

製造誤差を用いたフォトニック結晶分光器の高性能化について

兒玉拓昌(B4) Jocelyn Hofs(M2) 金セイ基(M2)

製造誤差の影響は、素子サイズが小さくなるにしたがって非常に大きな影響が生まれる。フォトニック結晶において、製造誤差はアンダーソン局在と呼ばれる現象として表れることが知られている。本研究では、フォトニック結晶の局在を利用して分光器の分解能を高めることに成功した。

キーワード：フォトニック結晶、分光器

1. 背景

製造誤差による影響は、実用化に向けた素子に対する大きな障壁となっている。微小な素子に関してはとりわけ大きな問題となっている。先行研究として、その課題を克服する方法は多く行われてきたが、未だ解決には至っていないのが現状である。一方、ランダムレーザ [1] や光の散乱 [2] など製造誤差を逆に利用した研究も行われるようになってきた。しかしそれらの研究も原理実証に留まっており、実用化には至っていない。

本研究も、そういった内在的な製造誤差を生かす手段を考えている。フォトニック結晶における製造誤差は、アンダーソン局在と呼ばれる現象としてあらわれる。局在は波長に非常に敏感であり、局在の箇所は波長に大きく依存している。我々は製造誤差のあるフォトニック結晶導波路 (PCW) を用い、高分解能な分光器を設計した。また、データ解析の部分で機械学習や最適化アルゴリズムを用いている。さらに、単一波長の重ね合わせで複数波長のデータを構成することが可能であったため、複数波長の解析にも取り組んだ。

2. 原理

微小サイズの分光器は非常に多くの応用先が存在する。例としては、光伝送やセキュリティ面での応用、さらに食品関係でも糖度のセンサーなどで用いることが出来る。フォトニック結晶は構造が微細であるため、フォトニック結晶素子は微小にすることが出来る。フォトニック結晶を用いた分光器の先行研究も多いが [3], 正確なファブリケーションを必要とするため、コストも高く、量産することは現状難しい。本研究で用いている構造は、チャープ構造のフォトニック結晶導波路という非常に単純なものである。この構造の導波路は、周期的に幅が変化しており、入力波長によってどこまで透過するかを制御することが可能であり、上方散乱してきた光を観測することが出来る。これは、導波路幅が違くとフォトニックバンドギャップが推移し、透過する波長帯域がシフトするためである。先行研究において、このような分光器は、CMOS 互換の製造プロセス上 1.5 nm 程の分解能しか得られていない。本研究では、その分解能を向上させるため、局在箇所をイメージ画像として取得して使用している。図 1(a)は用いた素子のイメージ図である。

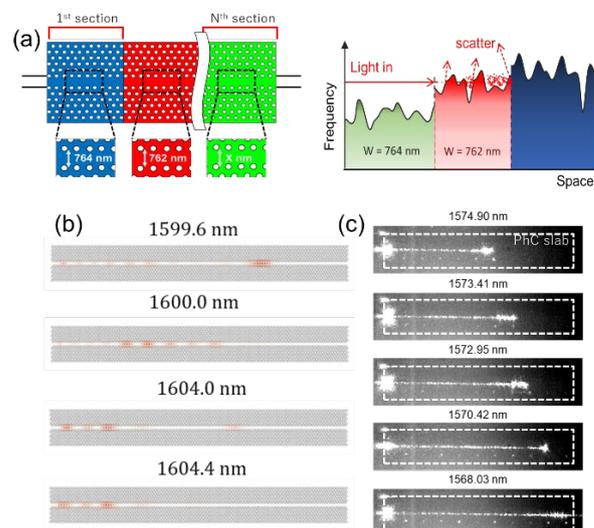


図 1 (a) : チャープ導波路の原理。導波路幅は左から右にかけて狭くなっている。なお、光源は導波路の左端に設置されている。結果として、バンドギャップは短波長側にシフトしてゆき、長波長は構造の手前側で散乱される。そのため、波長が異なる場合は散乱する場所が異なる。(b) FDTD シミュレーションを用いたイメージ画像。導波路幅は 764 nm, 759 nm, 754 nm と周期的に変化している。(c) 実験で得た画像。それぞれの画像は異なる波長で励起しており、スラブの上から IR カメラで取得した。

3. 単一波長の解析

まずは入力が単一波長での解析を行った。データの解析には機械学習を用い、シミュレーションと実験データで解析を行った。波長帯域は 1596.6 nm から 1604.4 nm で分解能は 0.2 nm である。それらの励振画像は二次元 FDTD シミュレーションで取得し、データ解析に機械学習を用いた。図 2(a) は機械学習のアルゴリズムの概略である。結果としては、分解能 0.2 nm において 97 % の正確性を記録した [図 2(b)]. 実験データを用いた解析の結果は図 2(c) のように 98 % という高い正確性を記録することができた。実験データでも分解能は 0.2 nm である。また用いたフォトニック結晶は CMOS 互換プロセスで作製されたものであるため、量産も可能な製造方法を用いている。

