

# 新しい商用分野を開拓する、コンパクトな深紫外連続波レーザー

スコット・バクター

ダイオード励起のプラセオジウム結晶と第2高調波発生に基づく小型レーザーは、堅牢性が高く、商用分野に適用できる状態にある。

深紫外線 (deep UV) の波長領域 ( $\lambda < 300\text{nm}$ ) で動作する連続波 (CW) レーザは、ラマン分光法、蛍光顕微鏡法、光学検査、殺菌など、多くの用途に有効である。この種のレーザーは従来、波長が  $1\mu\text{m}$  付近の近赤外 (near IR) ネオジウムレーザーの周波数4倍化によって構築されてきた。このアーキテクチャには、単一周波数の基本レーザーと、共振器内第2高調波発生 (SHG) の場合は1つ、それ以外の場合は2つの高感度の外部共振空洞が周波数変換のために必要であることから、このようなシステムの利用は主に研究用途に限定されている。その複雑な構造により、最もコンパクトなデバイスでも靴箱ほどのサイズがあり、携帯型やハンドヘルドの装置には基本的に使用できない。フィンランドのUVCフォトニクス社 (UVC Photonics) はこの数年間、ダイオードレーザーと同等のフォームファクタと堅牢性を備える、プラセオジ

ウムをベースとした深紫外CWレーザーの開発に取り組んでいる。

## プラセオジウムレーザーの歴史

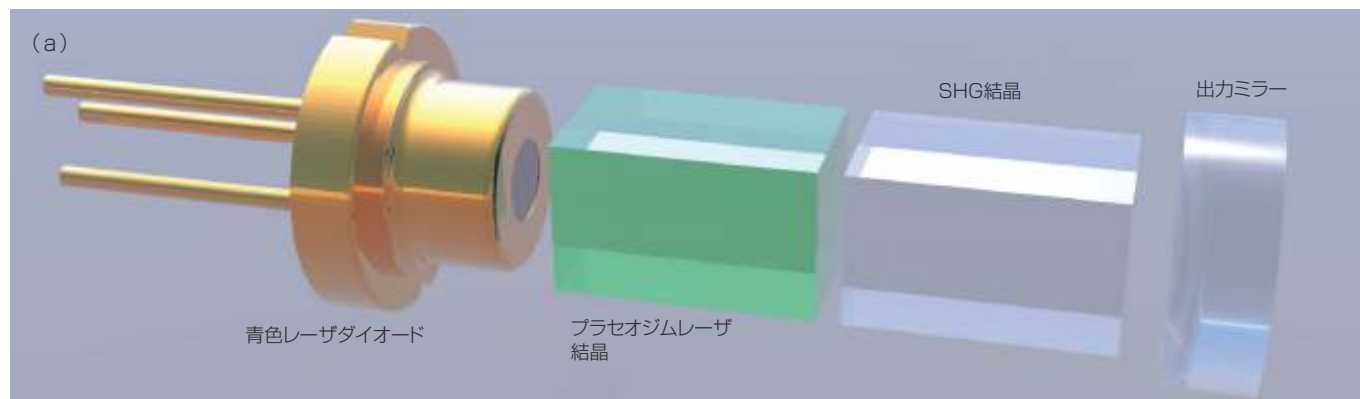
プラセオジウムは、決して新しい可視光レーザーイオンではない。イットリウムリチウムフルオライド (YLF) をホストとするプラセオジウムからの室温における青色レーザー発光が初めて示されたのは、1977年にまで遡るためである<sup>(1)</sup>。その実験では、励起源はパルスエキシマレーザー励起の色素レーザーで、完成し

たシステムはコンパクトでも実用的でもなかったために、商用製品の開発には至らなかった。その20年後に、アルゴンイオンレーザーを励起源とする、初めての室温でのCW可視光発光が示された<sup>(2)</sup>。しかしこのアーキテクチャも、研究用途にしか適さないものだった。1998年には、最初の完全固体のプラセオジウムレーザーが、赤、緑、青の出力波長で実証された<sup>(3)</sup>。これはコンパクトなレーザーに向けた大きな一歩だったが、それでもフラッシュランプ励起の固体レーザーが励起源として必要だった。

ほぼ同じ時期に、初めての青色発光



図1 深紫外レーザーは、青色励起ダイオードレーザー、プラセオジウムレーザー結晶、第2高調波発生 (SHG) 結晶、共振器出力ミラーで構成されている (a)。これによって、非常にコンパクトなデバイスが完成した (b)。



