

一般セッション(ポスター講演) | 3 光・フォトンクス: 3.13 光制御デバイス・光ファイバー

2024年9月19日(木) 9:30 ~ 11:30 皿 P06 (展示ホールA)

[19a-P06-1~17] 3.13 光制御デバイス・光ファイバー

[19a-P06-1]

Si導波層を有する磁気光学導波路における非相反移相量の計算

○古尾谷 勇太¹ (1.芝浦工大院理工)

[19a-P06-2]

超音速フリージェットPVD法で製作されるSi導波層を有する光非相反素子の研究

○(M2)田巻 優輝¹、横井 秀樹¹ (1.芝浦工大院理工)

[19a-P06-3]

磁気光学キャビティのバイオ化学センサへの応用

○(M2)劉 家祥¹、安川 雪子¹、山根 治起² (1.千葉工大、2.秋田産技センター)

[19a-P06-4]

等方性高分子を添加したリバースモードPDLCの電気光学特性

○渡辺 大地¹、山口 留美子¹ (1.秋大院理工)

[19a-P06-5]

偏波無依存性光トリプレクサを構成する交差導波路の伝搬特性

○(M2)大石 啓斗¹、白石 寛人¹、横井 秀樹¹ (1.芝浦工大院理工)

[19a-P06-6]

感光性構造形成材料により製作される光導波路を用いた
方向性結合器の設計○今村 遥貴¹ (1.芝浦工大)

[19a-P06-7]

高速BOCDRに基づくプラスチック光ファイバに沿った振動分布の検出

○鶴谷 柊人¹、越智 星河²、野田 康平³、水野 洋輔²、李 ひよん¹ (1.芝浦工大、2.横浜国大、3.東大)

[19a-P06-8]

傾斜利用BOCDRによる振動分布計測の実証

○田中 伸輔¹、鈴木 之大¹、捧 治紀¹、水野 洋輔²、李 ひよん¹ (1.芝浦工大、2.横浜国大)

[19a-P06-9]

ヘテロダイナ検出ファイバーキャビティリングダウン温度センサー II

○池口 泰樹¹、黒田 圭司¹ (1.北里大理)

[19a-P06-10]

二波長差動検波リアルタイムFBGセンサー

○鬼村 拓実¹、黒田 圭司¹ (1.北里大理)

[19a-P06-11]

時間・波長分割多重Bus Topology FBGセンサー

○松本 孝広¹、黒田 圭司¹ (1.北里大理)

[19a-P06-12]

マルチモード干渉構造光ファイバ屈折率センサの長さと局所的な径変化にともなう干渉スペクトルの変化

○(B)田中 翔稀¹、田上 周路¹ (1.高知工科大学)

[19a-P06-13]

光相関領域反射計におけるGHz周波数シフトを用いたゴーストピークの抑制

○(DC)清住 空樹¹、吉田 総司²、野田 康平¹、水野 洋輔²、山下 真司¹ (1.東大、2.横浜国大)

[19a-P06-14]

周期的ランダム変調方式によるOCDRの折り返しノイズの抑制

○比嘉 祐太¹、元田 圭佑¹、吉田 総司¹、大坪 謙太¹、朱 光韜¹、清住 空樹^{1,2}、石丸 貴大³、高橋 央^{1,3}、古敷谷 優介³、水野 洋輔¹ (1.横浜国大、2.東大、3.NTT)

[19a-P06-15]

単側波帯変調器を用いた外部変調BOCDRの提案

○尾崎 滉太¹、菊地 啓太²、李 ひよん²、水野 洋輔¹ (1.横浜国大、2.芝浦工大)

◆ 英語発表

[19a-P06-16]

Proposal of pump-probe technique for fiber-optic temperature sensing using Raman spectrum near Rayleigh peak

○Hamza Javid¹, Yosuke Mizuno¹ (1.YNU)

[19a-P06-17]

分子動力学シミュレーションを用いたシリカガラスの冷却速度と仮想温度に関する研究

○(M1)日色 駿介¹、木崎 和郎¹、小野 円佳¹、Liping Huang² (1.東北大工、2.Rensselaer Polytechnic Inst.)

