研 究

Fiber Bragg Grating を用いた水中音波の検出*

広瀬 明宏, 鉄村 幹太, 高橋 信明, 高橋 純夫**

(防衛大学校応用物理学教室)

(平成 10 年 1 月 12 日受付け)

A fiber Bragg grating (FBG), which is formed in a fiber core by introducing a periodic variation of the refractive index reflects selectively a particular wavelength of light due to the Bragg reflection. The reflected optical power is modulated if sound pressure is applied to the FBG. Using the FBG which has such a feature we made the fundamental experiments on the detection of underwater sound. Good linearity is obtained under various conditions with the insertion of optical isolators that avoid the fluctuation of detected output due to the Fabry – Perot interference effect between the FBG and the various facets. The sensitivity of detection is maximized if the slope of the curve in the transmittance – wavelength characteristics is steepest at the operating wavelength. Simultaneous multiplex detection is made possible by wavelength division multiplexing with two FBGs in series connection.

1. はじめに

Fiber Bragg Grating (以下, FBG という。)は, 光ファイバコアの長さ方向に周期的な屈折率分布を形成したものであり, ブラッグ反射により特定の波長の光を反射する。¹⁾ この特性を利用して主に波長多重伝送等のフィルタとして開発が進められているが, ^{2, 3)} センサとしての利用も考えられている。⁴⁻⁶⁾ FBG センサは通常の光ファイバセンサの優れた特徴⁷⁻¹¹⁾に加えて, センシング部分を短い領域に集中させることができ, また, 1つのファイバ内に異なる反射波長のFBGを複数個形成することにより, 同時多点計測が可能である等の特徴を有する。本研究ではFBGを用いた水中音波の検出について報告する。

2. FBGによる音波の検出原理

FBGは光ファイバの長さ方向をz軸とすると, コアの屈折率 $n(z)$ は式(1)のように表わされる。

$$n(z) = n_0 + \Delta n \cdot \cos(2\pi/\Lambda \cdot z) \quad (1)$$

ここで, n_0 , Δn 及び Λ はそれぞれ, コアの平均屈折率, 屈折率変化量及びグレーティング周期である。このようなFBGはブラッグ反射により, 特定の波長の光を反射し, Fig.1 に示すような透過特性を持つ。その反射波長 λ_B は式(2)のように表される。

$$\lambda_B = 2n_0 \Lambda \quad (2)$$

Fig.1. Transmission spectrum of FBG.

Fig.1において λ_B は1550nmである。このFBGに透過特性の傾斜部の波長(例えば, 1549.2nm付近)の光を通しFBGに音圧を加えると, 光ファイバ内部の圧力変化により n_0 及び Δn が変化する¹²⁾と共に, 光ファイバ自身の伸縮により Λ が変化する。¹³⁾ 従って, 式(2)より λ_B が変化し, 透過特性が短波長又

* Detection of underwater sound using a Fiber Bragg Grating.

** By Akihiro HIROSE, Kanta TETSUMURA, Nobuaki TAKAHASHI and Sumio TAKAHASHI (Dept. of Applied Physics, National Defense Academy).

は長波長側にシフトするため、動作波長における透過光の強度が変化する。この強度変化を検出することにより音波を検出することができる。同様に反射光を用いても音波の検出が可能であり、Fig.2に示すFBGの反射特性の変化を利用する。検出原理は透過型と同様、FBGに音圧が加わると反射特性も短波長又は長波長側にシフトし、動作波長における反射光の強度が変化するので、その強度変化を検出する。

Fig.2. Reflection spectrum of FBG.

3. 水中音波の検出実験

3.1 透過型及び反射型のFBGによる音波の検出

FBGによる音波の検出には、先に述べたとおり透過特性の変化を利用する透過型及び反射特性の変化を利用する反射型の二つの検出方法があり、それぞれの方法で水中音波の検出実験を行った。Fig.3に透過型の実験装置の構成を示す。光源にはLDを用い、出力光波長 (λ_{LD}) 1549.2nm, 出力光強度 (P_{LD}) 0.5mWの光をFig.1に示した透過特性を持つFBGに通した。そのFBGを、蒸留水を満たしたガラスセル中にある円筒形振動子の端面部の中心軸上に配置した。振動子の励振周波数は20kHzであり、その振動子の励振レベルを変化させた時の音圧レベルに対するFBGによる検出出力をO/E変換し、基本波成分をスペクトラムアナライザで測定した。また、FBGとほぼ同じ位置にハイドロホン (B & K8103) を置き、音圧を測定した。Fig.4に反射型の実験装置の構成を示す。透過型との違いはLDとFBGの間にカップラを挿入し、反射光を検出している点である。実験は透過型と同様に行った。

実験結果をFig.5に示す。横軸は1 μ Paを基準とした音圧レベル、縦軸は検出出力の基本波成分のレベル (相対値) である。反射型はカップラの挿入によりFBGへの入射光及びFBGからの反射光が減衰するため、透過型に比べ感度が低くなっている。

Fig.3. Experimental setup of transmission type.

