

赤、緑、さらには青色領域へと拡大する 可視光ファイバレーザ

ジョン・ウォレス

周波数二倍化、周波数結合、ラマンシフトにより、近赤外ファイバレーザで
科学や産業用の可視光を生成することができる。

可視波長のファイバレーザ(可視光ファイバレーザと呼ばれることが多い)はこの10年間で、商用レーザ分野における存在感を確立した。しかし、何ももって可視光ファイバレーザというのか。この疑問は興味深いものである。なぜなら実際には、レージングファイバそのものの中から目に見えるレーザ光を生成するファイバレーザなど、市場に存在しないためである。

ただし可視光は、外部で周波数を変換すること(たとえば、ラマンシフト、周波数二倍化、和周波混合、またはそれらの組み合わせ)によって、近赤外線(near-IR)を照射するファイバレーザから得ることができる。本稿では、これを可視光ファイバレーザの定義とする。レーザダイオードからの光をゲインなしのファイバに結合させるダイレクトダイオードレーザは、この定義に含まれないことに注意してほしい。

可視光ファイバレーザは、連続波(CW: Continuous Wave)またはパルス波で、低出力のものから100W以上を出力するものまでがあり、科学や産業(特に材料加工)から一般的なレーザ用途にいたるまでのさまざまな分野に用途がある。

科学と医療のためのレーザ

可視光ファイバレーザ技術の起源は、こうしたデバイスを製造する企業と同じくらい多種多様である。たとえ

ば、カナダのMPBコミュニケーションズ社(MPBC: MPB Communications)は、ラマン増幅サブシステムを光ファイバ通信業界に供給している。2001年、テレコムバブルがはじけたとき、MPBC社は市場の多角化を図った。ラマン技術を保有していたので、ファイバレーザの分野は自然な方向だったと、可視光ファイバレーザの事業開発を担当するクロデット・リントン氏(Claudette Linton)は言う。

「MPBCの通信用ラマンファイバレーザを、今は偏波保持ファイバとコンポーネントを使用して再生し、シングルパスの周期的分極反転ニオブ酸リチウム(PPLN: Periodically Poled Lithium Niobate)二次高調波発生器によって、基本のファイバレーザ波長の周波数を二倍化して可視域にすることができた」とリントン氏は述べた。「この単純明快な周波数二倍化手法を活用することにより、ファイバレーザの卓越したビーム特性を損なわずに済む」(リントン氏)。

リントン氏によるとMPBC社は、波長560nmの初めての可視光ファイバレーザを、2006年のSPIE Photonics Westで発表したという。同レーザは直ちに、米国立衛生研究所(NIH: National Institute of Health)の国立がん研究所(NCI: National Cancer Institute)のウィリアム・テルフォード氏(William Telford)によるフローサイトメトリー

応用に採用された。MPBC社社内のファイバブラッググレーティング(FBG: Fiber Bragg Grating)設備によって、同社は、手法を簡単に改変して、特定の要件に応じて新しい波長を生成することができる、とリントン氏は言い添えた。MPBC社は現在、可視光ファイバレーザを、応用分野のニーズに応じて、488~775nmの26の商用波長と0.2~5Wの出力で製造している。

MPBC社のレーザは現在、誘導放出抑制顕微鏡法(STED: stimulated emission depletion)、ゲート付きSTED、確率的光学再構築顕微鏡法(STORM: stochastic optical reconstruction microscopy)、光シート顕微鏡法などの商用の超解像度顕微鏡法システム、フローサイトメトリー、DNAシーケンシング・プラットフォームに組み込まれていると、リントン氏は述べた。現在までに累積実行時間は5万時間を超えており、ファイバレーザ技術の信頼性を示しているという。

同社は、米アルベルト・アインシュタイン医科大(Albert Einstein College of Medicine)解剖学構造生物学部のヴラディスラフ・ヴェルクューシャ氏(Vladislav Verkhusha)、ノーベル賞受賞者で独マックス・プランク研究所(Max Planck Institute)に所属するシュテファン・ヘル氏(Stefan Hell)、同じくノーベル賞受賞者で米ハワード・ヒューズ医学研究所(HHMI: Howard

Hughes Medical Institute)に所属するエリック・ベツィグ氏(Eric Betzig)といった研究者らと連携した。こうした研究者らが求める波長は、ダイオード技術では達成や出力調整が難しい場合が多かった。たとえば、ベツィグ氏は2017年、新しい光シート顕微鏡法プラットフォーム用に、607nmの波長と1Wの光出力を求めた。半導体励起固体(DPSS: Diode Pumped Solid State)レーザでは、この用途に必要な出力レベルが達成できず、高出力の光励起半導体レーザ(OPSL: Optically Pumped Semiconductor Laser)では、この用途に必要なビーム品質が提供できなかった。リントン氏によると、MPBC社は短期間のうちに、波長607nmで出力が1W以上、ビーム品質 M^2 が1.1未満のファイバレーザの設計とテストを行い、出荷を開始したという(図1)。

