

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14245

研究課題名(和文) 超高解像ビーム掃引機能を可能にする集積フォトニクス

研究課題名(英文) VCSEL photonics for super-high resolution beam steering

研究代表者

小山 二三夫 (Koyama, Fumio)

東京工業大学・科学技術創成研究院・教授

研究者番号：30178397

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：非機械式ビーム掃引デバイスは、将来の自動運転等で用いるLiDARのコアデバイスである。本研究では、Bragg反射鏡導波路の巨大な波長構造分散を活用することで、解像点数500、光出力0.4Wの高出力・高解像ビーム掃引機能を実現するとともに、電氣的に波長を掃引できる波長可変面発光レーザとの集積化を行い、解像点数300、光出力0.4Wの高出力・高解像ビーム掃引を実現するとともに、熱光学効果を用いたビーム掃引機能集積光源の実証、アレイ化とシリンドリカルレンズによる解像点数 270×7 の2次元ビーム掃引を実現した。

研究成果の概要(英文)：A non-mechanical beam scanner is one of key components for future LiDAR systems. In this study, we realized the high-power and high-resolution beam steering function of VCSEL amplifier scanner thanks to its angular dispersion and high gain amplifier function, exhibiting the number of resolution points of over 300 and an output power of over 0.4W. We also demonstrated a lateral integration platform of VCSEL amplifier and high-resolution beam scanner. In addition, the 2D beam scanning was demonstrated by using 1D VCSEL scanner array and a cylindrical lens, showing a number of resolution points of 270×7 .

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：ビーム掃引 LiDAR 光センシング 面発光レーザ 光増幅器 半導体レーザ

1. 研究開始当初の背景

光ビーム掃引デバイスは、レーザレーダ、ディスプレイ、イメージセンサー、空間光スイッチなど様々な光情報処理機器の基幹要素である。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広く使用されているものの、掃引速度が遅いこと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きた。特に最近では、光レーザレーダ応用で、北米 DARPA による高速ビーム掃引プロジェクト“SWEEPER”が推進され、レーザレーダ搭載による車載の自動運転やロボットの3次元視覚センサーなど、新たな応用が注目されている。ビーム掃引の性能は、遠方で観測したときに、いかに細かくビームを分解して掃引できるかを示す解像点数が重要となる。解像点数は、最大偏向角とビーム拡がり角の比 N で定義され、多くの実用システムでは、解像点数 1,000 以上の高解像度ビーム掃引が必要とされるが、これまでの非機械式ビーム掃引デバイスでは、いずれも解像点数 100 に満たないものばかりで技術的限界があった。申請者は、Bragg 反射鏡導波路の大きな構造分散により巨大なビーム掃引角を可能とする掃引デバイスを提案し、数 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（IEEE Photonics J 2012, IEEE JSTQE 2013, IEEE JLT 2015）。一方、ビーム掃引機能を有する小型チップを光源である半導体レーザに集積することができれば、超小型ビームスキャナーとして、ウェアラブル光センサー、多数の車載搭載レーザレーダなどへの展開が期待できる。しかし、これまでのビームスキャナー機能を有するレーザ光源としては、 $N=100$ 以上の解像点数のデバイス実現に至っていない。

2. 研究の目的

周期構造の超高反射率ミラーから構成される Bragg 反射鏡導波路アレイを形成し、その巨大な波長構造分散を活用することで、超高解像 2 次元ビーム掃引機能を実現するとともに、電氣的に波長を掃引できる波長可変面発光レーザとの集積化を行い、従来技術では到達不可能な超高解像ビーム掃引機能を有する集積半導体レーザを実現することを目的としている。

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い、超高解像ビーム掃引面発光レーザ

という革新的な半導体レーザ工学の創出を目指した。面発光レーザと Bragg 反射鏡導波路ビームスキャナーは層構造が同一のため、光を横方向に結合させることで、ビームスキャナー機能を有する面発光レーザを構成することができる。さらに、上記の Bragg 反射鏡導波路をさらにアレイ状に集積し、マイクロレンズを配置することで、上記と直交方向への 2 次元ビーム掃引を実現した。

具体的には、以下の研究項目を実施した。

1) 超高解像度ビーム掃引スキャナーの製作と評価

超高反射率の多層膜反射鏡(Bragg 反射鏡)による低伝搬損失と巨大構造分散によるデバイスの小型化と高解像点数の両立が可能である。これまでに確立した高精度な薄膜形成技術による多層膜反射鏡技術により、出力ビームの広がり角低減による解像点数の限界へ挑戦し、高解像レーザレーダへの応用可能性を示した。特に、Bragg 反射鏡導波路に電流を注入して増幅素子として使用することで解像点数の向上を目指した。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、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、ビーム掃引デバイスとしての極限性能を追究した。

