

新世代の超高速チタンサファイアレーザー

ミン・ヤン

超高速チタンサファイアレーザーは現在、画期的な変貌を遂げようとしている。小さな半導体レーザーを使用したLD直接励起により、手頃な価格の超小型システムを実現することができる。

レーザーは1961年の発明以来、従来の光源では得られない、その比類ない卓越性によって、科学研究と産業の分野に前例のない機会をもたらしてきた。それ以来、レーザー性能は大きく進歩し、レーザーパルスはさらに短く、ピーク強度はさらに高く、レーザー出力はさらに増加している。中でも最も科学的に探究されているのが、超高速レーザーである。

チタンドープサファイア (Ti:sapphire) レーザーは、1986年に初めて発表されて以来、その広いゲイン帯域幅を理由に、常に超高速レーザーの最高峰に君臨してきた。それから40年が経ち、他の多くのゲイン媒体が、超短パルスの生成に使用されてきたが、レ

ーザー共振器から直接6fsという短い光パルスを生産するその能力に太刀打ちできるものは、1つも現れていない。超高速チタンサファイアレーザーは今でも、最も短いパルスを得るための最良の選択肢である。

チタンサファイアの 利便性を高めるための取り組み

チタンサファイアにも、さまざまな用途に対する手頃な価格の手段となるための独自の課題が存在する。チタンサファイアの励起吸収波長域は、光スペクトルの青から緑の領域内 (中心波長は約490nm) にあるため、非常に長い間、大きくて高額なアルゴンイオンレーザーと周波数2倍化固体レーザーが、

励起源として使用されていた。

今日のダイオード励起固体 (Diode Pumped Solid State: DPSS) レーザーは、808nmのダイオードを使用して、ネオジムドープまたは半導体ゲイン材料を励起して、約1064nmのレーザー出力を生成してから、周波数2倍化によって532nmに変換する。これらの中間工程のすべてが、かなりのスペースを必要とする上に、損失、熱、光学ノイズを生成する。そのために、チタンサファイアレーザーには通常、大きなレーザーヘッドと巨大な制御装置が装備されており、複雑な周波数変換によって生成される過剰な熱を取り除くためのチラーが必要であることは言うまでもない。高いコスト (一般的に10万ドル程度) と相まって、チタンサファイアレーザーはその疑う余地のない性能にもかかわらず、一般的な用途に利用しやすい、ユーザーフレンドリーなデバイスでは決してなかった。これらの制約が克服できない限り、超高速チタンサファイアレーザーは、限られた顧客に最高性能を提供する高額なシステムという現状を打破できない。

コンパクトさと手頃な価格という側面が明らかに欠落しているために、多くのユーザーが、コンパクトさ、コスト、堅牢性を理由に、超高速ファイバレーザーを選択する。ファイバレーザーは、パルス幅は約100fs、平均出力は数百mWと、チタンサファイアレーザーと比べると性能は控えめであるため、すべての用途に対して、チタンサファイアレーザーに代わる適切な手段というわけではない。超高速ファイバレーザーは、非線形効果と限られたゲイン帯域幅により、

