

機関番号：15301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656257

研究課題名(和文)近赤外表面プラズモンファイバセンサの研究

研究課題名(英文)Study of near-infrared surface-plasmon-resonance fiber sensor

研究代表者

深野 秀樹 (Fukano, Hideki)

岡山大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：60532992

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：光通信用の石英系光ファイバの表面に金属薄膜や金属ナノ粒子を形成し、その表面の自由電子が透過光の電場によって集団的に共鳴振動する表面プラズモン共鳴を起こした。その時に起きる光位相変化を、特殊な光ファイバ構造を作製することにより発生するマルチモード干渉と呼ばれる光干渉を利用して極めて高感度に検出する、新しい検出手法による超高感度ファイバセンサの研究を行った。金属構造を制御することで、共鳴波長が明瞭に変化することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We have studied a super-high sensitivity fiber sensor by a new detection technique. A metallic thin film or metal nanoparticles have formed on the surface of silica fiber used for optical communication system. The free electrons of the metal surface are excited by the electric field of transmitting light, and then collective oscillation of electrons, called surface plasmon resonance occurs. This induces the phase shift of light. This shift has been detected using a multimode interference produced by the special fiber configuration. We clarified that the resonance wavelength of the light can be controlled by changing the metal structure.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学，計測工学

キーワード：センシングデバイス

1. 研究開始当初の背景

電磁波が境界面で全反射する時に発生するエバネッセント波は、金属表面特有の電子の集団振動である表面プラズモンと位相速度が一致し得るため、共鳴振動を観測出来る。表面プラズモン共鳴 (SPR) の実現方法としては、大別して、プリズムを利用するものと光ファイバを応用する方法がある。表面プラズモン共鳴型センサは大学・研究所・企業で研究開発が精力的に進められているが、従来の表面プラズモン共鳴は、可視～紫外域の波長でしか起きないため、プリズム型では、特定波長のレーザで入射角を変えることで表面において等価的に波長を変化させるような、機械的機構が必要であり、ファイバ型では、白色光と高価な分光器を組み合わせるような手法が必要となり、これらが高精度化・汎用化のボトルネックとなっている。また、これらの従来技術は、共鳴に伴う光強度減少をセンサの検出原理として用いている。

2. 研究の目的

光ファイバを利用した表面プラズモン共鳴において、金属表面における大きな光位相変化を利用し、位相変化を、マルチモード干渉手法により極めて高感度に検出する、新しい検出手法による超高感度ファイバセンサの研究を行う。その共鳴波長のシフトを図り、これまであまり取り扱われて来なかった近赤外の通信波長領域での現象解明と新たなセンサ技術分野の開拓を行う。これにより、1.5 $\mu\text{m}$ 帯高精度波長可変レーザ光源を利用可能とし、多様かつ高感度なバイオセンサや環境ガスセンサが従来の様なメカニカルな機構等なしに超小型、安定、高精度に実現できるようにする。波長帯のシフトは、金属種や微小金属構造、金属周期構造形成による表面プラズモン波の回折現象応用を実験手法と計算機シミュレーションによる両面より検討し、その実現を図る。

3. 研究の方法

(1) マルチモード干渉による高感度位相変化検出のために、センサファイバ部の新規構造を含むマルチモード導波構造の設計と実験による評価。

- ・入力ファイバのコア径細線化に基づく回折増強によるマルチモード光生成効率の向上
- ・出力ファイバのコア径最適化による高感度位相検出方法確立

(2) 共鳴波長の近赤外へのシフトを目的とした、金属種、および、構造に依存する表面プラズモン周波数変化の実験による評価と赤外化指針の明確化。

4. 研究成果

(1) マルチモード干渉による高感度位相変化検出のために、センサファイバ部の新規構造を含むマルチモード導波構造の設計と実験による評価。

マルチモード干渉(MMI)による高感度位相変化検出のために、センサファイバ部のマルチモード導波構造(図1)の設計と実験による評価を行った。

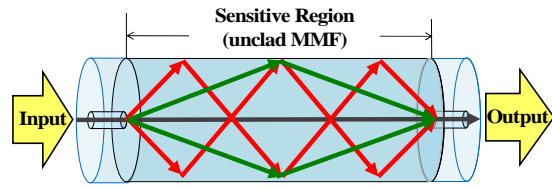


図1 Multimode interference (MMI) structure.

