

チタンサファイアレーザが チップスケールに

サリー・コール・ジョンソン

チップ上に実装されたチタンサファイアレーザは、サイズ、効率、コストの面で、フォトリソ分野にとってのとてつもない破壊的技術である。加えて、可動部品を持たないということは、量産が可能であることを意味する。

エレナ・ヴチュコヴィッチ電気工学教授 (Jelena Vučković) が率いる米スタンフォード大 (Stanford University) の研究者らは、チタンサファイア (Tisapphire) レーザを集積回路 (平方ミリメートル単位) の上に実装した。これは素晴らしい偉業である。なぜなら、同グループのレーザは、これまでに開発されたどのチタンサファイアレーザと比べても、サイズは4ケタ小さく (1万分の1)、コストは3ケタ低く (1000分の1)、緑色のレーザポイントで駆動できるためだ。

チタンサファイアレーザは現在、ど

のレーザ結晶よりもゲイン帯域幅が大きく、超高速であることから、量子光学、分光法、神経科学の実験において、他の追随を許さない性能を誇る。しかし、サイズが巨大で (体積は立方フィート単位)、1台数十万ドルもする。また、これを動作させるには、機能するのに十分なエネルギーを供給するために、1台平均3万ドルもする別の高出力レーザが必要になる。

「スタンフォード大のわれわれのグループである Nanoscale and Quantum Photonics Lab は、ダイヤモンドや炭化ケイ素のような材料の中の固体スピニキュービットに関する多くの量子実験を行っており、市販のチタンサファイアレーザに大いに依存している」と、博士課程の学生でヴチュコヴィッチ教授とともに研究に従事するジョシュア・ヤン氏 (Joshua Yang) は述べた。

高額であることに加えて、チタンサファイアレーザは複雑で、動作上の問題を解消するために定期的な保守が必要になる傾向がある。ヴチュコヴィッチ教授のグループは、かなり多くの実験を行うため、チタンサファイアレーザの数がとにかく足りない。装置を共有することになるため、実験スケジュールを慎重に管理しなければならない。また、実験に必要な出力レベルと、市販のチタンサファイアレーザの出力が大きく異なるために、レーザ出力を

数ケタ減衰させており、出力の大半を無駄にしている。

「チップベースのチタンサファイアレーザは、われわれが市販のシステムで抱えていたほぼすべての問題を解決し、高精度な実験に必要な高い性能を備えた、安価で小型で堅牢なレーザである」と、ヤン氏は述べた。

巧妙なレーザ設計

同グループのレーザ設計は、導波路とリング共振器という2つの主要要素で構成される。

これを構築するために、チタンサファイアのバルク層を二酸化ケイ素 (SiO_2) のプラットフォーム上に配置し、それをサファイア結晶上に配置した。チタンサファイア層は、わずか数百ナノメートルの厚さになるまで、研削、エッチング、研磨される。次に、チップ全体に光を導く導波路のパターンをその上に描画する。導波路は、渦巻き状の小さな畝のような形状をしている。

マイクロスケールのヒーターで導波路を加熱すると、その屈折率と、伝播する光の速度が変化する。これによって光の色 (波長) を、赤色から赤外波長の範囲で調整することができる (現在は60nm)。

「われわれの導波路増幅器は、それを通るレーザ光のパワーを増加させる渦巻き状になっている。リング共振器は、マイクロヒーター調整によるレーザ波長の制御を可能にする、フィルタとしての役割を果たすと同時に、レーザにはキャピティ (光が循環できる経



エレナ・ヴチュコヴィッチ教授とジョシュア・ヤン氏。研究室にて。ヤン氏が手にしているのはレーザと、大きさを示すためのチタンサファイアのブロックである (写真提供: Eran Lustig氏)

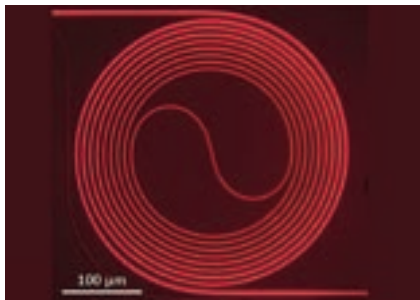
路)が必要であるため、再循環素子としての役割も果たす」と、ヤン氏は説明した。

開発時に遭遇した課題

チタンサファイアレーザの取り扱いで最も難しい点の1つは、動作のために高い励起強度が必要なことである。同グループは、チタンサファイア技術を高閉じ込めの導波路に変換することにより、次の2つの重要なことを成し遂げた。

