

高温下の歪み測定用の 光ファイバファブリ・ペローセンサ

ラオ・ユンチアン、ラン・ゼンリン

157nmレーザ微細加工システムを用いてシリコンまたはサファイアファイバを直接書き込みする非常に正確なマイクロ光ファイバファブリ・ペロー干渉測定(MFFPI)センサは苛酷環境の測定に適している。

中国電子科学技術大学(University of Electronic Science & Technology of China)のわれわれのグループとウーシ・チェンジャン・オブティカルファイバセンシングテクノロジー(WuXi Cheng-Dian Optical Fiber Sensing Technology)は、特注設計した157nmエキシマレーザ微細加工システムを使用して、一連の新しいマイクロ光ファイバファブリ・ペロー干渉測定(MFFPI)センサを開発した。これらのマイクロ光ファイバセンサは高品質インライン方式のファブリ・ペロー(F・P)エタロンをシリコンまたはサファイアファイバ内部に形成できるため、超小型、自己温度補償、高温(>300℃)耐性、遠隔測定距離(>10km)などの優れた多数の利点が得られ、大量生産も行うことができる。これらのセンサは苛酷環境における歪み、圧力、屈折率、温度および加速度を容易に測定できる。

歪み測定

苛酷環境センサ、とくに耐高温性のセンサは、実験力学、航空学、計測工学、採掘穴の石油/ガスセンシングなどの多数の応用がある。しかしながら、これらのセンサは製作が非常に難しい。高温環境下での電気センサの使用は、高温下での短寿命、非線形歪み、電磁干渉(EMI)に対する感受性、限られる温度範囲、限定される測定距離な

どの電子デバイスの欠点に囲まれる⁽¹⁾。光ファイバセンサはEMIに対する不感受性、高温耐性、より長い遠隔測定距離などの多数の利点をもつため、これらの欠点を克服できる。

高温センサに使われる光ファイバは、一般に、優れた高温安定性をもつシリカまたはサファイアファイバが使われる。とはいえながら、光ファイバに良好な高温耐性を付与することは容易でない。ファイバブラッググレーティング(FBG)とF・Pの干渉測定センサは商品化が成功しているが、紫外(UV)レーザを照射して書き込みをしたFBGセンサは>300℃になると長期安定性が悪くなる⁽²⁾。また、温度無依存光ファイバF・Pセンサは高温の用途に適していると考えられるが、これらのデバイスは、一般に、苛酷環境では壊れやすい多数の光部品から構成されている。

光ファイバセンサの製作に成功するには3つの判定基準を満足しなければならない。第1に、正規の高温センサはすべてがファイバから構成され、分割された部品のない小型で一体構造のデバイスとして集積されなければならない。シリカやサファイアの光ファイバは広帯域ギャップ材料であるため、従来の方法を用いて全ファイバ方式のインラインセンサを精密に製作することは非常に難しい。第2に、このデバイスは1000℃までの温度を自動的に補償

する必要がある。第3に、このセンサは優れた再現性と低いコストでの量産が必要になるが、このことの実現は従来の人手による組み立てでは不可能に近い。

われわれのチームは特注設計の157nmレーザ微細加工システムを使用し、集積度の非常に高いF・Pをファイバ上に直接製作して、これらの問題を解決した(図1)。われわれは157nmの光吸収係数が約20000cm⁻¹と非常に高いことを見いだした。このことを利用して、シリカおよびサファイアファイバの高品質冷却加工を可能にした⁽⁶⁾。レーザ微細加工システムは157nmパルスレーザ、25分の1の縮小率をもつ集光システムおよび書き込み用ファイバを搭載する精密移動台から構成した。157nmレーザの最大単一パルスエネルギー、パルス幅および繰返し速度は、それぞれ35mJ、15nsおよび50Hzであった。

二つのセンサ方式

157nm微細加工システムを使用して、第一の方式のMFFPIセンサを製作した。このセンサは標準サイズが数十ミクロンのシリカファイバの内部に微細な矩形ノッチ構造を持つ。書き込みをするノッチの25倍の大きさをもつ矩形鋼板マスクを通して、157nmレーザビームをファイバに投影する。ファイバ内部に製作されるノッチは二つの平滑で平行な反射界面をもつF・P干渉測定共振器を形成する。約26dBまでのすぐれたコントラストのフリッジが得られ、800℃までの高温下の精密歪