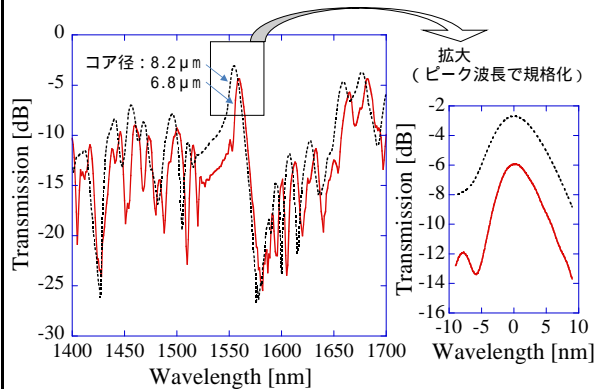


図2 入出力ファイバのコア径によるスペクトル形状の変化

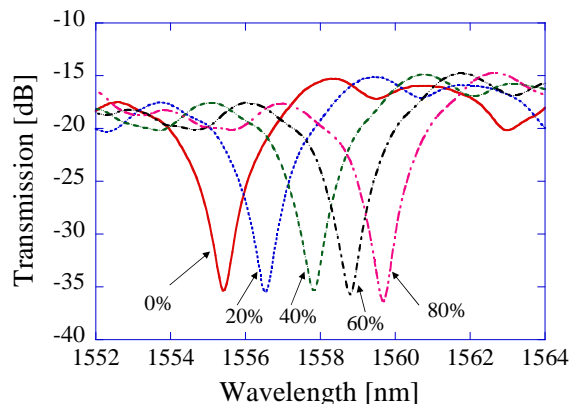


図3 エタノール水溶液の濃度変化によるスペクトルシフト

入力ファイバにコア径の細いファイバを導入し、入射端での回折増強によるマルチモード光生成効率の向上について調べた。また、出力ファイバのコア径も同様に、細いファイバを導入し、干渉光の選択性の向上を調べた。その結果、通常のシングルモードファイバのコア径8.2 $\mu\text{m}$ に対し、6.8 $\mu\text{m}$ のモード径のファイバを入出力ファイバに用いることにより、マルチモード干渉信号が急峻となり、干渉の山と谷の変化量が明瞭に検出できる状況を確認した(図2)。エタノール水溶液の濃度変化(位相変化)に伴うスペクトルシフトを図3のように極めて敏感に捉えることができ、これより屈折率変化を測定できる。その結果、MMI 屈折率センサとして世界最高感

度を実現した。

(2) 共鳴波長の近赤外へのシフトを目的とした、金属種、および、構造に依存する表面プラズモン周波数変化の実験による評価と赤外化指針の明確化。

金属種として、従来よく用いられる金に加え、銅、および、白金をスパッタ法により、ファイバ上に形成し、その吸光度の波長依存性が、スパッタ条件により、どのように変化するかを調べた。その結果、銅において、金より大きな表面プラズモン共鳴を確認し、その膜厚の増大により、共鳴波長の長波長側へのシフトを確認した。一方、金においては、表面プラズモン共鳴とその共鳴波長がスパッタ条件や膜厚により、長波長側へ大きく広がって行く現象を実験的に確認し、近赤外の通信波長領域への拡大が可能であることを明らかにした。

塩化金酸水溶液を用いたクエン酸・タンニン酸還元法を利用し、金ナノ粒子径の作製制御を行い、作製した金ナノ粒子の粒子径に依存する局在表面プラズモン共鳴波長の近赤外領域への拡大とその特性評価を行った。

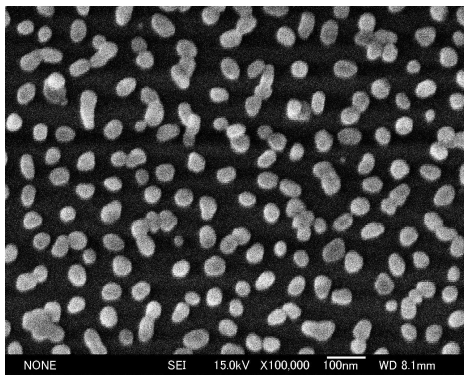


図4 製作した金ナノ粒子のSEM写真

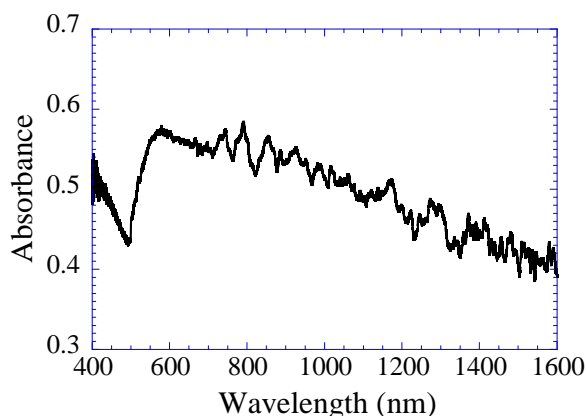


図5 金ナノ粒子付着ファイバの吸光スペクトル

金ナノ粒子の大きさ、形状制御により、局在表面プラズモン共鳴を光通信波長帯まで拡大できることを明らかにした。図4は製作した金ナノ粒子のSEM写真であり、これをファイバ上に形成し、ファイバの透過光強度測

定により求めた吸光度の波長依存性を図5に示す。金薄膜で通常現れる 550 nm 付近の吸光に加え、1600 nm 程度までに及び、吸光度のブロードな拡大が確認できる。

