ウィスパリングギャラリーモード共振器による超狭線幅半導体レーザ

ルート・マレキ

光ウィスパリングギャラリーモード共振器を適用することで線幅0.6Hzの半導体レーザが実現可能になる。耐久性が高く、コンパクトな外部共振器構成で、100mW以下のアプリケーションではファイバレーザの置き換えとなり得る。

スペクトル純度は発振器の特性のひとつであり、これによって密接周波数を区別することができる。レーザの場合、通常、周波数ノイズと線幅がスペクトル純度の基準となる。特に、狭線幅レーザは、周波数(波長)差の計測で高分解能が求められるアプリケーションで使うことができる。

高いスペクトル純度を必要とするアプリケーションには、①光ファイバセンサのような干渉計測をベースにしたもの、②光検出や測距あるいはライダ(LIDAR)のような長いコヒレンス長を必要とするもの、③分光法のように近接する周波数の直接計測を必要とするものがある。狭線幅レーザは、コヒレント通信でも必要とされている。この場合、光位相ロックループ(干渉計の特殊タイプ)で局発光(LO)として使われる。

スペクトル純度に加えて、狭線幅レーザは個々のアプリケーションで必要となる特殊波長でも動作しなければならない。こうしたアプリケーションに適合するためにガスレーザ、固体レーザおよびファイバレーザの他に、狭線幅技術の進歩により半導体レーザも有効な候補となりつつある。

スペクトル純度の定義

線幅をスペクトル純度の基準に使用することはレーザ文献に広く見られ、それを明記しているベンダーは多い。しかし、これはレーザのスペクトル純度を規定する正確な方法ではない。計測された線幅が計測の時間尺度(帯域)に依存するからである。したがって、ほとんどのベンダーは、瞬間的な線幅を規定している。これは本質的なレーザのシャロー・タウンズ(Schawlow-Townes)限界である。

スペクトル純度を定量化する最良の方法は、位相ノイズ、もしくは周波数ノイズのパワースペクトル密度を使用することである。このアプローチは、関心のある全フーリエ周波数、一般には1Hz～100MHzにわたりレーザノイズと、そのスペクトル純度を表している。ここでは、レーザ線幅の慣例を使用する。

レーザのスペクトル純度の特性を表現するもう1つの方法は、そのコヒレンス長、つまりコヒレンスタイムを規定することによって行う。これは、レーザ光のコヒレンス特性が維持される間隔(タイムオブフライト、光速を距離で除したものに等しい)である。

干渉計の長さが増加してレーザのコヒレンス長に近づくにつれて、コヒレンス時間が十分に長くないと、観察される縞の品質が劣化し、最終的にはなくなる。したがって、干渉分光法を用いるセンシングなどの用途では、両方のアームを伝搬する光を結合して、位相、つまり周波数の変化(アームの一方)を観察するので、所望の分解能で計測するためには、干渉アームの長さがどの程度となるかはレーザの線幅によって決まる。

特別仕様の波長

一般に、干渉型、長コヒレンス長、分光学的アプリケーションは、特定の波長で狭線幅レーザを必要とする。例えば、ほとんどのファイバセンサは1550nm付近の波長を使うが、これはコヒレント光通信の局発光と同様である。ライダは他の波長、可視光あるいは2000nm程度の長波長とすることもできる。分光計の要件では、広い波長範囲が最も重要であるが、これは原子線がUVから近赤外範囲に広がり、分子波長が、一般に中赤外から遠赤外域まであるためである。

多くのアプリケーションで、温度、加速および振動に関して、レーザの小型、軽量および堅牢さが要求されるパラメータとなっている。半導体レーザのコンパクトで堅牢な特性は、これらのスペクトル純度の高いアプリケーションには最適であるが、半導体レーザは本質的に線幅が広い。これは、そのキャビティサイズが小さいために、外的手段で狭線幅化しなければならないからである。

