub> ブラッグ反射鏡導波路, 2015 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-15, 福岡, Sep. 2015.

7) Xiaodong Gu, Fumio Koyama. 60-channel Wavelength Selective Switch on Bragg Reflector Waveguides Array with 182 Output-ports, International Nano-Optoelectronics Workshop, ThP20, pp. 157-158, Tokyo, Aug. 2015.

8) Masanori Nakahama, Xiaodong Gu, Takahiro Sakaguchi, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama. Transverse-mode Coupled cavity VCSELs with High Speed Beam Switching, International Nano-Optoelectronics Workshop, ThP1, pp. 119-120, Tokyo, Aug. 2015.

9) Fumio Koyama, “Virtually Image Phased Array based on Bragg Reflector Waveguide for Large-port Optical Switching, Photonics West2015, 9372 - 13, San Francisco, Feb. 2015.

10) Xiaodong Gu, Fumio Koyama, “Ultra-large port-count wavelength selective switch based on a Bragg reflector waveguides array,” レーザー学会学術講演会第 35 回年次大会, 東京, 12a VI03, Jan. 2015.

11) Fumio Koyama, “VCSEL Photonics for High-Speed Optical Interconnects,” The

4th Annual World Congress of Nano Science & Technology-2014, Nano-S&T2014, pp. 056, Qingdao, Oct. 2014.

12) Xiaodong Gu, Kenya Suzuki, Yuichiro Ikuma, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, “Improvement in Crosstalk of 200-Port Bragg Reflector Waveguides Array-based Wavelength Selective Switch, IEEE Photonics Conference, IPC2014, MB2.4, pp. 34-35, San Diego, Oct. 2014.

13) Xiaodong Gu, Kazunori Seno, Hiromasa Tanobe, Fumio Koyama, “60-channel Wavelength Selective Switch on Bragg Reflector Waveguides Array with 125 Output-ports, European Conference on Optical Communications, ECOC 2014, We.3.5.3, pp. 1-3, Cannes, Sep. 2014. (Top Scored Paper)

14) Toshikazu Shimada, Hamed Dalir, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, “Beam scanner integrated VCSEL with electro-thermal wavelength tuning,” IEEE International Semiconductor Laser Conference, WB3, Palma de Mallorca, Sep. 2014.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称: 波長選択スイッチ

発明者: 小山二三夫, 顧 曉冬, 田野辺博正, 妹尾和則

権利者: 東京工業大学, 日本電信電話株式会社

種類: 特許

番号: 特願 2014-126985

出願年月日: 2014 年 6 月 20 日

国内外の別: 国内

名称: 光信号処理装置

発明者: 小山二三夫, 顧 曉冬, 田野辺博正, 妹尾和則

権利者: 東京工業大学, 日本電信電話株式会社

種類: 特許

番号: 特願 2014-121857

出願年月日: 2014 年 6 月 12 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://vcsel-www.pi.titech.ac.jp/index-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小山 二三夫 (KOYAMA FUMIO)

東京工業大学・精密工学研究所・教授

研究者番号: 30178397