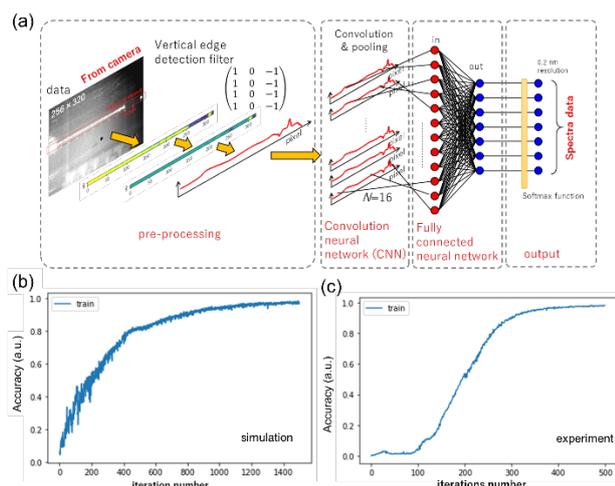


図2 (a) データ解析に用いた機械学習アルゴリズムの概略図. (b) FDTD シミュレーションによって取得したデータを用いた解析結果. 波長帯域は 1596.6 nm から 1604.4 nm まで, 分解能は 0.2 nm である. 波長クラスごとに 30 枚用意し, 少しずつ時間をずらして取得した. (c) 図 1(c) のような実験データを用いて解析を行った結果.

4. 複数波長の解析

次に, 複数波長の入力の波長再構築の方法を検討した. 一つ目の方法としては, 単一波長の延長として機械学習で行うことだが, その場合は波長クラスが膨大になってしまうため, 計算が遅くなる可能性がある. 二つ目の方法としては, 最適化アルゴリズムを用いる方法である. 複数波長のパターンが単一波長の単純な足し合わせとなっている場合は, 最適化アルゴリズム(SA)を用いて再構築が可能となる.

本研究では, SAによる解析を行った. 伝搬部分の光分布を一次元データとして格納し, 入力波長 λ_i に対して \mathbf{I}_{λ_i} の光分布があるとすると, その場合, 複数波長の分布が単一波長の分布の足し合わせとなっているとすると, \mathbf{I}_m は次式で表される.

$$\mathbf{I}_m = c_1 \mathbf{I}_{\lambda_1} + c_2 \mathbf{I}_{\lambda_2} + \dots + c_i \mathbf{I}_{\lambda_i} \quad (1)$$

この理論を証明するために, 単一波長のデータと複数波長のデータを取得して比較した. なおこのデータはFDTDシミュレーションを用いたものである. その比較結果は図3 (a) のようになった. その単一波長と複数波長のデータをSAを用いて解析を行った. SAはコスト関数, 即ちターゲットと構成データの差が最小になるまで係数を変化させ, 再構築を行う. 図3 (a) においてターゲットが赤い実線のグラフで再構築データが青い実線のグラフとなっており, 挿図は実際の複数波長データのシミュレーション画像である. また, 波長は1603.2 nmと1608.8 nmである. 再構築の結果を3 (b) に示した. この結果から, SAを用いることで, 単一波長のデータから複数波長の解析が可能であり, 足し合わせであることが証明できた. なおこの結果は局在箇所がかぶっていない波長ではほぼ確実に達成でき, 実験データを用いた場合でも正確に再構築が可能であることが確認できた.

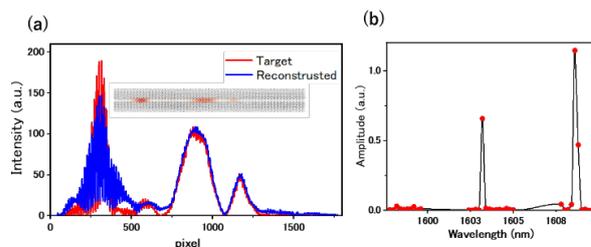


図3 (a) 製造誤差に見たてて半径にランダム性を振ったフォトニック結晶導波路の強度分布. 励振波長は1603.2 nmと1608.8 nmである. 挿入図は複数波長のターゲットの強度分布である. 青線はターゲットで赤線が再構築データの結果である. (b) SAを用いて解析を行った場合の再構築スペクトル.

5. まとめ

以上の結果から, 機械学習や再構築アルゴリズムを用いてフォトニック結晶導波路の製造誤差を分解能の向上に利用することが出来ることが確認できた. さらに, このような強力な解析ツールを用いることによって, ランダム光学素子の実用化への進展となることを証明できた. しかしこの研究には課題が存在している. 先ほどの結果のように局在がはっきりと見え, かつ局在の箇所がかぶっていない場合では解析が可能であったが, 局在箇所がかぶっていたり, そもそも局在が弱かったり起きていなかったりする波長では, 再構築が正確に行えなことも多々あった. また波長が近い場合は, 位相の干渉も起こってしまう. 位相の干渉が起こった場合, 複数波長の強度分布が単一波長の足し合わせとして表せられないため, SAによるやり方が適応できない問題があった. そのため次の課題としては, 以上の課題をいかにして克服するか考え, 解消していく必要がある.

参考文献

- [1] Lee, M., Callard, S., Seassal, C and Jeon, H. Nat. Photonics **13**, 445-448 (2019).
- [2] Redding, B., Liew, S., Sarma, R and Cao, H. Nature Photon **7**, 746-751 (2013).
- [3] Gan, X., Pervez, N., Kymissis, L., Hatami, F and Englund, D. Appl. Phys. Lett. **100**, 231104 (2012).
- [4] L, Sapienza., H, Thyrrerstrup., S, Stobbe., P. D, Garcia., S, Smolka., and P, Lodahl. Science **327**, 1352-1355 (2010).