

# CMOS互換フォトニック結晶分光器の開発

金 セイ基(M2) ホフス ジョスリン(M2) 兒玉 拓昌(B4)

本研究では CMOS 互換の作製手法にて超微小なフォトニック結晶分光器を作製した。サイズ(PhC部分のみ)は $29 \times 370 \mu\text{m}^2$ であり、ディープラーニングによる分類検証では $0.1 \sim 0.2 \text{ nm}$ の分解能を 98%の精度で検証した。そして、フォスファーコーディングを利用した近赤外光を可視光に励起する過程を検証した。本研究の目的は現状の一般的な商用分光器に関する課題を解決できるような NIR フォトニック結晶分光器を実現することである。

キーワード：フォトニック結晶，分光器，フォスファー，ディープラーニング

## 1. 導入

微小かつ高分解能で低コストの分光器は様々な分野において必要とされている。特に現在の産業における IoT 化においてはサイズとコストは重要な要素である。一例として食品分析などが挙げられる。しかし、現状の商用 NIR 分光器ではサイズと分解能のトレードオフといった課題や、NIR 光の検出のコストが高いといった課題がある。こうした課題解決に向け、様々な従来研究が行われてきた。例として、AWG 型分光器[1]やフーリエ変換を利用した分光器[2]、フォトニック結晶分光器[3]などが挙げられる。しかし、微小サイズ・高分解能・低コストという 3 点をすべて満たすことは困難である。本研究ではこうした課題を解決できるようなフォトニック結晶分光器の実現を目的としている。そこで、本研究では CMOS 互換の作製手法でフォトニック結晶を作製し、微小サイズの実現を目指した。そして、フォトニック結晶チップにフォスファーコーディングを行い NIR 光のアップコンバージョンを行うことで、高コストの InGaAs センサーをらずに検出コストの低下を目指した。そして、ディープラーニングを組み込むことで高分解能を目指した。

## 2. フォトニック結晶分光器のデザイン

本研究で作製したフォトニック結晶分光器は導波路幅の異なるフォトニック結晶導波路から構成されている(図 1)。図 1(a)に示すように、分光器構造は 11 の異なる幅のフォトニック結晶導波路からなっており、764 nm から 744 nm まで 2 nm ずつ幅を狭めている構造である。ただし、三角格子状のフォトニック結晶の基準となる導波路の幅を 1.00W とここでは規格化した。図 1(b)には幅の異なるフォトニック結晶導波路の透過スペクトルのシミュレーション結果を示している。このように、透過スペクトルのバンド端は導波路幅に応じて異なっていることが見て取れる。つまり、特定の波長の光は特定の導波路幅の領域に局在するといえる。これらの局在に加え、フォトニック結晶の作製誤差に応じてランダムな局在も引き起こされる。これらの局在が観測される場所に応じて、その波長情報を特定することが出来る。

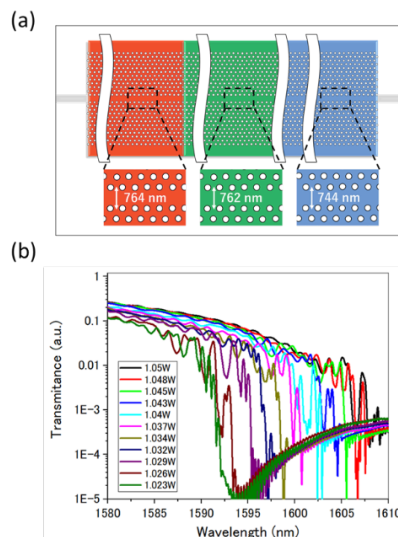


図 1：(a) フォトニック結晶分光器構造の概要図。この構造は 11 の異なる導波路幅(764 nm, 762 nm, ... 744 nm)の導波路から構成されている。(b) それぞれの導波路幅に応じた導波路(1.05W, 1.048W, ... 1.023W)の透過率のシミュレーション結果。

## 3. フォスファーコーディング・アップコンバージョン

NIR 分光器は InGaAs センサーのコストにより高価になる傾向がある。そこで、本研究ではフォスファーを利用して NIR 光を可視光に励起する手法を導入した。図 2 にフォスファーコーディングと実験結果が示されている。まず、図 2(a)の過程のようにフォスファー粒子とダイヤモンドスラリーを混ぜ、(質量比フォスファー粒子 9 : ダイヤモンドスラリー 1)乳鉢で 10 分間すり潰した。その後、この混合物をフォトニック結晶に塗布した。そして、実験結果が図 2(b), (c)に示されている。図 2(b)は NIR カメラによる観測画像を示しており、入力光は 1563.4 nm で 10 dBm であり、図のような局在が観測できた。そして、図 2(c)はアップコンバージョンを行った後の可視光カメラによる観測画像を示しており、入力光は 1563.4 nm で 10 dBm であり、図のように局在光がアップコンバージョンされていることが観測できた。ただし、この可視光カメラの露光時間は 2 秒に設定した。このように、フォスファーを用いて NIR 光を可視光へとアップコンバージョンすることを検証した。

