

# ディラック渦トポロジカルレーザとシリコンの融合

サリー・コール・ジョンソン

ディラック渦 (Dirac-vortex) 状態は、超伝導電子システム内のマヨラナフェルミオン (別名: エンジェル粒子) の数学的類推体であり、従来の光共振器よりも広い自由スペクトル範囲を有する。そのため、シリコン上にシングルモード面発光レーザを生成するのに理想的な状態である。

国際的な研究チームが、軸上シリコン基板上にモノリシック成長させたインジウム・ヒ素/インジウム・ガリウム・ヒ素 (InAs/InGaAs) 量子ドット材料から、通信波長で室温連続波のディラック渦トポロジカルレーザを実験的に実証した。これは、次世代シリコンフォトリソ集積回路にトポロジカルなロバスト性をもたらす多大な可能性を示唆している。

シリコンは光子を変調、導波、検出するのに優れた材料であるが、これまでのところ、高性能レーザをシリコン

上に集積することは、研究者にとって捉えどころのない聖杯となっている。シリコンが今日のナノフォトニクスやマイクロエレクトロニクスにおいて最も一般的な材料であるため、高性能レーザをシリコン上に集積することは容易ではない。

同チームの研究が飛躍的進歩となるのはなぜか。シリコン基板上にモノリシックに集積されたトポロジカルレーザ (図1) が、室温の連続波条件で動作可能であることを証明したためだ。この成果により、研究者らはトポロジカ

ルレーザをシリコンナノフォトニクスおよびマイクロエレクトロニクスのプラットフォームに使用できる可能性に一步近づいたのである。

「7年前、当チームの共同研究者である英ユニヴァーシティ・カレッジ・ロンドン (University College London) のシミン・チェン氏 (Siming Chen) のチームが、シリコン上に III-V 量子ドットレーザをモノリシック集積する技術を開発した」と、香港中文大の電子工学准教授兼同大光科学センターの副所長のシャンカイ・ソン氏 (Xiankai Sun) は言う。「しかし、既存の量子ドット共振器レーザのほとんどは共振器の変動に非常に敏感であり、その性能が根本的に制限されている」。

トポロジーの概念は数学の領域で生まれたが、最近では光学やレーザ設計の領域にも取り入れられている。そして、ディラック渦状態は、超伝導電子システム内の有名なマヨラナフェルミオン (エンジェル粒子) の数学的類推体であり、古典波を堅牢に閉じ込める方法として、同研究チームが利用しているものだ。

「光学領域におけるディラック渦状態の利点として、従来の光共振器よりも基本的に広い自由スペクトル範囲を有することが挙げられる」と、ソン教授は述べる。「この重要な特性を活用

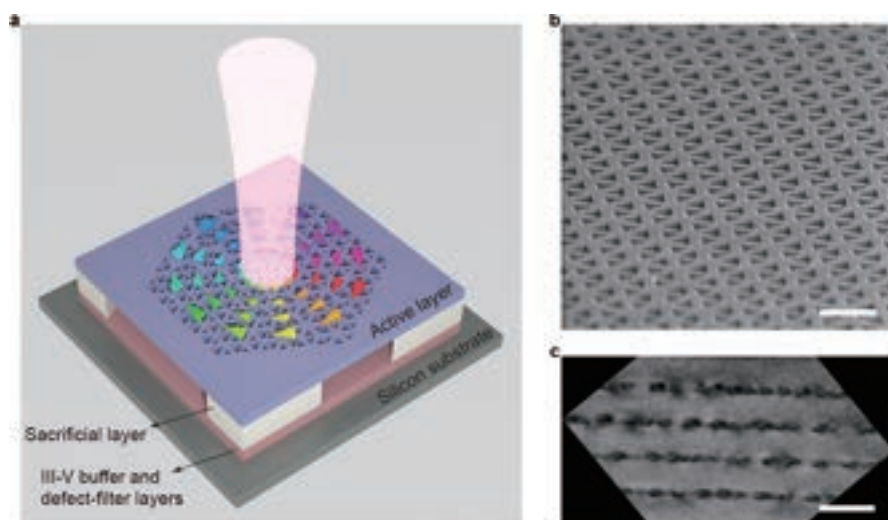


図1 シリコン基板上にエピタキシャルに成長させたディラック渦トポロジカルレーザの概念図。フォトリソ結晶構造が活性層内に形成され、犠牲層を部分的に除去して浮遊させた (a)。作製したトポロジカルディラック渦フォトリソ結晶共振器の斜視走査電子顕微鏡 (SEM) の画像で、スケールバーは500nm (b)。4層のInAs/InGaAs量子ドット層を含む活性層の断面明視野透過電子顕微鏡 (TEM) の画像で、スケールバーは100nm (c) (画像提供: <https://doi.org/10.1038/s41377-023-01290-4>)