ベツィグ氏は、607nmの波長で輝度と光安定性の高い蛍光タンパク質mCardinalを最適に励起したいと考えていた。mCardinalは、mAppleやtdTomatoなどの橙赤色の蛍光タンパク質とは、スペクトル的に十分に隔離されているので、光毒性の低い赤色波長での2色イメージング(橙赤色と深赤色)が可能となるほか、緑色の蛍光タンパク質を含めた3色イメージングも可能となる。このレーザは現在、HHMIでテストされており、HHMIと連携して作業に取り組む協力組織に提供されている。

MPBC社は、同社の可視光ファイバレーザの製品ラインを拡大し、原子冷却/ホログラフィ/ガイド星レーザに用いられる高出力単一周波数のファイバレーザおよび単一周波数のラマンファイバ増幅器、STEDに用いられる高出力サブナノ秒パルス可視光ファイバレーザを追加している。「超解像度顕

微鏡法は、当社が初めて着手したときは新しい手法だった」とMPBC社社長のジェーン・バチンスキー氏(Jane Bachynski)は述べた。「今では顕微鏡法を扱うすべての主要企業が、可視光ファイバレーザの性能によって実現された、独自の超解像度プラットフォームを保有している」(バチンスキー氏)。

特殊ファイバで、可視放射範囲を青色領域まで拡大

仏アズールライト・システムズ社(Azurlight Systems)のセールスおよびマーケティング担当ディレクターを務めるピエール・レイグ氏(Pierre Laygue)によると、同社は、基本となる赤外線(IR)ファイバレーザの周波数を二倍化することによって、可視波長ファイバレーザの設計と製造を行っているという。イッテルビウム(Yb)のゲイン帯域幅を976nmまで拡大(従来

の下限は1030nm)した、特定の特殊ファイバが開発されている。これによって同社は、可視波長範囲を光スペクトルの青色領域まで拡大することに成功している(図2)。

「変換は、特定の結晶内でシングルパス構造で行われ、IRの波長と出力に合わせて最適化された結晶長と技術によって、変換効率が最大化されている。シングルパス構造により、IR光のすべての主要な性質(堅牢な単一周波数動作、ショットノイズに近い強度ノイズ、完璧なモード品質、卓越した指向安定性)が維持できる」とレイグ氏は述べている。

アズールライト社の高出力可視波長ファイバレーザ(488nmで2W、515または532nmで10W)の主な応用分野は、アルゴンイオン(Ar+)レーザの代替、レーザドップラー流速計(LDV: Laser Doppler Velocimetry)、ホログラフィ、

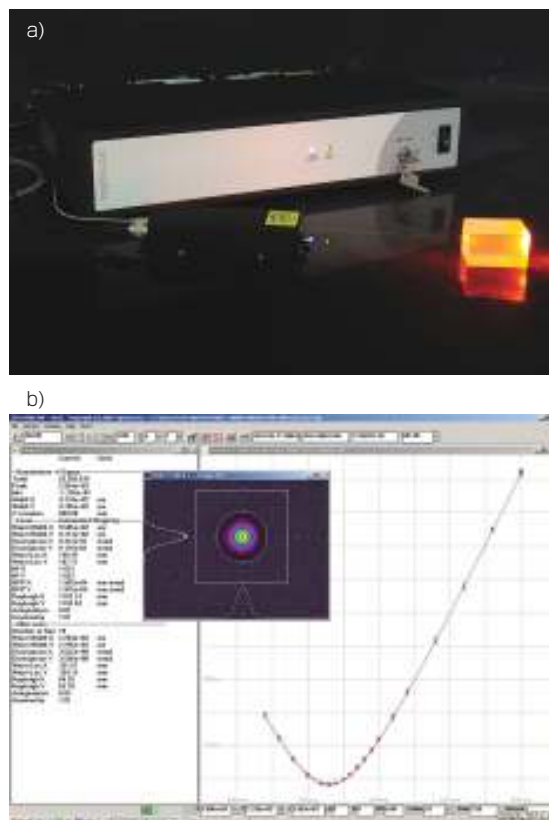


図1 この高出力の607nm可視光ファイバレーザは、蛍光タンパク質mCardinalの励起に用いられる(a)。レーザのビームプロファイルによると、 M^2 は1.04未満で、実質的に非点収差はない(b)。(提供: MPBコミュニケーションズ社)