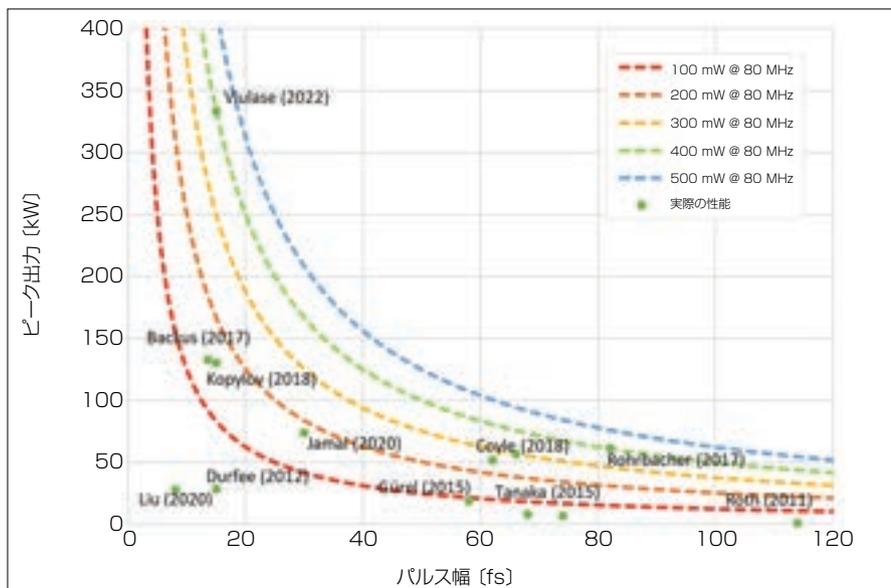


図1 科学的出版物に基づく、LD直接励起チタンサファイア発振器の出力レベルの過去10年間の推移

チタンサファイアレーザに匹敵する性能を達成することはできない。

どうすればチタンサファイアレーザは、ファイバレーザの手頃な価格とユーザーフレンドリー性に対抗できるのだろうか。

チタンサファイアレーザに転換点が訪れたのは2011年、Rothらによって、初めてのLD直接励起の超高速チタンサファイアレーザが実証されたときである⁽¹⁾。大きなDPSS励起がGaN LD（窒化ガリウム系半導体レーザ）に置き換えられたことにより、チタンサファイアレーザの最大の弱点が緩和された。しかし、GaN LDは当初、理想的な波長では発光せず、出力が限られており、ビーム品質が低かったため、このようなLD直接励起システムの出力はかなり低かった。

この10年間でかなりの数の研究が行われている（図1）。ビーム結合やプロファイル成形など、発振器出力を最大化するためのさまざまなアイデアが考案された^{(2)~(5)}。しかし、標準出力はわずか100mW強で、ピーク出力はせいぜい150kWである。より低いコストとより小さなフットプリントで、まずまずの出力を提供するシステムの登場が期待されている。

より最近では、オーストリアのビウラーセ社（Viulase）が、「Tenacity」というモノリシック型のLD直接励起の超高速チタンサファイアレーザ（DDPTL）システムを発表している。80MHzで400mWを超える出力を備え、ピーク出力は約400kW、パルス幅は15fs未満のこの新しい発振器は、DDPTLが従来のレーザに匹敵する性能を達成できることを示している。また、追加の制御装置は不要で、サイズは靴箱よりも少し大きい程度と、レーザシステムとして前例のないコンパクト

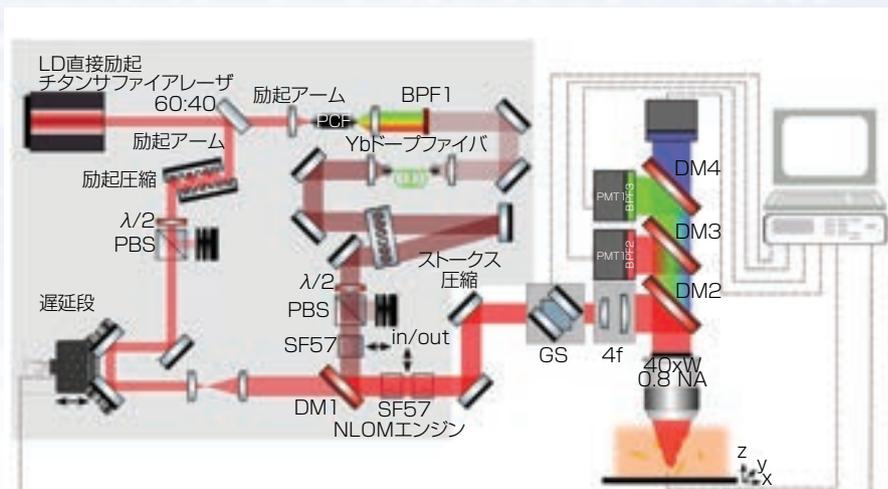


図2 LD直接励起チタンサファイアレーザに基づく、マルチモーダルな非線形光学顕微鏡構成

トさが実現されている。

実験用ラットではなく 実用に耐える馬に

フェムト秒レーザ発振器のさまざまな用途の中で、非線形顕微鏡イメージングは、高いピーク出力と低い光学ノイズの両方が光源に求められる、やや要件の高い分野である。ウィーン医科大（Medical University of Vienna）と共同で、強力なLD直接励起チタンサファイアフェムト秒レーザを、主要なレーザ源として使用した、マルチモーダルイメージングの実験を行った。

