

シングルモード半導体レーザーの大型化と高出力化

サリー・コール・ジョンソン

60年間にわたって面発光レーザーの高出力化を阻んでいた障害が取り除かれ、光通信、レーザー手術、防衛、ライド(LiDAR)、ロボティクス、さらには量子スケーリングに至るまでのさまざまな用途に対して、より長い距離に対応するさらに強力なレーザーが実現される可能性がある。

米カリフォルニア大バークレー校(University of California at Berkeley)の電気工学及びコンピュータサイエンス学部の准教授で、ローレンスバークレー国立研究所(Lawrence Berkeley National Lab)の材料科学部(Materials Sciences Division)の科学者であるブバカル・カンテ氏(Boubacar Kanté)率いる研究者グループは最近、長年にわたる光学分野の課題を解決した。

カンテ氏のグループ(図1)は、等間隔に小さな穴が開けられた半導体薄膜からスケーラブルなレーザー共振器を作成することにより、レーザー動作から高次モードを体系的に取り除くことに成功した。同氏らはこれを、「Berkeley Surface Emitting Laser」(BerkSEL)と呼んでいる。

「製造上の課題は今後も出現する可能性があるが、面発光レーザーの高出力化を60年間阻んでいた障害は、取り除かれた。メーカーは今後、数百台ものレーザーを使用する必要はなくなり、十分な出力を持つ1台のレーザーで、それらを置き換えることができる」とカンテ氏は述べている。

BerkSELの設計

BerkSELは、InGaAsP(インジウムガリウムヒ素リン)で作られた厚さ200nmの薄膜上にリソグラフィでエッチングさ



図1 ワイシュ・カロニー博士(Wayesh Qarony)、ルシン・コントラクタ氏(Rushin Contractor)、エマ・マーティン氏(Emma Martin)、ブバカル・カンテ教授、ワリッド・レジェム博士(Walid Redjem)。研究室にて撮影(本稿の写真はすべて、カンテ氏のグループ提供)。

れた穴を通して、シングルモードの光を放射することができる(図2)。これらの穴は、ディラック点(Dirac point)としての役割を果たす。ディラック点とは、エネルギーの線分散に基づく2次元材料のトポロジカル特性である(図3)。

カンテ氏のグループは、高エネルギーのパルスレーザーを使用して、BerkSELに対する光励起とエネルギー供給を行い、近赤外分光法に対して最適化された共焦点顕微鏡を使用して、各アパーチャからの発光を測定した(図4)。

同氏らは、通信波長でのレーザー動作を可能にする半導体材料と構造寸法を選択したが、BerkSELは、穴のサイズや半導体材料などの設計仕様を調整

することによって、異なるターゲット波長での発光が可能である。

レーザーの発明以来、光学研究者は、レーザー共振器のサイズの増加に伴って崩壊し始める、コヒーレントで指向性を持つ単一波長の光に、光を増幅するための導波路などの外部機構を利用することによって、対処してきた。また、高い出力には長い導波路が必要である。

「レーザー出力を増加するための最善の方法は、表面を利用することである。表面の面積は直線寸法の二乗だからだ。面積を大きくすれば、導波路を利用するよりもはるかに素早く出力を増加させることができる」とカンテ氏は述べた。

カンテ氏は、電磁気学全般に深く関心を寄せており、光に対する量子ホール効果に基づくトポロジカルレーザーの概念を、2017年に考案して実証した。この発見が、BerkSELの実現に役立っている。

屈折率をゼロにする

カンテ氏のグループは、共振器のフリースペクトルレンジ(共振器に多数のモードが存在すると考えて、モード間の距離のこと)が複素数であることを示した。つまり、その距離は「実数だが虚数部を持つ」という。現在、レーザー共振器のサイズの増加に伴い、各モードは周波数が近くなり、分離できなくなる。1つのモードがレーザー動作を行うと、共振器サイズの増加に伴って他のモードもレーザー動作を開始することになる。

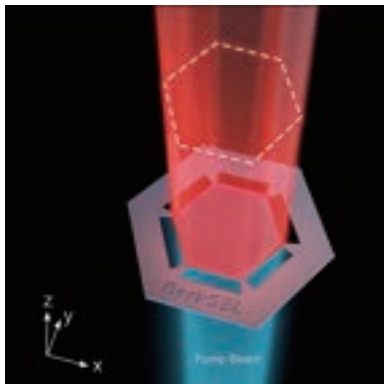


図2 BerkSELの概念図。青色は励起ビーム、赤色はレーザービームである。半導体薄膜は、同位相のすべての共振器と同期するように設計されているため、そのすべてがレーザー動作モードに関与することになる。