Fig.4. Experimental setup of reflection type.

Fig.5. Detected output as a function of sound pressure.

以上の実験により、透過型及び反射型のFBGによる水中音波の検出が可能であることが確認されたが、両者とも検出出力にかなりのフェージングを生じていたので、その最大値を測定した。Fig.5の縦軸と横軸はデシベル目盛であり、測定値は透過型・反射型ともに傾き0.9の直線に近いので、検出出力は音圧に完全に比例してはいない。これは3.2節で述べるファブリ・ペロー共振に起因するものと考えられる。

3.2 検出の安定化

フェージングの原因は、FBGと光ファイバ端面間の反射によるファブリ・ペロー共振の影響であることが分かった。これを除去するためにはファイバ接続部の融着、端面の斜め研磨、アイソレータの挿入等の無反射処置が必要となってくる。今回はFig.6に示すようにFBGの前後にアイソレータを挿入し、透過型の検出実験を行った。

Fig.6. Experimental setup of stabilizing.

Fig.7は音圧137dB re $1 \mu\text{Pa}$ のハイドロホン (B & K8103) の出力電圧波形 (上側)、及びFBGによる検出出力波形 (下側) である。LDの出力光波長及び強度は 1549.2nm 及び 0.9mW である。検出出力はアイソレータの挿入により反射波が除去され、安定した出力が得られた。Fig.8は音圧レベルに対する検出出力の基本波成分のレベル (相対値) であり、LDの出力光波長及び強度は 1549.1nm 及び 2mW である。検出出力は 87~141dB re $1 \mu\text{Pa}$ の音圧に対して線形性を示し、54dBのダイナミックレンジが得られた。141dB re $1 \mu\text{Pa}$ を越える音圧は、振動子の中心付近でキャビテーションが発生するため得ることができなかった。¹⁴⁾ また、音圧 87dB re $1 \mu\text{Pa}$ の検出レベルは水槽中の水中雑音レベルに相当する。従って、FBGによる検出出力のダイナミックレンジは 54dB より大きいと考えられる。

Fig.7. Wave form of the output voltage of hydrophone (B & K8103) and detected output.

Fig.8. Detected output as a function of sound pressure.

本実験において、透過型の検出はアイソレータの挿入により安定化を図ることができたが、アイソレータはFBGからの反射波も除去するため反射型の検出はできない。反射型の検出においてはインコヒーレント光源の使用、サーキュレータによる反射波の分岐等の対策により、ファブリ・ペロー共振を防止しなければならない。

3.3 光波長依存性

検出出力のFBGに入射する光波長依存性を調べるため、Fig.6の実験装置においてFBGに加わる音圧レベル及びLDの出力光強度を一定に保ち、LDの出力光波長を変化させた時のFBGによる検出出力を、スペクトラムアナライザで測定した。また、 λ_B の前後の波長における検出出力の位相変化をロックインアンプで測定した。

Fig.9は音圧 (p_A) 130dB re $1 \mu\text{Pa}$ 、LDの出力光強度 2mW におけるFBGによる検出出力の光波長依存性であり、横軸はLDの出力光波長、縦軸は検出出力の基本波成分のレベル (相対値) である。検出出力はFig.1の透過特性の傾斜が大きい波長 1549.1 nm 及び 1551.0nm で極大となった。 λ_B の 1550nm 付近及び 1551.5nm 以上では透過特性の傾斜がほとんどないため、検出レベルは非常に低い。短波長側の極大値 (1548.6nm 及び 1546.4nm) も透過特性の傾斜によるものであるが、 λ_B の前後に比べ傾斜が小さいため検出レベルは低くなる。Fig.10はハイドロ

ホン (B & K8103) の出力電圧波形 (上側), 及び LD の出力光波長 1551.2nm における FBG による検出出力波形 (下側) である。FBG に加わる音圧レベル及び LD の出力光強度は Fig.7 の場合と同じである。Fig.7 (LD の出力光波長 1549.2nm) と比較すると FBG による検出出力の位相が変化していることがわかる。その位相差を測定した結果, 約 180 度となり位相が反転していることが分かった。このことは Fig.1 の透過特性において, λ_B の前後で傾斜の傾きが逆転していることから明らかである。

Fig.9. Wavelength characteristics of detected output.