み測定が実現できることを実証した(図2)。

このセンサは共振器長の振動の変化を測定し、 $\varepsilon = \Delta L/L$ の式にもとづいて歪みを測定する。ここで、 L と ΔL はそれぞれ共振器長と共振器長に対する変化を示している。より重要なことは、このセンサが独自の共振器構造にもとづいて、温度を自己補償する独自の特徴をもつことにある。ファイバコアは空気ギャップのために長さ方向に自由に動くため、ファイバコアの熱膨張は共振器長の減少をもたらす。一方で、ファイバクラッドはレーザアブレーション後も存在するため、ファイバクラッドの熱膨張は共振器長の増加を引き起こす。その結果、増加と減少の二つの効果は温度の変化とともに相殺される。

第二の方式のMFFPIセンサは、その自己封止共振器構造によって、高温、歪み、圧力および屈折率を測定できるセンサの製作が可能になる^{(7), (8)}。自己封止MFFPI共振器を製作するために、まず、レーザ微細加工を用いて、数十マイクロメートルの標準深さと直径をもつ円形マイクロホールをへき開した光ファイバのチップに形成する(図3)。

次に、最初のファイバともう一つのへき開ファイバ(歪みセンサとして使用する)を融着接続し、MFFPI共振器を形成して封入する。このマイクロエタロンはロバスト性、安定性および信頼性のある製法を確保できるため、800℃までの温度で動作する。このデバイスもエタロンの中空構造とシリカの超低熱膨張係数によって、温度変化に対する無依存性が得られる。

このセンサは圧力、温度および屈折率測定的能力を付加するために、空気を充填したF・P共振器の近傍のファイバを精密にへき開して、圧力ダイヤフラム(マイクロメートルのサイズ)を形

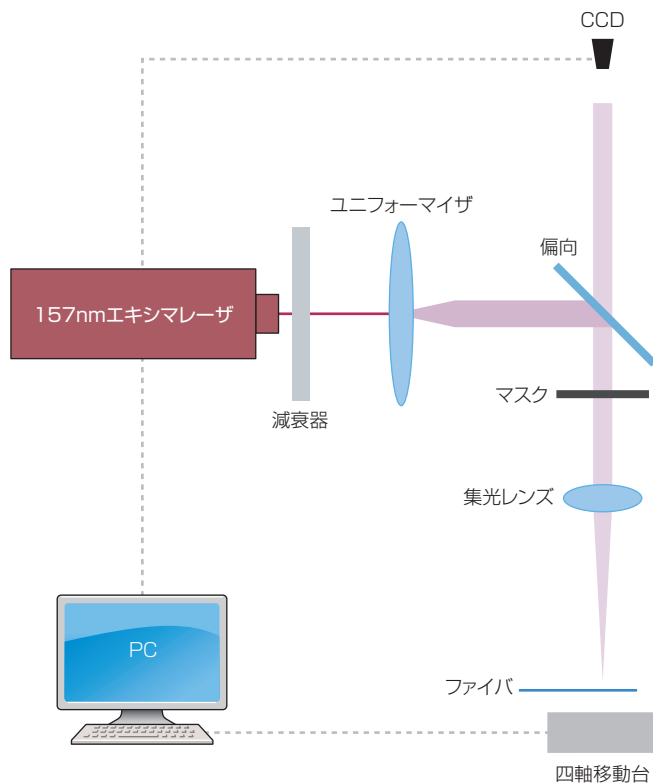


図1 157nmエキシマレーザを用いる微細加工システム概念図を示している。(資料提供:いずれの図も中国電子科学技術大学)

