

文部科学大臣賞

マイクロマシン構造を用いた
温度無依存・波長可変レーザー

－ 革新的な大容量光インターコネクトを目指して －

東京工業大学大学院 物理電子システム創造専攻 博士課程2年

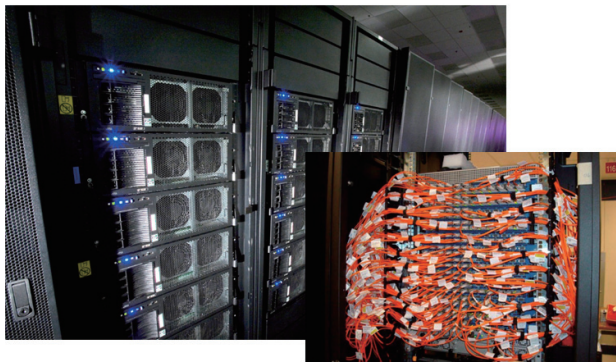
中濱 正統

1. 緒 言

現代社会は情報技術の発展の上に成り立っている。地球を覆う高速のインターネット通信網は、個人の携帯端末で世界中の人々に向けて動画をリアルタイムで配信することを可能にするなど、かつては想像もできなかったほどの利便性を我々にもたらした。世界各国が開発にしのぎを削るスーパーコンピュータは、気象災害を予測し、安全な乗り物を設計し、病を克服する新薬を開発することを可能にした。これらの情報化社会の発展を支えているのは、1970年代の低損失光ファイバの登場に端を発する光通信技術である。

近年のモバイルデバイスの急速な普及や、動画コンテンツの充実化に伴って IP トラフィックは指数関数的な増加を続けているが、利用者とインターネットを仲介するデータセンターのトラフィックの内訳で最も多くを占めているのは、データセンター内部での通信である [1]。そのため、これからも急増を続けるインターネットトラフィックを支えるため、データセンター内における低消費電力・大容量の短距離通信技術の需要が高まっている。また、高性能化の著しいスーパーコンピュータにおいても、高速な演算を実現するため CPU 間の大容量データ伝送技術の必要性が高まっている [2]。実際に、図 1 に示すように、スーパーコンピュータやデータセンターでは、高速の光インターコネク트가高性能化のための必須技術として導入され、図 2 に示すように膨大な光デバイスが使用されている。既に一つのシステムで 100 万チャンネルを超える光モジュール (光送受信デバイス) が使用され、この数は全世界の光通信システムで使用されるモジュール数に匹敵するという信じがたいスピードで急成長している [2,3]。従って、今や全世界の通信トラフィック量の大半は、データセンターやスーパーコンピュータ内での通信トラフィックで占められていると言ってよい。

面発光レーザ (VCSEL) は小型・低消費電力な半導体レーザであるため、現在すでに、データセンターやスーパーコンピュータの内部において VCSEL を光源とした光インターコネクションが主役になっている。図 2 に示すように、既に光インターコネク트의配線数も天文学的な数として急成長しており、今後の更なる伝送容量の拡大への要求に応える解の一つとし



“Roadrunner”, Los Alamos National Laboratory
<http://www.lanl.gov/index.php>

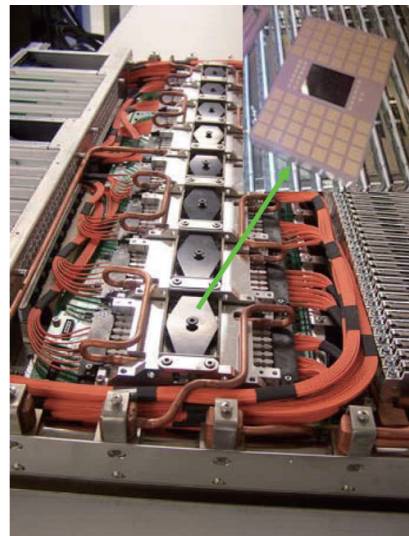


図 1. スーパーコンピュータにおける光インターコネクつ [2]。従来の電気配線の速度限界を打破するため、光ファイバ (写真のオレンジ色のケーブル) と光モジュールに置き換えられた。

