

スリーブ型極細光ファイバー式圧力センサの開発

Development of sleeve type fine optical fiber pressure sensor

高橋 幸郎¹, 市川世司²

Kohro Takahashi¹, Seiji Ichikawa²

¹埼玉大学 電気電子システム工学科

Department of Electric and Electronics systems, Faculty of Engineering, Saitama University

²埼玉大学 地域共同センター

Cooperative Research Center, Saitama University

1. はじめに

光ファイバー式圧力センサは、光ファイバーの先端に取り付けたダイヤフラムによって圧力を光信号へと変換するものである。圧電性素子を用いたセンサに比べて小型化が可能であることに加え、電気信号を用いていないので、電磁波による他の機器への干渉や生体への感電の危険性がない。また、バッチ製造によって一度に多数製作することができ、安価であるため使い捨てが可能となるなどのメリットがある^{1,2)}。

微細な光ファイバーの先端にダイヤフラムを装着するには、位置や角度を正確に合わせる事が困難であるが、我々はすでに、装着の際のガイドとして機能するスリーブ（円筒）構造を有するダイヤフラムを形成し、光ファイバーへの装着を簡単化し、スリーブと一体構造としたダイヤフラムを光ファイバー側面で固定することで接合面積を増やし、その信頼性を高めることが可能となるプロセスを報告した。しかし、我々が報告したスリーブ構造を有する圧力センサは、スリーブ構造を形成するためのエッチング工程で発生したエッチング残渣などの影響により、光出力が極端に小さいことが問題点とされていた。本稿では、光出力を高くするためにエッチング工程で生じた残渣がセンサの性能に悪影響を与えたと考えられるため、残渣の発生が最小限となる条件を最適化し、センサの動作を確認した。

2. 圧力センサの開発

2. 1 原理

図1に光ファイバー圧力センサの動作原理を示す。

光ファイバーの終端はハーフミラー処理が施されている。ダイヤフラムは全反射ミラーとして働き、これら2つのミラーによってFabry-Perot干渉計が構成される。光ファイバーの別の終端から光を挿入すると、光の一部はハーフミラーで反射し、残りはハーフミラーを透過した後、全反射ミラーで反射し、再び光ファイバーへ戻る。

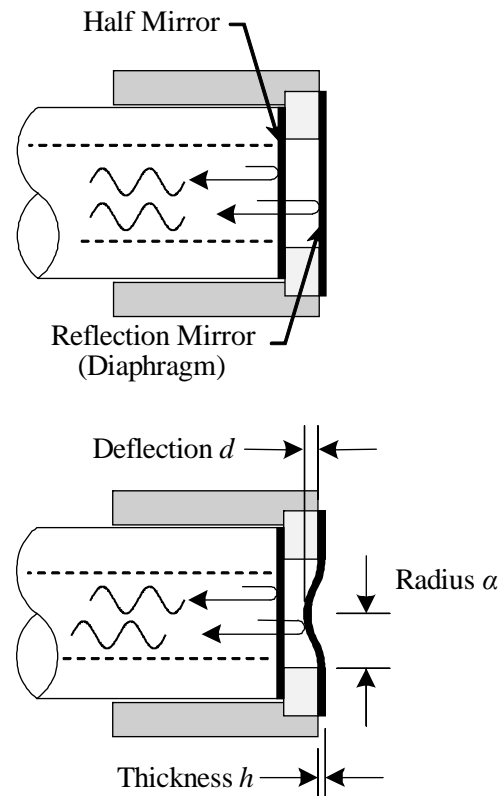


図1 動作原理
Fig.1 Working principle.

〒338-8570

さいたま市桜区下大久保255

電話：048-858-3479

Email: takahasi@elc.ees.saitama-u.ac.jp

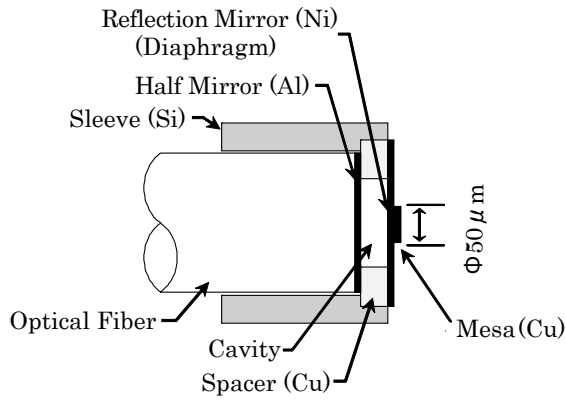


図2 圧力センサの構造
Fig.2 Structure of pressure sensor.

