

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：32612

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K18912

研究課題名（和文）構造揺らぎの深層学習への活用によるナノフォトニクス素子の高性能化

研究課題名（英文）Increased performance of nanophotonic devices by utilizing structural fluctuation information with deep learning

研究代表者

田邊 孝純（Tanabe, Takasumi）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・教授

研究者番号：40393805

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：チャープフォトニック結晶導波路を用いた分光器を実現した。通常ナノフォトニクス素子は作成精度による限界がある。特に作成誤差の影響は大きい。本研究では作成ゆらぎの結果得られる光の局在パターンを波長同定にもちいることで、作成精度を超えた波長分解能を実現した。各波長での局在パターンを予め測定しておき、2次元マップ化する。未知の波長入力のパターンに、その2次元行列の逆行列を積算することで、スペクトルを再構築する。スペクトル分解能0.8 nm以下を得ることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

フォトニック結晶(PhC)やプラズモニクス、メタマテリアル、集積光回路を始めとするナノフォトニクス研究は、光科学の一大分野を形成しているが、その性能は作成誤差によって制限をうける。従来は作成誤差との戦いであったが、本研究はその戦略を180度転換するものであり、作成誤差をソフトウェアの力も借りながら積極的に活用しようとするものである。本手法は全く新しいものである、ナノフォトニクス分野の発展に大きな変革をもたらすことが期待される。

研究成果の概要（英文）：We have demonstrated a spectrometer using a chirped photonic crystal waveguide. Nanophotonic devices usually have limits due to fabrication precision. In particular, the effects of fabrication errors are significant. On the other hand, in this study, we have achieved a wavelength resolution exceeding the fabrication precision by using the light localization patterns resulting from fabrication fluctuations. We measure the localization pattern at each wavelength in advance and map it into a two-dimensional matrix. By multiplying the inverse matrix of this two-dimensional matrix by the pattern of unknown wavelength input, we reconstruct the spectrum. We have successfully achieved a spectral resolution of less than 0.8 nm.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：光エレクトロニクス フォトニック結晶 ナノフォトニクス

1. 研究開始当初の背景

フォトニック結晶(PhC)やプラズモニクス, メタマテリアル, 集積光回路を始めとするナノフォトニクス研究は, 光科学の一大分野を形成している。それは, 光を微小空間に閉じ込めることで, これまでにない省エネ性や高性能化が実現できたり, これまで実現できなかった光の振る舞いを実現できたりすることができるためである。その性能はとどまるところを知らず, 理論上ではこれまで不可能と思われてきたような性能や特性が得られる。しかし, 実際にはナノフォトニクス素子は製作が難しく, 作成誤差が性能を制限する。実際には理論通りの性能が得られない。例えば, フォトニック結晶微小光共振器をフォトニック結晶導波路の側に並べて, 共振する周波数の光を取り出すタイプの分光フィルタの実装について考えてみても, 空間作成誤差が 1 nm 程度を実現したとしても, 共振器の共振波長が 1 nm 程度設計よりズレてしまう。したがって, この方法で分光器を作成しても 1 nm を切るものを得るのは難しい。つまり, これまでの研究の歴史を振り返ると, 研究者たちはナノフォトニクス素子の作製精度の向上に心血を注いできたといっても過言ではなく, 作製誤差が素子の性能を制限するので「理論上は可能だが実際は…」という状況がいくつもあった。

しかし, ここで発想を 180 度転換してみる。つまり作製誤差の克服を目指すのではなく, 素子に内在する構造揺らぎを逆に利用することで「本来得られる精度よりも高い性能を得る」ことはできないのだろうか?

