可視光固体レーザとダイオードレーザ：新たな選択肢

ジェフ・ヘクト

新しい技術と周到なエンジニアリングによって可視光スペクトラム領域で固体レーザと半導体レーザの選択肢が増えつつある。

2014年の物理学ノーベル賞は効率的な青色LEDの発明者に贈られた。これは、可視光の固体光源における大きな進歩を思い起こさせる。1991年12月、材料研究学会の会議で赤﨑勇氏が明るい青色LEDを見せてくれたときの驚きを覚えている。今では、紫、青、緑、それに赤色のレーザポインターをわずか数ドルで購入できる。

しかし可視光スペクトラムの他の所に残っている穴は、埋めるのが難しい、つまりコストがかかる。特定のアプリケーションでは幅広い可変性や波長精度が必要となり、また黄色やオレンジのビームは見つけにくい。幸いなことに、そのようなニーズの多くを満たす新しい改善された光源が出てきた。これは初期の研究システムの技術改良や新たな研究を反映している。

可変パラメトリック光源

光パラメトリック光源は、初期の実験室から大きく発展した。その広いチューニング範囲は非線形オプティクスを使用することによってもたらされる。これにより励起フォトンを「シグナル」と「アイドラ」という周波数の低エネルギー（長波長）フォトンペアに分けるが、これらは足すと励起周波数になる。超紫外（UV）レーザ、一般には355nmで励起されると、周波数は可視域全体に広がり、近赤外（NIR）まで達する。和周波や第二高調波発生のために光学系を追加することで可変範囲を超紫外に広げ、200～2600nmまで可変とすることができる。

最もよく知られた光パラメトリックシステムは光パラメトリック発振器（OPO）と光パラメトリック増幅器（OPA）である。重要なバリエーションには、疑似位相整合（QPM）OPO、同時励起OPO、シーディングされたOPAが含まれる。パラメトリック発振は強い励起光を必要とし、ナノ秒OPOでは平方センチメートルあたり一般にはメガワット、フェムト秒OPAでは平方センチメートルあたり最大数100ギガワットが必要になる。高エネルギーのパルスレーザ、パルスレーザを導波路やファイバの小領域に閉じ込めるとこのようなニーズを満たすことができる。

「パラメトリック発振は励起レーザのパフォーマンスに非常に敏感である」と米オールトス・フォトニクス社のルシアン・ハンド社長は言う。「安定した励起レーザを造ることができるとすぐに、OPOは適切な設計でターンキーになる」。同氏が言うには、機器キャリブレーションに使えるOPOを造る上で大切な部分はkHzのQスイッチレーザの開発であった。Qスイッチレーザは、効率的なパラメトリック発振と光損傷閾値の間のウインドウ内に留まることができる安定性が必要である。ほとんどの可視光OPOやOPAは、Qスイッチあるいはモードロック固体レーザから第二高調波もしくは第三高調波で励起されている。

「過去10年の開発は、物理学と言うより機械工学や光工学の方が多かった」とハンドは言う。光学マウントの安定化は、それが振動や温度の変化に耐えるのに役立つ。中赤外OPOは軍用機のカウンターメジャーシステムで使用されている[(1)]。開発者は、そのシステムを非専門家にも使いやすくした。システムが振動や温度の変化に耐えられるように、光学マウントの安定化に多くの努力が払われた。NISTの研究者たちがkHz OPOをハワイのハレアカラ山、アリゾナのマウントホプキンスに運び、200～1000nmの望遠鏡CCDの較正を行った[(2)、(3)]。

レーザシネマ用二倍波VECSEL

可視光スペクトラム固定波長の範囲には欠けているところがある。ネオジウムレーザの第二高調波は532nmで汎用緑色の標準であった。また、赤色と青色のダイオードは簡単に見つかる。しかし他の波長が適切なアプリケーションは多い。

近赤外半導体の周波数を2倍にすることで他の可視光波長を生成することができるが、ビームに高品質が必要だ。それは垂直外部キャビティ面発光レーザ（VECSEL）で可能になる。光励起バージョン、いわゆる光励起半導体ディスクレーザ（OPSL）では、2000年ごろにイントラキャビティ第二高調波発生が商用化された。米コヒレント社は現在355～639nmまでの製品を供給している。