Fig.10. Wave form of the output voltage of hydrophone (B & K8103) and detected output.

3.4 光強度依存性

検出出力の FBG に入射する光強度依存性を調べるため, Fig.6 の実験装置において FBG に加わる音圧レベル及び LD の出力光波長を一定に保ち, FBG に入射する光強度を変化させた時の FBG による検出出力を, スペクトラムアナライザで測定した。

Fig.11 は音圧 130dB re 1 μ Pa, LD の出力光波長 1549.1nm における FBG による検出出力の光強度依存性であり, 横軸は FBG に入射する光強度, 縦軸は検出出力の基本波成分のレベル (相対値) である。光強度に対して検出出力は直線的に増加している。このことから, FBG に入射する光強度を増加させて

検出レベルを高くすれば, 検出系の SN 比を上げることができ, ダイナミックレンジを大きくすることが可能となる。3.2 節で述べた水中雑音レベルは, 水中音場の環境条件により決まるものであり, 検出系自身の雑音レベルではない。

Fig.11. Detected output as a function of optical input power.

3.5 FBG の直列接続による Wavelength Division Multiplexing

単一の FBG による基本的な動作が確認されたため, 次に二つの FBG を直列接続した Wavelength Division Multiplexing (以下, WDM という。) センサ^{15, 16)} を構成し, 音波の多重検出を試みる実験を行った。Fig.12 は直列接続した二つの FBG の透過特性であるが, アイソレータ, コネクタ及び融着による損失を含んでいる。FBG1 は λ_B が 1550nm で Fig.1 に示した透過特性を持つ FBG であり, FBG2 は λ_B が 1540nm の FBG である。Fig.13 に実験装置の構成を示す。この実験装置において以下の三つの実験を行った。

3.5.1 光波長依存性

直列接続した FBG1 及び FBG2 に一方の LD から一定の出力光強度の光を入射させる。二つの FBG をそれぞれ, 蒸留水を満たした二つの水槽中にある円筒形振動子の端面部の中心軸上に配置した。振動子の励振周波数は, FBG1 側が 20kHz, FBG2 側が 35kHz である。二つの FBG に加わる音圧を同一レベルに設定し, LD の出力光波長を変化させた時の二

つの FBG による検出出力を、スペクトラムアナライザで測定した。

Fig.14 は音圧 120dB re 1 μ Pa, LD の出力光強度 0.9mW における FBG1 及び FBG2 による検出出力の光波長依存性であり、検出出力は相対値である。FBG1 による検出出力は、Fig.9 に示した単一の FBG の光波長依存性と同様である。FBG2 による検出出力は、Fig.12 に示した FBG2 の透過特性の傾斜が大きい波長 1539.2nm 及び 1541.4nm で極大となったが、FBG1 に比べ透過特性の傾斜が小さいため検出レベルは低くなる。

Fig.12. Transmission spectrum of two FBGs in series connection.

Fig.13. Experimental setup of multiplexing.

Fig.14. Wavelength characteristics of detected output by FBG1 and FBG2.

3.5.2 多重検出

二つの LD を使い、FBG に入射する光強度を一致させ、LD の出力光波長をそれぞれの FBG で検出可能な波長に設定した。FBG2 に加わる音圧レベルを一定に保ち、FBG1 に加わる音圧レベルを変化させた時の二つの FBG による検出出力を測定した。

Fig.15 は二つの FBG による多重検出出力のスペクトルであり、横軸は検出出力の周波数成分 (5kHz/div), 縦軸はその相対レベル (10dB/div) である。二つの FBG は、それぞれ 20kHz 及び 35kHz の音波を同時に検出している。Fig.16 は音圧レベルに対する FBG1 及び FBG2 による検出出力の基本波成分のレベル (相対値) である。FBG1 及び FBG2 に入射する二つの LD の出力光波長は、それぞれ 1549.2 nm 及び 1541.5nm, FBG に入射する光強度 (P_0) は 0.35mW であり、FBG2 に加える一定の音圧レベルは 126dB re 1 μ Pa である。FBG1 に加わる音圧レベルの変化に対して、FBG1 による検出レベルは変化するが、FBG2 による検出レベルは変化しない。このことは、それぞれの動作波長において二つの FBG による検出が互いに影響を受けないことを示している。

Fig.15. Spectrum of the multiplex detected output.