2. 研究の目的

これまででも, 作製誤差に強い構造を探索する研究はあったが, 今回の提案研究の目標はそこからさらにもう一步踏み込んで, これまでは邪魔と思われてきたランダムな構造揺らぎを積極的に活用することで, 設計よりも高い性能を得ることを目指したものである。一見荒唐無稽なこの課題を可能にするのが, 近年急速に発展している深層学習によるパターン認識の活用である。本研究は, 何十年と続いてきたナノフォトニクス研究での「作製精度向上との戦いに終止符を打つ」第一歩につながるかもしれない。

研究の具体的なターゲットとしては, フォトニック結晶(PhC)チャープ導波路を用いた超小型・超高精度分光器の開発に置く(図 1)。一般的に分光器の波長分解能と装置の大きさはトレードオフの関係にあるので, 超小型・超高分解能を同時に満たすことはできない。PhC による分光器が実現できれば, スマートフォンのカメラに搭載するまで小型化できる。ポスト COVID ではマスク着用のまま使用できる虹彩認証の需要が高まるはずである。この時分光情報も併用できればより高いセキュリティが得られることは容易に想像がつく。このように超小型な分光器の開発は様々な分野に波及効果をも

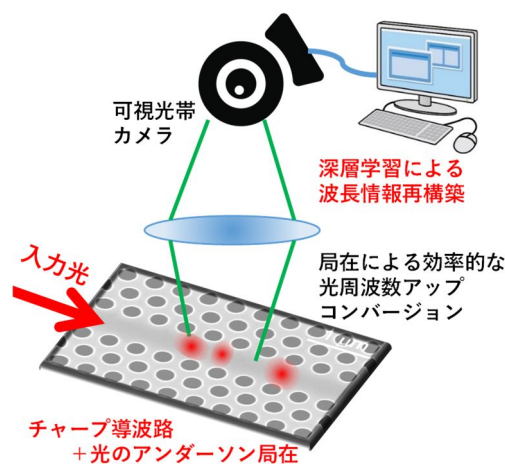


図 1: 提案する PhC チャープ導波路による分光システム。チャープ導波路で波長分解する。同時に素子に内在するランダム性に起因する波長依存の光局在パターンが形成される。それらをカメラで測定して深層学習で解析することで波長データを再構築する。

もたらす効果は、様々な分野に波及効果をも

たらず。

研究背景でも前述したように、PhC を用いれば原理的には分光器を小型化できるが、作製精度の限界によりナノメートル以下の波長分解能は難しく、実用的な素子研究には進展してこなかった。本研究では本来は波長分解能が約 2 nm しか得られないはずのこの素子を、その 10 倍を超える 0.1 nm オーダの波長分解能を実現させることを目標に据えている。

3. 研究の方法

そのために使うのが導波路の幅が伝搬方向に沿って狭まる PhC チャープ導波路である(図 2)。PhC 導波路はその幅によってカットオフ周波数が異なるので、PhC チャープ導波路ではある波長の光を入力すればカットオフ周波数に一致する導波路幅の領域まで伝搬後に面外放射する。この地点を記録すれば入力光の波長がわかる。しかし、CMOS プロセスは約 2 nm の空間分解能しかないのでチャープ構造は滑らかなには作製できず、約 1.5 nm の波長分解能しか得られない。そもそも作製揺らぎの影響で等しく 1.5 nm 間隔が得られるわけでもない。

しかし、PhC 導波路では、カットオフ周波数付近の光を入力すると光のアンダーソン局在として知られる局在がランダムに生じることが知られている。これは工学的には特性を劣化させる厄介なものであったが、今回はこの局在のパターンが入力光波長に鋭敏に依存することに着目する。ここで深層学習によるパターン認識を組み合わせれば、素子へのわずかな入力波長の違いを光局在パターンの違いから検出できる。

ランダム性は素子毎に異なるので、素子毎に個別に学習が必要となるが(従来の分光器の校正作業に相当)、一度学習を終えてしまえば性能はこれまでの素子を凌駕できるだけでなく、ソフトウェアが分解能向上の面倒を見てくれるので、そもそもハードウェアの作製精度向上に心血を注ぐ必要がなくなる。

なお、光が局在すれば非線形光学効果が容易に生じるので、周波数アップコンバージョンを利用でき、光通信波長帯でも安価な CMOS カメラを利用できる。

4. 研究成果

図 1 に全体のシステムの模式図を示す。これはチャープ構造を有するシリコン(Si) PhC 導波路であり、導波路幅は光が伝搬するにつれて狭くなる。PhC 素子の面積は約 $1000 \times 28 \mu\text{m}^2$ 、格子定数は 420 nm、空気穴の測定直径は 262.3 nm である。スラブの厚みは 220 nm で、 SiO_2 でクラッドされている。

