

高性能なチップスケールレーザが登場

サリー・コール・ジョンソン

コロンビア大の研究者らは、赤色よりも短い可視波長域のチューナブルで狭線幅のチップスケールレーザを、世界で初めて開発した。これは、とてつもなく素晴らしい一連の応用分野の扉を開くものである。

集積フォトニクスによる完全な微細化の達成に欠けていた重要な部品が、ようやく誕生した。それは、高性能なチップスケールレーザである。

米コロンビア大(Columbia University)のミハル・リプトン教授(Michal Lipson)のナノフォトニクスグループ(図1)は最近、指先の上に収まる高性能可視光レーザプラットフォームを実際に構築した。これは、赤色よりも短い波長域のチューナブルで狭線幅のチップスケールレーザを、最小のフットプリントと最短の波長(404nm)で実現する、世界初のプラットフォームである。

同グループのプラットフォームは、これまでベンチトップ型の高額なレーザシステムでしか達成できなかった、チューニング範囲、チューニング速度、線幅、出力、サイドモード抑圧比(Side Mode Suppression Ratio: SMSR)などの性能指標を備え、量子光学、原子時計、バイオセンシング、拡張現実(AR)／仮想現実(VR)用のレーザディスプレイ、水中Li-Fiにおける応用の扉を開くものである。

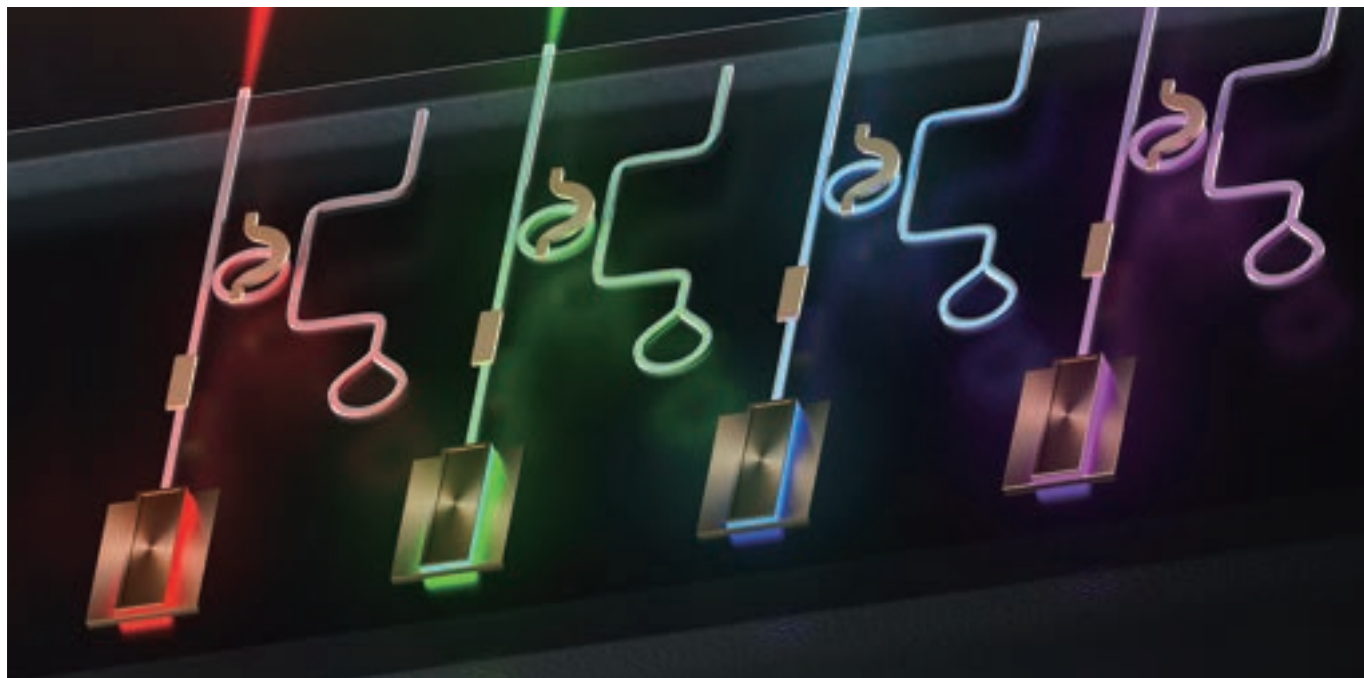
「可視光の集積フォトニクスに取り組んでいた時に、高性能な可視光レーザが大きくて高価なために、多くの研究施設にとって利用しにくい状態にな