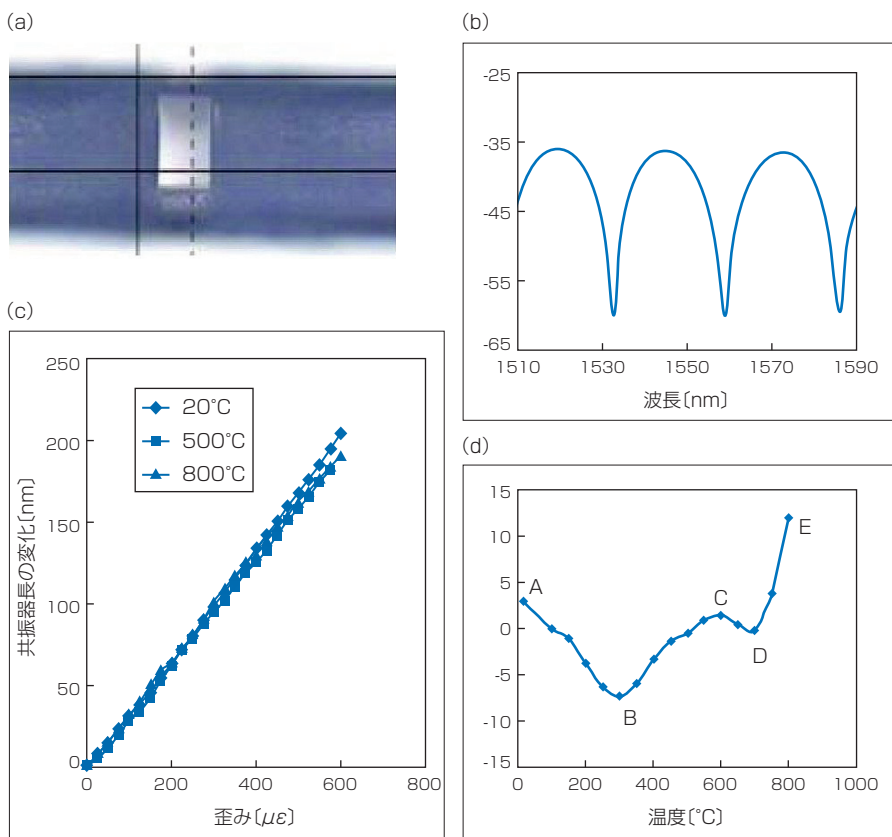


図2 マイクロファブリ・ペロー干渉測定(MFFPI)センサのSEM写真を示している(a)。その反射スペクトル(b)、歪み特性(c)、温度応答(d)が温度を変えて図示されている。

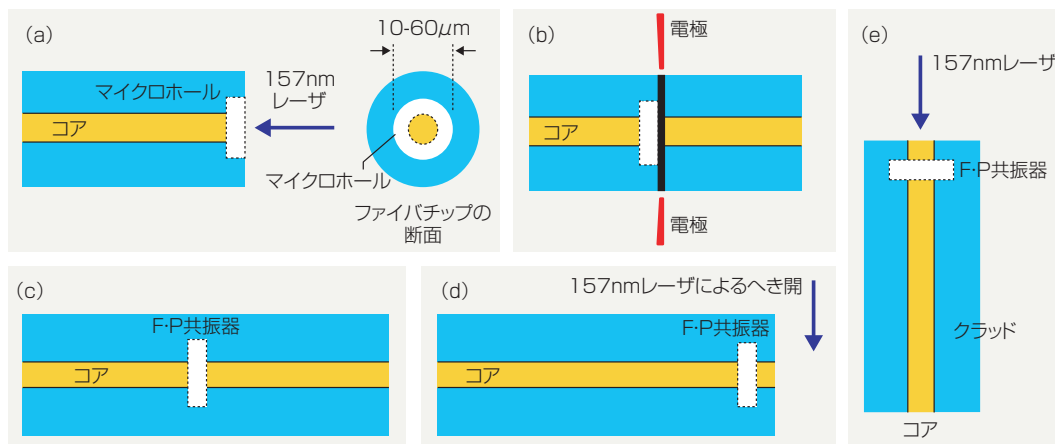


図3 自己封止光ファイバ光ファイバF・Pインタインエタロンの製作工程は、まず157nmレーザーを用いてファイバチップを製作する(a)。このファイバはもう1つのファイバとアーク放電を用いて融着接続され(b)、F・Pエタロン(歪みセンサ)が完成する(c)。次に、ファイバは空気共振器の近傍でへき開されて、完全な圧力、温度、歪みおよび屈折率センサになる(d)。最後に、加速度センサが製作される(e)。

