

## Photonics Technology

## MEMS 技術を用いた高速波長可変面発光レーザー

High speed micromechanically tunable Surface Emitting Laser with Si-MEMS technology

蒲原 敦彦<sup>\*1</sup>

KANBARA Nobuhiko

野田 隆一郎<sup>\*2</sup>

NODA Ryuuitirou

矢野 哲夫<sup>\*1</sup>

YANO Tetsuo

齊藤 裕己<sup>\*1</sup>

SAITO Hiroki

藤村 直之<sup>\*1</sup>

FUJIMURA Naoyuki

西山 伸彦<sup>\*3</sup>

NISHIYAMA Nobuhiko

シリコンのマイクロマシン技術を用いた高速波長掃引可能な新しい波長可変面発光レーザーを開発した。このレーザーは、一方の誘電体反射膜がない半 VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) 構造チップとマイクロマシン技術を用い作製した凹面形状の可動ミラーを持つ SOI (Silicon On Insulator) 基板から構成されており、2つのチップは高精度な熱圧着により接合されている。SOI 基板のミラーが形成されたシリコンメンブレン構造とシリコン基板間に電圧を印加することにより、広い波長範囲を高速に掃引できるという特徴を持つ。試作したモジュールでは、モードホップフリーで応答周波数 500 kHz 以上、波長可変範囲 55 nm、サイドモード比 60dB 以上の良好な特性が得られ、これは VCSEL 構造のレーザーとしては世界トップレベルの性能である。

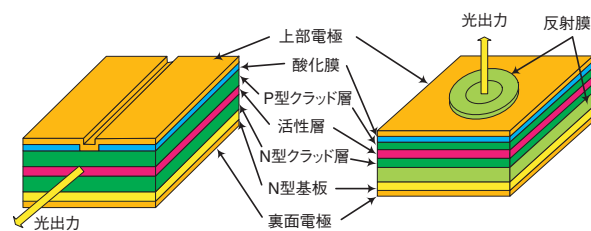
We have developed a novel high-speed micromechanically tunable surface emitting laser with Si-MEMS technology. This laser consists of a half VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) chip without a one-side dielectric mirror and a micromachined SOI (Silicon on Insulator) substrate with a concave mirror. These two chips are bonded together using a high-accuracy metal thermo compression bonding method. High-speed, wide-wavelength tuning is achieved by applying a variable voltage between the silicon membrane with the mirror and the silicon substrate. In the prototype, we have achieved high-performance wavelength modulation over 500 kHz, a wide tuning range of 55 nm without any mode-hop, and a side mode suppression ratio of over 60 dB. This is a world-class product in its field.

## 1. はじめに

近年、光応用計測の分野では社会の安全・安心や環境問題に対応するため、光ファイバーを用いた侵入センサや構造物の歪センサ、更に煙道中の有毒ガスや高温燃焼ガスのリアルタイム超高感度ガスセンサのニーズが高まっている。これらのリアルタイムセンサの光源として、広い波長可変範囲、高速掃引、位相連続掃引、小型、低価格などの特徴を持つ波長可変光源が求められている。これらの要求を満たす光源としてシリコンマイクロマシン技術を用いた波長可変面発光レーザーを開発したので、報告する。

## 2. 基本構造及び動作原理

一般的に半導体レーザーの構造は、図1の(1)に示すような光共振器の構造が横型の端面発光レーザーと、(2)に示すような光共振器の構造が縦型の面発光レーザー (VCSEL: Vertical Cavity Surface Emitting Laser) に分けられる。表1にそれらの特性比較を示す。



(1) 横型端面発光レーザー構造

(2) 縦型面発光レーザー構造

図1 半導体レーザー構造比較

\*1 技術開発本部 先端術研究所

\*2 IA事業部 プロダクト事業センター

\*3 東京工業大学理工学研究科電気電子工学専攻

表1 半導体レーザー特性比較

項目	端面発光レーザー	面発光レーザー
発振閾値	高	低
光出力強度	高	低
光共振長	長	短
縦モード	多モード	単一モード

両者の最大の違いは光増幅を行う共振器の活性層の長さである。端面発光レーザーでは数100  $\mu\text{m}$ の長さを取ることができ、波長の千倍程度であるのに対し、面発光レーザーでは活性層の厚みである数  $\mu\text{m}$ でしかなく、波長の十倍程度である。共振器の縦モード(共振状態)の間隔は共振器長に反比例するので、端面発光レーザーでは半導体の利得帯域の中に百以上の縦モードが存在するのに対し、面発光レーザーでは一つの縦モードしか存在しない。光応用計測用光源として重要な単一モード発振を得るために、端面発光レーザーでは多数のモードの中から一つを選択するための回折格子を半導体共振器内に集積したDFB(Distributed FeedBack)レーザーやDBR(Distributed Bragg Reflector)レーザーの構造を用いる必要があるが、面発光レーザーではそのようなモード選択機構が不要で、単純な共振器構造で単一モード発振を実現できる。更に面発光レーザーの一方のミラーを可動にすることにより、ミラーの位置を制御するだけで位相連続波長掃引が可能となる。