Si 導波層を有する磁気光学導波路における非相反移相量の計算

Calculation of Nonreciprocal Phase Shift in Magneto-optic Waveguide

with Si Guide Layer

芝浦工大院理工[○](M2) 古尾谷 勇太, 横井 秀樹

Shibaura Inst. of Technol

[○]Yuta Furuoya, Hideki Yokoi

E-mail: ma23165@shibaura-it.ac.jp

1. まえがき

近年の技術進歩により、スマートフォンやデータセンターなどの高速通信化やIoT化に伴い、扱う情報量の増加により、消費電力や処理能力が問題となっている。問題解決のため、基板上に光デバイスを集積して光導波路で接続する光集積回路が研究されている。中でもSOI (Silicon On Insulator) 基板を材料とした光デバイス及び光導波路を集積化する技術のシリコンフォトニクスは光電融合への応用が可能なことから注目されている。光通信では光素子との接合部において反射光が生じる場合があり、その反射光が素子の動作に影響し、期待する動作が得られなくなる。そのため、光波を一方方向にのみ伝搬させる光アイソレータが必要とされる。本研究では非相反移相効果を利用した導波路型光アイソレータについて検討を行った。三次元構造の磁気光学導波路内を伝搬する光波に生じる非相反移相量を計算したので、報告する。

2. 原理

本研究では、超音速フリージェット PVD (Physical Vapor Deposition) 法を利用して実現される磁気光学導波路について検討する。この磁気光学導波路を用いて構成される導波路型光アイソレータの構造を Fig.1 に示す。導波路に磁界を印加すると光波の前進波と後退波で受ける磁界の向きが異なることで伝搬定数に違いが生じる。TM モードの光波を入射させたとき、反射光が TE モードのカットオフ値より小さいことで位相整合が成立し、TE 放射モードに変換に結合されて遮断される。これにより光アイソレータとして機能する。

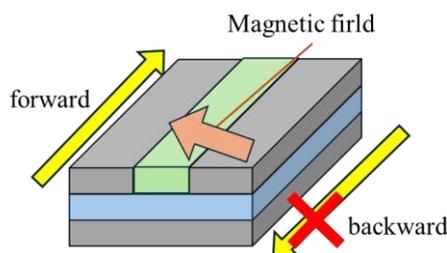


Fig. 1. Structure of optical isolator employing nonreciprocal radiation-mode conversion.

3. 非相反移相量の解析

解析に用いる磁気光学導波路の断面構造を Fig.2 に示す。非相反移相量を解析するにあたり、摂動論を用

いて解析を行った。上部クラッドを $(\text{CeY})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (Ce:YIG)、コアを Si、下部クラッドを SiO_2 、コアの膜厚を $0.2\mu\text{m}$ として導波層幅を $0.5\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ まで変化させた。Fig. 3 に解析結果を示す。Fig.3 より、導波層幅を大きくすると一定の値へ収束することが分かる。この値は Ce:YIG/Si/ SiO_2 構造のスラブ構造における非相反移相量に一致する。

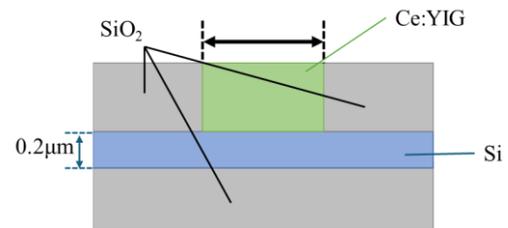


Fig. 2. Cross-sectional structure of magneto-optic waveguide.

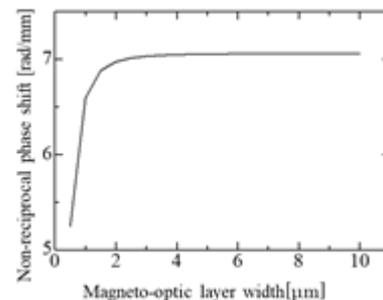


Fig. 3. Calculated nonreciprocal phase shift depending on waveguide width.