っていることに気づいた」と、同プラットフォームの構築に携わった電気工学博士課程の学生であるマテウス・コラト・ザナレラ氏(Mateus Corato-Zanarella)は述べた。

ポータブルな原子時計やAR/VR技術といった、いくつかの重要な分野で、「光学システムに出力を供給するためのベンチトップ型レーザが、高額すぎて利用できない」として、「小型で安価な高性能可視光レーザが必要であることが明らかだったので、集積フォトニクスを使用してそれを構築することにした」と同氏は述べた。

チップスケール レーザプラットフォームの構築

同グループのチップスケールレーザプラットフォーム(図2)の背景にある



コロンビア大のミハル・リプトン教授のナノフォトニクスグループが開発したチップスケールレーザプラットフォームの図(画像提供: 同グループ所属 Myles Marshall氏)

最も重要なコンセプトは、自己注入同期である。自己注入同期とは、出力光の一部を反射させてレーザキャビティに戻すことにより、レーザ発光を改変する処理である。

「この取り組みでは、われわれが設計したフォトニック集積回路 (PIC) を使用することにより、既存の半導体レーザの発光を、この物理現象を利用して改変および制御した。各レーザはもともと、特定の色合いの複数波長の光を放射する。われわれの PIC 中の低損失のマイクロリング共振器に基づく帰還ループを使用することにより、単一の波長を選択して、その光の一部を反射させて半導体レーザに戻した」と、コラト-ザナレラ氏は説明した。

同氏によると、この選択的な光帰還により、選択されたレージングモードは、「他のすべてとの競争に勝ってゲインを獲得し、レーザの全光出力がそれに集約して、挟線幅の単一周波数発光となる。マイクロリング共振器をオンチップの位相シフタで電氣的に制御することによって、勝たせるレージングモードを選択し、それによって発光波長を調整する」という。

この自己注入同期のコンセプトは、大型である場合が多い、外部キャビティレーザにおいて長年使用されてきたものだが、「われわれは今回、可視波長用に設計されたフォトニック集積プラットフォームにこれを適用した」と、コラト-ザナレラ氏は続けた。

豊富な応用分野

同グループの取り組みの最も驚くべき点は、その集積型レーザプラットフォームが非常に高性能で、チップスケールフォームファクタの最先端スケールのレーザが実現できることにある。「われわれの取り組みは、高性能可視

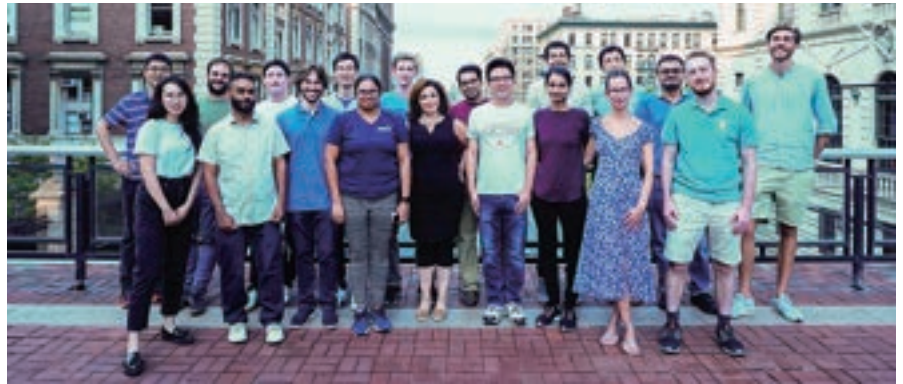


図1 リプトン教授(中央)とナノフォトニクスグループ。前列左から3人目がコラト-ザナレラ氏(写真提供:ナノフォトニクスグループ)