サンプルからさまざまな情報を取得するために、2光子励起蛍光（Two Photon Excited Fluorescence: TPEF）顕微鏡法、第2高調波発生（Second Harmonic Generation: SHG）顕微鏡法、コヒーレントアンチストークスラマン散乱（coherent anti-Stokes Raman scattering: CARS）顕微鏡法からなる、マルチモーダル検出を使用した。多光子顕微鏡法ではほとんどの場合、広範囲でチューニング可能なフェムト秒レーザを、ある特定の波長に設定して、生物組織の酵素やタンパク質を励

起する。CARSでは、異なる励起波長の光子が必要だが、1台のチューナブルなフェムト秒レーザだけでそれを行うことはできない。そこでこの実験では、単一のLD直接励起フェムト秒光源を使用して、多光子顕微鏡法とCARS顕微鏡法を実行する、洗練されたイメージングプラットフォームを実際に構築した。出力は400mW、レーザパルス幅は約50fsである（FWHMは15nm、図2）。

このDDPTLの出力は、2本のビームに分割され、1本は805nmの励起ビームとして作用し、もう1本はフォトニック結晶ファイバによって広げられ、さらに増幅されて1050nmのストークス（Stokes）ビームを生成する。2つのパルス列は、時間領域において本質的に同期される（図3）。その後、2本のビームはダイクロイックミラーによって結合され、顕微鏡によってサンプルに集束される。励起アームの遅延段を制御することにより、励起パルスとプローブパルスの時間差を変更することができる。経路上のSF57ガラスブロックは、パルスのチャージングを制御してCARS信号を操作するために用いられる。

805nmと1050nmを中心とする超高速パルスは、どちらも独自に第2高調波発生(SHG)を行うことができるため、これら2本のビームの和周波数は、923nmにおけるSHGと一致する。これら2本のビームは、3つの異なる色素の2光子励起蛍光、SHG、CARSを含む、最大6つの異なる信号をサンプルに生成することが可能で、それによって、広範囲の情報を取得することができる。

この実験では、カエノラブディティス・エレガンス(線虫の1種)とゼブラフィッシュ(熱帯魚の1種)の稚魚のマルチモードイメージングに成功し、合成画像を簡単に取得することができた。

要件の高いこの実験は、DDPTLの出力レベルと安定性性能が、生体イメージングの大半の用途に対して十分であることを実証するものである。また、これらの新しい種類のフェムト秒レーザーは、テラヘルツ波の発生と検出や2光子重合など、その他の用途にも適用できる状態にあると考えて、間違いないだろう。

さらなる高速化と小型化で、さらなる高みへ

固体レーザーを置き換え、すべてをワンボックスに統合したのは、最初のステップにすぎない。DDPTLは、それをはるかに超える可能性を秘めている。

LD励起により、光学ノイズをシステムに加える可能性のある、高度な光周波数変換段が不要になるだけでなく、最終出力を安定化させるための駆動電流のサーボループ帯域幅が大きく拡大する。従って、出力の安定化やキャリアエンベロープ位相の安定化など、任意の能動的なフィードバックが、格段に迅速かつ簡単に行えるようになる。

