

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 9 月 30 日現在

機関番号：32690

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24510126

研究課題名(和文) フェムト秒レーザー加工を利用した光ファイバ導波路に対するセンサ機能の埋め込み

研究課題名(英文) Sensing function embedded in optical fiber using Femto-second laser processing

研究代表者

渡辺 一弘 (Kazuhiro, WATANABE)

創価大学・工学部・教授

研究者番号：40240478

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではフェムト(10の15乗分の1秒)という短い時間に強度の高いレーザーを光ファイバ内に照射し、熱的影響によるガラスの破壊を極力抑制し、内部に微細加工を施すことにより、光ファイバにこれまでにないセンサとしての機能を埋め込もうとするものである。内部加工は直径125 μmの細い光ファイバに行われるが、(1)内部に空孔のみを生成させたり、または(2)数μm直径の極めて細かい貫通穴(穿孔：せんこう)を作りこむことによって、特徴的なセンシングを可能としている。これにより、空孔配置によって光ファイバの曲げ方向を検知、また穿孔加工では試料となる溶液を導入することで微小容量の分光センシング機能を実現できた。

研究成果の概要(英文)：Novel sensing functions have been successfully embedded in a single mode optical fiber by means of femto-second, ultra short pulse laser material processing. A single laser pulse was focused on a thin optical fiber to produce an array of voids (macro cavity) in the close vicinity of core/cladding boundary region in the optical fiber. It has been found that such voids array plays an important role to create information how to know the direction of bending. A pulse train of 1-kHz femto-second laser was used to produce a very thin drilling hole which transversely penetrated a cylindrical structure of optical fiber with a hole diameter of a few micro-meters. It has been interestingly shown that such thin drilling holes provide us with an in-line optical fiber spectroscopic sensing function which might be a very viable technique to enable spectroscopic analysis by means of a pico-litter sampling.

研究分野：レーザー工学、光電子工学、光ファイバセンシング

キーワード：フェムト秒レーザー加工 量子ビーム産業応用 光ファイバセンサ

1. 研究開始当初の背景

レーザによる加工技術は、レーザ応用の代表的な例の一つであり、実際に切断や溶接、穴あけ等の産業的な加工が実現されてきている。このレーザ加工は、近年のフェムト秒レーザの登場により新たな局面を迎えている。フェムト秒レーザはその名が示す通り、フェムト秒 (10^{-15} s) オーダーという極短パルス幅の超高強度パルスを発振することが可能なレーザであり、これまでのレーザ加工とは一線を画した加工が実現されてきている。フェムト秒レーザによる加工では、フェムト秒オーダーでエネルギーが注入されることから、周囲への熱拡散が極端に小さくなり、熱による変形がほとんど無視される“非熱加工”が可能になる()。このとき得られる加工形状は、熱による歪みや溶融部を持たない均一な形状となる。また、高強度なビームを利用することで、多光子吸収を誘起し、透明材料の内部のみを選択的に加工することも可能である()。一方で、透明材料内部加工はナノ秒レーザでも可能であり、実際に申請者はこれまで、ナノ秒レーザの内部加工を利用した個人認証手法を提案し()実用性を示してきた()。一方で、これまで申請者はヘテロコア光ファイバを提案し開発を行ってきた。このセンサーは、図 1(a)に示すようにコア径の異なる二つのファイバを融着した構造を持ち、ヘテロコア部より意図的にコア内伝送光を外側へ漏洩させる。ヘテロコア部への曲げにより光が漏洩することを利用した圧力センサや()、図 2(a)のようにクラッド周囲に金属薄膜を蒸着することでプラズモン効果を誘起し、外部の液体などを検知する化学センサ()を開発してきた。このセンサを製品として量産するためには、作製過程の2度の切断と2度の融着といった接触加工を回避し、非接触で内部に等価の効果を生じるメカニズムを埋め込むことが望まれる。