のダイオードレーザーが開発されていた。これは、可視域内の複数の波長で動作し、UV域へのSHGの可能性を秘めた、コンパクトなプラセオジム源を期待させるものだった。しかし、青色ダイオードの出力が励起源として使用できるレベルに達するまでに、さらに数年を要し、最初のダイオード励起のプラセオジムレーザーが示されたのは2004年のことだった<sup>(4)</sup>。この最初のレーザーの出力はわずか数mWだったが、プロジェクトでの使用を目的としたディスプレイ市場に主に牽引されて、青色ダイオードの励起源は急速に改良された。数年のうちに、実験室で実証されるプラセオジムベースのレーザーからのCW出力は、可視域からUV域までの波長にわたって、数百mWレベルにまで増加した<sup>(5)</sup>。

有望な未来が待っていると思われたプラセオジムレーザーだったが、商用システムはほとんど登場せず、登場したのもも短命に終わった。その一因は、可視光ダイレクトダイオード技術の急速な進歩にある。2010年代初頭には、赤、緑、青色波長でワットレベルのCW出力が可能なダイオードが提供されていた。これらのデバイスは、ビーム品質は一般的に固体レーザーよりも低かったが、大半の用途に適しており、そのシンプルさとコストは、他の技術では太刀打ちできないものだった。

プラセオジムベースのレーザーが急増しなかったもう1つの理由は、本質的に科学的なものである。その優れたレーザー結果を詳しく説明する文献の中ではほとんど触れられていないが、プラセオジム添加のフッ化物結晶は、商用製品に求められる品質と一貫性を確保しつつ成長させるのが、極めて難しい。UVCフォトリソ社の結晶成長の専門家らは、50年以上にわたって

フッ化物結晶の成長に取り組んできた。実際、上述の1977年に初めて実証されたレーザーに用いられた結晶を成長させたのも彼らだった。その経験が最終的に、レーザー製品に必要な再現性を達成するための材料の高純度化と成長のプロセスにつながっている。

### プラセオジムレーザーの商用応用の追求

一見したところ、これらの深紫外レーザーの光学的構造は、かつては至る所にあった、周波数を2倍化したネオジム添加結晶をベースとする緑色レーザーポインタに、非常によく似ているように見える。構成要素は、シングルエミッタの励起ダイオード、レーザー結晶、非

線形結晶、出力ミラーとシンプルである(図1)。このレーザーは、522nmの基本波長で動作するように設計されている。共振器内周波数2倍化により、出力波長は261nmになる。しかし、材料成長の課題に加えて、状況を複雑にする微妙な相違点が存在する。

1つめは、励起ダイオードに関するものである。YLF内のプラセオジムの吸収ピーク波長は444nmで、その幅は約1nmと比較的狭い。これは、所望の動作電流における励起ダイオード波長も444nmでなければならないことを意味する。808nm付近で励起されるネオジムレーザーでは、ダイオード温度を調整することによってこれを達成するのが、一般的な方法である。近