すれば、シリコン上にロバストなシングルモード面発光レーザを実現できると考えていた」。

## ディラック渦フォトニック結晶レーザの設計と作製

同研究チームは、トポロジカル絶縁体の補助的な軌道自由度を利用して、ディラック渦フォトニック結晶レーザ(図2)を設計および作製した。同チームのマイクロ共振器は、フォトニック結晶スラブ構造内に形成されたトポロジカルなディラック渦状態に基づいている。

「数年前にナノメカニカルトポロジカル絶縁体で発見した補助的な軌道自由度を利用して、ディラック渦フォトニック結晶レーザを設計および作製した」と、ソン教授は言う。

同研究チームは、この補助的な軌道の自由度を利用することにより、ディラック渦レーザ共振器の近接場を制御し、直線偏光の遠方場発光を観測できた。その後、室温で連続波光ポンピングを行い、ディラック渦マイクロ共振器からの垂直レーザ発光を観測した。

「当チームのレーザは、他のレーザとは根本的に異なる特性を示している」と、ソン教授は述べる。「第一に、発振波長がトポロジカルな性質によってディラック点(Dirac point)に固定されているため、その発振波長は共振器のサイズの変化に対して非常に安定している。第二に、その自由スペクトル範囲(FSR)は、自由スペクトル範囲の普遍的な逆スケールリング則、つまりFSR  $V^{-1}$  ( $V$  は共振器モード体積) に反している。これらのユニークな特性により、当チームのレーザは従来の共振器設計のレーザとは根本的に異なるものなのだ(図3)」。

重要なことは、同研究チームのレー

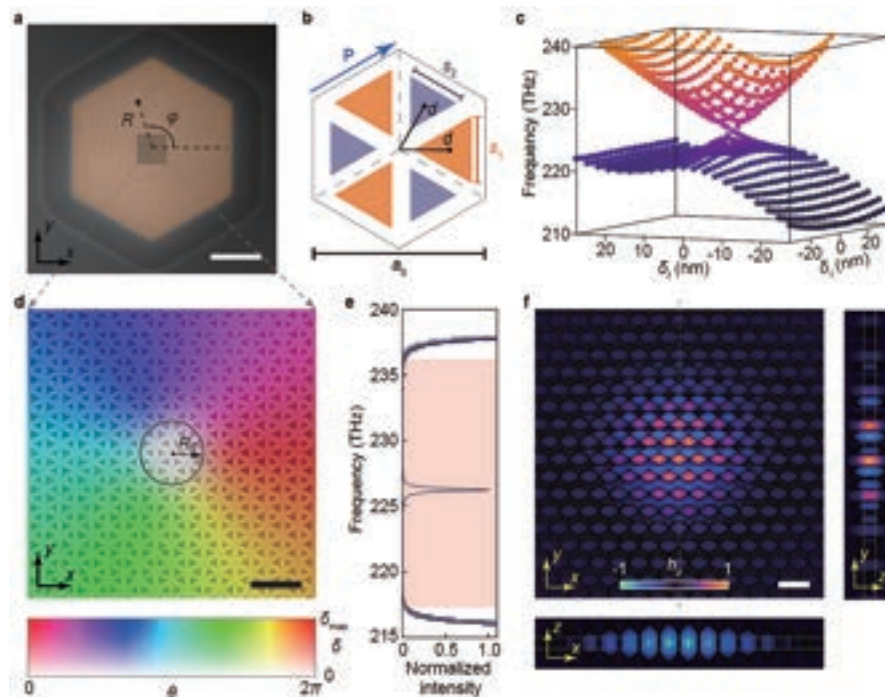


図2 ディラック渦レーザ共振器の設計と作製：作製したディラック渦トポロジカルフォトニック結晶レーザの走査電子顕微鏡(SEM)画像(a)、単位セル内の詳細構造の図解(b)、 $\delta_i$ と $\delta_t$ の値が異なる第1ブリルアン領域の $\Gamma$ 点におけるバルク状態の固有振動数のシミュレーション(c)、渦中心付近のフォトニック結晶構造のSEM画像(d)、ディラック渦共振器の正規化強度スペクトルのシミュレーション(e)(画像提供: <https://doi.org/10.1038/s41377-023-01290-4>)

ザは、共振器サイズの普遍的なスケールリング則に反しているため、オンチップ・フォトニックおよびオプトエレクトロニクス・システム用の相補型金属酸化膜半導体(CMOS)と互換性があるという点だ。

同チームが直面した主要な課題の1つは、使用した浮遊膜構造により、レーザ共振器に実験上の限界が生じ、大型(数百マイクロン以上)のフォトニック結晶スラブを実現できないことだった。