4. 結論

三次元磁気光学導波路の非相反移相量の解析を摂動論を用いて行った。導波路幅が $2\mu\text{m}$ 以上において、非相反移相量がほぼ一定の値に収束することが分かった。

参考文献

1) N, Bahlmann et al., "Improved design of magnet-optics rib waveguides for optical isolators", Journal of Lightwave Technology, vol.16, no.5, pp.818-823, 1998

超音速フリージェット PVD 法で製作される Si 導波層を有する 光非相反素子の研究

Nonreciprocal Devices with Si Guiding Layer Fabricated by Supersonic Free-Jet PVD

芝浦工大院理工, ○(M2)田巻 優輝, 横井 秀樹

Shibaura Inst. of Technol.

○Yuki Tamaki, Hideki Yokoi

E-mail: ma23119@shibaura-it.ac.jp

1. 背景

光通信において、光源に用いられる半導体レーザーの発振を安定化させるために光非相反素子である光アイソレータは必要不可欠である。光アイソレータには近赤外領域で光の吸収損失が小さく、かつ大きな磁気光学効果を有する磁性ガーネット(Ce:YIG)が用いられる。非相反移相効果を利用した光アイソレータは、一偏波のみで動作することから位相整合が不要であり、印加磁界の制御も容易である[1,2]。本研究では任意の位置に任意の材料の成膜が可能である超音速フリージェット PVD(Physical Vapor Deposition)法により、Si 導波路上に Ce:YIG 薄膜を成膜して磁気光学導波路を構成することを検討したので報告する。

2. 素子構造及び解析

Fig.1 に直線リブ型導波路からなる非相反放射モード変換型光アイソレータを示す。磁気光学導波路は Ce:YIG/Si/SiO₂ 構造を有している。印加された外部磁界における光波の進行方向に垂直な成分により、導波路を伝搬する TM モードの光波には非相反移相効果が生じる。ここで、リブ型導波路の幅と高さを調節することで、伝搬定数には以下の関係式が成り立つ。

$$\beta_B^Y < \beta_C^X < \beta_F^Y \quad (1)$$

β_B^Y と β_F^Y はそれぞれ順方向、逆方向の TM モードにおける伝搬定数、 β_C^X は TE モードのカットオフ値である。逆方向に伝搬する TM モードのみ TE 放射モードに結合することにより、TM モード動作の光アイソレータとして機能する。Fig.1 に示す光アイソレータを波長 1.55 μm で動作させるために Ce:YIG/Si/SiO₂構造の磁気光学導波路の非相反移相量を計算した。Si 導波層の厚さが0.2 μm の時、Ce:YIG クラッド層の厚さは0.5 μm 以上で非相反移相量は最大となる。したがって、導波層の厚さを0.2 μm 、クラッド層の厚さを0.5 μm として、リブ型導波層の幅と厚さを調節することで、伝搬定数が関係式(1)を満足する条件を調査した。

3. 素子構造及び解析

フォトリソグラフィ技術を用いて SOI (Silicon On Insulator)基板上に導波路パターンを形成し、その上に超音速フリージェット PVD 法を用いて、Ce:YIG を成膜することで Fig.1 に示す導波路構造を製作した。製作した磁気光学導波路に波長1.55 μm のレーザー光を照射させて、近視野像を観察した。Fig.2 に示す近視野像より、光波は Si 導波層に閉じ込められて伝搬していることが確認できた。

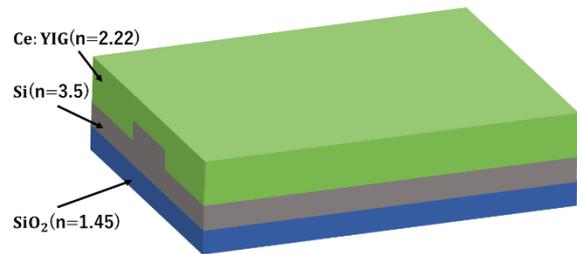


Fig. 1 Optical isolator employing nonreciprocal guided-radiation mode conversion



Fig. 2 Near field image

4. 結論

光アイソレータの実現に向けて、超音速フリージェット PVD 法を用いて磁気光学導波路の製作を行い、導波実験により導波光の近視野像を観察することができた。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省「マテリアル先端リサーチインフラ(ARIM)」事業、「東京工業大学ナノ構造造形支援事業」の支援を受けて実施された。

参考文献

- [1] T. Mizumoto, S. Mashimo, T. Ida, and Y. Naito: IEEE Trans. Magn., vol. 29, no. 6, pp. 3417-3419, 1993.
- [2] H. Yokoi, T. Mizumoto, T. Takano, and N. Shinjo: Appl. Opt., vol. 38, no. 36, pp. 7409-7413, 1999.