面発光レーザーには共振器が小さく光出力が弱いという課題もあるが、その反面、発振閾値が極めて低く、低消費電力動作が可能であり、計測用波長可変光源として多くの特長がある。そこで我々は、面発光レーザー構造を採用することとした。また可動ミラー構造としては、高い共振周波数が得られ且つセンサとして多くの実績を持つSi-MEMS構造を採用した。

図2に試作した波長可変レーザーの概念図を示す。この波長可変レーザーは、上部の一方の誘電体反射膜がない半VCSEL構造チップと、下部のSOI(Silicon on Insulator)基板を用いた可動反射膜チップから成る。

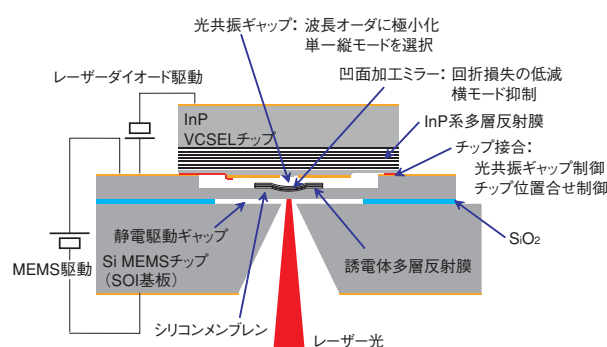


図2 波長可変レーザー概念図

可動反射膜部はシリコンの薄いメンブレン構造となっており、その上には回折損失を避けるための凹面形状の誘電体多層膜が形成されている。そのメンブレン構造を持つSOI基板のメンブレン側と下部の基板側に電圧を印加することにより発生する静電力によってメンブレン部分が基板方向に引き寄せられる。結果として半VCSEL構造チップ内部にある半導体側の反射膜とメンブレン上にある誘電体多層反射膜の間の距離が長くなり、レーザーの発振波長が長波長側に変化する。

### 3. 製作に必要となる要素技術及び作製プロセス

図2のような構造の波長可変レーザーを製作するために必要となる要素技術として新たに開発した凹面形成技術と接合工程を含む製作プロセスについて説明する。

#### 3.1 凹面形成技術

シリコンメンブレン上のレーザー反射膜用凹面形成に要求される項目としては、微細加工に半導体プロセスを適用できること、形状の再現性が良いこと、目標とする曲率が得られること、面粗さが小さいことの4点が挙げられる。

半導体プロセスを用いた凹面加工法としては、シリコンをウエットまたはドライエッチングする方法や材料の内部応力を用いた反りによる凹面形状を作製する方法などがある。しかし我々はシリコンを平坦化する通常のウエハー研磨の手法を応用して凹面を形成する技術を開発した<sup>(1)</sup>。

図3に開発した手法の概念図を示す。まずシリコン基板上にマスクとなるシリコン酸化膜または窒化膜を形成する。次に凹面形状を形成する部分の膜を除去し、CMP (Chemical Mechanical Polishing)を行うという簡単な方法である。シリコンの通常の研磨方法を用いているので面粗さはシリコン基板と同等である。

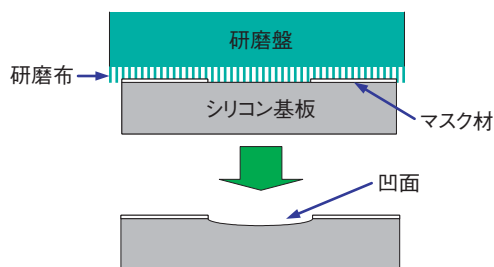


図3 凹面研磨概念図

図4に作製した凹面形状のSEM (Scanning Electron Microscope) 写真を示す。良好な凹面形状が形成されていることが確認できる。凹面の曲率半径は研磨領域、研磨時間及びマスク材料などによって決まる。