この2つの反射光は光路差の違いによって干渉を起こす。また、圧力に対するダイヤフラムのたわみによって光路差は変化する。したがって、干渉光の強度を測定することによって、圧力を求めることができる。

2. 2 構造と設計

図2に提案する圧力センサの構造を示す。直径 125μm の光ファイバーの先端にダイヤフラムを正確に接着できるように、接着の際のガイドとしてダイヤフラムの外側に円筒状のスリーブ構造を設けた。ダイヤフラム部は、全反射ミラーとして機能するダイヤフラムとスペーサー及びスリーブからなる。スリーブの外径は約 200μm である。また、ダイヤフラムに 50μm の剛体を取り付けることでダイヤフラムが凸型にたわむことを抑制した。ダイヤフラムに剛体を付加した場合、印加される圧力とダイヤフラムのたわみの関係は、式1で表される³⁾。

$$w_0 = \frac{3Pa^4(1-\nu^2)}{16Eh^3} \left(1 - \frac{b^4}{a^4} + 4 \frac{b^2}{a^2} \ln \frac{b}{a} \right) \quad (1)$$

ここで、 w_0 はダイヤフラムの変位量、 h はダイヤフラムの膜厚、 P は圧力、 E は素材のヤング率、 ν は素材のポアソン比、 a はダイヤフラムの半径、 b はメサの半径である。提案する圧力センサの仕様として、ヒトの血圧を最大 200mmHg と考え、圧力を 0 から 200mmHg まで変化した場合に干渉光強度が最小値から最大値まで変化するようなセンサとした。また、参照光には波長 1310nm のレーザーダイオードを使用するものとする。2つの反射光の位相のずれはダイヤフラムの変位の2倍に等しく、圧力 200mmHg のときのそれが参照光の半波長分に等しければよい。したがって、 $P=200[\text{mmHg}]$ 、 $w_0=325[\text{nm}]$ となる。式1からダイヤフラムの膜厚を計算すると、 $h=2850[\text{Å}]$ となる。

2. 3 作製プロセス

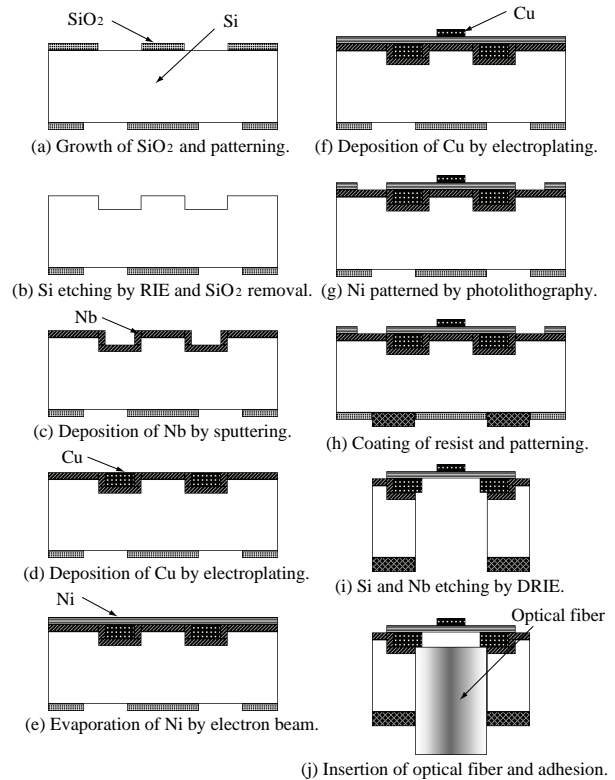


図3 作製プロセス
Fig.3 Fabrication process.

スリーブ構造およびスペーサーを持つダイヤフラムは、シリコン微細加工技術を用いて作製した。図3にダイヤフラム部の作製プロセスを示す。

- (a) 厚さ 200μm の Si 基板の表裏両面に熱酸化により酸化膜を形成し、レジストを塗布した後、両面のマスク合わせをして同心円状にパターニングを行う。
- (b) 表面にスペーサーとなる Cu を堆積させるために RIE を用いて 5μm の溝をエッチングした後、酸化膜を取り除く。
- (c) 電気めっきのシード層として、スパッタ法を用いて表面に Nb を成膜する。
- (d) スペーサーを形成するために、電気めっきを用いて Cu を堆積させる。
- (e) ダイヤフラムとして働く Ni を電子ビーム蒸着によって成膜する。
- (f) ダイヤフラムのメサを形成するために、電気めっきを用いて Cu を堆積させる。
- (g) センサを切り離すために Ni をパターニングする。
- (h) 裏面にプラズマ耐性のあるレジストを塗布し、パターニングを行う。
- (i) 基板の裏側から最適化された条件によりスリーブ構造を形成する。
- (j) 終端にハーフミラー処理を施した光ファイバーを、スリーブに沿って挿入し、紫外線硬化樹脂をスリーブと光ファイバーの境界部分に塗布した後、紫外線を照射して接着を行う。