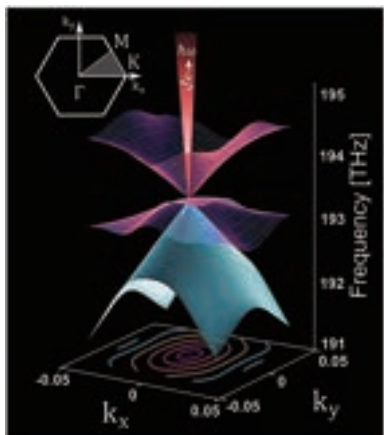


図3 ディラックコーンの構造図。ディラック点が単一であることから、半導体共振器全体から同期的に光が放射される。

しかし同氏は、レーザーの屈折率をゼロにして、レーザー表面のすべての要素を同位相にする方法を見出した。「これは、既存のどのレーザーにおいても起きない現象だ」とカンテ氏は指摘している。「他のすべてのモードのレーザー動作を防いで、共振器の全出力を単一のモードに集約することを想像してほしい。そのようなレーザーがどれだけ強力なものになり得るか、すぐにわかるだろう」(カンテ氏)。

2点間の光位相は、2点間の屈折率に2点間の距離を乗じたものである。「屈折率がゼロならば、位相はどこでも同じで、すべての共振器が寄与する

ことになる。これによって驚くほど効率的なシステムが得られる」とカンテ氏は述べた。

これまで、垂直共振器型面発光レーザー(VCSEL)においてこれは不可能だった。アパーチャがマイクロン単位でそれよりも大きくすることができなかったためである。「我々の研究により、アパーチャを好きなだけ大きくできることが示されている。デバイスは平面状であるため、製造方法は容易に判明するだろう」とカンテ氏は付け加えている。

スケーリング

カンテ氏が以前発明したトポロジカルレーザーは、どのように関与するのだろうか。既存の面発光レーザーはすべて、共振器の中央のみから発光し、それはポテンシャル井戸の基本モードからのものである。「エネルギーは中心にあり、境界ではゼロである。BerkSELでは、いたるところから光が放射されて、他のモードが入り込む空間は残されていない。高次モードのレーザー動作は、この共振器の物理法則によって禁じられる」とカンテ氏は説明している。

この取り組みの素晴らしい側面の1つは、「いかなるポテンシャル井戸においても、この種のモードを予測または観測した人はいない」ことだと、カンテ氏は述べている。「我々は、これらのレーザーのスケーリングを可能にする、『オープンディラック』のポテンシャルを発見した。システムをスケーラブルにするには、何らかの損失が必要である。オープンとは、システムにいくらかの損失があるために、高次モードが損失モードに入ってくることを意味する。これには、物理学、特に波動物理学において、多くの用途が存在するだろう」(カンテ氏)。

重要な点として、同グループはポテ

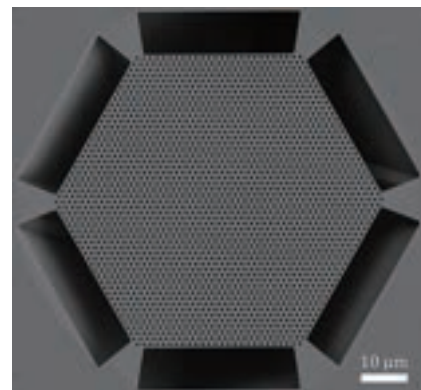


図4 BerkSELを上から見た走査電子顕微鏡写真。その六角形の格子状のフォトニック結晶によって、電磁共振器が形成される。

ンシャル井戸における新たなソリューションを発見している。「これは、レーザー業界だけでなく、波動物理学業界にとっても驚くべき成果だ。今日の量子科学における最大の課題はスケーリングで、つまり、いかにしてシステムのコヒーレンスを維持しつつ、量子ビット数を増加させるかということである。それはレーザーのスケーリング問題と同じである。シングルモードにおいて共振器を維持したままサイズを増加させるということは、コヒーレンスを維持したままサイズを増加してスケーリングすることを意味するためだ」とカンテ氏は述べた。

カンテ氏は現在、このデバイスをベースとしたシステム実装の提案に取り組んでいる。「例えばライドに利用できる」と同氏は述べている。「ライドは、レーザー光源の出力に依存しており、それが今回増加できるようになったことで、さまざまなライドシステムに利用できる非常にコンパクトなデバイスを開発することができる。非常に小型でありながら強力なレーザーがあれば、考え得る任意の小型ロボットにそれを搭載することができる。我々は今、この基礎的な発見を、システムに搭載される技術に転換する必要がある」(カンテ氏)。