

回折限界の12分の1の体積に 光を集束する、誘電ナノキャビティ

サリー・コール・ジョンソン

デンマークの研究者らは、回折限界以下に光を集束する誘電ナノキャビティを構築し、シリコンなどの誘電材料ではそれは不可能だという、一般的な誤解を打ち消した。

半導体業界で広く用いられている、光を吸収しない誘電材料において、回折限界以下に光を集束するのは不可能だという一般的な誤解は、2006年に理論的に打ち消されている。ソーレン・シュトッベ氏 (Søren Stobbe) 率いる、デンマーク工科大 (Technical University of Denmark : DTU) の研究者グループは最近、回折限界の12分の1の体積に光を集束する、蝶ネクタイ型の誘電ナノキャビティをデザインおよび構築することによって、これを確認した。

回折限界は、従来の顕微鏡などの画像処理システムの基本的限界だが、誘電ナノキャビティには、回折限界などというものは存在しない。

同氏らはどのようにして、誘電ナノキャビティを構築するという偉業を成し遂げたのだろうか。同グループは、実際のフォトリソグラフィの限界に関する知識をコンピュータにプログラムして、光子を集束するための最適パターンの検索を行い、その結果として得られた光ナノキャビティのデザイン (蝶ネクタイ型) を構築した。

図1 中心部分の回折限界よりもはるかに小さな体積に光を集束して強化するこの新しいナノキャビティを、アーティストが表現したもの。構造の中の多くの微細なフィーチャが作製可能なのは、製造制約を考慮に入れてデザインされているためである (画像提供:DTU)

「基礎研究と応用の両方の面で意欲をかきたてられた。光と物質の相互作用の強さの基本的限界における調査と操作を行う実験ができるという心躍る側面が存在する一方で、これらのキャビティを使用して新しい量子デバイスと光相互接続が実現できるかもしれないという展望にも同じだけ興味を惹かれた」と、DTUの電気およびフォトニクス工学部の准教授であるシュトッベ氏は述べている。

同グループは、そのようなデバイスを実際に構築するという、ナノテクノロジーの基本的な課題にも突き動かされた。それには、デザインとナノファブリケーションを統合するための新しいアプローチと、シリコンフォトニクスに対するナノリソグラフィの限界の押し上げが必要だった。

シュトッベ氏は次のように

語っている。「2006年に、現在はコロンビア大 (Columbia University) に在籍するミハル・リップソン氏 (Michal Lipson) のグループによって、この新しいタイプのキャビティについて概説する、最初の理論的な論文が発表された。ダーク・エングルンド氏 (Dirk Englund, MIT 在籍) のグループによる、より最近の理論的研究では、これらのキャビティを利用することによって、バルク光学的非線形性を高め、単一光子レベルで有効にできる可能性が、論じられている。この効果はこれまでのところ、量子エミッターでしか実現されていない。それ以外にも、スティーブン・

ジョンソン氏 (Steven Johnson, MIT)、イエスパー・モルク氏 (Jesper Mørk, DTU)、オレ・シグム



ンド氏 (Ole Sigmund, DTU) の研究が、重要なインスピレーション源になった。それらの研究では、誘電ナノキャビティのデザインにおいて、トポロジ最適化が特に効果的であることが示されていた。実際、モルク氏とシグモンド氏は、このプロジェクトに直ちに協力してくれた」。