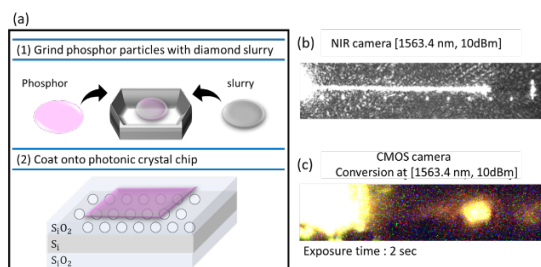


図 2: (a) フォスファーコーティングの概要図。フォスファー粒子とダイヤモンドスラリーを乳鉢ですり潰し、フォトニック結晶チップにコーティングする。(b) 1563.4 nm で 10 dBm の入力をした時の NIR 画像(実験結果)。(c) 1563.4 nm で 10 dBm の入力をした時の可視光カメラ(CMOS カメラ)画像(実験結果)。

#### 4. ディープラーニングによる分類

本研究ではディープラーニング(Tensorflow)を検出に組み込むことで設計上の分解能以上の分解能を目指した。この検出手法と分類結果は図 3 に示されている。図 3(a)のように、はじめに入力画像の切り取りを行い、フォトニック結晶分光器の部分のみに着目する。次に、エッジ検出というフィルタリングにより画像の中の異なる色の境界を強調する。そして、次にこうしたデータは 1 次元ベクトルデータに変換され、全結合層と呼ばれるプロセスに渡される。ここでは、入力画像とその波長情報の紐づけを行うトレーニングを行い、その後未知のデータを入力することで、その画像に応じて波長の分類を行う。

図 3(b)にはこうした NIR カメラによる観測画像を用いた学習結果が示されている。この NIR 画像の分類検証では 100 波長 × 20 強度パターンの画像群が使用された。波長レンジは 1565.0 nm から 1584.8 nm までの範囲で 0.2 nm 間隔で、強度レンジは -10 dBm から +9 dBm までの 1 dBm 間隔であった。これらの画像群のうち 75%(15 強度パターン)をトレーニングデータとして用い、残りの 25%(5 強度パターン)をテストデータとして用いた。図 3(b)は学習カーブを示しており、横軸は学習回数を、縦軸は精度を表している。図 3(b)では、学習回数が約 500 前後において精度が飽和し始めた。また、テストデータでの分類精度は 98%であった。つまり、98%の画像は正しく分類されたことになる。次に、図 3(c)にはアップコンバージョンを行った可視光カメラ(CMOS カメラ)による観測画像を利用した学習結果を示している。この CMOS カメラ画像での検証では、31 波長 × 4 強度パターンの画像群を利用した。波長レンジは 1561.5 nm から 1564.5 nm までの範囲で 0.1 nm 間隔であり、強度は 3 dBm, 5 dBm, 6 dBm, 10 dBm-10 dBm の 4 パターンであった。ただし、この CMOS カメラ画像での検証では同じセッティングの画像を 2 枚ずつ取得した。つまり、31 波長 × 4 強度パターンの画像群が 2 セットあり、そのうちの 1 セットをトレーニングデータとして、残りの 1 セットをテストデータとして用いた。

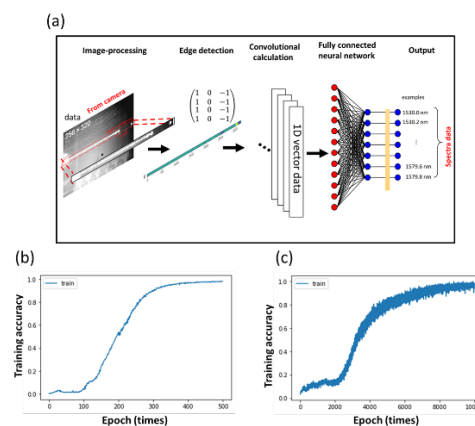


図 3: (a) ディープラーニングプロセスの概要図。画像処理の段階ではフォトニック結晶の部分のみを切り取る。エッジ検出により異なる色からなる境界を強調する。エッジ検出後、画像データは 1D テンソルデータに変換され、全結合ニューラルネットワークに入力される。(b) NIR カメラ画像による学習曲線。(c) CMOS カメラ画像による学習曲線。

その CMOS カメラ画像による学習結果が図 3(c)に示されている。学習精度は学習回数が約 10000 前後で飽和し始めた。そして、テストデータによる分類精度は 98%であった。CMOS カメラ画像を用いた検証ではデータ数が限られてはいたものの、高い精度で、0.1 nm の分解能の分類が検証出来た。