3. DRIE によるスリーブ構造の形成

スリーブ構造の形成には、Robert Bosch によるプロセスを適用した（以下 Bosch プロセス）。Bosch プロセスは、エッチングターンと側壁の保護ターンを交互に行うことにより高異方性、高エッチングレートを達成できる。

我々がすでに報告した圧力センサのエッチング条件とそのダイヤフラムの SEM 写真を表 1 と図 4 に示す。図 4（左）は厚さ 400 μm の Si 基板でテストした写真であり、図 4（右）は表 4 の条件で得られたセンサのダイヤフラム面の写真である。図 4（左）に示すようにアンダーカットのないスリーブ構造が形成されているがニードル状のエッチング残渣が発生している。このようなエッチング残渣は、イオン衝撃によってスパッタされたマスク材料や埃などがマイクロマスクとなることにより発生すると報告されている⁴⁾。図 4（右）に示すようにエッチング残渣がダイヤフラム上にある場合、光ファイバーから照射される光がエッチング残渣により拡散および乱反射されることにより、反射率の低下を招く原因となる。

表 2 に最適化したエッチング条件、図 5 にその条件で製作したスリーブ構造とダイヤフラムを示す。Bosch プロセスのエッチングステップを支配的とした。わずかなサイドエッチングを起こすことによりエッチング残渣の発生を抑制し、

表 1 エッチング条件
Tab.1 Etching condition

	SF ₆	C ₄ F ₈
Gas flow	30 sccm	10 sccm
ICP power	100 W	100 W
Bias power	100 W	100 W
Time	8 sec	12 sec
Temperature	20°C	
Total time	120 min	

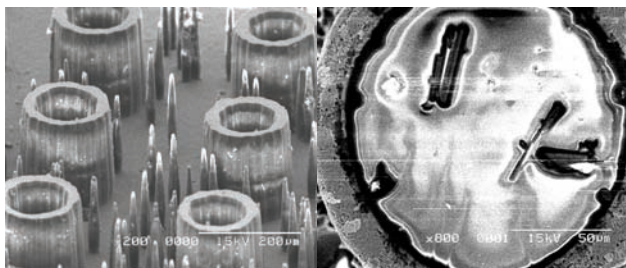


図 4 スリーブ構造とそのダイヤフラムの内表面
Fig. 4 The sleeve structure and inner surface of diaphragm.

表 2 エッチング条件
Tab.2 Etching condition

	SF ₆	C ₄ F ₈
Gas flow	100 sccm	20 sccm
ICP power	500 W	500 W
Bias power	10 W	0 W
Time	12 sec	8 sec
Temperature	20°C	
Total time	90 min	

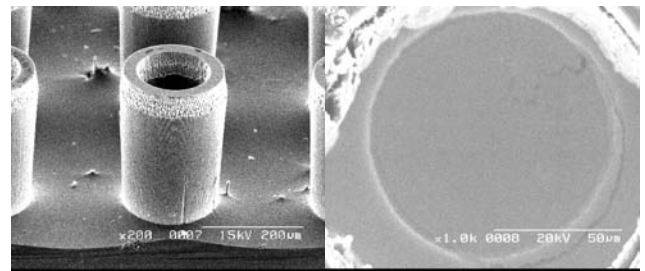


図 5 スリーブ構造とそのダイヤフラムの内表面
Fig. 5 The sleeve structure and inner surface of diaphragm.

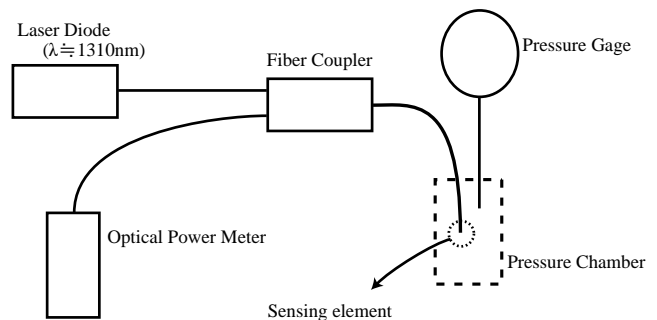


図 6 測定系
Fig.6 Measurement system.