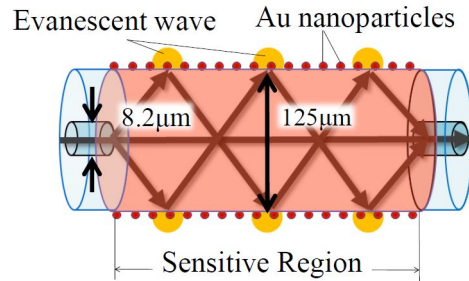


図6 金ナノ粒子を定着させたマルチモード干渉構造ファイバセンサの概念図

作製した光ファイバマルチモード干渉構造センサのセンサ部に赤外波長域まで共鳴波長が拡大する形状制御された金ナノ粒子を化学定着させ(図6),その透過光波形を評価した。純水とエタノールによるわずかな0.0266の屈折率変化に対し、金ナノ粒子の効果により、付着の無い場合に比べて約2倍の干渉波長の大きなシフトを観測し、金ナノ粒子による大きな位相シフトをマルチモード干渉手法により極めて高感度に検出できることを明らかにした。また、このことは、センサの超高感度化に向けた大きな可能性を示している。

スパッタ金属形成後の熱処理による構造変調および金属細線状構造の作製による共鳴波長の変化について調べた。

ファイバ表面にスパッタ法により金薄膜を形成し、その構造が熱処理によって形状変化し、それと共に共鳴波長がどのように変化するかを実験により調べた。スパッタ条件により、初期段階で金薄膜の微細構造に違いが発生することをSEM観察により確認し、その結果、表面プラズモン共鳴スペクトル形状に違いが起こることを明らかにした。これに熱処理を加えると、金薄膜の微細構造に変化が起こり、SEM画像より粒子性が顕著になることが確認でき、表面プラズモン共鳴スペクトルに粒子性に基づく特徴が強く現れてくることを明らかにした。

また、ファイバ表面に金ナノ粒子を選択的に配列させ、金属細線状構造を形成する技術開発を行った。透過光強度の測定より、吸光度評価を行い、形成した細線状構造やその密度によって局在表面プラズモン共鳴スペクトルの様子が明瞭に変化することを明らかにした。

### (3) 今後の展望

本研究成果は、光ファイバを利用した新しい検出方法による高感度センサの可能性を明らかにし、金属ナノ構造の制御により、利用波長域を大きく拡大でき、バイオや医療応用から産業応用まで広い適用領域が期待される。

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5件)

Hideki Fukano, Tomohiro Aiga and Shuji Taue, High-sensitivity fiber-optic refractive index sensor based on multimode interference using small-core single-mode fiber for biosensing, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 53, 2014, 04EL08, 1-4, (査読有). DOI:10.7567/JJAP.53.04EL08

Hideki Fukano, Takuya Hashimoto and Shuji Taue, Reflection-type optical fiber refractive-index sensor using a multimode interference structure with high sensitivity, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 53, 2014, 04EG05, 1-4, (査読有). DOI: 10.7567/JJAP.53.04EG05

Hiroyuki Daitoh, Shuji Taue and Hideki Fukano, Sensitivity Improvement of Optical Fiber Refractive Index Sensor with Multimode Interference Structure using Localized Surface Plasmon Resonance, Extended Abstracts of the 2013 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2013), pp. 238-239, 2013 (査読有). Takuya Hashimoto, Shuji Taue and Hideki Fukano, "High-Sensitivity, Short-Length Optical Fiber Refractive-Index Sensor using a Multimode Interference Structure with an End-Face Mirror", Extended Abstracts of the 2013 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2013), pp. 240-241, 2013 (査読有).

Tomohiro Aiga, Shuji Taue and Hideki Fukano, "High-Sensitivity Multimode Interference Refractive Index Sensor using Small-Core Single-Mode Fiber for Biosensing" Extended Abstracts of the 2013 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2013), pp. 828-829, 2013 (査読有).

[学会発表](計6件)

岡田崇慶, 田上周路, 深野秀樹, 銅薄膜を用いたSPR光ファイバ屈折率センサの検討, 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, 2013.9.18, 福岡工業大学

松本義輝, 深野秀樹, 田上周路, マルチモード干渉光ファイバ屈折率センサの長尺化による感度の向上, The 14th IEEE Hiroshima Student Symposium, 2012年11月17日, 18日, 岡山県立大学

大藤浩之, 田上周路, 深野秀樹, マルチ

モード干渉と局在表面プラズモン共鳴を利用した光ファイバ屈折率センサの検討, 第73回応用物理学会学術講演会, 2012.9.13, 愛媛大学・松山大学

[その他]

ホームページ等

<http://www.opt.ec.okayama-u.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

深野 秀樹 (FUKANO HIDEKI)  
岡山大学・大学院自然科学研究科・教授  
研究者番号: 60532992

(2)研究分担者

鶴田 健二 (TSURUTA KENJI)  
岡山大学・大学院自然科学研究科・教授  
研究者番号: 00304329

田上 周路 (TAUE SYUJI)

岡山大学・大学院自然科学研究科・助教  
研究者番号: 80420503