

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02629

研究課題名(和文) 機械学習を活用したフォトニック結晶共振器の高性能化

研究課題名(英文) Optimization of photonic crystal nanocavities based on machine learning

研究代表者

浅野 卓 (Asano, Takashi)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30332729

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：フォトニック結晶共振器は波長程度の微小領域への強い光閉じ込めを可能にする技術であり、これを用いて光と物質の相互作用の増大や、光の動的操作等の従来にはない光機能が創出されてきた。しかしフォトニック結晶は高い構造自由度をもつため、従来手法ではその潜在能力を十分に活用する設計ができていなかった。本研究では、その設計に機械学習を活用することを提案・検討し、高次元の構造パラメータ空間を効率的に探索して最適化を行える手法を開発した。そして、これを適用することで、超高Q値共振器の歩留まり向上、シリコンラマンレーザの閾値低減、電気制御光転送チップの実現等の実デバイスの性能向上や新規機能発現を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の第一の意義は多数の構造パラメータをもち、かつ個々の構造の特性計算に時間のかかるデバイスの構造を効率よく最適化する手法を実現したという点である。これはフォトニック結晶に限らず広く適用できる手法であり、学術的にも社会的にも重要な成果といえる。また、本手法を用いて設計し、作製されたデバイスにおいて、大幅な性能向上や電気制御光転送などの新機能が実現されたことは光情報技術の発展に大きく寄与している。機械学習によって単に既存の構造の性能を予測することは広く行われているが、本研究ではさらに進んで未知のより性能の高い構造を提案できており、またそれが実際のデバイスで確認できていることの意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：Photonic crystal cavities are a technology that enables strong light confinement in a region as small as a wavelength, which has been used to create unprecedented optical functions such as enhancement of light-matter interaction and dynamic manipulation of photons. However, because photonic crystals have a high degree of structural freedom, conventional methods have not been able to design photonic crystals to fully utilize their potential. In this study, we proposed and investigated the use of machine learning in the design of photonic crystals, and developed a method that can efficiently search and optimize a high-dimensional structural parameter space. By applying this method, we have improved the yield of ultra-high Q-value cavities, reduced the threshold of silicon Raman lasers, realized electrically-controlled photon transfer chips, and so on, and achieved new device performance and new functions.

研究分野：光量子電子工学

キーワード：フォトニック結晶 機械学習 ナノ共振器 構造最適化

1. 研究開始当初の背景

近年、Si を用いたフォトニックナノ構造およびその集積回路を、電子集積回路と融合することで、従来の電子回路の限界を乗り越えようとする動きが盛んである。光電子変換チップによる並列計算システム内の光接続が実現されつつあり、さらには光情報の直接バッファリング、光による演算アクセラレータ、チップ上での光量子演算の実現等の展開が期待されている。

申請者はフォトニックナノ構造のなかでもフォトニック結晶共振器の研究を進めており¹⁾、本研究開始時点で、世界最高の Q 値をもつ光ナノ共振器 (Q 値 1100 万、光子寿命 9.2ns) を実現し²⁾、光制御による共振器間での任意タイミング光転送の原理実証³⁾等の高度な光の動的操作を実現していた。さらに高 Q 値光ナノ共振器によってラマン効果を増強することで、Si のみからなる超低閾値ラマンレーザの実現⁴⁾にも成功している。また Si を超える性能が期待される SiC を用いたフォトニック結晶の研究にも取り組み、世界最高の Q 値や 2 次高調波発生効率を実現してきた⁵⁾。このような成果は、フォトニック結晶共振器の高い光制御能力を基に達成されていたが、研究開始時点ではその潜在能力を完全には活用し切れていない可能性があった。それは、フォトニック結晶共振器の調整可能な構造自由度が膨大であり、従来の最適化手法では十分な最適化を行うことが困難であったためである。

2. 研究の目的

本研究の目的は、この課題に機械学習を活用して取り組み、これを用いてフォトニック結晶共振器の潜在能力を十分に引き出せる最適化手法を確立することにある。このような最適化手法は、フォトニック結晶ナノ共振器に限らず、高い構造自由度をもつデバイス一般を最適化できる新たな手法として利用できると考えられる。そして開発した手法を用いて、光保持時間の増大、Si ラマンレーザの低閾値化などのフォトニック共振器デバイスの高性能化を行うことも本研究の目的である。