「共振器サイズが制限され、周囲のフォトニック結晶のバンドギャップによる面内光閉じ込め効果が比較的弱いため、共振器の品質係数が比較的低くなってしまふ」と、ソン教授は言う。「この課題は、当チームが次世代のディラック渦レーザデバイスを設計・作製する際に、克服しなければならない」。

## 数多くの期待される用途例

ディラック渦量子ドットレーザの開発は、次世代シリコンベースのフォトニック集積回路のオンチップ光源として有望であり、また、非エルミート性、ボソニック非線形性、量子電磁力学などのトポロジカル現象を研究することも可能になる。このような研究は、オプトエレクトロニクス分野の進歩を促し、さらに効率的で安定性の高い通信技術への道を切り拓くだろう。

同研究チームのディラック渦レーザは、「ファイバースペースやフリースペースの光通信ネットワーク内のトランスミッター、ライダー(LiDAR)や顔認識システムの光源、化学センサや生物医学センサなどの用途に活用できるかもしれない」と、ソン教授は述べる。

また、「レーザは本質的に非エルミ

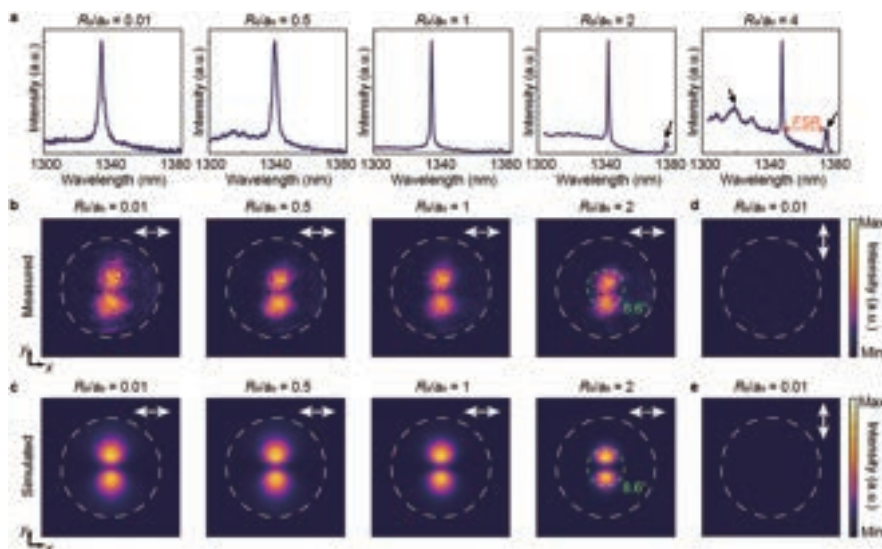


図3 さまざまな共振器サイズを有するトポロジカルディラック渦マイクロ共振器レーザの発振特性 (画像提供: <https://doi.org/10.1038/s41377-023-01290-4>)

ート性とボソニック非線形性を示すので、当チームの研究成果は、電子領域では対応するものがないマヨラナ束縛状態において、新たな物理現象の研究を促進できるのだ」と、ソン教授は補足する。「InAs/InGaAs量子ドットの密度を低減し、ディラック渦共振器の1つの量子ドットのみを配置することにより、当チームのデバイスは、トポロジーと量子電磁力学の相互作用を研究する新たな手段となる」。

光励起レーザの用途はまだ限定的であるため、同研究チームの次なる課題は、トポロジカルフォトニック集積回路に利用可能な、電気励起型のトポロジカルディラック渦レーザを構築することである。

LFWJ

# 無料購読お申込み方法

Laser Focus World Japanは、レーザ/フォトンクス/オプトエレクトロニクス応用技術/製品の開発、研究、マーケティングなどに携わっている方に無料でお届けする雑誌です。ご希望の方は、ウェブサイトからご登録ください。ご登録内容を確認させていただいた上で読者として正式に登録させていただきます。正式登録完了後は、無料でお送りいたします。

**\* オンラインからご登録が可能です。**

● <http://www.lfw-japan.jp>

登録内容のご変更もこちらから可能です。

お問い合わせ: 株式会社イーエクス プレス

Tel: 03-6721-9890 email: [lfwj@lfw-japan.jp](mailto:lfwj@lfw-japan.jp)

個人情報に関する当社の方針はこちらをご確認ください。

≫ <http://ex-press.jp/lfwj/privacy/>



## ご登録の流れ

お申し込み

FAXまたはURLから



登録審査

ご登録内容から、お申し込みの方が無料購読対象の方かどうか確認させていただきます。



登録完了/購読開始

登録完了後、約1~2ヶ月後の発行号から無料購読を開始いたします。



ご購読の更新

約1年毎に購読継続の確認をさせていただきます。  
\*更新の段階で有料購読に切り替わることはありません。