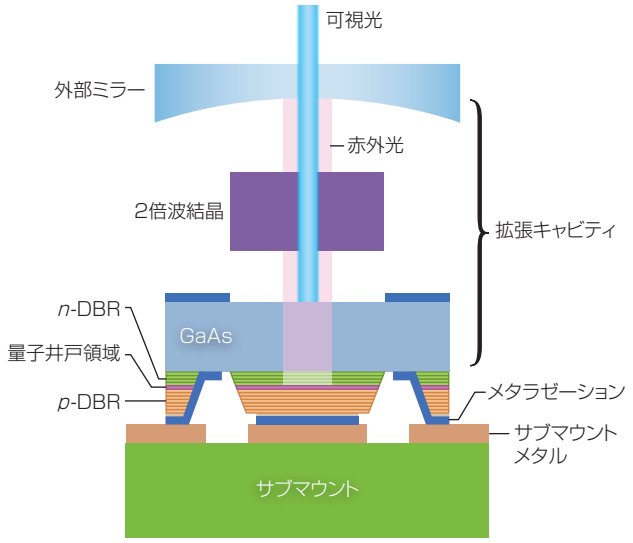

図1　ネクセル社の電気励起VECSELの構造、イントラキャビティの2倍波用結晶を示している。量子井戸領域で生成された光は垂直に共振する。濃い青色が電極で、ここから駆動電流が流れ込む（ネクセル社提供）。

しかしRGBレーザシネマプロジェクタのようなアプリケーションには電気励起の方が魅力的だ、と米ネクセル社のグレッグ・ニーブン氏は言う。同社はレーザシネマ用に端面発光の青色と赤色エミッタを使用している。しかし緑色チャネルには、**図1**で示した電気励起VECSEL使用する[4]。このレーザは、大型3Dスクリーンに必要な6万～7万2000ルーメンを供給する。これは最高輝度のランプ出力の2倍以上であり、レーザの寿命は40倍長い[5]。

個々の二倍波VECSELは、525～555nmで数100mWを出力するので、アレイは緑色チャネルに必要となる数100Wを出力できる。わずかに異なるレーザラインで発振する複数のレーザを使うことで良好な画像品質に必要なレベルにレーザスペクルを減らせる。米IMAX社は、ネクセル社のレーザを同社の新世代カラーベース3Dプロジェクタに使っている。**図2**に示したように、左右の目には、15～20nm離れた一連の赤、緑、青の波長で画像が生成される。視聴者は、左右の目のそれぞれに調整されたカラーフィルタを持つ眼鏡をかける。開発者によると、これは偏光ベースの3Dよりもコントラストが優れている。

図2　カラーベース3Dプロジェクタは、右目と左目でわずかに異なる赤、緑、青を使う。

二倍波VECSELは、アプリケーションが現れれば、実現が難しい他の波長も供給できる。「黄色やオレンジは可能だが、まだそれを欲しがる顧客はいない」と同氏は言う。その一方で、研究者は研究室で達成できるパワーレベルを上げている。米プリンストンオプトロニクス社、チュニ・ゴッシュ氏の研究チームは、8月に531nmで4.7Wを達成したと報告した。報告によると、これはイントラキャビティ2倍波、電力変換効率18.3％、電気励起VECSELの記録である[6]。

ラマンシフト

黄色、オレンジあるいは赤色を生成する別のアプローチは、個体レーザの出力を長波長側にラマンシフトさせ、さらに周波数を2倍にすることによって実現する。

米IPGフォトニクス社は、3段プロセスによってオレンジレーザビームを生成している、ここではイッテルビウム（Yb）ファイバレーザで励起したラマンファイバレーザからのビームを2倍の周波数にする必要がある。2005年に報告された実験では、D.ゲオルギエフとV. ガポンツェフのチームが直線偏光CW Ybファイバレーザからの1118nmを40Wから始めた。そのレーザで、1178nmで出力23Wのファイバラマンレーザを励起し、周期分極反転ニオブ酸リチウム（PPLN）で2倍波にし、589nmで出力3Wだった[7]。同社の現状のバージョンは、570～600nmで最高15Wを出力する。同じ赤色レーザは、615～650nmで最高20W出力だ。