図2 コンパクトなプラセオジムレーザーを光源として使用することで、深紫外光線の照準制御が可能な深紫外線殺菌システム。

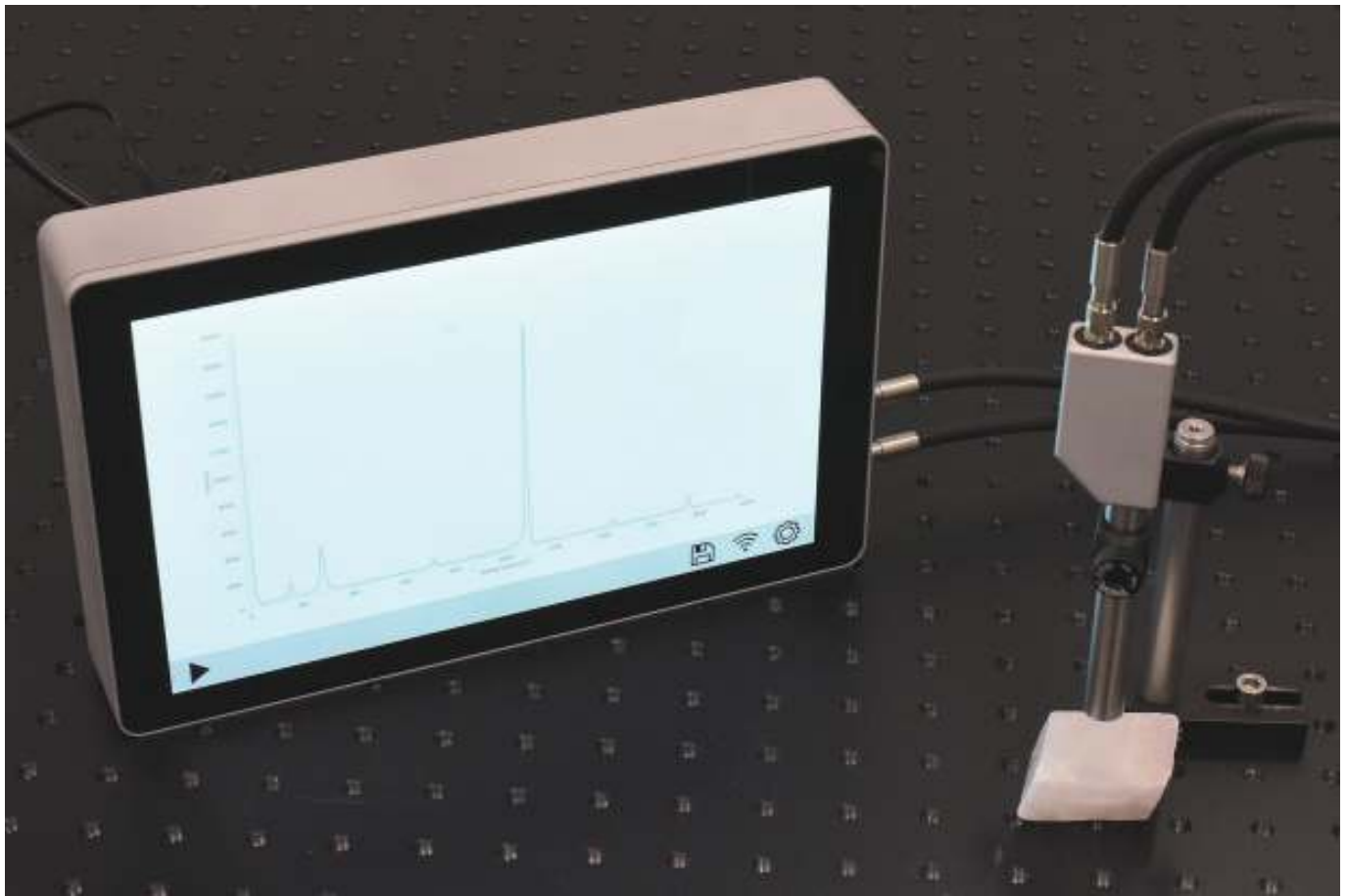


図3 プラセオジムレーザーは、携帯型の深紫外ラマン分光システムの商用化も可能にした。

赤外ダイオードの場合、温度に伴う波長シフトは約 $0.3\text{nm}/^\circ\text{C}$ である。ダイオードの中心波長の一般的なばらつきの範囲は $\pm 5\text{nm}$ であるため、過度に温度を調整することなく簡単にこれを達成することができる。しかし、窒化ガリウム (GaN) をベースとする青色ダイオードは、温度調整係数が約 $0.09\text{nm}/^\circ\text{C}$ と、はるかに小さい。中心波長の一般的なばらつきを先ほどと同じ $\pm 5\text{nm}$ とすると、最大で $\pm 50^\circ\text{C}$ もの調整を行わなければ、結晶の吸収ピーク波長に合わせるができない。これでは明らかに、コンパクトなデバイスとして実用化できないため、所望の結果を達成するための別の手段が必要である。

1つの選択肢は、正しい波長のダイ

オードを手作業で選択することだが、これにはコストと時間がかかる。数少ない青色ダイオードレーザーのメーカーも当然ながら、これへの協力には消極的である。ディスプレイ市場や照明市場に販売される年間数百万個ものレーザーのほうに意識を集中しているためだ。深紫外レーザーは最も楽観的に見積もっても、その数量には全く及ばない。2つめの選択肢は、波長選択フィードバックをダイオードに供給して $444\text{nm}$ で動作するように調整することである。外部回折格子による角度調整、結晶への波長選択コーティングの適用、体積型ホログラフィック回折格子 (Volume Bragg Grating : VBG) など、いくつかの方法でこれを行うことができる。この中ではVBGが、最もコン

パクトで堅牢な方法である。

緑色レーザーポインタと比べた場合の2つめの相違点は、レーザー結晶そのものに関するものである。イットリウムアルミニウムガーネット (YAG) やオルトバナジウム酸イットリウム (YVO4) など、一般的に用いられるネオジム結晶において、ダイオードによる端面励起によって生じる熱レンズは、励起出力やビームパラメータに依存する正の焦点距離をもつ。短い直線レーザーの場合、これにはレーザー共振器を安定させる効果がある。実際、大半のレーザーポインタデバイスにおいて、共振器の光学面はフラットである。共振器の安定性は、励起に起因する熱レンズによって完全に支えられている。プラセオジム添加YLFの場合、状況は逆である。励起



に起因する熱レンズは負の焦点距離をもち、光学部品がその影響を打ち消すように設計されていない場合、共振器は不安定になってしまう。実際には、レーザ結晶、出力ミラー、またはその両方を曲面にする必要がある。適切な曲率を選択することによって、対象の励起出力範囲におけるレーザ共振器の安定性が維持される。