3. 研究の方法

本研究の核となる構造最適化手法は、研究代表者が着想した独自の手法である。まず、ある初期構造(図 1(a))を基準として、そこからランダムに構造を変化させることで生成した複数の共振器構造(図 1(b))を用意し、電磁界の第一原理計算を行って共振器の Q 値等の最適化したい性能指数を求める。つぎに、畳み込み多層ニューラルネットワーク (図 2 参照) にこれらの構造と性能指数の関係を学習させる。そして、学習後のネットワークに構造パラメータ空間における性能指数の勾配を推定させ、性能指数が増大する方向に徐々に構造の修正を行う。最後に、得られた構造(図 1(c))に対して第一原理計算を行って性能指数を確認する。構造パラメータの次元が大きい場合に、性能指数が増大する変化の方向を得るための勾配計算を直接的に第一原理計算で行うには非常に時間がかかる。しかし、ニューラルネットワークを用いた勾配推定は近似ではあるが、パラメータの次元が高くても非常に高速に行えるため、多数の構造パラメータに対して徐々に構造修正を行うことが可能になると考えられる。本研究ではこのような手法を実証するとともに、これを発展させつつ、フォトニック結晶共振器の様々な性能指数の最適化を試みた。

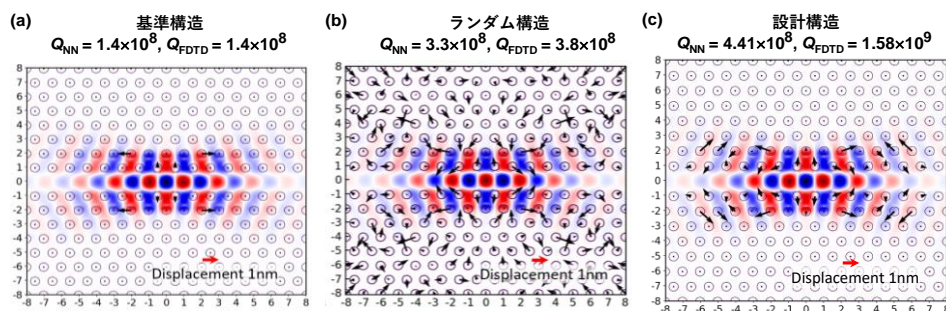


図 1: 本研究で検討した最適化手法の例、円は誘電体に形成された空気穴を表し、その間隔は 410nm 程度である。また矢印は空気穴位置の基準構造からの変位量を表す。 Q_{NN} は学習後のニューラルネットワークによる予測 Q 値、 Q_{FDTD} は第一原理計算による値。(a)基準となる共振器の一例、(b)ランダム構造の一例、(c)本手法で最適化された構造の一例

4. 研究成果

(1) 機械学習を用いた構造最適化手法の実験的検証：

本研究で提案した手法で設計した共振器を作製し、実際に Q 値が向上するかどうかを検証した。まず、用いた設計手法の詳細を説明する。本手法で構造最適化を行うには、調整対象とする構造パラメータを選択する必要がある。ここでは、作製に反映させ易いことから空気孔の位置シフトを選んだ。そして図 1(a)を基準構造として、孔の位置をランダムにシフトさせた多数(1000 個)の異なる構造を生成した(図 1(b)が一例)。これらの構造に対して、3 次元 FDTD (Finite Difference Time Domain)法による第一原理計算を行い、各構造について基本共鳴モードの Q 値を算出し、構造と Q 値が対になった 1000 個のデータを準備した。次に図 2 のニューラルネットワークを用意した。このネットワークでは、各空気穴の基準位置からの変位量のパターンが 2 次元テーブル

データとして入力され、畳み込み層と2つの全結合層を通して出力層(予測 Q 値に対応)に纏められる。第1層に畳み込み層を用いることで、入力パターンの2次元の特徴を効率よく抽出できる。次に、準備したデータのうちの900個を用いて、入力構造に対する予測 Q 値が、第一原理計算 Q 値に近くなるようにニューラルネットワークの結合重みを調整した(=学習)。次に検証のため、学習後のニューラルネットワークに、残りの100個の未学習構造(テストデータ)を入力してその Q 値を予測させ、第一原理計算 Q 値と比較した(図3)。図3から両者の相関係数は0.96と高く、未学習の構造に対しても Q 値を高い精度(標準偏差で13%程度)で予測できていることが分かる。この学習後のニューラルネットワークに孔位置シフト空間における Q 値の勾配(微分値)を推定させ、これに従って予測 Q 値が向上する方向に構造を僅かに変化させ、これを予測 Q 値が収束するまで繰り返した(本例では100万回程度)。得られた最終構造と、第一原理計算によって確認された Q 値を図1(c)に示す。初期構造(図1(a), Q 値 1.3×10^8)と比較して、1桁以上大きい 1.6×10^9 という高い Q 値が得られている。この最終構造では、多数の孔が様々な方向にシフトされており、本手法により高い構造自由度を十分に活用した最適化が可能になったことで、従来活用できていなかった能力を引き出せたと言える。