3.5.3 検出出力の合成

二つの振動子の励振周波数を 20kHz に一致させ、一方の LD の出力光強度を調整することにより、二つの FBG による検出出力を同一レベルに設定し、FBG2 側の振動の位相を変化させた時の二つの FBG による合成出力を測定した。

実験結果を Fig.17 に示す。横軸は FBG1 側と

FBG2 側の振動の位相差, 縦軸は検出出力の基本波成分のレベル (相対値) である。検出レベルは, 計算値と良く一致している。このことは二つの FBG を用いて位相を含めた検出が可能であることを示している。

Fig.16. Detected output by FBG1 and FBG2 as a function of sound pressure.

Fig.17. Phase characteristics of two FBGs in series connection.

これらの実験から, 二つの FBG を直列接続した WDM センサを構成することにより, 異なる二つの光波長において, それぞれ独立に音波の検出が可能であることが確認された。また, 複数の FBG を直列接続することにより, 同時多点計測やアレイを構成できる可能性が確かめられた。

4. おわりに

本研究では, FBG を使用した水中音波の検出について基本的な動作確認を行った。FBG による音波の検出は, 圧力による透過特性及び反射特性の変化を利用するため, 高感度で線形性の良いセンシングが可能であり, 今後の応用が期待される。

参考文献

- 1) D. K. W. Lam and B. K. Garside, "Characterization of single-mode optical fiber filters", *Appl. Opt.*, **20** (3), 440-445 (1981).
- 2) 井上享, 岩島徹, 角井素貴, 茂原政一, 服部保次, "ファイバグレーティングとその応用", *応用物理*, **66** (1), 33-36 (1997).
- 3) 山内良三, "先端光ファイバ加工技術", 第18回光波センシング技術研究会講演論文集, 33-40 (1996).
- 4) T. A. Berkoff and A. D. Kersey, "Experimental Demonstration of a Fiber Bragg Grating Accelerometer", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **8** (12), 1677-1679 (1996).
- 5) S. M. Melle, K. Liu, and R. M. Measures, "Practical fiber-optic Bragg grating strain gauge system", *Appl. Opt.*, **32** (19), 3601-3609 (1993).
- 6) L. A. Ferreira, A. B. L. Ribeiro, J. L. Santos, and F. Farahi, "Simultaneous Measurement of Displacement and Temperature Using a Low Finesse Cavity and a Fiber Bragg Grating", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **8** (11), 1519-1521 (1996).
- 7) O. Sugiyama, K. Okajima, S. Takahashi and T. Kikuchi, "Fiber-Optic Hydrophone using a Zeeman Laser", *Proc. 11th Symposium Ultrasonic Electronics, Kyoto 1990, Jpn. J. Appl. Phys.* **30** Suppl. **30-1**, 99-101 (1991).
- 8) T. Yoshino, K. Kurosawa, K. Itoh, and T. Ose, "Fiber-Optic Fabry-Perot Interferometer and Its Sensor Applications", *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-18** (10), 1624-1633 (1982).
- 9) M. Vaziri and C-L. Chen, "Optical-fiber strain sensors with asymmetric etched structures", *Appl. Opt.*, **32** (31), 6399-

- 6406 (1993).
- 10) A. Wang, S. He, X. Fang, X. Jin, and J. Lin, "Optical Fiber Pressure Sensor Based on Photoelasticity and its Application", *IEEE J. Lightwave Technol.*, **10** (10), 1466 – 1472 (1992).
- 11) B. Culshaw and J. P. Dakin, "Revisiting Optical – Fiber Sensors", in *Optical Fiber Sensors*, B. Culshaw and J. P. Dakin, Eds. (Artech House, Boston, 1996), Vol.3, Chap. 1, p.1.
- 12) W. B. Spillman, Jr., and D. H. McMahon, "Multimode fiber – optic hydrophone based on the photoelastic effect", *Appl. Opt.*, **21** (19), 3511 – 3514 (1982).
- 13) H. L. Price, "On the mechanism of transduction in optical fiber hydrophones", *J. Acoust. Soc. Am.*, **66** (4), 976 – 979 (1979).
- 14) A. Hirose, N. Takahashi and S. Takahashi, "Spectral Change in Acoustic Pressure and Cavitation Inception", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36**, Part 1, (5B), 3348 – 3349 (1997).
- 15) T. Fukushima and T. Sakamoto, "A7 × 6 Optical Fiber Grating Demultiplexer – Multiposition Switch for 0.64 – 0.88 μ m Band", *IEEE J. Lightwave Technol.*, **14** (5), 867 – 872 (1996).
- 16) L. Dong, P. Hua, T. A. Birks, L. Reekie, and P. St. J. Russell, "Novel Add/Drop Filters for Wavelength – Division – Multiplexing Optical Fiber Systems Using a Bragg Grating Assisted Mismatched Coupler", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **8** (12), 1656 – 1658 (1996).