上述の細かい部分を考慮すれば、非常にコンパクトで低コストの深紫外レーザを構築することが可能である。UVCフォトニクス社の標準デバイスは、わずか22×24×71mmのサイズで、ダイレクトダイオードレーザのように動作する。電流を励起ダイオードに印加すると、深紫外光が照射される。これまでの周波数4倍化ネオジウムレーザのような、共振器のロックや高精度な温度安定化を行うための複雑な電子部品は不要である。これにより、以前は考えられなかったような多くのデバイスやアプリケーションが実現可能である。

## コンパクトな深紫外レーザの応用例

この1年半の間に、日常生活の中で触れる機会のある表面や物体の殺菌や消毒に対する関心が大きく高まっている。UVC域の深紫外光は、病原菌の不活性化に有効であることが広く知られている。水銀ランプや、より最近では深紫外LEDが、この目的に採用されている。そのどちらの光源も、レーザで得られるほどのビーム品質はないため、投光照射形式で使用されている。それは、有効ではあるものの非常に効率的とはいえない。特に病原菌は、ドアノブやエレベーターのボタンなど、人々が頻繁に触れる箇所に集中していることが知られているためである。投光照射の場合、壁や天井にも、頻繁に

触れる箇所と同量のUVエネルギーが照射され、それは基本的に無駄とみなされる。また、深紫外光は人体に有害である可能性があるため、そうしたシステムは、人間がいるときには使用できない。加ニューラバイオレット社 (NeuraViolet) は、コンパクトなプラセオジウムレーザを採用した、次世代の深紫外線殺菌システムを開発している (図2)。このデバイスのサイズは、天井に取り付けられるパン・チルト機能搭載の一般的なセキュリティカメラと同程度である。高度な人工知能 (AI) ソフトウェアによって環境内にいる人間の安全性を確保しつつ、プログラムされたターゲット領域をレーザで連続的に照射することができる。

別の新しい応用分野として、紫外表面励起による顕微鏡法 (Microscopy with Ultraviolet Surface Excitation : MUSE) という蛍光顕微鏡法がある。MUSEにより、高品質の蛍光画像を得るための組織切片の作成に関連する、時間のかかる工程が不要になる。MUSEでは一般的に、深紫外LEDが照明として使用されているが、ビーム品質と輝度が低いことから、顕微鏡の拡大倍率は10倍程度までに制限されてきた。コンパクトな深紫外レーザ源を使用することで、より高い倍率が適用可能となり、従来の蛍光顕微鏡に匹敵するレベルまで、試料の細部が確認できるようになる。

### 参考文献

- (1) L. Esterowitz et al., J. Appl. Phys., 48, 650 (1977).
- (2) T. Sandrock et al., Appl. Phys. B, 58, 149-151 (1994).
- (3) S. C. Buchter et al., "Advanced Solid State Lasers," OSA Trends in Optics and Photonics Series, Optical Society of America, paper VL1 (1998).
- (4) A. Richter et al., Opt. Lett., 29, 22, 2638-2640 (2004).
- (5) A. Richter et al., Opt. Express, 15, 8, 5172-5178 (2007).

### 著者紹介

スコット・バクター (Scott Buchter) は、フィンランドのUVCフォトニクス社 (UVC Photonics) の共同創設者。e-mail: scott.buchter@uvcp Photonics.com URL: uvcp Photonics.com

UVラマン分光法は、分子研究と物質識別のための強力な手段として古くから認識されている。しかし、コンパクトな深紫外レーザが存在しないために、UVラマン分光法の利用は、研究用途にほぼ限定されている。深紫外光をラマン分光法で使用することには、複数のメリットがある。ラマン分光法の信号強度は、励起波長の4乗の逆数に比例するため、深紫外線への移行によって、785nmなどの従来波長で動作するラマンシステムよりもはるかに高い信号対雑音比が得られる。また、多くの物質で、電子的及び振動的遷移の間のカップリングによる共鳴効果が生じ、信号はさらに最大105倍に増幅される可能性がある。もう1つのメリットは、UV域深くの励起波長に移行することにより、従来の励起波長を使用する場合に問題を引き起こす恐れのある、サンプル蛍光が回避されることである。フィンランドのスペクトラレンス社 (Spectralence) は、プラセオジウムをベースとするレーザを使用する、初めてのバッテリー動作の携帯型深紫外ラマンシステムを開発した (図3)。このシステムは、採鉱、半導体、材料科学全般、爆発物やその他の危険物質の検出と識別などに適用できる。

上記は、応用分野のほんの数例にすぎず、このようなコンパクトレーザの統合が進むにつれて、新しい応用分野は次々と開拓されている。