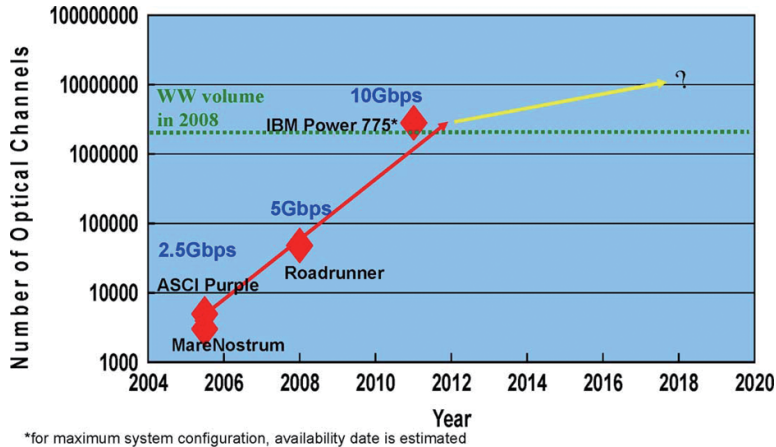


図2. スーパーコンピュータ内で使用されている光送受信モジュール数の推移[2]。

て、幹線系光通信で発展を遂げた波長分割多重 (Wavelength Division Multiplexing) 通信方式を、光インターコネクต์においても導入することが必須と考えられる。

WDM 通信は図3に示した通り、複数のチャンネルを異なる波長の光信号に割り当て、1本の光ファイバで並列して伝送する方式である。チャンネル数に比例してより多くの情報を伝送できるが、波長空間上でチャンネル間隔が密になるほど、それぞれの波長を精密に制御する必要がある。光源である半導体レーザは環境温度の変化に応じて波長が変動してしまうので、チャンネル同士の干渉を防ぐため、精密な温度制御による波長の安定化が不可欠である。しかし温度制御に用いるペルチェ素子は消費電力が高く小型化も困難であるため、膨大な数の光源を用いる短距離光インターコネクต์においては、システムの規模と消費電力の増大を招いてしまう。そのため図3に示したように、温調を不要とする半導体レーザの波長の温度無依存化(アサーマル化)が重要な課題である。同時に波長可変性を実現できれば、固定波長のレー

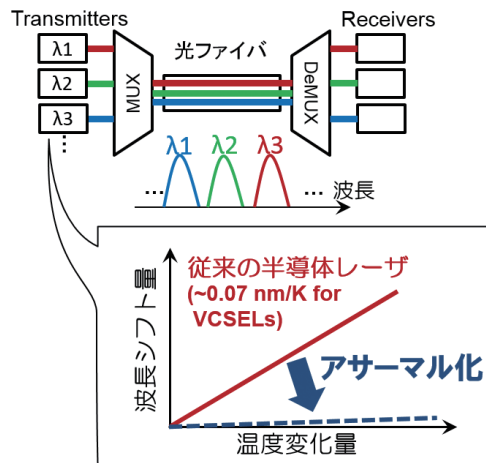


図3. 将来の WDM 光インターコネクットを可能にする半導体レーザの波長温度無依存化(アサーマル化)の概念図。波長が異なる複数のチャンネルを1本の光ファイバで伝送する。環境温度変化による波長変動を、温調を用いることなく抑制する。

ザを複数用いる必要が無く、システムの簡易化や波長スイッチングによる光配線の可変接続などの革新技術をもたらす。従って、半導体レーザーのアサーマル化と波長可変性を同時に実現する技術が、将来の光インターコネク트에革新をもたらすであろう。

半導体レーザーの波長の温度依存性は、共振器を構成する半導体材料の屈折率が温度によって変化し、共振器内を往復する光の光路長が変化することが原因である。つまり材料固有の性質に起因する現象であるため、これまでアサーマル化は非常に困難であった。DFB レーザ[4]やリング共振器レーザー[5]などの固定波長での報告例はあるものの、これらは広帯域な波長可変動作との両立は困難であった。

それに対して著者らは、マイクロマシン技術を応用して機械的に駆動する微細な反射鏡を面発光レーザーに集積した Micro-electro-mechanical system (MEMS) VCSEL 構造を用いることで、アサーマル化と波長可変性を両立できることを世界に先駆けて見出した。これまでに、アサーマル化に向けた波長温度係数制御や、波長可変性との両立の実証を行ってきた [6-9]。本論文では、マイクロマシン構造を用いたアサーマル波長可変レーザーの動作原理と設計手法について述べ、実際にアサーマル動作と広帯域波長掃引動作を初めて実現した素子の特性を明らかにする。最後に、同様のマイクロマシン構造を用いた、様々な分野への応用例を紹介する。

2. 動作原理とデバイス設計

ここではまず、我々の提案する波長可変デバイスの基礎となるマイクロマシン共振器の動作原理について述べる。図4はその構造を模式的に示したものである。量子井戸を含む活性層及びエアギャップが高反射率の分布ブラッグ反射鏡 (DBR) によって挟まれた構造であり、光は其中で積層方向に多重反射を繰り返しながら共振する。その往復の距離を $2L$ とすると、この共振器の中に局在モードとして存在できる光の波長 λ は共振条件 $m\lambda/2 = nL$ で決まる。この式から、共振波長の変化量 $\Delta\lambda$ は次のように表される。