2. 研究の目的

フェムト秒レーザによる内部加工と穿孔加工を利用することによって通信用光ファイバに対してセンサ機能を埋め込むことを目的とする。具体的には、光ファイバコア近傍にミクロンオーダーの微小空孔または穿孔を造り込み近傍を通過する光の散乱およびプラズモン効果を誘起させて、コア内の伝送光にアクセスする方式を検証する。従来のものは周期的な屈折率変化による光の干渉を用いているが、本方式は温度依存性がなく、構成が極めて簡便で実用的にできることが大きな特長となる。

これまでできなかった、力・圧力の方向といった物理量の検知、また周囲の液体・気体の検出を速い応答速度で実現できる。導波光に与える影響は内部に作製する微小空孔の配列に依存すると考えられ、配列部に曲率

が与えられた場合にその構造が変化し内部を透過してくる光の強度も変化する。フェムト秒レーザの応用では、長周期ファイバグレーティングが例として挙げられるがあり、これは光学的フィルタとして作用しスペクトル計測により測定を行うものである。

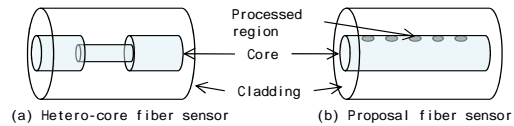


図1 ヘテロコア光ファイバセンサ及び提案センサの構造

これに対して、図 1(b)のようなファイバの軸に対して非対称な構造を作製することでコア内部の伝送光が散乱され、曲げ方向が変わると構造体異なる変化をするため透過光強度に変化が生じると考えられる。これにより、従来のセンサでは検知が不可能であった曲げ方向をも検知することが可能となる。一方、穿孔加工を利用したファイバセンサの開発も行う。図 2(b)が開発するセンサの構成図である。ファイバのクラッド部表面からファイバの中心に向けてコア部周辺まで穿孔加工する。この穿孔部の壁面部に対してスパッタリングによって金属薄膜を形成することで、コア内の伝送光のプラズモン効果を誘起することが可能となる。

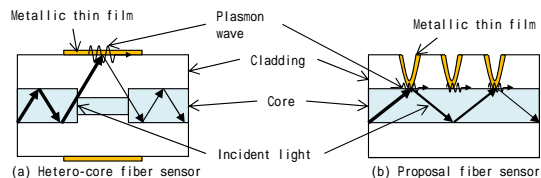


図2 プラズモン効果を利用したヘテロコアファイバセンサと提案センサの概念図

3. 研究の方法

本研究では 内部加工を利用した物理センサと、穿孔加工を利用した液体・気体センサの2つの開発を平行して行う。

では内部加工による空孔配列とセンサ応答の関係性を明らかにする。まず、空孔配列を直線的な配列に固定をし、空孔のサイズ、配列の長さを変化させることによる、センサの性能を確認する。その後、散乱による損失と曲げによる変化が最適となる空孔サイズ、配列長、配列構造を検討する。物理センサでは、まず、基本的な空孔配列として空孔を直線的に配置した配列におけるセンサ応答について検証する。これまでの研究により直線状に空孔を配置することで、センサ部に加わる力の方向を検知する

ことが確認されているが、配列の長さや空孔のサイズを固定しており十分な解析が行われていない。そこで、空孔作製時のパルス数を変化させることで空孔のサイズを制御し、加工数を増減させることで配列の長さを変化させることで最適な直線的な配列の最適化を試みる。

では穿孔配列と薄膜の条件がセンサの性能に与える影響について明らかにする。液体・気体センサの中では、穿孔加工の形状を検討する。穿孔部の形状が小さい場合、表面張力により液体が入り込まず、液体検知は不可能となる。穿孔部を広げるとセンサの強度に影響を与えることが予想される。これまでの研究により穿孔部の形状は集光条件によって変化することが分かっている。そこで、複数の集光レンズを用いて加工を行い、それぞれのレンズにおける加工形状を観察する。これにより液体・気体の検知を可能とする穿孔加工の加工条件を明らかにする。まず、照射条件による穿孔加工部の形状を確認し、気体・液体を検知可能な穿孔加工を実現する。また、金薄膜を蒸着した穿孔部を配列し、検知に必要な加工数を明らかにする。その後、プラズモン効果を効率よく誘起するための膜厚、薄膜金属、などの最適条件の検索を行う。またマルチモードファイバの導入による多波長計測も試みる。