2) 波長可変面発光レーザとの集積化

波長可変面発光レーザとの横方向集積化の設計をシミュレーションにより行うとともに、横方向結合のための微小酸化膜構造形成などプロセスについて実験的基礎資料を収集した。さらに、熱光学効果を用いた波長可変面発光レーザとの横方向集積化を行い、ビーム掃引機能集積面発光レーザを製作し、その分解能・解像点数、掃引速度などの掃引特性を明らかにした。さらに、マイクロマシン構造によるマイクロ秒オーダーの高速ビーム掃引の可能性を探った。

3) 2次元アレイ化による2次元ビーム掃引機能創出

半導体プロセス技術を駆使して、Bragg 反射鏡導波路ビーム掃引デバイスを高密度にアレイ化を行い、上部にシリンドリカルレンズを配置することで、アレイ素子を選択することにより、2次元ビーム掃引の実現を目指した。

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を明らかにした。また、本デバイスは、半導体技術によりアレイ集積化が可能である。

1) 超高解像度ビーム掃引スキャナーの実現

本研究では高出力化と高ビーム品質化を

両立するために Bragg 反射鏡導波路構造を用いた面発光レーザ増幅器を提案した. 本構造は増幅器長を長くするほど高出力化とビームの狭窄化が行える. また入力波長を変えることで出射光の偏向角が変わり, ビームを偏向することができる. そのため LiDAR などのビーム掃引デバイスへの応用も可能である. しかし増幅器の長尺化によって増幅自然放出光 (ASE) が増大し素子長に制限がかかる. そこで本研究では ASE を抑圧する構造を提案し, 長尺増幅器による高出力化と高解像度化の実現を目指した.

ASE は増幅器のコアとクラッドの屈折率差によって導波モードとして全反射する. そこで活性層近辺の光閉じ込め層 (SCH) の屈折率を下げ, コアとクラッドの屈折率差を無くすることで導波モードをカットオフにする構造を提案した. SCH の屈折率を下げてでもスローライトモードの光閉じ込め係数は減少せず, 本手法の有効性が確認できた. 本構造によって増幅器を cm 規模まで長尺化できる可能性を示した. 実際に, 図 1 に示す増幅機能を有するビーム偏向器を製作して偏向特性を測定した. 素子長 1mm でビーム拡がり角 0.08° 以下, 波長可変幅 20nm に対して, 26° の偏向角, 角度分散値 $1.3^\circ/\text{nm}$, 解像点数 300, 光出力 0.4W を実現した. (図 1~2) また, 均一性改善により, 解像点数として最大 500 点を達成した.

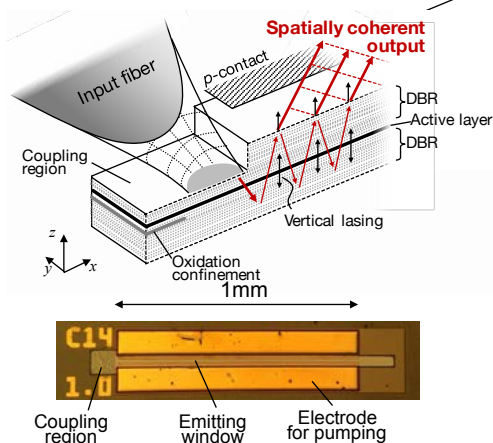


図 1 増幅機能を有するビーム偏向器

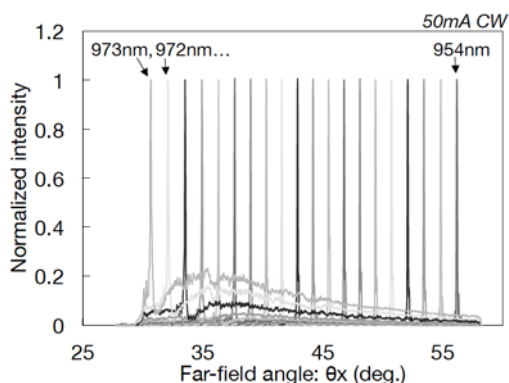


図 2 ビーム偏向特性

2) 波長可変面発光レーザとの集積化

波長可変面発光レーザと増幅機能を有するビーム偏向器の集積構造を製作した. 図 3 に構造の概略図, 図 4 (a), (b) に製作したデバイスの酸化狭構造と上面写真を示す. この波長可変面発光レーザとビーム偏向器を横方向に集積し, イオン注入によって電氣的アイソレーションを取ることで, 波長可変からの種光源を偏向器に結合させる. 面発光レーザへの電流注入量に応じて熱光学効果による屈折率変化が生じ, 面発光レーザに結合する入力波長を可変する. これによりビーム偏向角の電氣的制御が可能となる. 広がり角 0.15° の鋭いビームが観測するとともに, 偏向角 13° , 最大解像点数 30 以上を達成した. (図 5).