1つ目として、励起強度は、出力を面積で割った値である。同グループは、チタンサファイアのフォトニック導波路を使用することにより、面積を大きく縮小することに成功した。「これは、はるかに低い出力(1000分の1)で、市販のバルクチタンサファイアシステムで使われているものと同等の励起強度が得られることを意味する。その結果、安価な緑色の半導体レーザでも、われわれのチップスケールレーザを十分に励起することができる」とヤン氏は述べた。

2つ目は、チタンサファイアレーザをチップ上に実装したことである。「これによって、自由空間システムにはない小型化、スケールアップ、堅牢性が得られ(可動部品はなくなる)、ウエハスケールの半導体製造技術を使用して量産



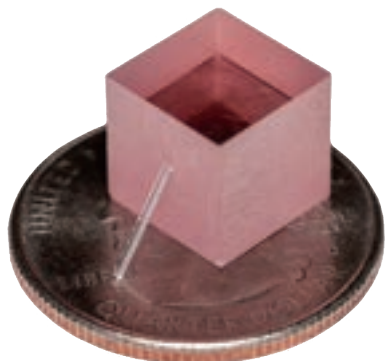
同グループの新しいレーザが、チタンサファイアのブロックに立てかけられている。大きさを示すために、両者は25セント硬貨の上に置かれている(画像出典:ネイチャー誌掲載のヤン氏他論文)

することができる」とヤン氏は続けた。

ヤン氏いわく、この取り組みの最も素晴らしい点は、同グループのチップスケールのチタンサファイアレーザが量子実験に使われていることである。「この小さなデバイスが、複雑な共振器量子電磁力学(Quantum Electrodynamics: QED)実験において、市販の大きなレーザシステムにとって代わるのを見るのは、まさに感動の瞬間だった。われわれは非常に特別なものを作り上げたのだと実感した」と同氏は述べた。

この状態にたどり着くために、ヴチュコヴィッチ教授のグループが乗り越えなければならなかった1つの課題は、励起出力の結合を最適化することだった。「われわれの実験では、自由空間を通してレーザを励起していた。しか

0.5平方ミリメートルに収まる、同グループのチタンサファイア導波路増幅器の光学画像(画像出典:ネイチャー誌掲載のヤン氏他論文)



し、フォトニックパッケージング技術を利用すれば、緑色の半導体レーザを、われわれのチップスケールのチタンサファイアレーザの励起源として直接統合することができる。パッケージ化されたシステムと改良された結合によって、より高いレーザ出力を、頑丈でポータブルなフォームファクタで生成することができた」とヤン氏は述べた。

可動部品がないため、このチップスケールのチタンサファイアレーザは量産可能で、1度に数千個を製造できる可能性がある。実際、研究者らは現在、数千個のチタンサファイアレーザを1枚の4インチウエハに配置する方法を模索している。これによってこのレーザのコストは、ただ同然にまでさらに低下することになる。

応用分野/時期

チップスケールのチタンサファイアレーザは、量子コンピューティングや原子時計といった量子技術から、光干渉断層撮影(OCT)や二光子顕微鏡といった医療用途にいたるまでの多くの分野で利用されることになるだろう。

「この技術が、今後数年のうちにそうした分野で利用できるまでに成熟することを望んでいる」とヤン氏は述べた。同氏は2024年夏の卒業後、Brightlight Photonicsという企業に勤めて、同グループが実証した増幅器とレーザの商用化に取り組む予定である。

「ヴチュコヴィッチ教授とそのグループは現在、チューナブルモードロック(パルス)チタンサファイアレーザのチップ実装に取り組んでいる」とヤン氏は付け加えた。

パルス動作は「量子技術、従来の情報処理、バイオメディカルサイエンスにおけるレーザの新しい可能性を切り拓く」と、ヴチュコヴィッチ教授は述べた。

LFWJ