

室温で動作する、ほぼ無閾値のレーザ

ジョン・ウォレス

これまでの「無閾値」レーザは、極低温での動作が必要だったのに対し、新たに登場したほぼ無閾値のレーザは室温で動作し、光学回路での使用に理想的なものとなっている。

今日実用化されているすべてのレーザに、レーザ発振しきい値が存在する。レーザ発振しきい値は、レーザの光出力が自然放出から誘導放出に変化する瞬間の印加電流または電流密度(光励起の場合は励起電力)で表される。レーザ発振しきい値を超えると、素子の線幅は、しきい値未満の場合よりもかなり(数ケタ単位で)細くなる。同様に、スロープ効率(光出力を入力励起の関数として表した式の一次導関数)も数ケタ単位で高くなる。つまり、しきい値を超えた時点で、素子はレーザとして機能する。

励起がどれだけ小さくても印加励起にほぼ比例してレーザ発振を行う、いわゆる無閾値レーザは、レーザが発明されて以来ずっと、レーザを扱う科学者やエンジニアにとっての夢だった。そのようなレーザは特に低出力時において、とにかく均一で、効率が高い。また、無出力時にいたるまでの動作範囲全体において線形であるため、光学回路への集積が簡素化される。

理想的な無閾値レーザが実現可能かどうかは不明だが、「無閾値」(実際には、「しきい値が非常に低い」か「ほぼ無閾値である」ことを意味する)とは、自然放出の結合係数(β)が1に近く、非放射性損失が低いレーザを指すというのが、実用的な定義となっている⁽¹⁾。そのようなレーザとしては、光共振器内に少数の量子ドット(QD: quantum dot)を含み、約4Kという極低温で動作するものが開発されている⁽²⁾。しか

し、低温が求められることから、それらのレーザは明らかに光学回路では利用できない。光学回路は、理想的には室温だけでなく、高温でも動作可能でなければならない。

スペインとスイスの研究者グループはこの度、室温以上の温度で動作する無閾値レーザを開発した。このレーザは、InAsSb(インジウムヒ素アンチモン)のQDがフォトニック結晶微小光共振器(PCM: photonic crystal microcavity)に配置されており、室温にお

いて1286nmの波長で放射する⁽³⁾。研究者らはそれぞれ、スペインのマドリッドマイクロエレクトロニクス研究所(IMM: Instituto de Microelectrónica de Madrid)、スイス連邦工科大チューリッヒ校(ETHZ: ETH Zurich)の固体物理学研究所(Laboratory for Solid State Physics)、スペインのバレンシア大学(Universitat de València)のUMDO(Opto electronic Materials & Devices Unit)、スペインのバレンシア工科大学情報通信研究所(ITEAM: Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia)のOQCG(Optics and Quantum Communications Group)の出身である。

フォトニック結晶に基づく光共振器

GaAs(ガリウムヒ素)の浮遊スラブ上に作製されるPCMは、六角形の2次元フォトニック結晶で構成される。9つの穴が欠けた線形部分があり、光共振器が形成されている(図1)。PCMは、QD放射の基本モードにスペクトルが一致するように、最適化されている。

PCMを作製するためには、AlGaAs(アルミニウムガリウムヒ素)の犠牲層と、厚さ190nmのGaAs層(InAsSb QDを含む)からなるGaAs基板上に、エピタキシャル材料を成長させた。活性層のパターニングと、GaAsスラブへのパターン転写の後に、犠牲層を除去することにより浮遊スラブだけを残した。

無閾値レーザそのものは、連続波(CW)レーザダイオードからの光で励起した。波長785nmで放射された光が、顕微鏡対物レンズによってスポット径1.5μmに集光される。顕微鏡対物レン

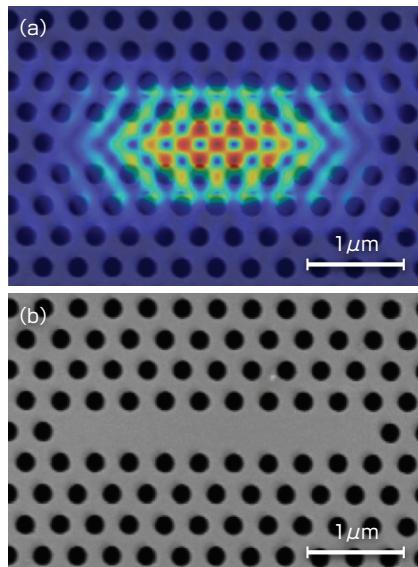


図1 フォトニック結晶微小光共振器(PCM)の走査型電子顕微鏡写真。9つの穴が欠けており、それによって光共振器が形成されている。GaAsの浮遊スラブには、1286 nmで放射するInAsSbのQDが含まれる。計算結果(a)は、得られたレーザの基本モードを示し、走査型電子顕微鏡写真(b)は、実際の素子を示している。素子のしきい値は860 nWと非常に低く、無閾値レーザであるとみなされる(資料提供:IMM)。

ズはPCMとしても機能し、テスト対象レーザの放射光を収集する。この光を、光ファイバに集光し、冷却型InGaAsフォトダイオードアレイを検出器として備える分光器に入射させた。