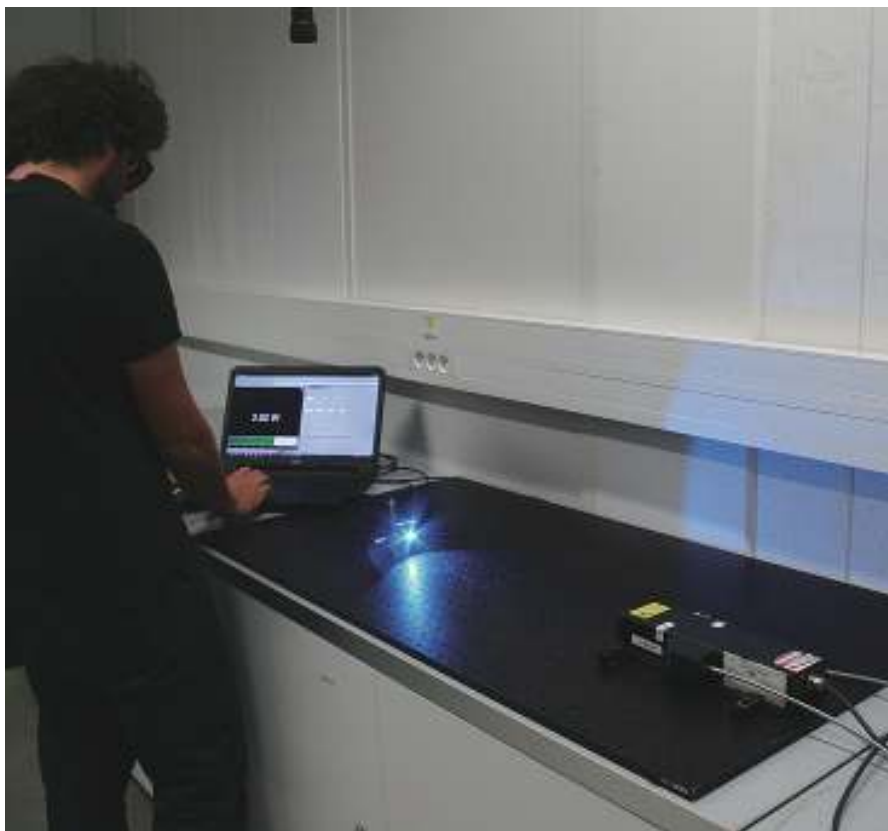


図2 この青色発光(488nm)ファイバレーザは、アルゴンイオンレーザの代替としての役割を果たす。周波数を二倍化した短い波長は、基本のIRファイバレーザに使用される特殊ファイバにより、イッテルビウム(Yb)のゲイン帯域幅を976nmまで拡大することによって実現されている。(提供:アズールライト・システムズ社)

干渉分光法、超解像顕微鏡法、光パラメトリック増幅器(OPO: Optical Parametric Oscillator)や固体レーザの励起である。

「488nmのAr⁺線(青緑色)に代わる固体技術は、開発が難しいことがよく知られている。Yb³⁺イオンの3段階遷移の976nmにおける利用が難しいことがその主な理由である」とレイグ氏は述べた。同氏によると、同社の特殊ファイバを採用する波長976nm、出力10Wのファイバレーザが、488nmのファイバレーザの基礎となっているという。「その結果として、488nmで最大限の出力を生成する製品が得られた。モード品質と指向安定性は、Ar⁺レーザをはるかに上回る。この光源は、Ar⁺レーザの代替としての利用をター

ゲット市場としている。これに変えることにより、繰り返し必要となる高額の改修が不要となり、実験室における水冷が不要となり、指向や出力パワーの安定性といった光ビーム特性が改善される」(レイグ氏)。

一例として、LDVシステムを設計する企業は、実験の体積に近いビームを供給するファイバにレーザ光を再結合する。アルゴンイオンレーザのビーム指向性は本質的に不安定なので、これらの企業は、1日に何度もポジショニングを再調整しなければならない場合がある。「当社の488nmのファイバレーザならば、指向安定性がかなり高いので、結合システムを数カ月間いじらずに放置することができる」とレイグ氏は述べた。

材料加工用の緑色パルス

一般的にファイバレーザは、材料加工と深い関わりがあり、可視光ファイバレーザについても同様である。米アドバリュー・フォトニクス社(AdValue Photonics)は、IRファイバレーザに加えて、材料加工用の一連の緑色発光のパルスファイバレーザを製造している。高い平均出力で、ナノ秒パルス(「EVERESTnano Green」)またはピコ秒パルス(「EVERESTpico Green」)を照射する。どちらのレーザも波長は515nmで、1030nmの主発振器出力増幅器(MOPA: Master Oscillator Power Amplifier)パルスファイバレーザをベースとし、自由空間ジオメトリにおける周波数二倍化によって、緑色波長を生成している。