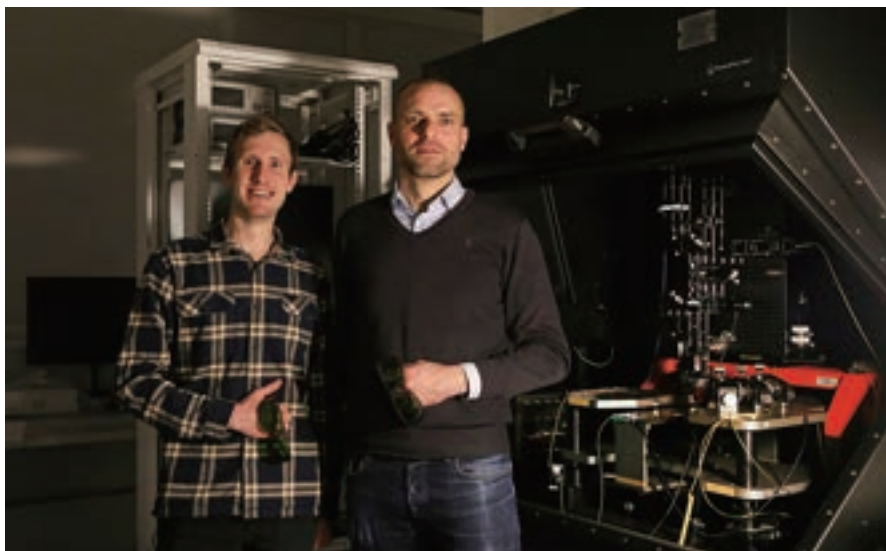
誘電光ナノキャビティ

光ナノキャビティは、「光を長時間蓄積して、小さな体積に集束すること」によって機能すると、DTUの博士課程の学生であるマークス・アルブレヒツェン氏 (Marcus Albrechtsen) は述べて、次のように続けた。「キャビティの品質 (蓄積時間) を高めるための研究は大きく進歩しているが、キャビティモード体積 (集束性) の改善はこれまでのところ、金属を使用してしか達成されておらず、金属は光を吸収することが、多くの応用分野において問題になっている」。

金属ナノキャビティを研究する理由の1つは、誘電材料からなるキャビティは回折限界以下に光を集束できないという、一般的な誤解にあった。

「われわれは金属ではなく、シリコンでできた蝶ネクタイ型のキャビティに取り組んでおり、そのキャビティの体積は、製造可能な最小フィーチャに依存する。シリコンは誘電材料であるため、吸収は問題にならない」と、アルブレヒツェン氏は述べた。

同氏らの研究は、デザインとファブリケーションの統合に重点を置いている。「それらは当然ながら、決して完全に独立してはいないが、われわれの実験では、この統合を新たなレベルに引き上げる必要があった。われわれは、最先端ナノファブリケーションプロセスの製造公差を直接測定してから、そ



マークス・アルブレヒツェン氏 (左) とソーレン・シュトツベ氏。研究室にて (写真提供: Jesper Scheel 氏)

れを『トポロジ最適化』として知られる逆設計用の最先端手法と組み合わせることによって、シリコン内部の光と物質の相互作用を最大化した」と、アルブレヒツェン氏は述べた。

そうして得られたのが、新しいナノスケールのキャビティ (図1) である。このキャビティは、回折限界の12分の1に光を閉じ込める。そのデザインのすべてのフィーチャが正確に作製可能で、光学測定によって数値計算が裏付けられる。

「誘電キャビティが光を回折限界よりもはるかに小さな空間に閉じ込められることを、実験によって証明したことは、数多くの応用分野に大きなインパクトを与えるが、ファブリケーション制約を逆設計アルゴリズムの中で直接測定するなど、それを基礎で支える手法も、われわれの研究によって初めて実証され、構造工学から他のチップスケールデバイスに至るまでの数多くの分野に、これと同じ手法を適用することができる」と、アルブレヒツェン氏は語った。

デザインのフィーチャはすべて、ト

ポロジ最適化 (図2)、基礎となる物理学、ファブリケーション制約から完全に創成されたものである。

「このデザインのすべての部分に目的があり、そのことは、デザインを見た後には結果論として理解できるが、直感だけに頼ってこのデザインを思いつくるのは難しかったはずだ。蝶ネクタイの形もそうだし、『毛のような』フィーチャもそうだ。製造公差が考慮に入れているため、これらはただの飾りとして追加されているのではなく、実質的で、おそらくは驚くべき進歩である」と、アルブレヒツェン氏は述べている。

これまでの研究は、キャビティのQ値 (quality factor) の最適化を目指したもので、それには滑らかな表面を作製して無秩序を低減することが必要だった。「一方、モード体積は、中心の蝶ネクタイ部分のサイズに直接的に依存する。これは、パラダイムとファブリケーションの焦点を転換させるものだ」と、アルブレヒツェン氏は説明してくれた。

主要な課題の1つは、現在の最先端

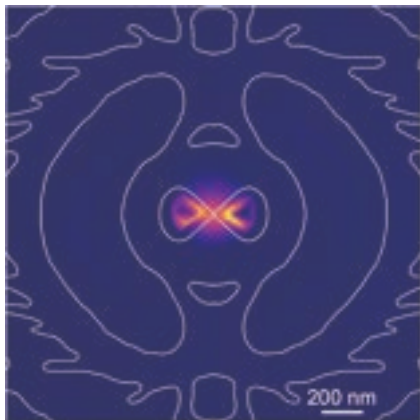


図2 光子がキャビティに送り込まれたときに現れる電界強度を、レーザー照射によって直接測定する。つまり、走査型近接場光学顕微鏡 (scanning near-field optical microscope: SNOM) という特殊な顕微鏡による、世界最小光子の顕微鏡画像である。白線は、ナノ構造の外形を比較のために示したものである

