

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K21212

研究課題名(和文)集積化ナノファイバーによる光機能融合センサデバイスの実現

研究課題名(英文)Hybrid sensing devices based on integrated optical nanofibers

研究代表者

山本 和広 (Yamamoto, Kazuhiro)

九州大学・先導物質化学研究所・助教

研究者番号：40455449

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、光ファイバーを集束イオンビームとウェットエッチングによる新規加工法により微細加工することで、直径が500 nm以下の複数・多種のナノファイバーを同一光ファイバー内に形成し、インラインでの光センシングへと適用した。ナノファイバーの光モードの変化によりミクロン領域での局所的な溶媒を透過光の変化として検出できることを実証した。また光ファイバーの透過波長、光モード分布を制御するフォトニック結晶構造および金属ナノ構造の導入によりセンシング感度の向上が見込めることを示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, to apply our novel nanofiber structure fabricated by the focused ion beam milling and chemical wet etching for optical sensing, we demonstrated the sensing of liquids with different refractive index by monitoring transmission spectrum. The propagation modes in nanofiber are changed from the mode in normal fiber section because of the tapering of core. So, when we detect the mode change due to the cladding environment, we can estimate the refractive index of cladding material in micron-sized area by evaluating the transmission spectrum. We can use such mechanisms for the in-line nanofiber optical sensing. Furthermore, We investigated the introduction of the photonic crystal and metal nano structures to the optical nanofibers which enhanced the sensibility of optical sensing.

研究分野：近接場光学

キーワード：光ファイバー ナノファイバー センシング 表面プラズモン 集束イオンビーム FDTD 近接場光学  
ラボオンファイバー

## 1. 研究開始当初の背景

光ファイバーを情報の伝送路として用いることで、物理、化学そしてバイオセンサーデバイスが発展してきた。現在光ファイバーセンサーにはより微小で高感度、高速かつ高い選択性を持つことが求められている。通常の光ファイバーセンサーはファイバー径が使用する光波長より大きく、センサーとして動作するのは光ファイバー端部となり、対象との相互作用領域は mm のオーダーでかつその応答時間と感度が制限されている。図 1 に示す径を光の波長より小さくしたナノファイバー構造は、可視域から近赤外域まで光をファイバーコア外のクラッド部すなわち外部領域に浸み出したエバネッセント波として備え、伝送方向に沿って外部環境のセンシングが可能になる。ナノファイバーでの光伝搬は外部の屈折率変化に非常に敏感なため、外部環境の熱的、化学的变化や生体反応などを高感度で検出することができる。またナノファイバーは軸対象な構造とその均一性、また平面導波路デバイスのような光結合の煩雑さがないことから、偏光依存性も少なく低損失であり高速高感度な微小光センシングに最適である。これまでに国内外でナノファイバーを用いた屈折率、熱、化学そしてバイオセンサーが研究されている。近年では共振器と結合することで気体のセンシングを行う試みも計算、実験の両面から行われている (Y. Sun et al., Opt. Exp. 16, 10254(2008))。またセンシングだけでなく、ナノファイバーはナノ粒子の捕捉や単一光子源取り出しなどの量子光学実験にも広く用いられている (G. Brambilla et al. Opt Lett. 32, 3041(2007))。こうしたナノファイバーはこれまで光ファイバーの熔融延伸により作製されてきた。この手法では比較的長いナノファイバーを作製できる一方、作製精度や制御性に困難があり、また単一ファイバー内に複数のナノファイバー領域を設けることや、直径を変化させることによるファイバーセンサーの高機能化を図ることは非常に難しい。また後述するようにナノファイバーにナノ構造、例えば波長選択性と光閉じ込めを実現するフォトニック結晶構造や顕著な電界増強効果を実現する表面プラズモン構造を導入することでセンシング機能の飛躍的な向上が期待できるが、こうした構造を任意の位置に導入することも困難である。

申請者はこうした困難を克服するため、基板上に配置した光ファイバーの任意の部分をドライ・ウェット複合プロセスによりナノファイバー化する技術を開発した (K.Yamamoto et al. Proc. SPIE, 8632, 863228(2013))。本手法では任意の位置を集束イオンビームにより掘削加工した後、フッ酸溶液によるエッチングで該当部分のみを選択的にナノファイバー化する。したがって単一ファイバー内に複数個所かつ加工条件