研究者らは、室温における性能を向上させるために、SbをInAs QDに添加することにした。Sbは伝導帯と価電子帯の境界を引き上げ、それによって正孔がさらに深く閉じ込められるため、高温における性能が改善される。これにより、キャリアの熱放散が低減され、室温における放射効率が高くなる。

「素子の放射を温度の関数として把握することは、容易ではない。QD放射の熱ドリフトが、共振器モードの熱ドリフトよりも格段に大きいためだ。したがって温度の変化によって、共振器モードは大きくデチューンされることになる」と研究者らは述べている。そのため、一定の温度範囲に対して詳細な調査を行うには、各温度に対して異なるPCMを用意するしか方法がないという。しかしそれを行ったとしても、確実な結論は得られない。共振器の間に個体差があるためだ。そこで研究者らは、作製したPCMの共振波長である1286nmでの室温動作を、詳細に調べることにした。

PCMレーザによる基本モードにおける発光の積分強度は、励起電力の関数となることが実験的に得られている。入力光と出力光の関係を表すこの曲線は、LL(light-in versus light-out)曲線とも呼ばれる(図2a)。この曲線によって、レーザ発振が開始する領域におけるレーザの動作を把握することができる。

自然放出結合係数 β の値を変化させた場合の曲線を算出した結果、 β の値が0.85である場合が、実験データに対するベストフィットであることが明

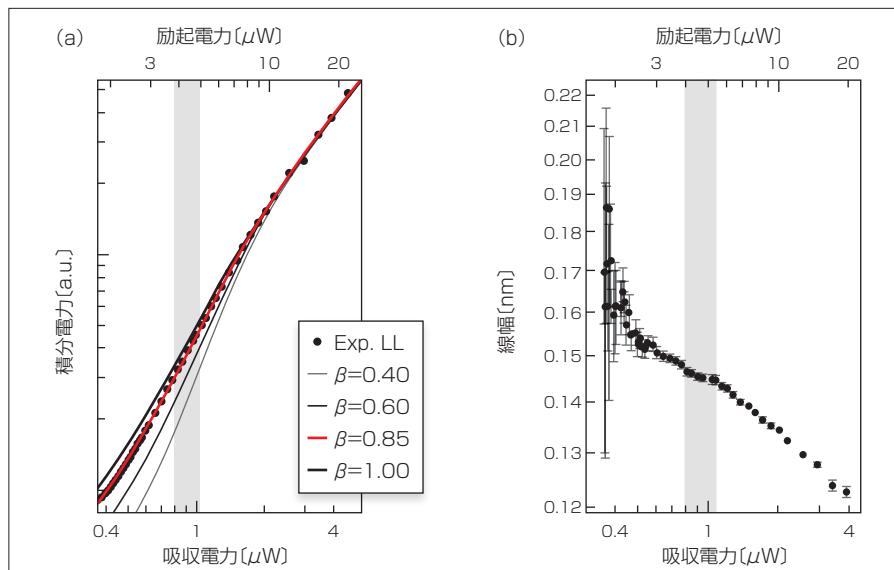


図2 PCMレーザのLL曲線から、非常に低い光励起レベルにおけるその動作を把握することができる(a)。赤線で示されているのは、ベストフィットの自然放出結合係数(β)である。線幅と入力電力の関係を示すグラフ(b)からは、レーザのしきい値が得られる。グレーで示された垂直領域は、増幅自然放出(ASE:amplified spontaneous emission)の領域である。

らかになった。この値は、前述の極低温動作の無閾値レーザに対して報告されている β の値とほぼ同じである。

860nWの極低しきい値を達成

素子がレーザ発振を開始するポイントを確認するために、共振モードの線幅を入力光電力の関数として測定した(図2b)。これによって、ほぼ自然放出の領域、ASEの領域、そして誘導放出の領域が特定された。レーザのしきい値は、入力電力が860nWのときで、十分に低く「無閾値」レーザとみなせることが確認された。

素子の共振器のQ値(エミッタ波長をその線幅で割った値)は、最小励起電力370nWにおいて7400、励起電力が10.14μWの場合で1万2100だった。研究者らは、二次相関関数(g^2)の解析を行うことにより、別な方法でレーザ

発振を確認することができると述べている。この解析を行えば素子の強度揺らぎの統計が得られるため、その動作を把握することができる。

IMMの研究者の1人であるパブロ・アイトル・ポスティゴ氏(Pablo Aitor Postigo)は、「次のステップは、素子の特性評価へと研究を進めることがある。特に、相関関数の測定と、電力をほとんど消費しない光センサへの素子の適用が求められる」と述べている。

PCMレーザの結果は、非放射再結合などの熱駆動プロセスが、室温以上で動作する無閾値レーザの開発の妨げにはならないことを示している。このような素子に対し、電気的注入を行うバージョンが開発されて実用化されば、非常に効率的な光学回路だけにとどまらない、素晴らしい成果がもたらされる可能性がある。

参考文献

- (1) S. Noda, Science 314, 260–261 (2006).
- (2) S. Strauf et al., Phys. Rev. Lett. 96, 127404 (2006).
- (3) I. Prieto et al., Optica 2(1), 2334 (2015); <http://dx.doi.org/10.1364/OPTICA.2.000066>.