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta\bar{n}}{\bar{n}} + \frac{\Delta L}{L} \quad \dots \quad (1)$$

面発光レーザーの共振器長 L は数波長程度であるため、僅かに変化させるだけで大きな波長変化量を得ることができる。この性質を波長可変動作に利用したのが MEMS VCSEL である [10,11]。

著者らは更に、これを半導体レーザーの波長の温度依存性制御にも利用できることに着目した。共振器の温度が ΔT だけ上昇したとき、波長の変化量は式(1)から以下のように表される。

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta T} = \frac{1}{\bar{n}} \frac{\Delta\bar{n}}{\Delta T} \lambda + \frac{1}{L} \frac{\Delta L}{\Delta T} \lambda \quad \dots \quad (2)$$

第1項目は半導体の屈折率の温度依存性による寄与である。半導体の屈折率は温度上昇に伴って増加するので、光が往復する光路長が増加し、波長が長波化する。その結果である波長温度係数は、通常的面発光レーザーにおいては $+0.07\text{nm/K}$ 程度であることが知られている。それに対して第2項目は、温度変化によって共振器長が変化することによる寄与である。つまり、温度変化による共振器長の機械的な変化量 $\Delta L/\Delta T$ を設計することで、波長温度係数を自由に制御することが可能である。よって、両者が打ち消しあうように設計すれば、屈折

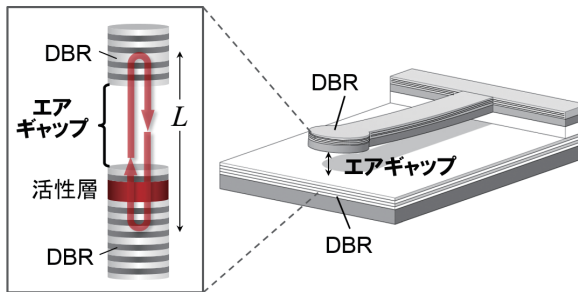


図4. マイクロマシン共振器。数波長程度の微小な空間に光が閉じ込められている。エアギャップの厚さを変化させることで、波長をダイナミックに制御できる。

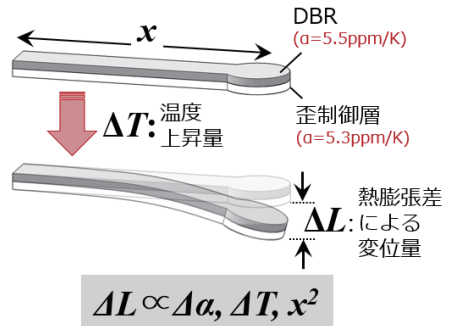


図5. 片持ち梁型の熱駆動マイクロマシン。熱膨張量の差によって先端の反射鏡が駆動する。温度変化当たりの駆動量は、片持ち梁の長さによって制御できる。

変化による波長シフトを共振器長変化によって自動的に補償し、温度係数をゼロにするアサーマル化が可能になる。

温度変化に応じて共振器長を適切に変化させるため、我々は図5に示す熱バイモルフ効果に基づく熱駆動マイクロマシンを面発光レーザに集積した、MEMS VCSELを提案している。その素子構造の概略図を図6に示す。上部反射鏡は片持ち梁型マイクロマシンによって保持されており、機械的に駆動することで共振器長が変化する。片持ち梁は半導体DBRと1波長厚さの「歪制御層」で構成されている。歪制御層の線膨張係数はDBRの平均値よりも小さいため、温度上昇によって先端の反射鏡が下方向に駆動し共振器が短尺化する。温度変化量当たりの駆動量、すなわち式(2)中の $\Delta L/\Delta T$ は、半導体成長時に決定される層構造と線膨張係数差の他に、片持ち梁の長さの2乗に比例する。従って、デバイス製作の際にフォトリソグラフィのパターンを変え、片持ち梁の長さを変えることによって、波長温度係数を制御できる。図7は一例として、 $120\mu\text{m}$ と $160\mu\text{m}$ の片持ち梁の素子の温度上昇による波長変化量を測定した結果である。 $120\mu\text{m}$ の片持ち梁の素子では波長温度係数が通常の1/2に抑制されていることが分かる。さらに長い $160\mu\text{m}$ の場合では、片持ち梁の熱駆動による波長シフトの補償量が過剰であるため、波長は温度上昇に応じて負の方向にシフトし、温度係数は -0.15nm/K になった。このように、熱駆動マイクロマシンを面発光レーザに集積することで波長温度係数を構造制御によって自在に制御できることが、理論と実験の両面から確認した[12]。