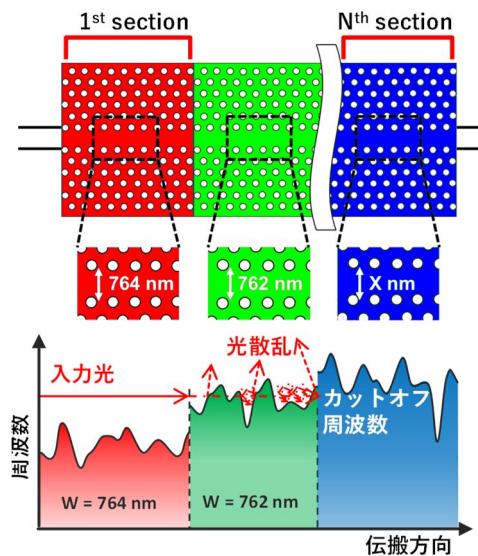


図 2: PhC チャープ導波路。導波路幅を狭くしていくとカットオフ周波数が上昇するのでその場所で上方散乱する。実際には 1.5 nm 程度でしかカットオフ周波数を変化できないため離散的な変化を示すが、ランダム性による局在も生じる。

チャープ PhC 導波路は，入力側は 1.05W (764 nm)で
ある．これは，元の W1 (727nm) PhC 線欠陥導波路より
1.05 倍幅を広げた導波路である．その後，伝搬方向に沿
って導波路の幅は徐々に狭め，W0.99 (722 nm)に達する
までチャープさせる．図 3 に，異なる幅の PhC 導波路の
分散を示すが，幅が狭い導波路が高い周波数でモードギャ
ップを有することがわかる．したがって，特定の波長
の光を素子に入力すると，光がその光の波長がモードギャ
ップの周波数に達する導波路構造の位置でスラブから
散乱する．これをスラブの上から散乱点を観察すること
で注入光の波長を得る．前述のように，理想的なチャ
ープ構造は滑らかであるが，製造の空間分解能の制限によ
り，導波路の幅は 2 nm 間隔でステップ状にしか狭める
ことができず，それによって通信波長でのモードギャ
ップが 1.6 nm 間隔で変化する．つまり，離散的にチャ
ープされた素子では設計分解能が 1.6 nm しか得られないこ
とになり，応用に用いるには心もとない．この問題を解
決するために，構造に内在する構造ゆらぎを用いた．

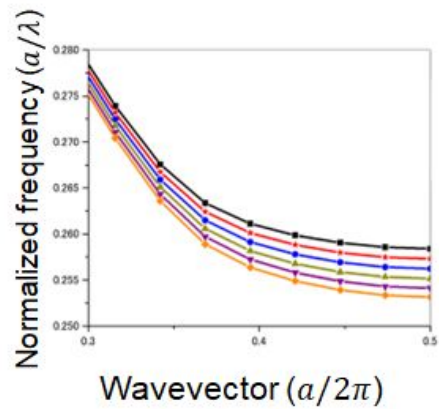


図 3: 異なる PhC 導波路の分散．

構造ゆらぎは，素子を製造するときに自然に生じる．
空気穴の位置，直径，形状が一つずつ微妙に異なるため，
導波路のモードギャップ周波数が導波路に沿って揺ら
ぎ，図 2 で模式的に説明さ
れているように光を捕捉
するポテンシャルを作り
出す．これはアンダーソン
局在として知られている．