#### 5. パッケージングデザイン

以上のような実験結果に基づいて、本研究では分光器のパッケージングデザインを行った。はじめに、ファイバーとフォトニック結晶チップの端面を結合させるファイバーカップリングを行った(図 4)。このファイバーカップリングでは UV 硬化剤のコーティングを 2 回行うことでより安定化を目指した。各コーティングの後に、UV 光を照射することで結合部分を硬化させた。図 4(a)は 1 度目の UV 硬化剤コーティングを行った様子の例を示しており、図 4(b)は 2 度目の UV 硬化剤コーティングを行った様子の例を示している。ただし、ファイバーはフォトニック結晶の入力端のみに行い、出力端では集光モジュール(focusing diameter:  $\phi 2.8\mu\text{m}$ , extinction ratio:  $\geq 20\text{dB}$ , input loss:  $\leq 0.9\text{dB}$ , fiber: PMF)を用いた。図 4(c)はファイバーカップリングを行ったフォトニック結晶導波路(Width: 1.05W)の透過スペクトルの測定結果である。黒の線, “before”, は UV 硬化を行わず、チップの両端に集光モジュールを用いた場合の測定結果を示している。緑の線, “first”, は 1 度目の UV 硬化を行った後の測定結果を示している。オレンジの線, “second”, は 2 度目の UV 硬化を行った後の測定結果を示している。1 度目の UV 硬化後の損失は黒の線と比較して近似して 9dB の損失があり、2 度目の UV 硬化後の損失は黒の線と比較して近似して 16dB の損失があった。

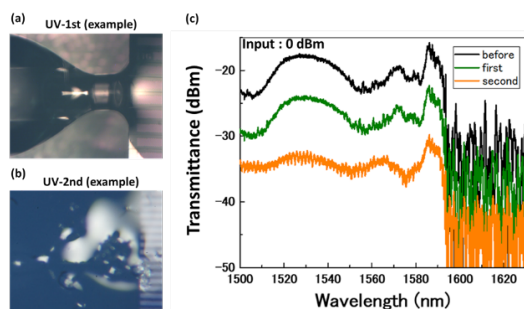


図 4: (a) 一度目の UV 硬化剤コーティングの実験画像. (b) 一度目の UV 硬化剤コーティングの実験画像. (c) それぞれのカップリング段階におけるフォトニック結晶導波路(Width: 1.05 $\mu$ m)における透過率の測定結果. 黒の線, “before”, は集光モジュール(focusing diameter:  $\phi$ 2.8 $\mu$ m, extinction ratio:  $\geq$ 20dB, input loss:  $\leq$ 0.9dB, fiber: PMF)がフォトニック結晶チップの両端に用いられた場合の結果を示している. 緑の線, “first”, はチップの入力端にのみファイバーカップリングした場合の, 一度目の UV 硬化剤コーティング段階の結果を示している(集光モジュールは他端に用いられスペクトルの測定に用いられた). オレンジの線, “second”, はチップの入力端にのみファイバーカップリングした場合の, 二度目の UV 硬化剤コーティング段階の結果を示している(集光モジュールは他端に用いられスペクトルの測定に用いられた).

以上のような実験結果に基づいて図 5 に示されるようなパッケージングデザインを行った.

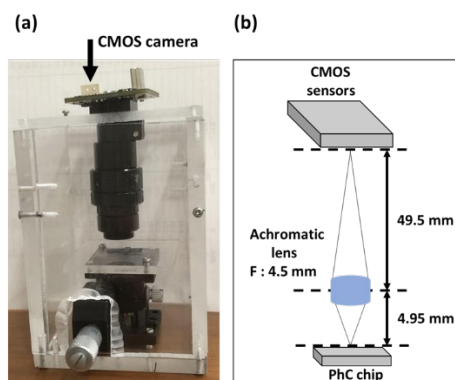


図 5: (a) パッケージング構造の例. (b) レンズと CMOS カメラのデザイン例.

図 5(a)はパッケージングデザインの例を示しており, ハウジングケースのサイズは近似して  $60 \times 60 \times 80 \text{ mm}^3$  である. 図 5(b)はレンズとカメラの設計例を示している. ここでは, アクロマティックレンズ( $F$ : 4.5 mm)を想定し, 近似して 10 倍の拡大倍率を想定した. このような構造により, フォトニック結晶導波路で発生する可視光にアップコンバージョンされた局在光を観測することが目的である.

## 6. 結論

本研究では, 微小サイズの分光器実現のために CMOS 互換の作製手法でフォトニック結晶分光器を作製した. そして, 検出コスト低下に向けて, フォスファーによる NIR 光の可視光へのアップコンバージョンを検証した. また, 検出においては高分解能化に向けてディープラーニングによる画像分類を検証し

た. そして, こうした結果に基づいてレンズと CMOS カメラを用いたパッケージングデザインを行った.

## 参考文献

- [1] Ryckeboer, E. *et al.* "Silicon-on-insulator spectrometers with integrated GaInAsSb photodiodes for wide-band spectroscopy from 1510 to 2300 nm," *Opt. Express* **21**, 6101-6108 (2013).
- [2] Kita, D.M., Miranda, B., Favela, D. *et al.* High performance and scalable on-chip digital Fourier transform spectroscopy. *Nat Commun* **9**, 4405 (2018).
- [3] Redding, B., Liew, S., Sarma, R. *et al.* "Compact spectrometer based on a disordered photonic chip," *Nature Photon* **7**, 746-751 (2013).