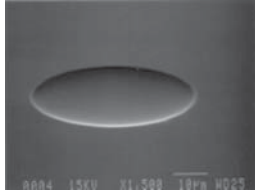


図4 凹面研磨 SEM 写真

### 3.2 製作プロセス

図5に製作プロセスを示す。以下にその各工程を説明する。

- (1) SOI基板を準備する。活性層の厚さ及び犠牲層となる酸化膜の厚さによりメンブレンの駆動電圧、駆動範囲、共振周波数が決まる。
- (2) 窒化膜パターンをマスクとして、選択的なCMPによって凹面形状を形成する。
- (3) 共振器の長さを決めるシリコンのスペーサ構造を形成し、裏面から異方性エッチングによりシリコン基板を加工する。
- (4) フッ酸の犠牲層エッチングにより酸化膜を除去しシリコンメンブレンを形成する。
- (5) 凹面を形成した部分の上に誘電体多層膜を形成し、基板取り出しのコンタクトホールを形成する。
- (6) 接合用電極及び取り出し電極を形成する。
- (7) 半VCSEL構造チップ<sup>(2)</sup>を熱圧着により接合する。

### 4. 作製したモジュールの評価

作製した波長可変レーザーチップをCANパッケージにマウントしシングルモードファイバーと接続したモジュールを製作し、光学特性と波長掃引周波数応答特性の評価を行った。図6に製作したモジュールを示す。

#### 4.1 レーザー光出力特性評価

図7に、波長可変レーザーモジュールの波長可変特性を示す。発振スペクトルは光スペクトルアナライザーにより測定した。シリコンメンブレン構造とシリコン基板の間の印加電圧を91Vから151Vに増加させることにより、レーザーの発振波長が1515 nmから1570 nmに変化することが確認できた。可動波長範囲は55 nmであり、光通信におけるCバンドは十分カバーできる。

図8に、発振波長1550 nmの時の光出力スペクトルを示す。そのスペクトル分布から、サイドモード抑圧比が60 dB以上であることが観測され、良好な単一モード発振が得られていることが確認できた。

図9には発振波長1550 nmの時のレーザーダイオード駆動電流と光出力強度の関係を示す。駆動電流が13 mAの時に最大光出力2.7 mWの値が得られた。

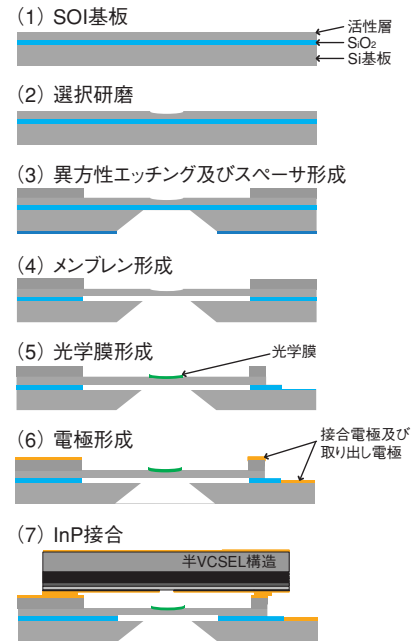
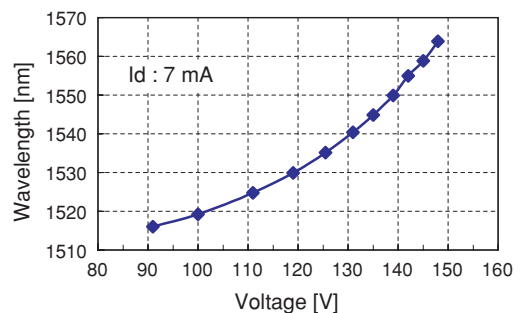