この設計手法の有用性を実験的に検証するため、図1(a)の手動設計による基本構造と図1(c)の機械学習設計による構造をそれぞれ約30個作製し、光学測定を行なった。その際、共振器から6列離れた位置に励起用の導波路を導入したため、導波路との結合損失により手動設計および機械学習設計の共振器の設計 Q 値はそれぞれ2700万および1.8億となった。これらの共振器群の Q 値と共鳴波長を実測して、統計的な比較を行った結果を図4に示す。まず共鳴波長に着目すると、同図から、両共振器群で波長のばらつきは同程度($\pm 0.5\text{nm}$ 程度)であることがわかる。これは両共振器群が同程度の精度で作製できていることを意味する。次に両者の Q 値を比較すると、機械学習設計の共振器群の方が高い Q 値をもつ共振器が多いことが分かる。定量的評価を行ったところ、評価した共振器数に対する Q 値1000万以上の共振器の割合は手動設計で4%であるのに対して、機械学習設計では14%であった。また Q 値900万以上の共振器の割合もそれぞれ12%と28%と大きな差があった。

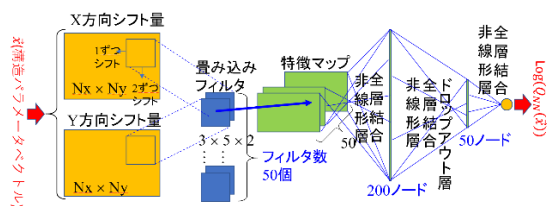


図2: 機械学習モデル構築に用いたニューラルネットワークの構造

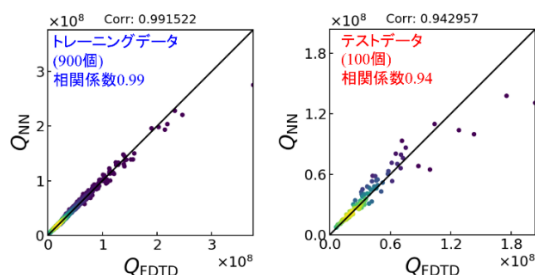


図3: 学習後の機械学習モデルによる予測 Q 値 (Q_{NN})と第一原理計算 Q 値(Q_{FDTD})の相関。(a)訓練データ、(b)テストデータ

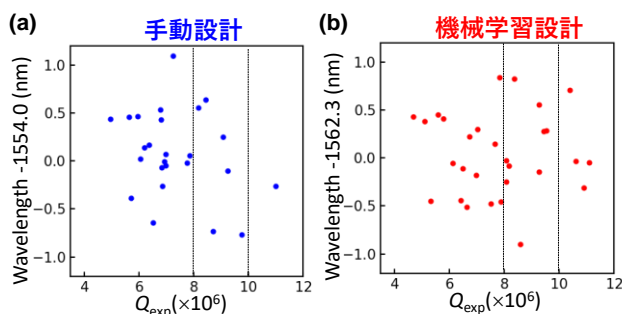


図4: (a)手動設計の共振器(図1(a))と(b)機械学習設計の共振器(図1(c))をそれぞれ30個程度作製し、 Q 値と共鳴波長を測定した結果。

(2)一つの共振器中の2つのモードの Q 値の同時最適化:

前述のようにフォトニック結晶共振器は非常に高い構造自由度をもつため、その構造を適切に調整することで Q 値だけでなく、複数の性能指数を同時に最適化できる可能性がある。そして応用によっては、自由空間への放射 Q 値を高くしつつ、導波路との結合 Q 値を低くしたい場合、共振器中の複数の共鳴モードの Q 値を同時に最適化したい場合などの様々な要求が存在する。しかし、構造とそれぞれの性能指数の関係自体がすでに複雑であるため、手動で複数の性能指数の同時最適化を行うのは困難である。そこで、図2のような機械学習モデルを拡張して、共振器構造と複数の性能指数の関係を学習させ、そのモデルを用いて複数の性能指数を同時に最適化することを考えた。そしてまず最初に共振器中の2つの共鳴モードを利用するラマンレーザの高性能化に向けて、機械学習による同時最適化を行った。