周波数変換段が不要ということは、全体的な放熱も大きく低下することを

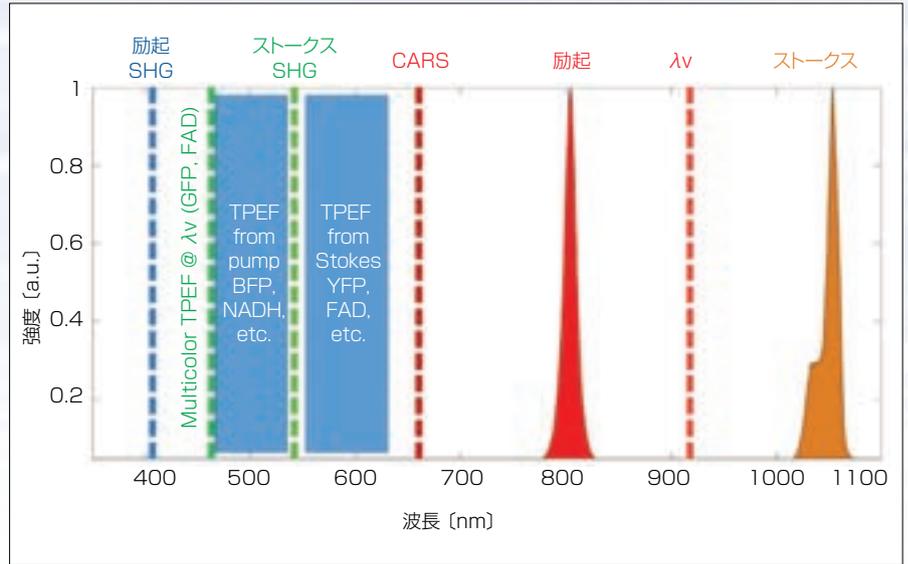


図3 励起ビームとストークスビームのスペクトルと、多光子吸収(SHG、TPEF、CARS)の相対的な励起帯幅。励起ビームとストークスビームを同期させることにより、2光子多色励起の仮想波長 $\lambda v = 2 / (1 / \lambda_{\text{pump}} + 1 / \lambda_{\text{Stokes}})$ (911nmに相当)を作成している

意味する。電力変換効率(Wall-Plug Efficiency: WPE)が格段に高くなれば、はるかに安価で小さな水冷装置で対応できるか、コンパクトな空冷システムでも十分になる可能性がある。そうなれば超高速レーザーは、クリーンルーム以外のさまざまな場所で、バッテリーでも動作できるようになる。

また、緑色と青色半導体レーザーの出力は継続的に向上していることから、将来的には、さらに強力なLD励起の超高速レーザーや、LD直接励起の超高速増幅器が登場すると期待できる。

超高速チタンサファイアレーザーは確

実に再生し、明るい未来を切り拓くと予測している。より広範な市場で利用されるようになり、どのレーザー光学実験室にもあるような、標準的で手頃な価格のフェムト秒の光ツールになる可能性がある。靴箱ほどのパッケージに収容されて、壁のコンセントに差し込むだけで使用できるほど、設置は簡単になるだろう。何らかの保守が必要になった場合は、製造元に返送して数日で修理してもらえ。そうした進歩に支えられて、超高速レーザーはスマートフォンのように、私たちの日常生活の至る所で目にする存在になるだろう。

参考文献

- (1) P. W. Roth, A. J. Maclean, D. Burns, and A. J. Kemp, *Opt. Lett.*, 36, 2, 304 (2011); doi:10.1364/ol.36.000304.
- (2) C. G. Durfee et al., *CLEO: Science and Innovations*, 20, 13, 1223-1227 (2012).
- (3) N. Sugiyama, H. Tanaka, and F. Kannari, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 57, 5, 0-4 (2018); doi:10.7567/jjap.57.052701.
- (4) S. Backus, M. Kirchner, C. Durfee, M. Murnane, and H. Kapteyn, *Opt. Express*, 25, 11, 12469 (2017); doi:10.1364/oe.25.012469.
- (5) J. C. E. Coyle, A. J. Kemp, J.-M. Hopkins, and A. A. Lagatsky, *Opt. Express*, 26, 6, 6826 (2018); doi:10.1364/oe.26.006826.

著者紹介

ミン・ヤン(Ming Yang)は、オーストリアのビウラーセ社(Viulase)のセールス及びマーケティング担当ディレクター。e-mail: ming.yang@viulase.com URL: www.viulase.com