センサのダイヤフラム面においてもエッチング残渣が発生していないことが確認できる。また、Bias power を小さくすることによりイオン衝撃によるスパッタ効果を抑制することにより、荒れのない綺麗な反射面が得られた。

4. 測定結果

図 6 に圧力センサの測定系を示す。参照光の波長は、1310nm である。LED 光源から出た参照光は、まずフォトカプラを経由して圧力チャンパー内のセンシング部に達する。センシング部において、光はハーフミラーおよび全反射ミラーで反射し、もと来たファイバー内を戻り、再びフォトカプラを経由して光パワーメータ

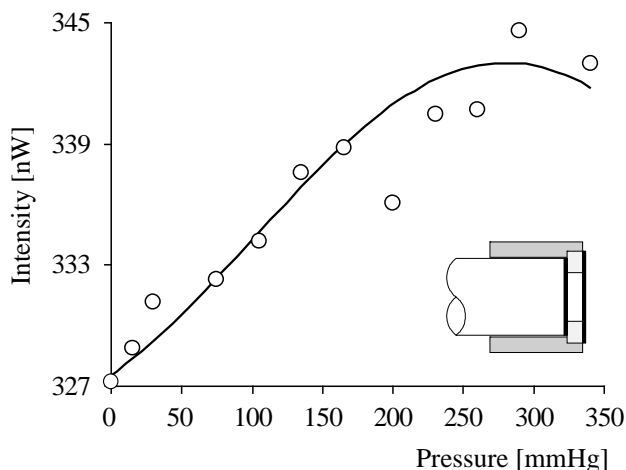


図7 フラット型圧力センサの測定結果

Fig.7 Response of the flat type sensor.

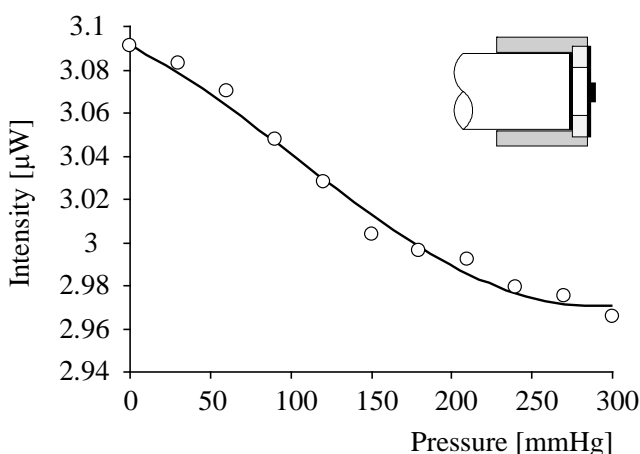


図8 メサ型圧力センサの測定結果

Fig. 8 Response of mesa type sensor.

ーに達する。センシング部に印加される圧力は圧力源から入力される。空気を圧力調整弁で調節し、圧エカ計でモニターする。

エッチング残渣がある場合の圧力に対する光出力変化を図7に示す。ややばらつきはあるがダイアフラムに印加される圧力の変化により、光出力が変化することが確認された。しかし、すでに述べたようにエッチング残渣による影響でダイアフラムの反射率が低下したため

光出力 300nW 程度、変調度が数 10nW 程度と小さく、圧力センサとしての十分な分解能が得られなかった。また、ダイアフラムが凸型にたわむため凸部で光が拡散したため圧力が増加するに伴いゆらぎが大きくなっていると考えられる。本研究で得られたメサ型圧力センサの測定結果を図8に示す。図に示すようにエッチング条件を最適化したことにより反射率が約1桁向上し、光出力が大幅に増加している。また、ダイアフラム面に剛体を取り付け凸型にたわむことを抑制したため、圧力の増加に対して光出力のゆらぎが減少していることがわかる。

5. まとめ

本研究では、ダイアフラムの反射率を大きくするためにエッチング工程においてサイドエッチングを支配的にするなど、エッチング条件を最適化した。最適化した条件により圧力センサを作製し、ダイアフラムに印加される圧力に対してより高い光出力が得られた。また、ダイアフラムにメサを形成することによってダイアフラムが凸型にたわむことが抑制され、高い圧力下においてゆらぎを減少させることができた。

参考文献

- 1) Kentaro Totsu et al: "Development of Ultra Miniature Fiber-optic Blood Pressure Sensor System", 19th Sensor Symposium, pp.429-432, 2002.
- 2) Yoichi Haga et al: "Vacuum sealed ultra miniature fiber-optic pressure sensor using white light interferometry", Digest of Technical Papers of the 12th Int.Conf. on Solid State Sensor, Actuators and Microsystems: Transducer'03 (Boston, MA), pp.931-934, 2003.
- 3) 中原一郎, "材料力学 下巻", 養賢堂, p153.
- 4) M. エルベンポーク, "シリコンマイクロ加工の基礎", シュプリンガー・ヘアラー東京株式会社, p324.