たとえば、ナノ秒パルス版は、パルス幅5ns、エネルギー100μJのパルスを生成し、パルス繰り返しレートは100、200、300、または500kHzで、平均出力は10、20、30、または50Wである(表1)。ピコ秒レーザのほうは、パルス幅50psで、平均出力は10、15、20、または30Wである。どちらのレーザも水冷式で、オプションとして冷却装置が用意されている。

アドバリュー・フォトニクス社のマーケティングおよびセールス担当ディレクターを務めるキャサリン・リウ氏(Katherine Liu)によると、これらの緑色レーザのターゲット用途は、穴あけ、切断、アブレーション、スクライビングなどで、ターゲット材料は、ガラス、サファイア、セラミック、シリコン、プリント回路基板(PCB)、金属、複合材、ポリマーなど(ただしこれだけに限定されない)だという。

可視光ファイバレーザは、赤外域よりも可視域で吸収率が高い材料の加工に有効である。銅や金などの一部の金

属は、基本のIR波長よりも緑色領域での吸収率が数倍高い。特に銅は、エレクトロニクス分野で広く使われている。

「アドバリュー・フォトニクス社のレーザー技術は、ファイバベースの緑色パルスレーザーの高いパルスエネルギーと短いパルス幅に加え、異なるパルス繰り返しレートにおける一定したパルスエネルギーとパルス幅を実現している。また、この技術によって、メガヘルツレベルに達するほどの非常に高いパルス繰り返しレートが可能である」とリウ氏は述べている。

リウ氏が挙げた1つの応用例は、ガラスの穴あけと切断である。「高繰り返しレートのナノ秒緑色ファイバレーザーは、需要が高まっている高品質で高効率の透明材料加工に対応する。レーザー穴あけ、切断、スクライビング、マーキングなど、複数のレーザー加工手法が、幅広い応用分野で広く活用されている。たとえば、レーザーレパン穴あけ加工を適用することにより、チップング・サイズが最小50 μm でテーパ（先細り）のない穴が生成でき、厚さ0.5mmのウエハを最大毎秒22mmの速度で切断できる。ソーダ石灰から石英ガラスにいたるまで、多種多様な透明材料を、非接触式の処理によって、選択的かつデジタル的に加工することができる」と同氏は説明した。

可視光ファイバレーザーの例

多数のファイバレーザーメーカーが、製品ラインの一環として可視光ファイバレーザーを製造している。本稿ですべての企業と製品を列挙することはできないが、以下では、もう少し例を紹介する。

仏イオライト・システムズ社 (Eolite Systems) は「PyroFlex」シリーズの一環として、緑色発光のパルスファイバレーザーを材料加工用に製造している。

表1 EVERESTnano 緑色パルスレーザー (AP-515) の特性

パラメータ	仕様
動作モード	パルス
動作波長	515nm (緑色)
平均出力	10W、20W、30W、50W
パルス幅	5ns
パルスエネルギー	100 μJ
ビーム品質 M^2	<1.2
出力安定性	$\pm 5\%$ 以内
出力デリバリ	コリメート出力ビーム

任意のパルス成形が可能という独特の機能を備えており、パルス形状と複雑なパルス列を1nsの分解能できめ細かく制御することができる。最大平均出力は10W、最大パルスエネルギーは100 μJ 、ビーム品質 M^2 は1.3未満である。

米IPGフォトニクス社 (IPG Photonics) は、緑色発光のCWファイバレーザー (出力0.5~100W) や、可視光CWラマンファイバレーザー (波長515~603nm、出力1.5~15W) など、幅広い種類の可視光ファイバレーザーを製造している。同社はさらに、赤色発光と緑色発光のファイバレーザーを、青色発光ダイレクトダイオードと組み合わせた (後者は実際には可視光ファイバレーザーではないが、可視光ファイバに基

づく光源を実現するための非常に有効な別的手段である)、レーザーシネマ用の照明レーザーシステム (「RGB-6P/3P」) も製造している。

米オプトロミクス社 (Optromix) は、一連の波長可変ファイバレーザーを提供している。シングルモードのCW可視光ファイバレーザーは、緑色領域の広い範囲 (515~562nm) で波長を変更できる。このレーザーの線幅はユーザーの要望に応じて調整可能で、0.01、0.05、0.1、0.3nmから選択できる。出力が100mW~6Wのさまざまなモデルが提供されており、すべてビーム品質 M^2 は1.1未満である。応用分野としては、バイオテクノロジー、分光法、ホログラフィなどがある。

免責事項

「photonics products」シリーズで取り上げる製品については、できるだけ多くのメーカーからの情報を掲載するように努めているが、文字数の制約や、情報提供を依頼しても必ず期限までに回答が返ってくるとは限らないなどの事情により、すべての企業からの情報を含めることは不可能で、もし自社製品がこのシリーズで紹介されなかったという読者がいれば、お許しいただきたいと思う。