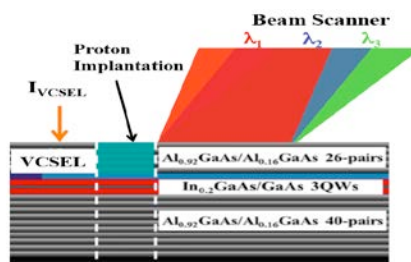


図 3 製作したビーム掃引集積光源の概略図

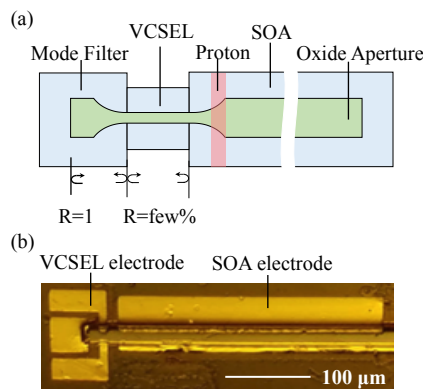


図 4 製作したビーム掃引集積光源の概略図と顕微鏡写真

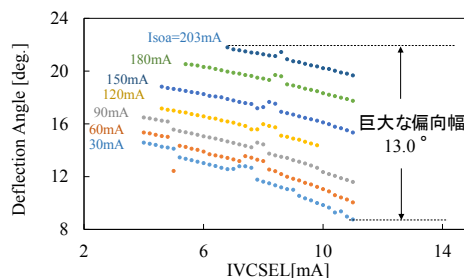
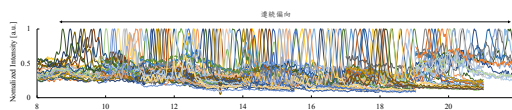


図 5 集積光源のビーム偏向特性

3) 2次元アレイ化による2次元ビーム掃引
 製作したスローライトビーム偏向器アレイによる2次元ビーム掃引と3Dイメージングシステムの概要を図6に示す。スローライト導波路を横方向にアレイ化し、その上にコリメートレンズを配置した。導波路に入力された信号光パルスはスローライト伝搬しながら徐々に上方に放射され、レンズでコリメートされて遠方でペンシルビームを形成する。入力波長変化により伝搬方向のビーム偏向角 θ を変え、入射光を入力する導波路の切替えにより伝搬垂直方向の偏向角 ϕ を変化させる。

InGaAs/GaAs 量子井戸のコアを AlGaAs の DBR で挟んだ多層膜ウェハを加工してデバイスを形成した。ウェハのカットオフ波長は980 nm, 利得ピーク波長は950 nmである。長さ1 mm, 酸化アパチャー幅8 μm の導波路を766 μm ピッチで形成した。可変波長レーザー光を導波路に結合させ、導波路に電流70 mAを注入してビームを放射させた。結合光パワー4.7 mW に対して、出力パワーは7.5 mW であり、チップ内利得は2 dB であった。コリメートレンズを θ 方向に45°傾けてデバイス上部に配置し、2次元スキャンを実験した。図7は異なる入力波長と駆動導波路を用いて観測された遠方界を重ね表示したもので、2次元ビームスキャンが確認された。ここでは、7本の導波路アレイを用いて少なくともスキャン角範囲38° × 10° が得られた。 θ 方向のビーム拡がり角は平均で0.14° であり、結果、解像点数として270 × 7を得た。

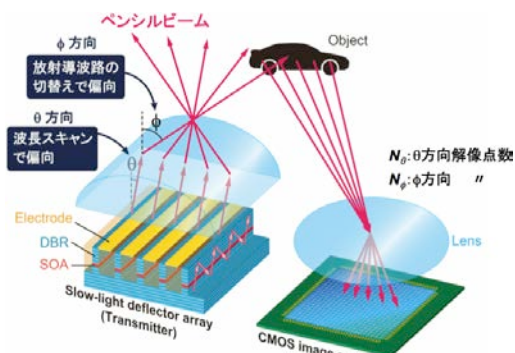


図6 面発光レーザー光偏向器アレイを用いた2次元ビーム掃引と3Dイメージングシステム概要

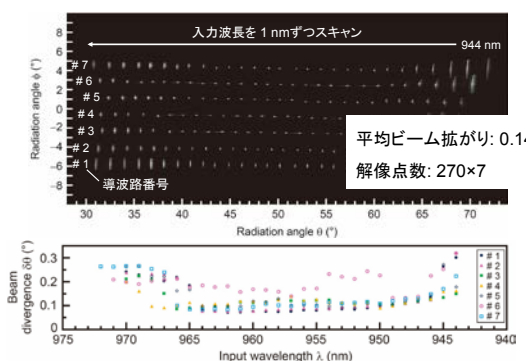


図7 2次元ビーム掃引特性.