光レーザはベンチトップ型でなければならないという常識を覆し、無数の応用分野に対する完全集積型の可視光システムの扉を開く」と、コラト-ザナレラ氏は述べた。

まずは、量子情報に使用できる。量子計算用のほとんどの量子ビットで、原子またはイオンのトラップやプローブが可視光によって行われるためである。「原子遷移に対応するには、光は非常に純粋(挟線幅)で、非常に限定された波長を持たなければならない。現在、これらの応用分野向けに提供されているレーザは、高額でベンチトップ型である。それらの大きな装置を安価な微小チップに置き換えることができれば、量子システムのサイズを縮小して、将来的には、一般大衆が利用できる技術に組み込むことができる」と、コラト-ザナレラ氏は述べた。

原子時計にもメリットがある。「最先端の原子時計は、非常に高精度で、ストロンチウム原子に基づいている。これらの原子を多数の異なる色のレーザで同時にトラップしてプローブする必要がある。量子光学システムと同様に、現在提供されているレーザのサイズが非常に大きいため、この技術の利用は研究施設に限定されている。チップスケールレーザは、これらのシス

テムを縮小して、ポータブルな原子時計の開発を目指すことを可能にする」と同氏は述べた。

バイオセンシングでは、複数の神経プローブで、神経反応の測定、改変、理解に光遺伝学が用いられている。「光遺伝学では、神経細胞の遺伝子操作によって、可視光に反応するタンパク質の1種であるオプシンを生成する。通常は青色の可視光をこれらの細胞に照射することにより、特定の神経細胞を意のままに活性化させることができる。同様に、蛍光イメージングでは、所望のイメージを生成するために、蛍光色素を可視光で励起する必要がある。われわれの高性能な小型レーザは、これらのシステムの小型化を可能にす

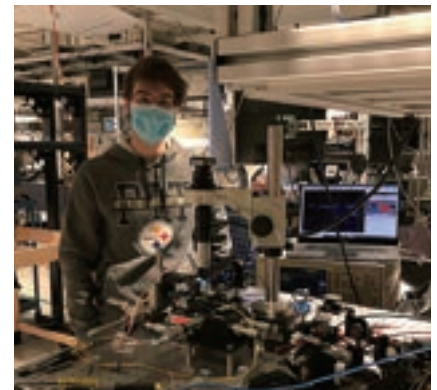


図2 研究室で青色半導体レーザからの光をフォトニックチップに結合するコラト-ザナレラ氏(写真提供:Aseema Mohanty氏)

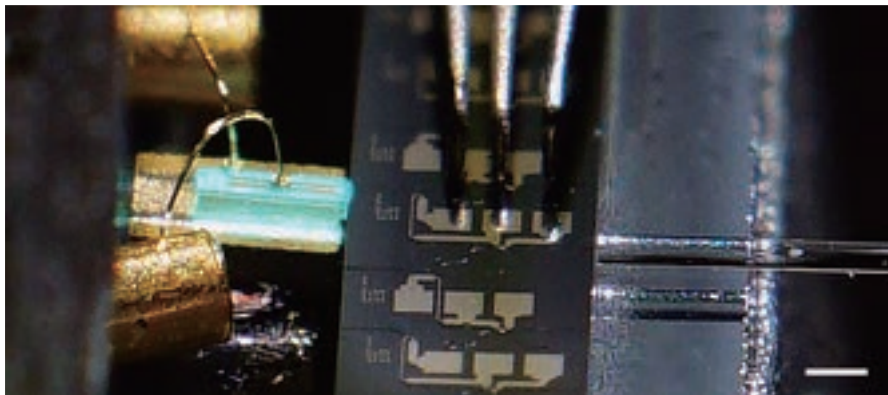


図3 ファブリペロー半導体レーザをフォトニックチップに結合することによって構成された青色チップスケールレーザ(画像提供: コラト-ザナレラ氏/doi:10.1038/s41566-022-01120-w)