磁気光学キャビティのバイオ化学センサへの応用

Magnetic-optical cavities for Biochemical Sensing Applications

千葉工大¹, 秋田産技センター² ○(M2) 劉家祥¹, 安川雪子¹, 山根治起²Chiba Inst. Tech.¹, Akita Ind. Tech. Center², ○J. Liu¹, Y. Yasukawa¹, H. Yamane²

E-mail: yamane@aitc.pref.akita.jp

磁性積層膜で構成された光学干渉 (キャビティ) 素子では、磁気光学効果の増大が可能である。我々は、磁気光学キャビティに関する理論計算において、磁気光学効果の上限「Kerr 回転角(θ_K) = $\pm 90^\circ$ 」が実現できることを報告している[1]。本研究では、バイオ化学センサへの応用を目的として、積層膜表面における媒質屈折率(n)の変化が、磁気光学特性に与える影響について、理論的解析を行った。なお、理論計算には、有限要素法(COMSOL Multiphysics)を使用した。

磁気光学キャビティは、[ハーフミラー層/光干渉層/全反射層]積層膜を基本構造として、いずれかの層に磁性膜を導入することで構成される。磁性層の厚さが十分に厚い場合には、磁気光学全反射層として機能し、薄い磁性膜を光干渉層に挿入した場合には、磁気光学干渉層として機能する。

図 1 に、CoPt 垂直磁化膜を全反射層として用いた試料(Type A) : [Pd (3.7 nm)/AZO (80 nm)/CoPt (100 nm)]、及び、磁気光学干渉層を有する試料(Type B) : [Pd (3.2 nm)/AZO (43 nm)/CoPt (2.8 nm)/AZO (43 nm)/Ag (100 nm)]の極 Kerr スペクトルを示す。共鳴波長(λ_R)において、Type A では単一増幅、Type B では極性反転を示している。理論計算(点線)では、試料の膜厚分布や測定光の波長幅を、測定系の揺らぎとしてローレンツ関数(半値=3 nm)にて取り入れている。スパッタ法によって作製した試料の測定結果(●)と、よく一致していることが分かる。

次に、両タイプのキャビティ素子のセンサデバイスとしての性能について評価した。各層の厚さは、真空中($n = 1$)にて、 θ_K が最も大きくなるように設定した。図 2 に、センサデバイスの概略図を示す。検出対象物質の有無や量によって、積層膜表面の屈折率が変わると共鳴条件が変動し、磁気光学スペクトルが変化する。理論計算より算出した屈折率の変化(Δn)に対する、 θ_K 及び λ_R の変化量($\Delta\theta_K$ & $\Delta\lambda_R$)を図 3 に示す。 $\Delta\theta_K$ は対数関数に近い形で増加しており、屈折率の微小な変化を検知するのに有効である。本研究における極 Kerr 装置の θ_K 分解能は 0.001° であることから、 $\Delta n = 0 \sim 0.01$ の範囲では、Type A および B の屈折率分解精度は、それぞれ、 1.25×10^{-6} 、および、 3.4×10^{-6} と算出される。これらの値は、通常のプラズモンセンサ[2]に比べて、Type A で約 7 倍、Type B で約 2.5 倍の感度向上に相当する。一方、 λ_R は単調に減少している。Type B では、 θ_K は極性反転を示すため、 $\Delta\lambda_R$ の計測は比較的容易と考えられる。幅広い屈折率変動を計測する際に有効と期待される。

[1] 劉 他, 応用物理 2024 春季, 24p-12H-4

[2] 岡本 他:「プラズモニクス-基礎と応用」, 講談社, (2010)