更に、波長の波長可変動作は静電力によって片持ち梁を駆動することでアサーマル動作と広帯域波長掃引動作の両立が可能になることを見いだした。図6(右)に示すように、レーザのn型電極と片持ち梁のチューニング電極の間に電圧を加えることによって、片持ち梁が基板側に引き付けられることで共振器が短尺化し、連続的な波長可変動作が可能である。固定波長の導体レーザのアサーマル化はDFBレーザ[4]やリング共振器レーザ[5]などで不完全ながらその報告例があるが、これらは負の屈折率温度依存性を持つ材料で共振器の一部を構成することで、半導体の正の屈折率温度依存性を打消し、共振モードの等価屈折率の温度依存性(式2第1項)をゼロに近づけるとい原理に基づいている。それに対して著者らの提案

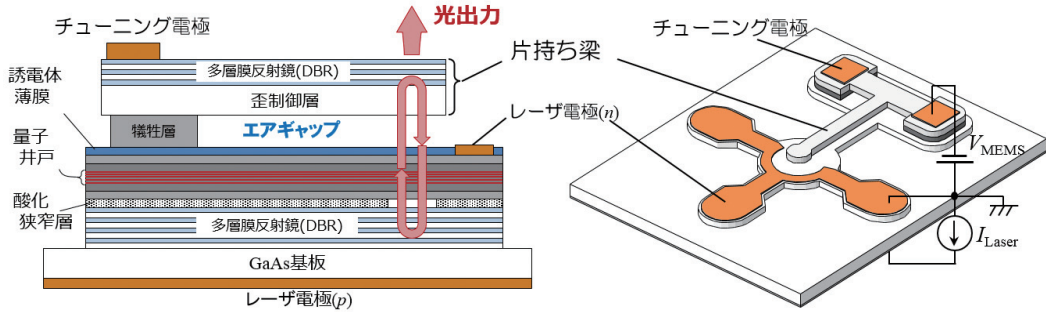


図6. 提案する波長可変アサーマル波長可変面発光レーザ。面発光レーザの上部反射鏡は片持ち梁型マイクロマシンによって中空に保持されており、片持ち梁の熱駆動によって共振器長を短尺化することで、温度変動による波長シフトを自動補償する。

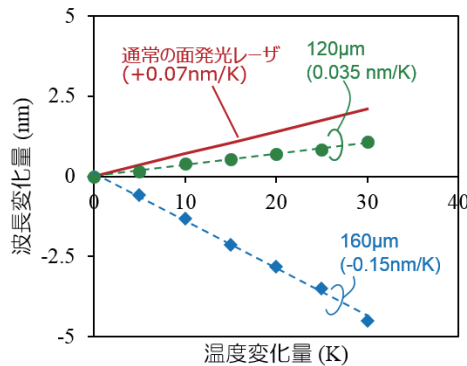


図7. 片持ち梁の長さによる波長温度係数制御[12]。温度変化量当たりの波長シフト量を、片持ち梁の長さを変えることで制御可能である。片持ち梁の長さを適切に設計することで、温度変化によって波長が変化しないアサーマル化が実現できることを示している。

する構造は片持ち梁の熱駆動による共振器長変化を利用するものであり、それとは独立して静電力によっても片持ち梁を駆動できるので、アサーマル化と波長可変動作の両立が可能であるという点で、本質的に異なる新しい発想である。

以上のようにして、面発光レーザに集積した片持ち梁型マイクロマシンの熱駆動と静電力駆動を併用することで、これまで困難であったアサーマル化と波長可変動作の両立を初めて可能にする。また、面発光レーザ構造に基づいているため、低消費電力動作と高速変調、さらに高密度アレイ実装など、将来の光インターコネクトに向けた革新技術に発展すると信ずる。

3. デバイスの製作と実験結果

前節で述べた構造設計に基づき、図8に示すプロセスでデバイスの製作を行った。

まず、有機金属気相成長(MOCVD)法を用いてウェハを結晶成長した。集積するマイクロマシンは半導体材料で構成されているので、面発光レーザ構造と一括して成長することがで