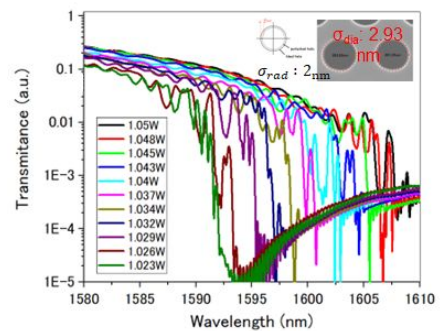


図 4: 異なる PhC 導波路の透過
スペクトル．

図 4 は，素子の透過スペ
クトルである．モードギャ
ップ波長付近でスペクト
ルのピークが観察される．

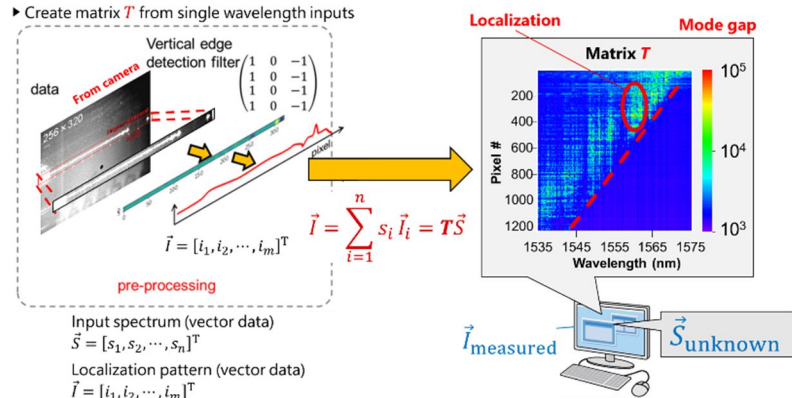


図 5: スペクトル再構築アルゴリズム

2D PhC スラブでの光
のアンダーソン局在化

は， 10^5 から 10^6 の Q 値が得られると報告されており，これは，通信波長帯でのスペクトル共
鳴幅が 1 ~ 10 pm に対応する．つまり，入力波長をわずかに変更すると (数 pm)，局在化パター
ンが変わることを意味するので，その情報を用いることで，分光器の波長分解能を向上させた．

図 5 に波長再生アルゴリズムについて示す．光の局在パタンはスラブの上面から観測し，そ
のパタンを 1 次元のベクトルに変換する．そのベクトルを異なる波長に対して取得して，2 次元
マトリックスを作成する．これがいわゆる校正データである．道の光入力に対しては，測定した
1 次元の局在パタンに求めた 2 次元マトリックスの逆行列をかけることでスペクトルを再生す
る．

実は多波長を入力した際の局在パターンは単一波長を入力したときの局在パターンお線形結合となっている．一般に多レーザー光を入力した際には，干渉パターンが生じるので，単純な線形和にならないが，今回のケースでは，入力光の波長が異なるため，十分ゆっくりと特性して時間平均を測定すれば，そこで得られるパターンは単純な線形和になる．したがって，この手法は多波長入力でも動作する．

このようにして得られた結果が図 6 に示すものである．ここでは 2 波長入力のケースを示すが，0.8 nm 離れた 2 つの波長の光が明確に区別して再構成できていることがわかった．

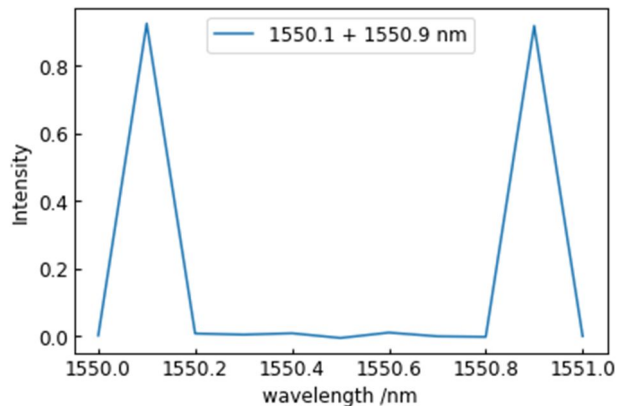


図 6: 2 波長再構築結果

ここで得られた波長分解能は製作時の空間分解能に制約されるものよりもよく，それはランダム性の情報を用いているからである．分解能についてももう少し詳細に理論検討した結果を図 7 に示す．