の調整により異種直径のナノファイバー領域を作製可能である。

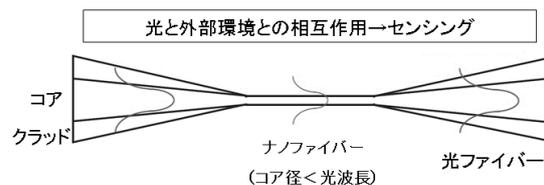


図1 ナノファイバー構造。

## 2. 研究の目的

そこで本研究は基板上に集積したナノファイバー構造を作製し、異なる光機能を融合した光センシング機能を実証することが目的とした。具体的な目標として、まず数値計算による設計を元に、ナノファイバーを基板上に高精度に集積して作製する。そしてファイバー内にナノファイバー領域を複数また異なる径の構造を作製することに、多点・多要素を分離した屈折率の光センシングが可能であることを示す。さらにセンシング感度の向上および異なる物理量（蛍光、電界）のセンシングのため、微細加工によりナノファイバー内にフォトニック結晶構造や表面プラズモン増強構造を導入し、異種光機能を融合した光センシングデバイスを提案する。

## 3. 研究の方法

### 3.1 異種光機能融合に適合した集積化ナノファイバー構造の高精度設計・作製

図2の電子顕微鏡像に示す基板上ナノファイバー構造作製の最適化、高精度化を行った。デバイス構造の設計は電磁界の数値シミュレーションである有限差分時間領域法 (FDTD 法) によって行い、構造作製にはこれまでに申請者が見出した集束イオンビーム (FIB) 加工およびその後の緩衝フッ酸溶液によるエッチングを用いた。具体的にはナノファイバーの形状 (長さ、直径、テーパ角) は加工条件に依存するので、集束イオンビーム (FIB) 加工の条件 (加工パターン、加工領域)、ウェットエッチング条件 (溶液濃度、エッチング時間) を精査し、再現性よく作製することに成功した。特にウェットエッチング時に白色光源をファイバーに導入、透過光をモニターし導波モードのスペクトル変化によって加工時間を制御することで、コア径を精度  $\pm 50\text{nm}$  以下で  $500\text{nm}$  以下とすることに成功した。

### 3.2 集積化ナノファイバー構造による多点・多要素センシングの実現

集積化ナノファイバー構造は同一ファイバー内に多数、多種の構造を実現できること

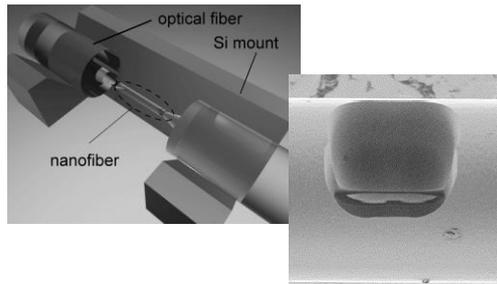


図2 基板上ナノファイバーデバイス。  
コア部のみをテーパー化しナノファイバーを形成する。

が特徴であるため、その有効性を同一ファイバー内での光センシングにより実証する。具体的には、ナノファイバー部位に異なる屈折率の溶媒（水、エタノールなど）を滴下することで透過スペクトルの変化から多点測定を評価した。その際ナノファイバーの導波モードは外部環境の屈折率に大きく依存するため、加工条件の調整によりコア径を制御することで信号選択比を大きくした多点・多要素光センシング技術の基礎を確立した。