図5(a),(b)に対象としたラマンレーザ用共振器の構造を示す。図1と同様の共振器構造であるが格子定数の変調量や孔径は異なり、図5(a)の基本モード(ストークスモード)と(b)の高次(ポン

プ)モードの周波数差が 15.6THz(結晶 Si のストークスシフト量)となるように設計されている。これにより、ポンプモードに光を注入すると基本モードにラマンゲインが発生し、Si のみを用いて微小レーザが実現できる。その際、ポンプモードの Q 値(Q_p)が高いほどポンプ光が共振器内に溜まりやすいのでラマンゲインが増加し、また基本モードの Q 値(Q_s)が高いほど発振対象モードの損失が小さくなるため、 Q_s と Q_p の積が高いほど低閾値でレーザ発振が生じる。

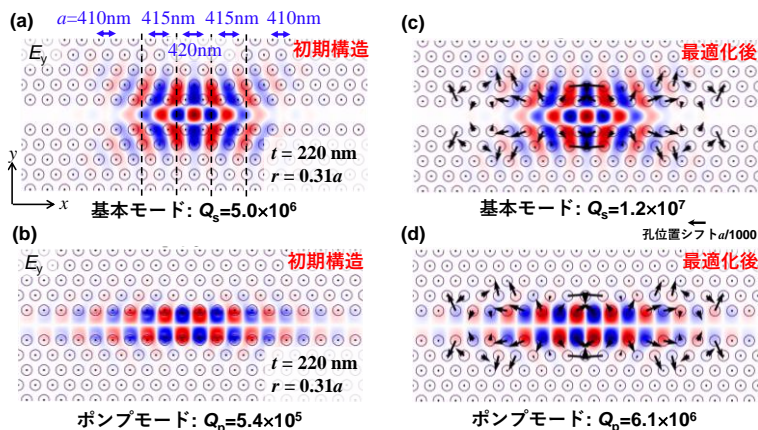


図 5: (a),(b)共振器初期構造と基本モードおよびポンプモードの第一原理計算 Q 値、電界分布(E_y)。 (c),(d)機械学習による最適化後の孔シフトパターンと基本およびポンプモードの第一原理計算 Q 値、電界分布(E_y)。

しかしながら図 5(a),(b)を比較してわかるように、基本モードとポンプモードの電界分布は全く異なるため、構造変化に対する Q 値の応答も異なり、手動調整では Q_s と Q_p の両方が増大するように構造を最適化するのは困難である。そこで図 2 のモデルを修正して、初期構造からの孔位置シフトパターンに対して 2 つの値を出力する機械学習モデルを準備し、これに 900 個のランダムに生成した孔シフトパターンと、各パターンに対して第一原理計算で求めた Q_s , Q_p の組を学習させた。そして学習済モデルを用いて Q_s と Q_p の積が大きくなるように、4-(1)節と同様の手法で孔シフトパターンの最適化を行った。その結果を図 5(c),(d)に示す。同図より Q_s が 5.0×10^6 から 1.2×10^7 へと、 Q_p が 5.4×10^5 から 6.1×10^6 へと増大しており、電磁界分布が異なるにもかかわらず、同じ構造修正で第一原理計算の Q_s と Q_p の積が 17 倍程度増大していることが分かる。また設計された図 5(c),(d)の構造を実際に作製した結果、 $Q_s = 2.70 \times 10^6$, $Q_p = 1.3 \times 10^6$ という高い実験 Q 値が両方のモードについて観測された。実験 Q 値は作製時の穴位置や半径の揺らぎによって決まる散乱損失や材料の光吸収による損失を含むため、設計値よりも小さくなっているが、特にポンプモードにおいては従来構造の設計値すら 2 倍以上上回る Q 値が得られている。またこの共振器で観測されたラマンレーザ発振の閾値は 100nW を下回っており、通常設計の共振器(図 5(a,b))で得られた最小の閾値 500nW の 1/5 以下であった。

(3) 構造探索と学習データ更新の繰り返しによる高度な最適化

上記(1),(2)で提案・実証した手法では、 Q 値の勾配の近似値を機械学習モデルから高速に取得できることを利用して、第一原理計算のみでは不可能な高次元の構造パラメータ空間の探索を行なった。しかし、ランダム生成された構造で初期構造よりも高い Q 値が得られる確率は小さく、そのようなランダム構造群を学習して得られたモデルでは高 Q 値領域の近似精度が必ずしも良くはない。よって、生成された構造には最適化の余地がまだ大きく残されている可能性がある。また、所望の性能を得るために初期構造から大きく構造を変化させる必要がある場合も、学習モデルの予測精度が悪くなり、最適化が難しくなると考えられる。このような問題を解決するため、最適化結果を学習データセットに加えてモデルを更新しつつ、学習と探索を繰り返す手法を考案した。