を超えるナノファブリケーション方法を開発することだった。「われわれがトップダウン型のファブリケーションを採用してデザインと作製を行った8nmの蝶ネクタイ(図3)は、一般的な量子ドットなどの従来の量子発光体よりもはるかに小さい」と、同氏は付け加えた。

世界が驚く成果

同グループの研究は、少なくとも16年前の理論的概念に基づいているが、物理学とナノフォトニクス業界の多くの人がまだ、金属ナノキャビティのプラズモン効果を利用しない限り、ナノキャビティの光モード体積の下限は回折限界であると信じている。

「われわれの実験は、純粋な誘電キャビティにおける回折限界以下のモード体積を、世界で初めて直接示すものである。このような構造が存在し得るということにさえ、多くのナノフォトニクス研究者が驚くだろう」と、シュトツベ氏は述べた。

この研究の最も素晴らしい側面はおそらく、トポロジ最適化とナノファブ

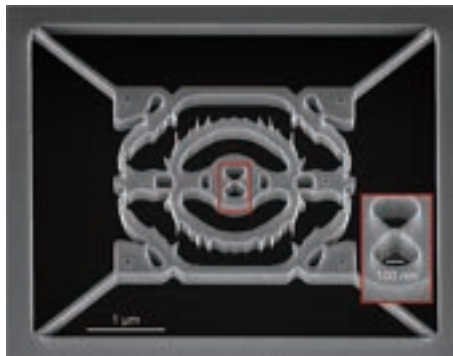


図3 作製された蝶ネクタイ型ナノキャビティの走査型電子顕微鏡画像。挿入図は、蝶ネクタイ部分をより高い解像度で示したもの

リケーションの統合である。「測定したファブリケーション制約を、世界でも先進的なトポロジ最適化アルゴリズムに入力しているため、光と物質の作用が最大限に強力なレベルに確実に達すると同時に、現実的な構造が、結果として確実に得られる」と、シュトツベ氏は述べている。

トポロジ最適化とファブリケーションの統合を実証したのは、研究と工学のあらゆる分野の中で、同グループの研究が初めてである。「トポロジ最適化は、グローバルな最適化を確保するには自由度が多すぎるが、われわれにはそれに近いものが得られていると確信するに足る根拠があり、われわれのキャビティがほぼ間違いなく、これまでに構築された中でも最も高度に最適化されたナノキャビティである」と、シュトツベ氏は述べた。

今後の方向性

初期成果は、データセンター、コンピュータ、携帯端末のコンポーネントのエネルギー負荷を低減する技術などの新たな応用と、実験の扉を開いている。

「研究の重要な方向性の1つは、量子発光体の組み込みで、これにはそれ独自の連続の課題が伴う。量子ドットなど、多くの一般的な量子発光体は、このキャビティと比べると巨大だからである」と、シュトツベ氏は述べた。

もう1つの重要な応用分野は光相互接続で、高損失の電気配線を低損失の光導波路に置き換えることによって、集積回路の消費電力が大幅に削減される可能性がある。「しかし、この利点が活用できるのは明らかに、電気領域と光領域の間の変換が非常に効率的に行える場合に限られる」と、シュトツベ氏は述べた。

そのために必要になるのが、光と物質の相互作用の大幅な強化であり、「キャビティに対する従来のアプローチではうまくいかない。それらは、高いQ値か、光を吸収する金属キャビティのいずれかに依存しており、前者は帯域幅を縮小させ、後者は効率を低下させるためである。これに対し、誘電キャビティにおけるモード体積の縮小は、帯域幅を犠牲にすることなく、また、材料に吸収されることなく、光と物質の相互作用を増加させる」と、同氏は付け加えた。

シュトツベ氏は、ナノテクノロジーをさらに押し進めたいと考えている。「8nmのシリコンブリッジの中に光を閉じ込めることに成功した。次の疑問は、どこまで小さくできるかだ。われわれは、自己集合のいくつかの新しい概念に取り組んでいる。それらはかなり有望と思われる、原子スケールのシリコンナノキャビティを指し示している」と同氏は述べた。