線幅を狭くするための最も効果的なアプローチは、狭いパスバンドの外部フィルタやキャビティを利用することである。微小なファブリペローキャビティやブラッググレーティングの進歩

により半導体レーザの線幅を狭くする効果的な手段が実現している。これは、フィルタを通した光をレーザにフィードバックする、あるいは広く採用されているPDH法（周波数安定化技術）のようなエレクトロニクス方式でレーザをロックするか、いずれかを用いる。これらの方式は、小型、低消費電力、堅牢動作、ローコストを含め、半導体レーザの望ましい特徴も維持する。

残念なことに、外的に半導体レーザの線幅を狭くする従来のアプローチは、3つの大きな難点がある。まず、パフォーマンスが、ファイバレーザやガスレーザのサブkHz線幅に対抗できない。センシング、ライダ、高分解能分光計などの新しいアプローチが要求するスペクトル純度がますます高くなっているので、これは重要な検討事項になる。次に、利用できるフィルタやキャビティは、動作波長範囲に限りがある。最後に、外部狭線幅レーザはモードホップのない可変が難しいことがよくある。

WGM共振器

数年かけて米OEwaves社は、微小な光ウィスパリングギャラリーモード（WGM）共振器をベースにした超狭線幅半導体レーザを開発した。WGM共振器は、透明材料でできた円形対称構造で、サイズは数十μmから数ミリメートルである（**図1**）[(1)~(4)]。

この共振器は、構造の周辺、表面に近いところにある、極めて高いQ値（Q、モード帯域に対するモード周波数比として定義）のモードをサポートしている。実際、光キャビティでこれまでに報告された最高Q値と最大フィネスの1つは、フッ化カルシウムWGM共振器によるもので、$Q=3\times10^{11}$である。これは約6kHzの帯域幅、と1000万フィネスに相当する[(5)]。