本手法を図 6 の L3 型共振器を例に説明する。本共振器は初期状態での Q 値の設計値は 7100 と低い。この構造を基準として最初の 1000 個の共振器は(1)と同様にランダムに生成し、これを異なる順番でデータを学習させた異なる学習モデルを 10 個準備した。つぎに各モデルを用いて、異なる 7 種類の拘束条件(後述)を加えつつ勾配法をベースとした探索を行い、計 70 個の高 Q 値候補構造を生成した。そしてこの 70 個の候補構造と、それぞれの構造について第一原理計算で求めた Q 値の組みを学習データセットに追加したのちに、上記と同じ手法で学習・探索を行った。以降、同様に新たなデータを学習データセットに追加しつつ学習・探索を繰り返した。各回における最大 Q 値を、その回までに蓄積された学習データの総数に対してプロットした結果を図 6(a)に示す。 Q 値は徐々に向上し、100 回の繰り返しを経て 8000 個のデータが蓄積された段階で、最大で Q 値 2900 万の構造が得られた(図 6(b))。最初の 1000 個の学習データのみを用いた探索で得られた Q 値は 8 万程度であったので、本繰り返し手法は非常に有効といえる。

より詳しく説明すると、本手法では四種類の異なる戦略による探索を行なった。それぞれは A, B, C の三種類の拘束条件の組み合わせとハイパーパラメータの違いで構成されている。拘束条

件 A は前世代までに得られた最大 Q 値の構造に向かう復元力を付加するもの、B は新たにランダムに構造を生成し、その構造に向かう復元力を付加するもの、C はこれまでに生成したすべての構造からの反発力を付加するものである。そして A+B+C では学習済みモデルから次世代を生成する際に、拘束条件 A を用いて生成したもの、B を用いて生成したもの、C を用いて生成したものが、合計で 7 個を生成している。また A では拘束条件 A のみでハイパーパラメータを変えて 7 種類の次世代を生成している。A+B, A+C などと同様である。拘束条件 A のみで得られた構造(図 6(e))の Q 値が 600 万程度であるのに対して、A+B+C で得られた構造(図 6(b))の Q 値が 2900 万と高く、また両者の構造は大きく異なる。これらの結果は学習モデルから得た Q 値の勾配に様々な拘束条件を付加することで、多様な候補構造を生成することが、より良い構造の探索に有効であることを示している。また実際に本構造を作製した結果、励起用導波路の負荷がある状態で 290 万という高い Q 値が実現された。これは励起用導波路の負荷がない状態の Q 値としては 430 万という非常に高い値に相当し、従来の L3 共振器で実現されていた最も高い実験 Q 値である 210 万(励起用導波路の負荷なし)を 2 倍以上超える値である。これにより、実験的にも本繰り返し最適化手法の有用性が示された。