バルク材料でも同じ効果を出せる。厦門大（厦門）のY.K.Buのチームは、Nd-YLFレーザの1047nm出力をストロンチウム - タングステン（$SrWO_4$）結晶で1158nmにラマンシフトし、**図3**に示したように、イントラキャビティホウ酸リチウム（LBO）で第二高調波579nmを生成した。研究者の報告では第二高調波出力889nmでは、5.8％の光変換効率に相当する[8]。

豪マッコーリー大と英Mスクエアレーザのチームは、光励起VECSEL出力のラマンシフトを2倍にすることで548.5～566nmでピーク0.8Wを達成した。基本波とラマンシフトを加えることで、同チームは577.5～596nmの帯域で0.5Wに達した[9]。

新しい基本可視光レーザ

可視光に基本出力を持つ新しいレーザの開発が進められている。II-VIダイオードレーザは、可視光中域に出力があるが、欠陥伝搬によってその寿命が著しく制限されていた。ベリリウム-

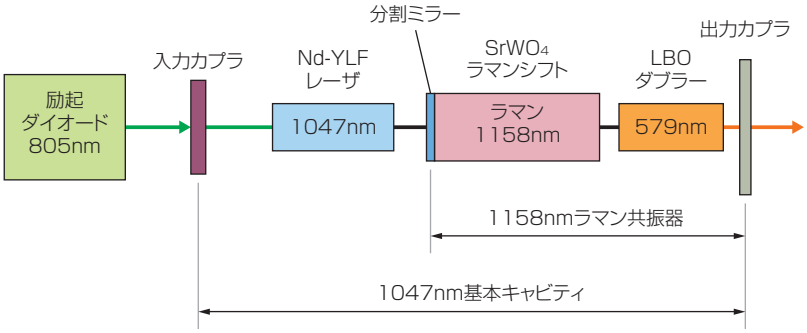

図3 二倍波ラマンレーザの概略。ダイオードが1047nmで発振のNdYLFを励起、これが1158nmで発振する$SrWO_4$ラマンレーザを励起。分割ミラーが1047nmNd線を透過させるが、1158nmラマン線は反射する点に留意。キャビティ内の$LiNbO_3$がラマン光を2倍波にして579nmとする。二倍波ラマンファイバレーザの動作は同じであるが、活性媒体はファイバであり、第二高調波ジェネレータはキャビティ外にある。

亜鉛-カドミウム-セレン（BeZnCdSe）ダイオードで寿命がもっと長くなる見込みがあると、日立中央研究所の田中滋久氏らのグループは報告している。同研究グループは、CW出力で50mWを超える量子井戸ダイオードを実証している。比較的低い閾値電流密度は約1kA/cm^{2}だった。しかし寿命の確立は今後のことである。

多様な固体材料の中で、希土類プラセオジム（Pr）とジスプロシウム（Dy）の両方が可視光を発振する。多くは青色InGaNダイオードレーザで励起する。大阪大学の藤本靖氏のチームは、耐水フッ化アルミ酸ファイバにイオンドープすると、従来の酸化物ファイバよりも高出力が得られる見込みがあると報告している[11]。Dy添加YAGは、583nmでピーク出力150mWを出力し、励起ダイオードの輝度が制限要因となった[12]。Pr添加BaY2F8（バリウム-イットリウム-硫黄）は、607nmで最大出力78mWを達成した[13]。ハンブルク大学の実験では[14]、Pr添加$SrAl_{12}O_{19}$導波路レーザは赤色644nmで最大1W、緑525nmで最大36mWを出力した。