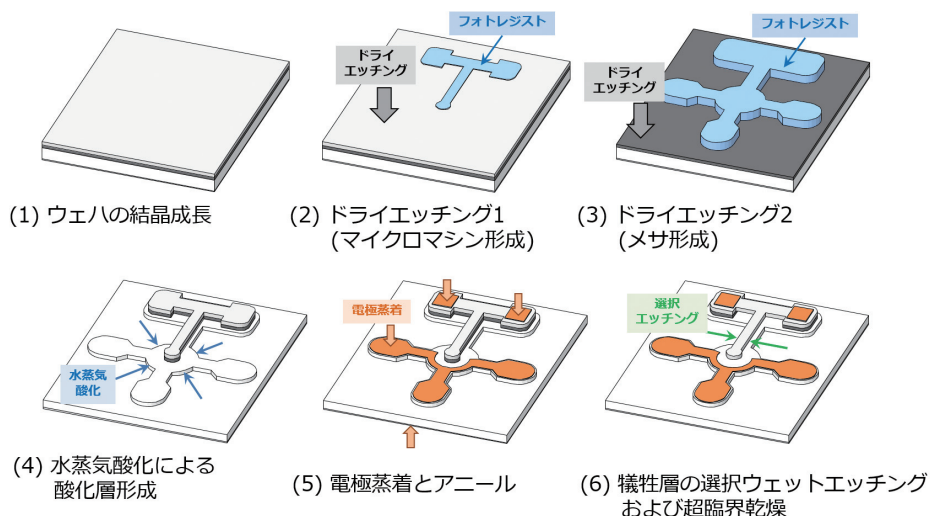


図8. デバイス製作プロセス。

きる。次にフォトリソグラフィとドライエッチングにより片持ち梁を形成した。この際に片持ち梁の長さが決定される。

続いて同様の工程でレーザのメサ構造を形成したのち、高温の水蒸気雰囲気酸化で高アルミ組成の半導体層を選択酸化し、酸化狭窄構造を形成した。そして金属蒸着及び熱アニール処理により電極を形成した。最後に、片持ち梁の直下の犠牲層を選択的にウェットエッチングすることで、片持ち梁が基板からリリースされ自由に駆動できる状態にした。マイクロマシンの加工プロセスにおいて共通の課題であるが、リリース後の片持ち梁のような微細構造は、乾燥の際に溶液の表面張力によって破壊されてしまうという問題がある。これを避けるため、ウェットエッチング後の乾燥には超臨界乾燥法を用いた。

ガリウムヒ素基板上に製作された素子の写真と、それを拡大した電子顕微鏡写真を、図9に示す。1円玉との比較写真から分かるように、我々の素子は面発光レーザの構造に基づいているため、大量の素子を一括して高密度のアレイ状に製作できるので、低コストで大量生産することができる。実際に、写真に示した数ミリ角のガリウムヒ素基板上には約100個もの素子が高密度に製作されている。

電子顕微鏡写真はそのうちの1つの素子を拡大したものである。素子サイズはおよそ $200\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$ 程度である。面発光レーザの上部反射鏡が片持ち梁によって中空に保持されており、直下に約 $1\mu\text{m}$ のエアギャップが形成されていることが確認できる。

製作した素子の波長可変特性と波長温度係数の測定を行った。素子温度はペルチェ素子によって制御している。レーザの自己発熱量の変動による波長シフトの影響を避けるため、レーザへの電流注入量は一定の値に保った。光出力はマルチモードファイバに直接結合させ、光スペクトルアナライザでスペクトルを測定した。

静電力による波長可変特性を図10(a)に示す。印可電圧を増加させるに伴って波長が短波長化し、 30nm 以上の広い範囲に渡って連続的な波長掃引を実現した。これは前述したように、面発光レーザの共振器長のわずかな変化が大きな波長変化をもたらす性質によるものである。このような波長可変性は、図3のようなWDM通信システムにおいて、従来の複数の

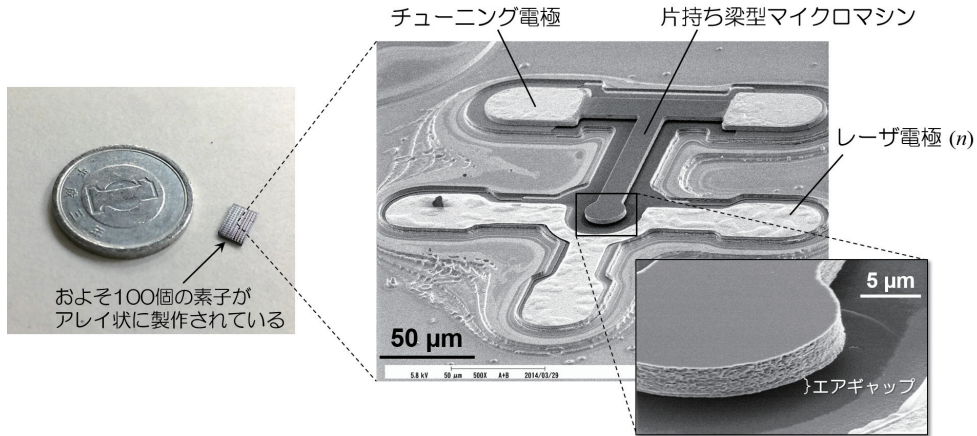


図9. 製作した MEMS VCSEL の電子顕微鏡写真。面発光レーザ構造に基づいているので、極めて微小な素子を一括して大量に製作でき、左の比較写真のように、1円玉よりも小さな半導体基板上に約100個の素子が並列して製作されている。素子には微小なマイクロマシンが集積されており、先端の反射鏡は中空に浮いた状態で、機械的に駆動することができる。