### 3.3 フォトニック結晶・プラズモン構造の導入による感度・選択性向上

図3 (a)に先行する研究として行った、直径 500nm のナノファイバーに対し FIB を用いて周期構造を設けた構造の電子顕微鏡像を、そして図3 (b)にこの構造における光透過を数値計算した結果を示す。幅、長さ 200nm の矩形開口を周期 400nm で配列した周期構造を形成したこの場合では、明確な反射による波長選択的な透過率の変化が見られた。またすでに試作した構造において、図3 (c)に示すように実デバイス上でも透過スペクトルにおける波長選択的なディップを確認した。これら特性評価、シミュレーション設計・ナノ加工技術の検討を元に、ナノ構造を導入した異種光機能融合デバイス構造の作製を目指した。平行して加工条件の調整によりナノファイバーをさらに先鋭化し、構造に金属（金・銀）をコートすることで、図4に示す表面プラズモンの超集束による電界増強効果を利用する構造を検討した。この場合光ファイバーの透過率は低下するが、テーパー部での非常に強い（数値計算では強度で 10000 倍 (K.Yamamoto et al.Proc. SPIE, 8632, 863228 (2013)) 光電界増強により、高感度蛍光検出が可能となる。作製においてはもっとも重要なパラメータであるテーパー金属部の先端の曲率半径の制御に注力し、具体的には曲率半径 10nm 以下を目標に、集束イオンビーム加工を行った。さらに通常のナノファイバーの高次モードの効率的利用やフォトニック結晶構造、プラズモン構造による更なる波長選択機能と融合して、センサ

一機能の高感度化を目指した。

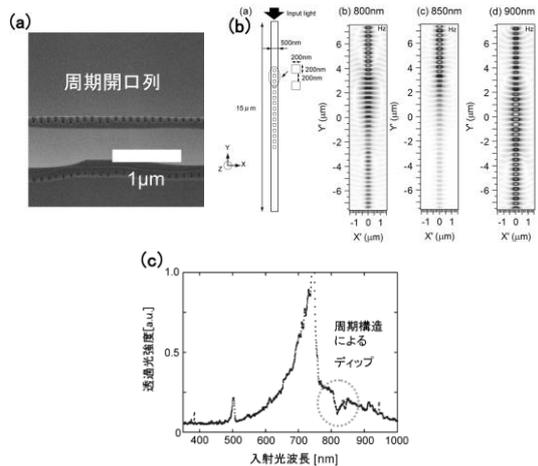


図3 FIB 加工により周期構造を形成した  
ナノファイバー構造。

- (a)電子顕微鏡像 (b)光分布の数値計算
- (c)デバイスの透過スペクトル

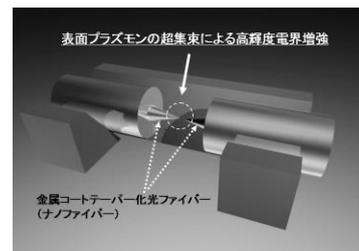


図4 光電界増強のための金属コート  
テーパー化光ファイバー構造。

## 4. 研究成果

実験方法で述べた光ファイバーの FIB 加工およびウェットエッチングにより、光ファイバー内の任意の位置にコア径を  $\pm 50 \text{ nm}$  で制御したナノファイバー構造形成に成功した。また同一ファイバー内に複数の加工を施すことにより、異なる径を有するナノファイバー構造をカスケードに形成することも実現した。

また作製したナノファイバー構造に異種溶媒を滴下することで、屈折率の違いによる溶媒センシングに成功した。図5に入射光を広帯域白色光とした場合の異種溶媒滴下時のファイバーデバイス透過光のスペクトル変化を示す。図よりわかるように溶媒の屈折率が大きくなるにつれ（空気からクロロホルム）透過光パワーが増加することがわかった。これはナノファイバーにおいては光ファイバーのクラッドが除去され、通常の光ファイバー部との光結合効率は低下するが、屈折率の大きな溶媒によって光モードの連続性が向上し、結合効率が增加するためと考えられる。したがって局所的なナノファイバー領域

(20  $\mu\text{m}$ ) での屈折率センシングがインラインで行えることを実証した。

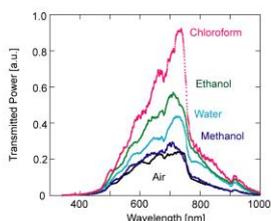


図5 ナノファイバー構造透過光スペクトル測定によるインライン溶媒センシング (検出領域の長さ 20  $\mu\text{m}$ )。

またセンシング感度は伝播する光モードに依存するため、より変化の大きい高次モードの励起を光ファイバー上で実現するため、光ファイバー上端面構造の作製を行った。光ファイバー端面上に金属膜を製膜し、コア領域周辺にグレーティング構造を設けると、入射光は一旦表面プラズモンに変換され、コア部で再度光ファイバー伝播光に変換される。この際適切な励起偏光を用いることで、伝播モードを選択することができる。図6に作製した構造および入射光を波長 633 nm の He-Ne レーザーとした場合の光ファイバー出射光の光分布を示す。