4. 研究成果

本研究ではフェムト (10^{-15} 秒) という短い時間に強度の高いレーザを光ファイバ内に照射し、熱的影響によるガラスの破壊を極力抑制し、内部に微細加工を施すことにより、光ファイバにこれまでにないセンサとしての機能を埋め込もうとするものである。内部加工は直径 125 μm の細い光ファイバに行われるが、(1) 内部に空孔のみを生成させたり、または (2) 数 μm 直径の極めて細かい貫通穴 (穿孔: せんこう) を作りこむことによって、特徴的なセンシングを可能としている。これにより、空孔配置によって光ファイバの曲げ方向を検知、また穿孔加工では試料となる溶液を導入することで微小容量の分光センシング機能を実現できた。

(1) では、シングルモード光ファイバに対してフェムト秒レーザ内部空孔加工を起さない、空孔による散乱光損失を制御し、光ファイバの屈曲方向を検知できる機能をはじめて実現した。空孔化領域の空孔の配列方法 (挿入長、挿入損失、空孔の配列間隔、空孔の埋込深さ等) を調整することによって、屈曲時のセンサ感度 (dB/mm) や感度特性を調整することが確認できた。また、有限要素法を用いた数値解析によって、理論モデルを

構築し、実験結果に非常に近い解析モデルの条件を明らかにすることができた。さらには、イラン工科大学のモハメッド教授との共同研究にゆかり、空孔生成過程モデルを構築した。

当初の研究目的では、穿孔加工の内部に金属薄膜を形成しそれによるプラズモン共鳴現象を実現しようとして、これまでに短波長側 (450nm) 近傍でプラズモンを励起したと思われる共鳴 SPR スペクトルを確認したが、相互作用長が不足し明確なプラズモン共鳴現象と確定するに至らなかった。相互作用長を長くする試みとして、穿孔を長く貫通させる加工を繰り返し続けた。その過程の成果として両側から穿孔加工をすれば、うまく貫通穿孔加工ができることに到達した。この成果を利用して、その貫通孔に試料となる溶液を容易に導入することができた。その結果光ファイバライン上に微小分光セルが出来上がった。その微小セルに光を導光して分光実験を実行した結果、見事に分光分析センシング機能の埋め込みが実現できた。図 3 (a) は、一つの貫通穿孔セルを用いてローダミン 6G と R110 色素を分光した結果である。

また、貫通穿孔内部表面の観察から、今後内部表面に多数の金属コロイドを固定化して局在プラズモン励起を誘起できないかという新たな研究の方向性を見出した。

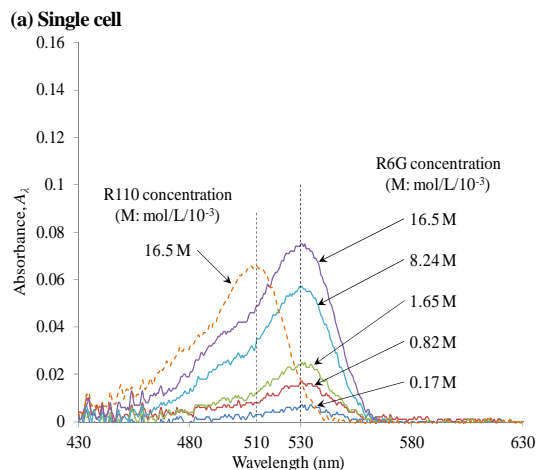


図 3 色素ローダミン 6G と 110 の吸収スペクトル

引用文献

- C. Mommaa et al. *Optics Communications* 1996;129:134-142
- W. Watanabe et al. *Optics Express* 2002;10:603-608
- 時田, 渡辺 他. *レーザー研究*. 2007;35:259-264
- 時田, 渡辺 他. *計測自動制御学会産業論文集*. 2009;8:17-24