固定波長レーザを1種類のレーザに置き換えることができ、システムの簡易化や低消費電力化に有用である。

続いてそれぞれの波長での波長温度係数の測定結果を図10(b)に示す。動作波長と波長温度係数の関係を明示するため、横軸を20℃における波長、縦軸を波長温度係数として示している。波長可変幅全域にわたって通常の VCSEL よりも遥かに小さな温度係数を維持しており、特に836.4nm から847.8nm までの約10nm に渡って、通常の1/10以下に低減した状態での波長可変動作に成功している。

図10(c)はこの波長範囲における温度ごとの発光スペクトルを測定したもので、温度が20℃から50℃まで変化しているにもかかわらず、波長がほぼ変動していないことが分かる。この結果はアサーマル動作と波長可変動作の両立を明確に示すものであり、著者らの知る限り本研究が世界初である。このような特性を実現することによって、小型化が難しく消費電力が高いという問題を抱える温度制御器が不要になり、将来の WDM 光インターコネクタにおける光源モジュールを、より小型で低消費電力、そして安価なものにできると期待している。

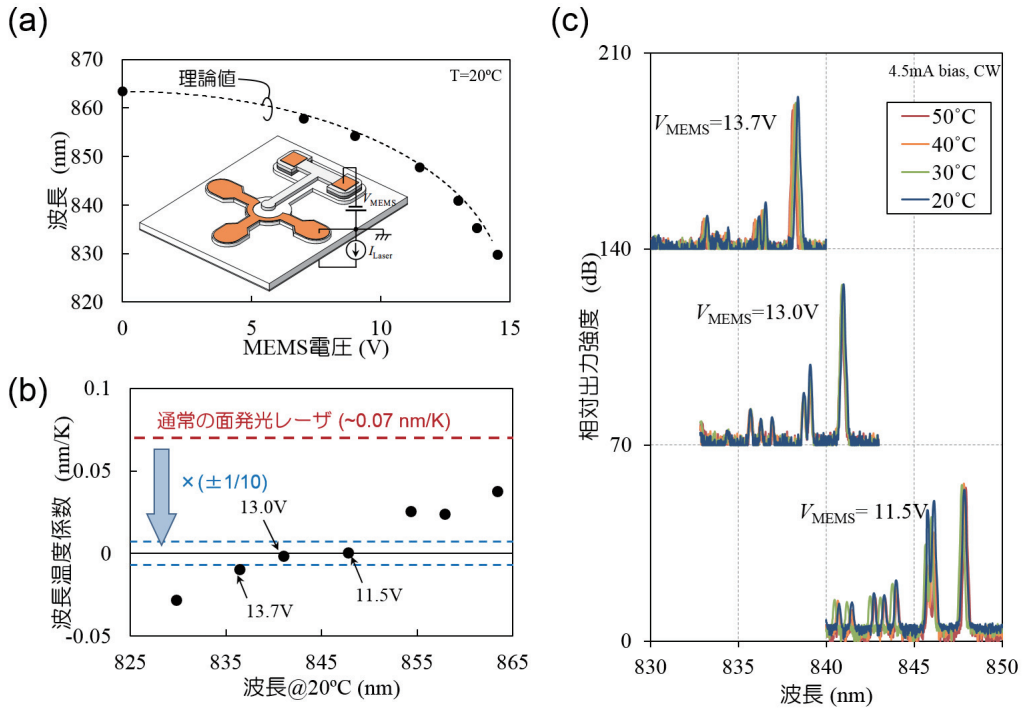


図10. 製作したMEMS VCSELの測定結果。

- (a) 静電力による波長掃引特性。はめ込み図に示したように電圧を印加することで、波長を連続的に変化させることができ、図3のWDM通信用光源として、1種類の素子で複数の波長を出力できる。
- (b) 波長ごとの温度係数。10nmの広い波長範囲に渡って、通常の面発光レーザの1/10以下に抑制できている。
- (c) 温度ごとの発光スペクトル。20℃～50℃のスペクトルを重ねて表示しているが、温度変動による波長シフトがほぼ無く、波長可変動作とアサーマル化の両立に成功していることを示している。