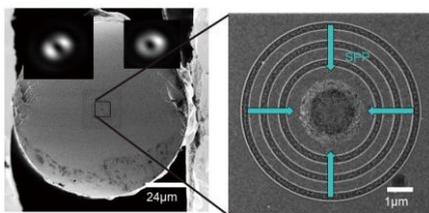


図6 光伝播モード選択のための光ファイバー端面金属ナノ構造と出射光モード分布。

またセンシング対象の波長依存性に応じて伝播光のスペクトルを変化させることでセンシング感度の向上が期待できるため、光ファイバー端面上構造による透過光スペクトルの制御を試みた。スペクトルの制御には電圧で制御可能な微小電気機械システム (MEMS) 構造を用い、MEMS 構造を金属 (金) で構成することで、金ナノ構造変化の表面プラズモン特性の変化を利用した。図7に作製した光ファイバー端面金属 MEMS 構造を示す。この構造に電圧印加 (21V) することで、図8に示すように光ファイバー伝播光のスペクトルを可視光および近赤外光の領域で外部信号によってアクティブに制御することに成功した。

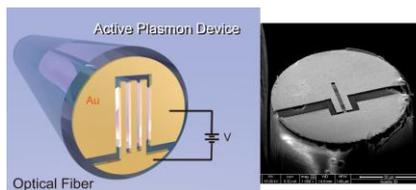


図7 センシング感度向上のためのアクティブスペクトル制御を実現する光ファイバー端面上 MEMS 構造。

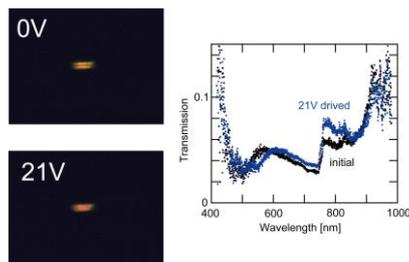


図8 光ファイバー端面上 MEMS 構造への電圧印加による光ファイバー透過光スペクトルのアクティブ制御。

これらの光ファイバー内ナノ構造を統合することで、インライン多機能光ファイバーデバイスを構築することが可能となった。光ファイバー内機能の集積化は「ラボ・オン・ファイバー」技術として注目され始めており、今後本研究課題で得られた成果を元に当該分野での重要な寄与を目指したい。具体的にはセンシングにおいては、現在ひずみを主に検出原理とするカテーテル等医療応用、またスペクトルの一括取得が必要な天文応用への展開を検討する。また光ファイバーデバイスの通信・情報処理デバイスへの接続容易性を有効に利用した多重情報処理にも応用を図る。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 5 件)

### 1.

#### 山本和広

「ラボ・オン・ファイバー技術を目指したナノ構造化光ファイバーの開発」  
 第五回アライアンス若手研究交流会  
 東京 (招待講演)  
 2017 年 8 月 22 日

2.

Kazuhiro Yamamoto, Kenzo Yamaguchi  
“Demonstration of active plasmon devices on an optical fiber”  
the 8th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META'17)  
Incheon, South Korea (国際学会)  
2017年7月26日

(3) 連携研究者 ( )

研究者番号 :

(4) 研究協力者 ( )

3.

山本 和広、山口 堅三  
「光ファイバー端面上アクティブプラズモンデバイスの作製」  
第64回 応用物理学会春季学術講演会  
パシフィコ横浜 (国内学会)  
2017年03月16日

4.

Kazuhiro Yamamoto, Kenzo Yamaguchi, and Akira Otomo  
“Integrated nanofiber for in-line optical sensing”  
KJF International Conference on Organic Materials for Electronics and Photonics 2016 (KJF-ICOMEF 2016)  
ACROS Fukuoka, Japan (国際学会)  
2016年09月05日

5.

K Yamamoto, K.Yamaguchi, S.Yokoyama, A.Otomo  
“Plasmonic nanostructures combined with integrated nano-fiber”  
The 6th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Photonics (META'15)  
New York, USA (国際学会)  
2015年08月04日

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 和広 (YAMAMOTO Kazuhiro)  
九州大学 先導物質化学研究所・助教  
研究者番号 : 40455449

(2) 研究分担者

( )

研究者番号 :