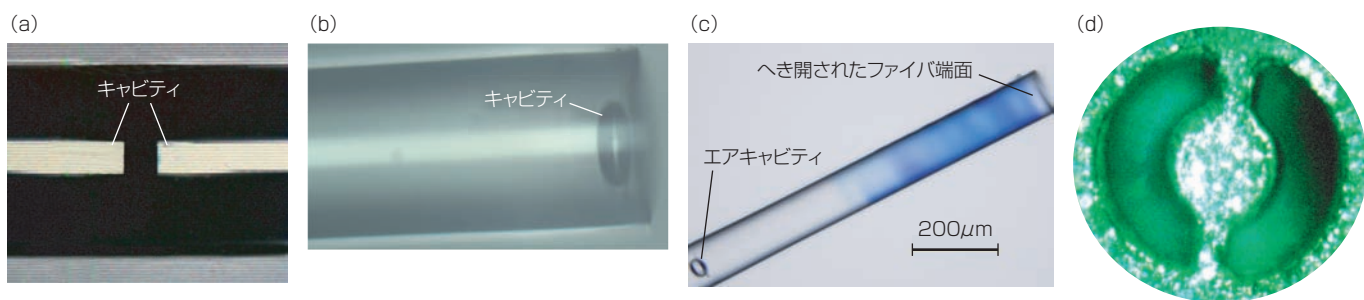


図4 封止F・P共振器にもとづく歪みセンサ(a)、圧力センサ(b)、屈折率および温度センサ(c)の写真を示している。加速度センサの上面も示している(d)。

成する。このダイヤフラムは平坦かつほとんど均一な厚みをもつため、 ΔP の圧力下の中心における偏向 ΔL は、 $\Delta L = 3(1-\mu^2)R^4\Delta P/16Eh^3$ により計算できる。ここで、 L 、 R および h はそれぞれ共振器長、ダイヤフラムの半径および厚みを、 E はヤング率、 μ はポアソン比を示す。

空気共振器に近いファイバをより広い間隔(100 μ m以上)でへき開して基本F・P干渉計を形成すると、屈折率と温度を同時に監視するセンサが得られる。この共振器には空気共振器とそれよりもはるかに長い固体の基本F・P干渉計(IFPI)がある。このセンサヘッドを使用してIFPIの干渉縞コントラストと光路長差を測定すると、屈折率と温度をそれぞれ求めることができる。

さらに、特注のマスクパターンを用いてへき開したファイバ端面の微細加工を反復すると、加速度センサを構成

できる(図4)^{(9)~(11)}。このセンサは二重固定加速度センシング構造をもつため、ファイバ端面に垂直方向の加速度に対する感度が得られる。共振器長の変化は加速が誘起するセンシング機構の運動により駆動される。

これらのF・Pセンサは従来の光ファ

イバセンサに比べると、直接加工、低コストの量産、良好な再現性、優れた性能、高温安定性などの数多くの利点が見られるため、歪み、圧力および屈折率を高温で正確に測定する多数の用途をもつ新世代の光ファイバセンサの構築が可能になる。

参考文献

- (1) A.C.R. Grayson et al., Proc. IEEE, 92, 1, 6-21(2004).
- (2) Y.J. Rao, Meas. Sci. & Technol., 8, 355(1997).
- (3) A.D. Kersey et al., Opt. Comm., 45, 71(1983).
- (4) Y.J. Rao, Optical Fiber Technol., 12, 227-237(2006).
- (5) T.W. Kao and H.F. Tayler, Opt. Lett., 21, 8, 615-617(1996).
- (6) Z.L. Ran et al., Opt. Lett., 32, 21, 3071-3073(Nov. 1, 2007).
- (7) Y.J. Rao et al., Opt. Expr. 15, 22, 14936-14941(Oct. 29, 2007).
- (8) Z.L. Ran et al., Opt. Expr. 16, 3, 2252-2263(2008).
- (9) Z.L. Ran et al., J. Lightwave Technol., 27, 15, 3143-3149(Aug. 1, 2009).
- (10) Z. Ran et al., IEEE Sensors Journal, 11, 5, 1103-1106(2010).
- (11) Z. Ran et al., 21st Intl. Conf. on Optical Fiber Sensors (OFS-21), Ottawa, ON, Canada, papers 7753-109, 7753-113, and 7753-114(May 2011).

著者紹介

ラオ・ユンチアン(Yun-Jiang Rao, e-mail: yjrao@uestc.edu.cn)は中国電子科学技術大学(University of Electronic Science & Technology of China, www.uestc.edu.cn)光ファイバセンシング&通信研究センターの副所長、ラン・ゼンリン(Zeng-Ling Ran)はウーシ・チェンジャン・オプティカルファイバセンシングテクノロジー(WuXi ChengDian Optical Fiber Sensing Technology Co. Ltd., www.dcopts.com)のCEO。