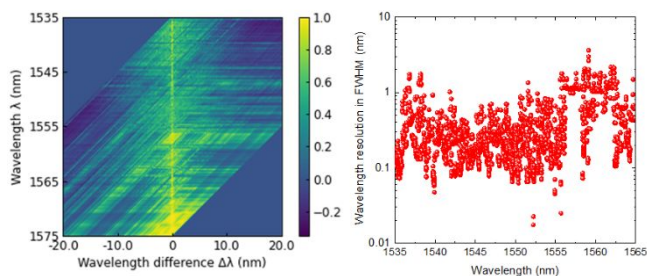


図 7: 図 5 で示した 2 次元マトリックスに対して，それぞれの波長で共分散関数を取得してマッピングした結果．右図は共分散関数の半値全幅を波長分解能として定義した結果．

これは 2 次元マトリックスの各波長における共分散関数を求めたものである．ここでの共分散関数は直感的には，ある波長を決めたときに，その波長から

わずかに波長をずらしたときに得られる 1 次元局在パターンが元の波長の局在パターンからどの程度の相関（類似性）を示すかを与えるものである．つまり，僅かな波長シフトでも相関が失われていれば，波長を区別できることになるので波長分解できることになる．図 7 の右図に示したのは共分散関数の半値全幅で定義した波長分解能である．実際にはその 1/10 程度の分解能が得られると考えられる．いずれも 1 nm，波長によっては 0.1 nm を切る分解能が得られており，我々の提案した分光器が製作誤差を超えて動作することが示された．

またここでは示していないが，再構成アルゴリズムに焼き鈍し法，及び，機械学習を用いた手法についてもそれぞれ検討し，動作を確認した．

本研究では，データ処理を積極的に活用することで，分解能を超えた性能が得られることを示すことができた．このアプローチは，これまでになかったものであり，これからのナノフォトニクス研究においてブレークスルーをもたらすと期待される．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 兒玉拓昌, 菅野凌, H. Jocelyn, 金セイ基, 大塚実, 関三好, 横山信幸, 岡野誠, 田邊孝純
2. 発表標題 ランダムフォトリック結晶導波路を用いた多波長解析
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Junnosuke Kokubu, Ryo Sugano, Minoru Ohtsuka, Nobuyuki Yokoyama, Makoto Okano, and Takasumi Tanabe
2. 発表標題 Small Spectrometer With Extremely High-Resolution (0.07 nm) Realized With an Improved Reconstruction Algorithm
3. 学会等名 CLEO:2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 國分淳之介, 菅野凌, 田邊孝純
2. 発表標題 ランダム性を有するフォトリック結晶導波路を用いた再構成分光器の高性能化に関する研究
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 四方田彩花, 菅野凌, 田邊孝純
2. 発表標題 ナノ構造体を用いた放射冷却による熱電発電に関する検討
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1 . 発表者名 R. Sugano, S. Jin, J. Hofs, K. Yube, K. Nagashima, T. Kodama, and T. Tanabe
2 . 発表標題 Low-cost photonic crystal spectrometer using up-conversion
3 . 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim 2022 (CLEO-PR 2022) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 T. Tanabe, T. Kodama, and R. Sugano
2 . 発表標題 Enhancing the wavelength resolution of a chirped photonic crystal waveguide based spectrometer by employing fabrication error
3 . 学会等名 The 12th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META 2022) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 T. Kodama, R. Sugano, J. Hofs, M. Ohtsuka, M. Seki, N. Yokoyama, M. Okano, and T. Tanabe
2 . 発表標題 Multi-wavelength reconstruction in a compact (< mm) high-resolution (< 0.1 nm) random photonic crystal spectrometer
3 . 学会等名 CLEO:2022 (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 T. Kodama, R. Sugano, J. Hofs, S. Jin, M. Ohtsuka, M. Seki, N. Yokoyama, M. Okano, and T. Tanabe
2 . 発表標題 Development of a photonic crystal spectrometer using randomness for multi-wavelength analysis
3 . 学会等名 The 11th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS2022) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 並木 周 他	4. 発行年 2022年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 628
3. 書名 次世代高速通信に対応する 光回路実装、デバイスの開発	

〔産業財産権〕

〔その他〕

アニュアルレポート https://www.phot.elec.keio.ac.jp/annual_report/
--

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
---------	---------