K. Watanabe et al. IEICE TRANS. ELECTRON. 2000;E83:309-314
M. Iga, A. Seki, K. Watanabe. Sensor and Actuators B. 2005;106:363-368

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

Kenji GOYA, Toshiaki ITOH, Atsushi SEKI and Kazuhiro WATANABE, Efficient deep-hole drilling by a femtosecond, 400 nm second harmonic Ti:sapphire laser for a fiber optic in-line/pico-liter spectrometer、査読有、Sensors and Actuators: B. Chemical, Vol.210, pp.685-691, 2015.

Takaaki FUJII, Kenji GOYA and Kazuhiro WATANABE, Femtosecond Laser Micromachining in an Optical Fiber for Bending Direction Sensor, 査読無, International Symposium on Smart Sensing and Actuator System 2014 (ISSS2014). 2014.8. Busan (Korea). Proceedings of the 2014 ISSS : pp.50-52

Toshiaki ITO, Kenji GOYA and Kazuhiro WATANABE, Fabrication of through-hole array by means of femtosecond laser pulses for spectroscopic measurements, 査読無, International Symposium on Smart Sensing and Actuator System 2014 (ISSS2014). 2014. . Busan (Korea). Proceedings of the 2014 ISSS : pp.53-55

〔学会発表〕(計5件)

合谷賢治, 伊藤俊明, 関篤志, 渡辺一弘, フェムト秒レーザー加工による貫通孔配列を応用した光ファイバインラインスペクトル測定、光ファイバ応用技術研究会(OFT).2014年5月.山形. 信学技報, vol. 114, no. 64, OFT2014-13 : pp. 61-64

Kenji GOYA, Toshiaki ITOH, Atsushi SEKI and Kazuhiro WATANABE. (Poster session), A through-hole array on optical fibers fabricated by 1-kHz/400-nm femtosecond laser pulses for an in-line/pico-liter spectrometer design.EUROSENSORS 2014, the XXVIII edition of the conference series. 2014年9月. Brescia (Italy). Procedia Engineering B4P-E06-5074.

合谷賢治, 伊藤俊明, 関篤志, 渡辺一弘, フェムト秒レーザー加工を利用した光ファイバへのインライン分光セルの配列とセンサ性能評価, レーザー学会学術講演第35回年次大会.2015年1月.東京.同講演会論文集 12aI03.

藤井隆明, 合谷賢治, 渡辺一弘, 光ファイバ応用のためのフェムト秒レーザー誘起空洞化領域の有限要素法(FEM)解析, レーザー学会学術講演第35回年次大会.2015年1月.東京.同講演会論文集 12aI04.

合谷賢治, 伊藤俊明, 関篤志, 渡辺一弘, 第二高調波400nm近紫外フェムト秒レーザー加工を利用した光ファイバ導波路への分光セルの埋め込み(理論モデルによる吸光度特性の解析), 光ファイバ応用技術研究会.2015年2月.鹿児島.信学技報, vol. 114, no. 452, OFT2014-62 : pp. 27-32.

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: 光ファイバセンサ及びその製造方法
発明者: 渡辺一弘, 関篤志, 合谷賢治, 伊藤俊明
権利者: 創価大学
種類: 特許
番号: 特願 2014-43340
出願年月日: 2015年3月5日
国内外の別: 国内

取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等
<http://www.t.soka.ac.jp/~watanabe/>
<http://www.soka-span-project.jp/modules/whatnew/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡辺一弘 (WATANABE Kazuhiro)
創価大学・工学部・教授
研究者番号: 40240478