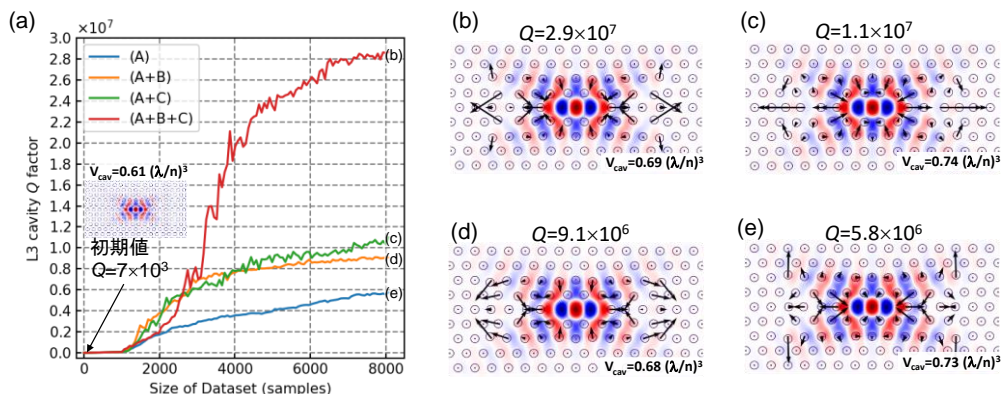


図 6: (a)機械学習を活用した繰り返し探索による L3 共振器の構造最適化結果。(b)~(e)それぞれの探索方法で最終的に得られた穴シフトパターン。

(4) 共振器 Q と共振器間結合強度の同時最適化による電気制御光転送チップの実現

上記に加えて、本研究では 3 つの共振器が導波路を介して結合した系において、光保持時間に相当する共振器 Q 値の増大と、光転送の速度や効率を決める共振器間結合強度の増大を同時に達成する構造を機械学習を用いて設計し、これに共振波長を電氣的に制御するための面内 pin 構造を導入することで光バッファメモリの基礎となる電気制御光転送チップを実現した(図 7)。この技術を発展させることで、将来的には光通信ネットワークのノードにおける電気光変換を削減し、通信におけるエネルギー消費の低減と遅延の低減に貢献できるものと期待される。

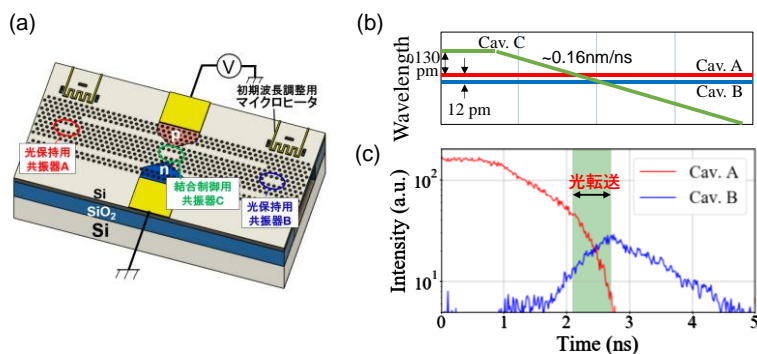


図 7: 機械学習設計により実現した電気制御光転送チップ。(a)デバイスの模式図。(b)波長制御の模式図。(c)共振器 A から B への光転送実験結果。

引用文献:

- 1) T. Asano, S. Noda, "Photonic Crystal Devices in Silicon Photonics," *Proc. IEEE* **106**, pp. 1–13 (2018).
- 2) T. Asano, Y. Ochi, Y. Takahashi, K. Kishimoto, and S. Noda, "Photonic crystal nanocavity with a Q factor exceeding eleven million," *Optics Express* **25**, pp. 1769-1777 (2017).
- 3) R. Konoike, H. Nakagawa, M. Nakadai, T. Asano, Y. Tanaka, and S. Noda, "On - demand transfer of trapped photons on a chip," *Science Advances* **2**, e1501690 (2016).
- 4) Y. Takahashi, Y. Inui, M. Chihara, T. Asano, R. Terawaki, S. Noda, "A micrometre-scale Raman silicon laser with a microwatt threshold," *Nature* **498**, pp. 470–474 (2013).
- 5) B.-S. Song, T. Asano, S. Jeon, H. Kim, C. Chen, D. D. Kang, S. Noda, "Ultrahigh-Q photonic crystal nanocavities based on 4H silicon carbide," *Optica* **6**, pp. 991-995 (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Shibata Takeshi, Asano Takashi, Noda Susumu	4. 巻 6
2. 論文標題 Fabrication and characterization of an L3 nanocavity designed by an iterative machine-learning method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 APL Photonics	6. 最初と最後の頁 036113 ~ 036113
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0040793	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Nakadai Masahiro, Tanaka Kengo, Asano Takashi, Takahashi Yasushi, Noda Susumu	4. 巻 13
2. 論文標題 Statistical evaluation of Q factors of fabricated photonic crystal nanocavities designed by using a deep neural network	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 012002 ~ 012002
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7567/1882-0786/ab5978	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Asano Takashi, Noda Susumu	4. 巻 8
2. 論文標題 Iterative optimization of photonic crystal nanocavity designs by using deep neural networks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nanophotonics	6. 最初と最後の頁 2243 ~ 2256
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1515/nanoph-2019-0308	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Nakadai Masahiro, Asano Takashi, Noda Susumu	4. 巻 16
2. 論文標題 Electrically controlled on-demand photon transfer between high-Q photonic crystal nanocavities on a silicon chip	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Photonics	6. 最初と最後の頁 113 ~ 118
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41566-021-00910-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kim Heungjoon、Noda Susumu、Song Bong-Shik、Asano Takashi	4. 巻 8
2. 論文標題 Determination of Nonlinear Optical Efficiencies of Ultrahigh-Q Photonic Crystal Nanocavities with Structural Imperfections	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Photonics	6. 最初と最後の頁 2839 ~ 2845
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsp Photonics.1c00737	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kawakatsu Taro、Asano Takashi、Noda Susumu、Takahashi Yasushi	4. 巻 29
2. 論文標題 Sub-100-nW-threshold Raman silicon laser designed by a machine-learning method that optimizes the product of the cavity Q-factors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 17053 ~ 17053
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.423470	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 浅野卓、野田進	4. 巻 483
2. 論文標題 シリコンフォトニクスにおけるフォトニック結晶共振器技術の展開	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 オプトロニクス	6. 最初と最後の頁 111-117
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 浅野卓、野田進	4. 巻 105
2. 論文標題 機械学習を用いた二次元フォトニック結晶共振器の構造最適化	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会誌	6. 最初と最後の頁 306-313
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計35件（うち招待講演 7件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 T. Shibata, T. Asano and S. Noda
2. 発表標題 Fabrication and Characterization of L3 Nanocavities Designed Using Machine Learning
3. 学会等名 International Conference on Nano-photonics and Nano-optoelectronics 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅野卓、野田進
2. 発表標題 フォトニック結晶を用いた光制御
3. 学会等名 超高速光エレクトロニクス研究会 第一回研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Asano and S. Noda
2. 発表標題 Advanced Light Manipulation using High-Q Photonic Crystal Nanocavities
3. 学会等名 The 11th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (ISPEC2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryota Mitsuhashi, Takashi Asano and Susumu Noda
2. 発表標題 Structure optimization of coupled photonic crystal nanocavities
3. 学会等名 The 11th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (ISPEC2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三橋凌太, 仲代匡宏, 浅野卓, 野田進
2. 発表標題 電氣的制御による高Q値光ナノ共振器間の光転送
3. 学会等名 2021年応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福田 明星, 藤本 正直, 高橋 和, 浅野 卓, 野田 進
2. 発表標題 非対称L3ナノ共振器の機械学習による高Q値化(II) ~ 実験Q値16万の達成 ~
3. 学会等名 2021年応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上 和輝, 宋 奉植, 浅野 卓, 野田 進
2. 発表標題 電氣制御高Q値光ナノ共振器結合の作製プロセスに関する検討
3. 学会等名 2021年応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Kim, B. S. Song, T. Asano, S. Noda
2. 発表標題 Demonstration of enhanced second harmonic generation in a SiC photonic crystal waveguide-coupled nanocavity using a heterointerface
3. 学会等名 2021年応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三橋凌太, 仲代匡宏, 浅野卓, 野田進
2. 発表標題 フォトニック結晶光ナノ共振器結合系の構造最適化
3. 学会等名 2022年応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上 和輝、宋 奉植、 浅野 卓、野田 進
2. 発表標題 高Q値光ナノ共振器結合系の電氣的制御の高度化に向けた 作製プロセス検討 (2)