る」と、コラト-ザナレラ氏は述べた。

水中測距はどうだろうか。「水中測距には、青色または緑色の光が必要だ。それ以外の色の光はすべて海水に強く吸収されるためである。広く利用されている周波数変調連続波ライダの測距方法では、物体の距離と速度を正確に検出するために、レーザを高速にチューニングする必要がある。われわれのレーザは、この技術を利用するポータブルな水中測距システムに使用できる可能性がある」と同氏は述べた。

そしてLi-Fiだ。「通信システムの帯域幅需要の高まりに伴い、ネットワークは飽和状態に達している。可視光通信であるLi-Fiは、従来のマイクロ波リンクをユーザーエンドで補完することによって、このボトルネックを解消するものである。われわれのレーザは変調速度が高いため、非常に高速な光通信リンクの実現に理想的だ」と、コラト-ザナレラ氏は述べた。

チップスケールレーザ実現の課題

同グループが克服すべき最大の課題は、可視波長における集積型プラットフォームの高損失特性を緩和しつつ、ほぼオクターブをカバーする堅牢な広帯域動作を達成することだった。

「赤色よりも短い波長では、フォトニック集積回路の結合損失と伝搬損失は著しく増加し、それがこれらの色における高性能レーザの実現を阻んでいた。われわれは、ファブリペロー(Fabry-Perot: FP)半導体レーザを選択することによって、結合損失の問題を解決した。それによって、チップスケールレーザの性能に対する損失の影響を最小化した」と、コラト-ザナレラ氏は述べた。

異なる種類の光源を使用する他の方法とは異なり、同グループの手法は、記録的に短い波長(404nm)のレーザの実現が可能である。またこのレーザは、光出力をさらに上げるスケーラビリティも備える。

「FP半導体レーザは、研究界と産業界で広く用いられる安価でコンパクトな固体レーザだが、複数波長の光を同時に放射し、簡単にはチューニングできないため、純粋で高精度なレーザを必要とする応用分野にはそのまま使用できない。これを特別に設計されたフォトニックチップ(図3)と組み合わせることにより、単一周波数で狭線幅で広くチューニング可能になるように、レーザ発光を改変することができる」と、コラト-ザナレラ氏は説明した。

同氏らは、材料吸収と表面散乱損失の両方をすべての可視波長で同時に最小化するようにプラットフォームを設計することにより、伝搬損失の問題を解決した。導光には、窒化ケイ素を使用した。窒化ケイ素は、半導体業界で広く用いられている誘電体で、すべての色の可視光を透過する。

「吸収は最小限だが、作製工程に起因する不可避な粗さによって、光にはやはり損失が生じる。特殊な種類のリング共振器を備えたフォトニック回路を設計することによって、この問題を解決した。このリング共振器は外周の幅が可変で、狭い導波路のシングルモード動作と広い導波路の低損失の両方の特性が実現できる」と、コラト-ザナレラ氏は述べた。

このようにして得られたフォトニック回路によって、波長選択された光帰還をFP半導体レーザに提供することにより、強制的に所望の単一波長の光を非常に狭い線幅で出力させる。

上述のような複雑に設計された要素を組み合わせることによって、同グループは、スケーラブルで全色の光に対応する、堅牢で多用途なプラットフォームを構築した。

出願中特許

同グループは、この技術の特許を出願中で、次の目標は「このチップスケールレーザを、量子光学、イメージング、センシングなどの応用分野に簡単に使用できる、スタンドアロンのユニットにするための光学/電気パッケージングを開発」することだ、とコラト-ザナレラ氏は述べている。

謝辞
ミハル・リプトン氏は2023年に、Optica(旧米国光学会[OSA])の会長に1年の任期で就任した。