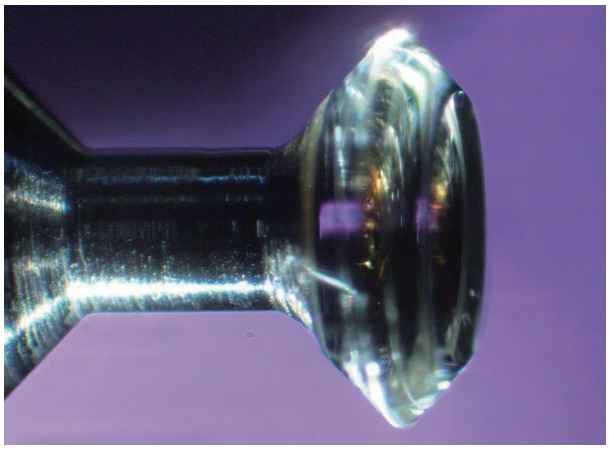

図1　このWGM共振器では、支持ピン上に3mmの共振器を置いている。

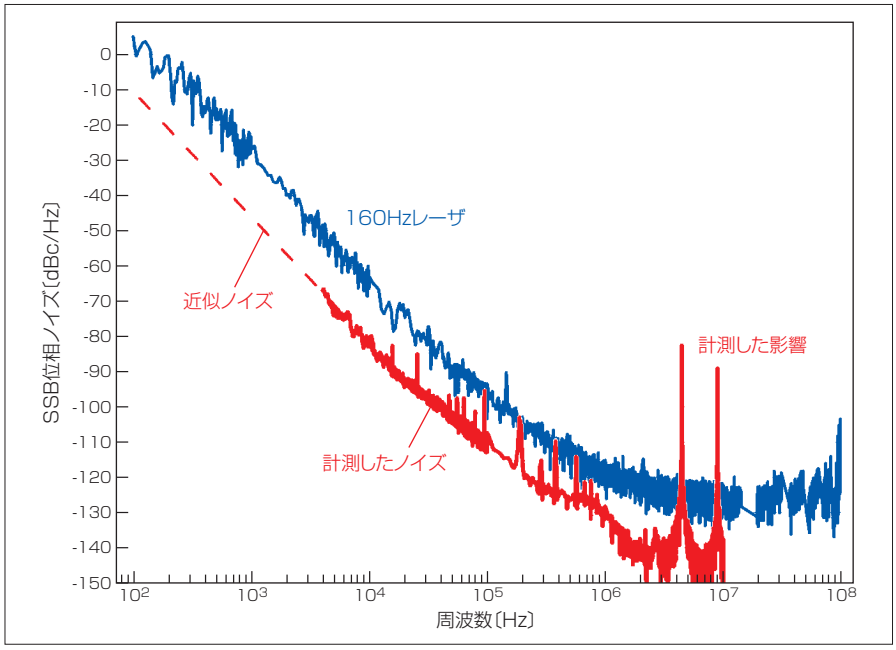

図2　線幅160Hz（赤）のレーザの位相ノイズを線幅～10Hzのレーザと比較。y軸は、キャリア/Hzに関してdBで計測した位相ノイズのシングルサイドパワースペクトル密度（dBc/Hz）、x軸はフーリエ周波数を表す。

これらのモードの高いQ値と狭い線幅は、構造的損失機構を極めて小さくできることによるものである。ここに含まれるのは曲げ損失と散乱損失。曲げ損失は、共振器の曲率半径が光波長よりもはるかに大きい場合には無視できる。また、散乱損失は、共振器表面を適切に加工することで除去することができる。これら共振器の主要な損失が起こる仕組みは、材料の吸収である。これは、フッ化カルシウムやフッ化マグネシウムなどの結晶材料では極めて小さい。シリカやシリコンナイトライドでできた共振器もかなり高いQ値を示す。

われわれの技術は、WGM共振器への自己注入同期によって半導体レーザの線幅を狭くしている[(6)]。このアプローチは、分布帰還型（DFB）レーザの線幅を約10Hzまで狭くすることができる（**図2**）。先頃われわれは、0.6Hzの狭線幅DFBレーザを実証した。線幅を

数100Hzまで、大幅に狭くしたファブリペロー半導体レーザも実証した。

自己注入同期は、散乱による共振器からの反射戻り光を利用する。これは、レーザの線幅を崩壊させる小さな内部散乱中心によるものである(7)~(10)。また、自己注入同期はレーザのダイナミクスを安定させるので、モードホップが減少し、偏光安定性が向上する。

共振器の小型サイズとレーザチップとの直接結合により、2.5×1.2×1.2cmの一般的なバタフライパッケージに実装できる(**図3**)。電子回路全てを含み、パフォーマンス劣化なしにパワー増幅できる、完全ターンキー 10mW、線幅＜300Hzのレーザモジュールは、基本的にiPhoneサイズである。

共振器材料はUVから遠赤外波長までの範囲で透明であるので、われわれのアプローチは利用できる半導体レーザの任意の波長で超狭線幅コヒレント光を作れる。685、795、1030、1550、2000、および4500nmで線幅＜300Hzのレーザを作製した。アプリケーションは多様なライダ、センシング、原子分光学、分子部光学などがある。

共振器の温度を変えることで、これらのレーザは2nm可変できる。50GHzで連続、モードホップフリーチューニングである。レーザは100kHzレートで変調可能。ピエゾ(PZT)素子と共振器を組み合わせて応力をかけ、モード周波数を変えることで変調度は3GHz超となる。これらのレーザは特にライダ用途で有用である。ライダでは、狭線幅と、レーザ周波数の素早い変調能力、大きな変調度とを組み合わせる必要があるためである。

高速変調特性を利用して、ルビジウム原子で795nm光D1遷移に蒸気セルを用いてレーザを固定した。アラン分散で示したこのレーザの安定能力は、1秒で10^{-12}であり、100～1000秒の間の平均で＜2×10^{-13}に達している(**図4**)。レーザとセルを収容したパッケージ全体は、サイズが10×5.5×2cmに過ぎず、このパフォーマンスで競合するファイバレーザ、ガスレーザ、固体レーザと比べて小さく、軽量で、エネルギー効率が優れている。