4. まとめと今後の展望

本研究では、マイクロマシン技術を応用したMEMS VCSEL構造を用いて、広帯域な波長可変動作と波長温度無依存性を同時に行うアサーマル波長可変面発光レーザを初めて実現した。熱応力によって駆動するマイクロマシン反射鏡を面発光レーザに集積することで、波長温度係数を自在に設計できることを明らかにすると共に、従来困難であった波長可変動作との両立を実現するデバイス構造の提案を行った。

実際に半導体加工技術を駆使してデバイス加工プロセスを確立し、製作した素子において30nm以上の広帯域な波長可変動作を実現するとともに、温度係数を通常のVCSELの1/10以下に抑制したまま約10nmに渡る連続波長掃引が可能であることを実証した。半導体レーザのアサーマル化と広帯域の波長可変動作の両立は世界的に見ても他に例がなく、本研究は

将来の高速光インターコネク用光源モジュールを実現するための革新技術を開拓したといえる。

最後に今後の将来展望をまとめる。本稿では MEMS VCSEL の光インターコネクへの応用例をご紹介したが、同構造は光通信に留まらず、以下のような様々な分野への展開が期待できる。

1) 広帯域波長可変性能の極限追求

本稿でご紹介した MEMS VCSEL は半導体材料の線膨張係数差を利用した熱駆動マイクロマシンを有するものであるが、より線膨張係数差の大きな異種材料を用いることで、波長温度係数を積極的に増大させることができる。例えば誘電体 / 半導体では通常の +11 倍 [13,14]、金属 / 半導体では通常の -28 倍の巨大な温度係数が得られている [15]。この構造にマイクロヒータを集積することで、低消費電力で波長掃引が可能であることを報告している [9]。静電力型マイクロマシンの駆動量は、電圧無印加時のエアギャップの 1/3 に制限されるのに対して、熱駆動型にはその制限が無いいため、より広い波長可変幅が得られる。このような光源は、ガスセンシングなどへの応用が期待できる。

2) MEMS VCSEL の単一モード出力の限界打破

単一モードで動作する MEMS VCSEL の光出力は、活性層体積が微小であるがゆえに数 mW 程度に留まっているのが現状である。この限界を打破するため、我々が提案しているブラッグ反射鏡スローライト導波路 [16,17] との集積構造を用いて、単一モード光出力を数十 mW クラスにまで増大できる可能性を報告している [18]。このような高出力・広帯域波長掃引光源は、生体細胞のイメージング技術である光コヒーレンストモグラフィなどの医療分野への応用が期待できる。

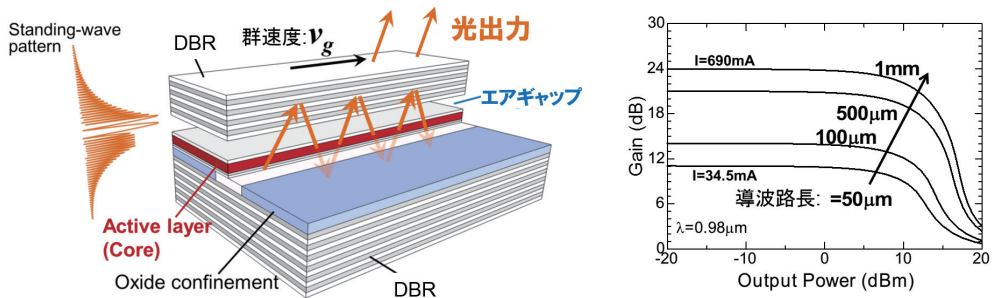


図 11. MEMS VCSEL のシングルモード出力増大のための、ブラッグ反射鏡導波路との集積構造 [18]。集積する導波路の長さ に 比例 して 光 出力 を 増 大 さ せ る こ と が 可 能 だ る。

3) MEMS VCSEL の新機能創出

同様に、ブラッグ反射鏡スローライト導波路との集積構造により、出力される光の方向を電気的に掃引するオンチップのビームスキャナの実現可能性も報告している [19]。従来のビーム掃引デバイスは光源の他にポリゴンミラーなどの大型の光学系で構成されるものであり、機械的な動作速度の限界や小型化が困難であるという問題があった。提案する構造は図

8で示したものとほぼ同様の半導体プロセスで大量に製作でき、かつ非常に小型であるというメリットがある。このようなデバイスは、レーザレーダなどの光センシング技術への応用が期待できる。