研究中の他の可視光源には、有機色素[15]やコロイド量子ドットの固体薄膜の光励起[16]がある。

展望

過去20年にわたる可視光レーザの開発を眺めると、この進歩は急速な進化である。とは言え、一歩離れて激変を眺めることができる。ニーブン氏に言わせると、「基本的にどんな可視光波長でも高出力で、相対的に低コストのレーザ技術に手が届く」。「これは以前にはなかったことで、どんな新しいアプリケーションが可能になるかを見たいと思っている」と同氏は語っている。

成功への決め手は、素晴らしい発明、堅実なエンジニアリング、本格投資の組合せである。ブルーレイHDビデオディスクの巨大な潜在市場が、青色ダイオードレーザへの数百万ドルの投資を呼び込んだ。現在、大抵の可視光域のレーザを実現するための道具立ては、より優れたものになっている。また、新しい波長を実現するための投資を正当化するための市場規模は小さくなっている。「だれかが、615nm、2Wのレーザを年に200個欲しいと言えば、わたしは納得するだろう」と同氏は言っている。

そのようなレーザを発注できると言うことは実に、進歩が画期的な段階に達していることである。

参考文献

(1) J. Hecht, "Laser Countermeasures: Scaling down mid-IR countermeasures for smaller aircraft," Laser Focus World（April 2014）.
(2) J. L. Tonry et al., "The Pan-STARRS1 photometric system," Astrophys. J. 750, 99,（2012）; doi:10.1088/0004-637X/750/2/99.
(3) Y. Zong et al., "A new method for spectral irradiance and radiance responsivity calibrations using kilohertz pulsed tunable optical parametric oscillators," Metrologia 49, S124（2012）; doi:10.1088/0026-1394/49/2/S124.
(4) A. Mooradian et al., "Surface emitting diode lasers and laser arrays for displays," J. Soc. Inf. Disp. 15, 805（Oct. 2007）.
(5) G. Niven, W. Krupke, and W. Mackenzie, "Laser lighting revolution, coming soon to a theater near you," Optik & Photonik 5, 4, 34（Dec. 2010）.
(6) P. Zhao et al., "Compact 4.7 W, 18.3% wall-plug efficiency green laser based on an electrically pumped VECSEL using intracavity frequency doubling," Opt. Lett. 39, 4766（Aug. 2014）.
(7) D. Georgiev et al., "Watts-level frequency doubling of a narrow line linearly polarized Raman fiber laser to 589 nm," Opt. Express 13, 6772（Sept. 2005）.
(8) Y.K. Bu, C.Q. Tan, and N. Chen, "Continuous-wave yellow light source at 579 nm based on intracavity frequency-doubled Nd:YLF/SrWO4/LBO Raman laser," Laser Phys. Lett. 8, 6, 439（2011）; doi:10.1002/lapl.201110021.
(9) J. Lin et al., "Continuous-wave VECSEL Raman laser with tunable lime-yellow-orange output," Opt. Express 20 5129,（27 Feb 2012）.
(10) S. Tanaka et al., "Progress of Be-based II-VI green to yellow laser diodes," in CLEO-Pacific Rim（2013）, paper MH2-2.
(11) Y. Fujimoto et al., "Visible fiber lasers excited by GaN laser diodes," Prog. Quantum Electron. 37, 185（2013）.
(12) S.R. Bowman, S. O'Connor, and N.J. Condon, "Diode-pumped yellow dysprosium lasers," Opt. Express 20, 12906（2012）.
(13) D. Paboeuf et al., "Diode-pumped Pr :BaY2F8 continuous-wave orange laser," Opt. Lett. 36, 2, 280（2011）.
(14) F. Reichert et al., "Efficient visible laser operation of Pr,Mg:SrAl12O19 channel waveguides," Opt. Lett. 38, 2698（2013）; doi:10.1364/OL.38.002698.
(15) O. Mhibik, et al., "Broadly tunable（440-670 nm）solid-state organic laser with disposable capsules," Appl. Phys. Lett. 102, 041112（2013）; doi: 10.1063/1.4790294.
(16) K. Roh et al., "Surface-emitting red, green, and blue colloidal quantum dot distributed

LFWJ