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1件)

1) Shunya Inoue, Shun Nishimura, Masanori Nakahama, Akihiro Matsutani, Takahiro Sakaguchi, Fumio Koyama, “High-speed wavelength switching of tunable MEMS vertical cavity surface emitting laser by ringing suppression,” Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 57, pp. 040308-1-4, Mar. 2018. 査読有り, DOI : <https://doi.org/10.7567/JJAP.57.040308>.

[学会発表] (計16件)

1) Masanori Nakahama, Xiaodong Gu, Akihiro Matsutani, Takahiro Sakaguchi, Fumio Koyama, “VCSEL-Based High Resolution Wavelength Demultiplexer with Large Optical Gain,” 25th International Semiconductor Laser Conference, ISLC 2016, TuD5, Sep. 2016.

2) Shunya Inoue, Masanori Nakahama, Akihiro Matsutani, Takahiro Sakaguchi, Fumio Koyama, “Fabrication of HCG MEMS VCSELs using nanoimprint lithography and consideration of athermal operation,” 21st. Optoelectronics and Communications Conference (OECC/PS2016), MD2-3, Jul. 2016.

3) Xiaodong Gu, Masanori Nakahama, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, “VCSEL-Integrated Bragg Reflector Waveguide Amplifier with Single-mode Output Power over 10 mW,” 21st. Optoelectronics and Communications Conference (OECC/PS2016), MD2-4, Jul. 2016.

4) Shunya Inoue, Masanori Nakahama, Akihiro Matsutani, Takahiro Sakaguchi, Fumio Koyama, “Consideration and Fabrication of athermal HCG MEMS VCSEL,” International Nano-Optoelectronics Workshop, iNOW2016, Poster Session-7, Jul. 2016.

5) Masanori Nakahama, Xiaodong Gu, Akihiro Matsutan, Takahiro Sakaguchi, Fumio Koyama, “Slow Light VCSEL Amplifier for High-resolution Beam Steering and High-power Operations,” Conference on Lasers and Electro-Optics 2016 (CLEO2016), SF1L.5, Jun. 2016.

6) Zeuku Ho, Keisuke Shimura, Xiaodong Gu, Masanori Nakahama, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, “VCSEL Optical Amplifier for High Power Operations,” The 24th General Congress of the International Commission for Optics, Tu1J-08, Aug. 2017.

7) Fumio Koyama, “High Power VCSEL Amplifier For Laser Processing,” The 12th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, 1-3G-1, Aug. 2017.

8) Zeuku Ho, Keisuke Shimura, Xiaodong Gu,

Masanori Nakahama, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, “High-resolution Beam Steering Of Slow Light VCSEL Amplifier,” The 12th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, 2-1G-5, Aug. 2017.

9) Keisuke Shimura, Zeuku Ho, Masanori Nakahama, Xiaodong Gu, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, “Non-mechanical Beam Scanner Integrated VCSEL For Solid State LiDAR,” The 12th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, 2-2G-3, Aug. 2017.

10) Masanori Nakahama, Shunya Inoue, Shun Nishimura, Akihiro Matsutani, Takahiro Sakaguchi, Fumio Koyama, “Sub-volt Wavelength Sweep Operation Of MEMS VCSEL Employing High-Q Mechanical Resonance,” The 12th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, 2-1N-5, Aug. 2017.

11) Fumio Koyama, “VCSEL Photonics For Non-mechanical LiDAR,” The 12th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, Aug. 2017.

12) Fumio Koyama, “VCSEL photonics for 3D imaging,” International Nano-Optoelectronics Workshop 2017, SaB1, Aug. 2017.

13) Ahmed Mohamed Ahmed Hassan, Moustafa Ahmed Hafez, Masanori Nakahama, Fumio Koyama, “Numerical analysis of Watt-class VCSEL amplifier,” The 24th General Congress of the International Commission for Optics, P14-02, Aug. 2017.

14) Keisuke Kondo, Xiaodong Gu, Zeuku Ho, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama, “Two-Dimensional Beam Steering Using Slow-Light Waveguide Deflector Array with Optical Gain,” Conference on Lasers and Electro-Optics 2018, SM31.4, May. 2018.

15) Mizuki Morinaga, Xiaodong Gu, Keisuke Shimura, Masanori Nakahama, Fumio Koyama, “VCSEL Amplifier with High Power and Narrow Divergence Applying a Folded Waveguide Layout,” Conference on Lasers and Electro-Optics 2018, JT2A.11, May. 2018.

16) Xiaodong Gu, Masanori Nakahama, Fumio Koyama, “Active Bragg Reflector Waveguide Demultiplexer Array with Over 100 Wavelength Channels and Optical Gain for Large Port-count WSS,” Optical Fiber Communication Conference 2018, Tu2E.3, Mar. 2018.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○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・科学技術創成研究院・教授

研究者番号：30178397