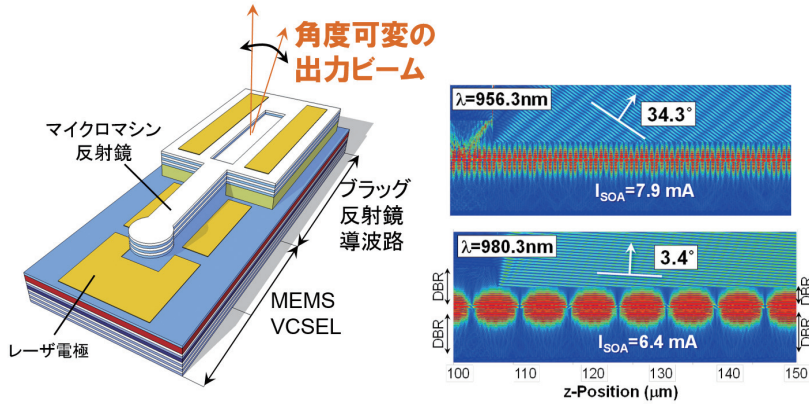


図12. MEMS VCSEL の新機能創出の一例。出力ビームの方向を電氣的に掃引するビームスキャナをオンチップで実現できる[19]。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、指導教官である小山二三夫教授から熱心なご指導を賜りました。ここに深い感謝の意を表します。また、研究を進める上でお世話になった松谷晃宏博士、坂口孝浩助教、佐野勇人博士、中田紀彦氏、顧曉冬氏をはじめとする共同研究者の皆様に感謝いたします。

参考文献

- [1] C. F. Lam, Liu Hong, B. Koley, Zhao Xiaoxue, V. Kamalov, V. Gill, Communications Magazine, IEEE , 48,7 (2010) 32
- [2] M. A. Taubenblatt, "Optical Interconnects for High-Performance Computing," J. Lightwave Technol, vol. 30, no.4, pp.448-457, (2012).
- [3] 富士通, スーパーコンピュータ「京」のさらなる先を見据えて
<http://jp.fujitsu.com/journal/strength/technologies/201201.html>
- [4] S. Sakamoto, H. Kawashima, H. Naitoh, S. Tamura, T. Maruyama, and S. Arai, IEEE Photon. Technol. Lett., 19, 5 (2007).
- [5] R. Ushigome, M. Fujita, A. Sakai, T. Baba and Y. Kokubun, Jpn. J. Appl. Phys., 41 (2002) 63.
- [6] W. Janto, K. Hasebe, N. Nishiyama, C. Caneau, T. Sakaguchi, A. Matsutani, F. Koyama, and C. E. Zah, 20th Int. Semiconductor Laser Conf. (ISLC2006), PD1. (2006)
- [7] H. Sano, A. Matsutani, F. Koyama: Applied Physics Express. 2 (2009) 072101.
- [8] H. Sano, N. Nakata, M. Nakahama, A. Matsutani, F. Koyama: Applied Physics Letters.

- 101 (2012) 121115.
- [9] M. Nakahama, H. Sano, S. Inoue, T. Sakaguchi, A. Matsutani and F. Koyama, IEEE Photonics Technology Letters, 25 (2013) 1747.
 - [10] C. Chang-Hasnain: IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 6 (2000) 978.
 - [11] J. S. Harris: IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 6 (2000) 1145.
 - [12] Masanori Nakahama, Hayato Sano, Shunya Inoue, Takahiro Sakaguchi, Akihiro Matsutani, Moustafa Ahmed, Ahmed Bakry, Fumio Koyama. Jpn. J. Appl. Phys., vol. 53, no. 1, pp. 010303-1-3, Dec. 2013.
 - [13] Masanori Nakahama, Hayato Sano, Norihiko Nakata, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama. Giant wavelength-temperature dependence of a micro-machined VCSEL with a thermally actuated cantilever structure, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 51, no. 4, pp. 040209-1-3, Mar. 2012.
 - [14] Masanori Nakahama, Hayato Sano, Norihiko Nakata, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama., IEICE Electronics Express, vol. 9, no. 5, pp. 416-421, Mar. 2012.
 - [15] M. Nakahama; H. Sano ; S. Inoue ; A. Matsutani ; T. Sakaguchi and F. Koyama. Proc. SPIE 8639, Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XVII, 86390F (March 13, 2013);
 - [16] X. Gu, T. Shimada, and F. Koyama, Opt. Express, vol. 19, no. 23, pp. 22675-22683 (2011).
 - [17] X. Gu, T. Shimada, A. Fuchida, A. Matsutani, A. Imamura, and F. Koyama, Appl. Phys. Lett., vol. 99, no. 21, pp. 211107-1 ~3 (2011).
 - [18] Masanori Nakahama, Toshikazu Shimada, Fumio Koyama., IEICE Electronics Express, vol. 9, no. 6, pp. 544-551, Mar. 2012.
 - [19] Masanori Nakahama, Xiaodong Gu, Toshikazu Shimada, Fumio Koyama., Jpn. J. Appl. Phys., vol. 51, no. 4, pp. 040208-1-3, Mar. 2012.