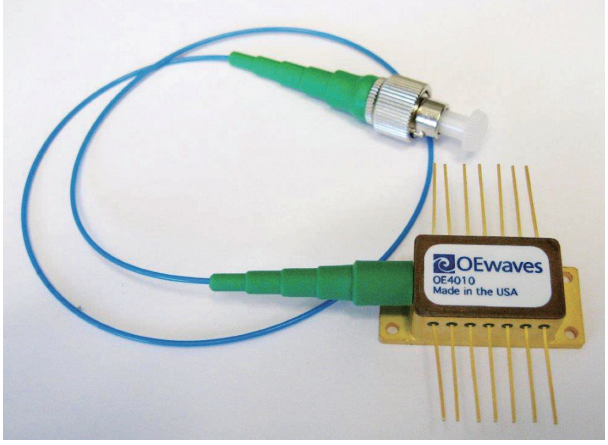

図3 バタフライパッケージに収めたOEwaves社のレーザ。

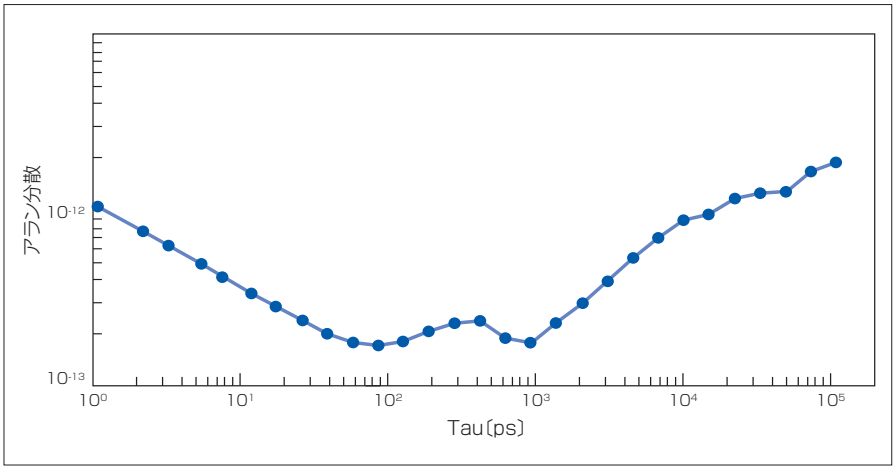

図4 変調可能なWGM共振器およびルビジウム光遷移に自己注入同期した795nm半導体DFBレーザの安定性を、周波数変動の基準として広く使用されているアラン分散で示す。

参考文献

(1) W. Liang et al., Opt. Lett. 35, 16, 2822-2824 (2010).
(2) V. S. Ilchenko et al., Proc. SPIE 7913, 79131G (2011).
(3) Danny Eliyahu et al., Proc. SPIE 8960, 89600X (2014).
(4) L. Maleki et al., Chapter 3 in Practical Applications of Microresonators in Optics and Photonics, ed. A. B. Matsko (CRC Press, 2009).
(5) A. A. Savchenkov et al., Opt. Express 15, 6768-6773 (2007).
(6) US Patent No. 7,991,025; US Patent No. 7,869,472.
(7) B. Dahmani et al., Opt. Lett. 12, 876-878 (1987).
(8) L. Hollberg and M. Ohtsu, Appl. Phys. Lett. 53, 944-946 (1988).
(9) A. Hemmerich et al., Appl. Opt. 33, 988-991 (1994).
(10) V. V. Vassiliev et al., Opt. Commun. 158, 305-312 (1998).

著者紹介

ルート・マレキはOEwaves社の社長／CEO。
e-mail: lute.maleki@oewaves.com URL: www.oewaves.com.

LFWJ