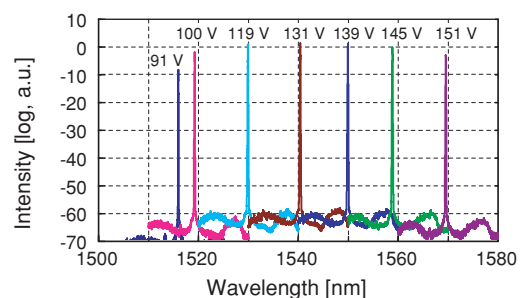
図5 作製プロセス



図6 光ファイバーと接合したモジュール



(a) 印加電圧と光出力波長の関係



(b) 印加電圧と光出力スペクトルの関係

図7 波長可変特性

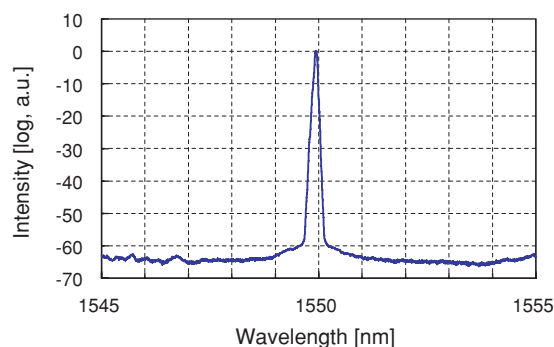


図8 光出力スペクトル

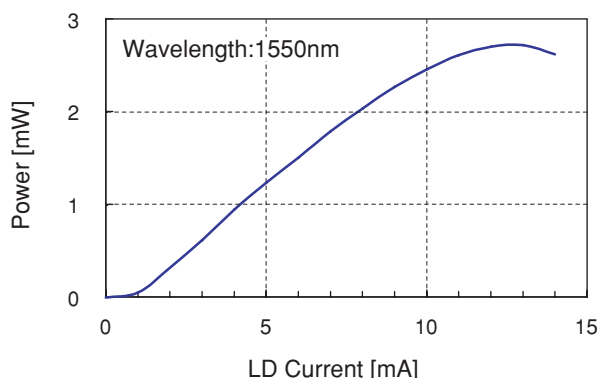


図9 電流光出力強度特性

#### 4.2 波長掃引応答特性評価

波長掃引動作の応答性を評価するために、MEMS構造に正弦波変調信号を印加し波長可変レーザーの発振波長の変化を測定した。発振波長の測定は干渉法によるリサージュ信号の高速、高精度な測定系を使用することによって行った<sup>(3)</sup>。印加信号電圧振幅は20 mVでこれは発振波長変動の40 pmに相当する。なお、この振幅の大きさは測定系の制限によるものである。

図10に、変調周波数を100Hzから800 kHzまで変化させながら信号を印加したときの光出力振幅の変化を示す。低周波数では、変調信号をMEMS構造に入力する際の結合コンデンサとデカップリング抵抗がハイパスフィルター( $f_c = 300\text{Hz}$ )として働くため、その影響により振幅の低下及び位相の進みが観測される。350 kHz近傍に共振によるピークが見られる。この値は共振周波数の設計値及び機械的加振による実験値と一致している。最終的に高周波域に向かって振幅が低下しているのはダイアフラム構造が高速動作するときに周囲の空気層がダンピング媒質として働く、所謂Squeezed film効果の影響である。

これらの測定により、モードホップフリーで応答周波数500 kHz以上という高速な波長可変レーザーが得られたことが確認できた<sup>(4)</sup>。

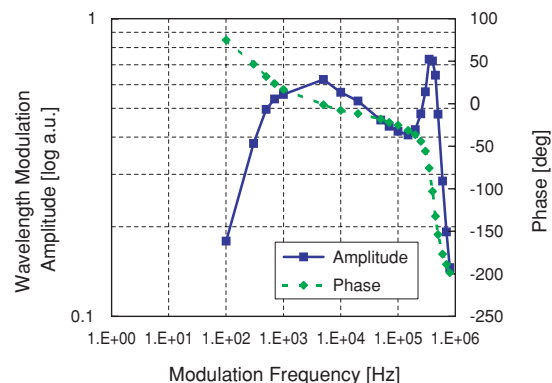


図10 波長可変レーザーの周波数応答

#### 5. おわりに

マイクロマシン技術を用いた新しい波長可変面発光レーザーを開発した。その構造は凹面形状の可動ミラーを持つMEMS構造と半VCSEL構造の2つのチップを高精度に接合したものである。このコンセプトにより試作したモジュールで、高速かつ広い波長可変範囲、モードホップフリー、良好なシングルモード発振の特性が得られた。これらは、VCSEL構造のレーザーとしては世界トップレベルの性能である。今後はさらに性能改善及び信頼性などのブラッシュアップを行うと同時にこれらの今までにない特性を生かした新しいレーザー応用センシング技術の開発を進める。

なお、本開発は、(独)新エネルギー産業技術開発機構(NEDO: New Energy and Industrial Technology Development Organization)「高集積・複合MEMS製造技術開発プロジェクト」(プロジェクトコード:P06022)の助成を受けて行った。

最後に、VCSEL基板を供給して頂いたCorning Incorporated殿、接合に対して助言頂いた東レエンジニアリング(株)殿に、この場を借りて厚く御礼申し上げる。

#### 参考文献

- (1) N. Kanbara, et al., "MEMS Tunable VCSEL with Concave Mirror using the Selective Polishing Method", Optical MEMS 2006, pp. 9-10
- (2) N. Nishiyama, et al., "Long-wavelength vertical-cavity surface-emitting lasers on InP with lattice matched AlGaInAs-InP DBR grown by MOCVD", IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 11, No. 5, 2005, pp. 990-998
- (3) T. Yano, et al., "A Precise Optical Interferometric Technique Using PDA and an Application to a Coherent Optical Network Analyzer", SICE-ICCAS 2006, pp. 5268-5272
- (4) T. Yano, et al., "Wavelength Modulation over 500 kHz of Micromechanically Tunable InP-Based VCSELs with Si-MEMS Technology", The 21st SLC, 2008, ThA3.