3. 学会等名 2022年応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Kim, B. S. Song, T. Asano, S. Noda
2. 発表標題 High-Q SiC nanocavity with TM-like polarization
3. 学会等名 2022年応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浅野卓、野田進
2. 発表標題 機械学習に基づく繰り返し探索を用いたフォトニック結晶共振器の最適化(3)
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会, 9p-Z09-10
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柴田 武志, 浅野 卓, 野田 進
2. 発表標題 機械学習を用いて設計したL3ナノ共振器の作製・評価 (2)
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会, 11a-Z18-4
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Heungjoon Kim, Takashi Asano, Bong-Shik Song, and Susumu Noda
2. 発表標題 7700%/W second-harmonic generation efficiency in ultrahigh-Q SiC photonic crystal nanocavities
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会, 10a-Z18-4
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takashi Asano and Susumu Noda
2. 発表標題 Design of Photonic Crystal Cavities Using Deep Neural Networks
3. 学会等名 The Annual Conference of the IEEE Photonics Society 2020, MA1_1 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 浅野卓 野田進
2. 発表標題 機械学習を活用したフォトニック結晶ナノ共振器の構造最適化設計
3. 学会等名 電子情報通信学会 2020年ソサイエティ大会 CI-1. ナノフォトニクスの最前線 (CI-1-3)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 浅野卓、野田進
2. 発表標題 機械学習を利用したフォトニック結晶ナノ共振器の設計
3. 学会等名 電子情報通信学会合同研究会, IEEE Photonics Society Kansai Chapter (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柴田 武志, 浅野 卓, 野田 進
2. 発表標題 機械学習を用いて設計したSiO ₂ 埋め込み型ナノ共振器の作製・評価
3. 学会等名 第68回応用物理学会 春季学術講演会, 19p-Z10-10
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福田明星, 浅野卓, 川勝太郎, 野田進, 高橋和
2. 発表標題 非対称L3共振器の機械学習による高Q 値化
3. 学会等名 第68回応用物理学会 春季学術講演会, 19p-Z10-8
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三橋凌太, 仲代匡宏, 浅野卓, 野田進
2. 発表標題 面内p-i-n構造による高Q値光ナノ共振器の動的制御に関する実験的検討
3. 学会等名 第68回応用物理学会 春季学術講演会, 19a-Z10-4
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takashi Asano, Yasushi Takahashi, and Susumu Noda
2. 発表標題 Machine learning based optimization of Q-factors of photonic crystal nanocavities -simultaneous optimization of two-modes in a nanocavity-
3. 学会等名 International Conference on Nano-photonics and Nano-optoelectronics 2019 (ICNN2019), Pacifico Yokohama, Japan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Asano and Susumu Noda
2. 発表標題 Machine learning based approach to optimize photonic crystal nanocavities
3. 学会等名 10th International Conference on Materials for Advanced Technologies, Marina Bay Sands, Singapore (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Asano
2. 発表標題 Machine Learning for Designing a High Q Photonic Crystal Cavity
3. 学会等名 The 45th European Conference on Optical Communication, Dublin, Ireland 22-26 September 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浅野卓、野田進
2. 発表標題 機械学習の微小光学構造設計への適用 ~フォトリック結晶ナノ共振器の高Q値化を例に~
3. 学会等名 第152回微小光学研究会, 早稲田大学西早稲田キャンパス, 2019/6/14 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takeshi Shibata, Takashi Asano, and Susumu Noda
2. 発表標題 Optimization of Q factors of silica-embedded photonic crystal nanocavities based on machine learning
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (ISPEC2019) Session B: Silicon Nanophotonics Devices & Systems I (B-3) November 26-27, 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Asano and S. Noda
2. 発表標題 Advanced Light Manipulation using High-Q Photonic Crystal Nanocavities
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (ISPEC2019) Session B: Silicon Nanophotonics Devices & Systems I (B-3) November 26-27, 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浅野卓、野田進
2. 発表標題 機械学習に基づく 繰り返し探索を用いた フォトニック結晶共振器の最適化
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会, 20aB01-7, 北海道大学, 札幌キャンパス 2019/9/20
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柴田武志 , 浅野卓 野田進
2. 発表標題 SiO2 埋め込み 型 ナノ共振器の 機械学習による 構造最適化
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会, 19pE207-2, 北海道大学 札幌キャンパス 2019/9/20
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川勝 太郎、浅野 卓、野田 進、高橋 和
2. 発表標題 Q値の増大によるナノ共振器シリコンラマンレーザの低閾値化
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会, 19pPA5-6, 北海道大学 札幌キャンパス 2019/9/20
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浅野卓、野田進
2. 発表標題 機械学習を用いたフォトニック結晶ナノ共振器の 構造最適化
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第40回年次大会, 仙台国際センター, 2020/1/22 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 浅野卓、野田進
2. 発表標題 機械学習に基づく繰り返し探索を用いたフォトニック結晶共振器の最適化(2)
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会, 14pA205-8, 上智大学四谷キャンパス
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 浅野卓、柴田 武志、野田進
2. 発表標題 2次元フォトニックナノ共振器群の同時自動測定
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会, 14pA205-9, 上智大学四谷キャンパス
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柴田 武志、浅野卓、野田進
2. 発表標題 機械学習を用いて設計したL3ナノ共振器の作製・評価
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会, 14aB415-3, 上智大学四谷キャンパス
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川勝 太郎、浅野 卓、野田 進、高橋 和
2. 発表標題 機械学習によって設計したナノ共振器シリコンラマンレーザの実験的評価
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会, 14aB415-1, 上智大学四谷キャンパス
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 浅野 卓、野田 進
2. 発表標題 機械学習を用いたフォトニック結晶ナノ共振器の設計
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会、広島大学東広島キャンパス、2020/3/17-20 (招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

野田研究室 研究内容 http://www.qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp/

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------