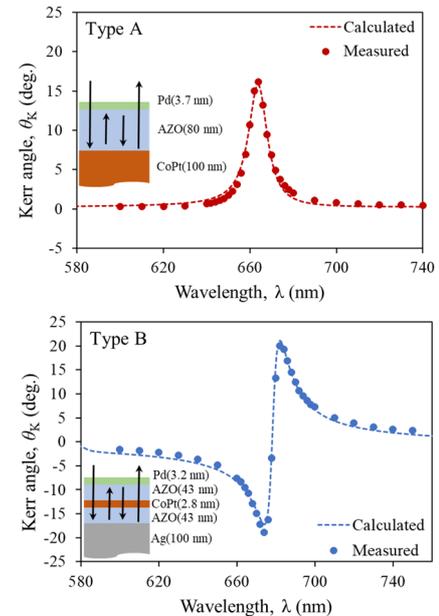


図 1. Calculated and measured polar θ_K spectra of Magnetic-optical (MO) cavities.

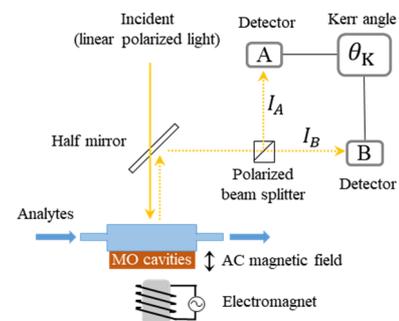


図 2. Schematic illustrations for MO cavity sensors.

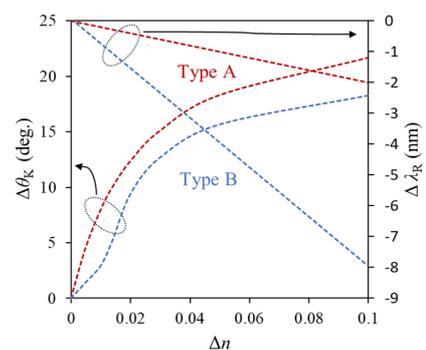


図 3. Calculated polar $\Delta\theta_K$ and $\Delta\lambda_R$ of Type A and B as a function of the Δn .

等方性高分子を添加したリバースモード PDLC の電気光学特性

Electro-optical property of reverse mode polymer dispersed liquid crystal added with isotropic polymers

秋大院理工¹ ○(M2) 渡辺 大地¹, 山口 留美子¹

Akita Univ.¹, °Daichi Watanabe¹, Rumiko Yamaguchi¹

E-mail: m8023421@s.akita-u.ac.jp

【緒言】 電圧印加により透明状態から光散乱状態へ切り替わる液晶素子として、液晶と高分子材料の屈折率差による散乱を用いるリバースモード PDLC(R-PDLC)がある。これまで、機械的強度の向上のために異方性高分子を増やすと駆動電圧が著しく上昇することがわかっており、等方性高分子を新たに加えることを試みてきた[1,2]。本研究では、等方性高分子の種類と混合量を変え、電気光学特性への影響について検討した。

【実験】 液晶材料として p 型液晶 E7, 異方性高分子として光重合開始剤 Irg-184 を 4wt%含む RM257(Merck)を用いた。RM257 の混合濃度は 5wt%とし、数種類の単官能、二官能、多官能のそれぞれの等方性高分子を 15wt%混合まで試みた。E7+RM257+等方性高分子の混合物は、すべて室温でネマチック相を示した。セル厚 10 μm のホモジニアス配向セルを用い、UV-LED ($\lambda_{\text{max}} = 365 \text{ nm}$)を 20 mW/cm^2 の強度で 300 秒間照射し、モノマーの重合を行った。電気光学特性は、1 kHz の正弦波電圧を印加し、半導体レーザー(波長 636 nm, 集光角 2°)を用いて測定した。

【実験結果】 本報告では、PDLC 作製時に液晶ドロップレット構造となる NOA65(Norland)と、高分子ネットワーク構造となる二官能モノマー R-167(日本化薬, Fig. 1)を添加した結果を示す。

Fig. 2 に、等方性高分子を加えた時の R-PDLC の電気光学特性を示す。Fig. 2(a)より、NOA65 を 5wt%添加した素子では、オフ時の透過率は 20%ほど減少した。E7 の配向オーダーが減少したことが示唆される。一方、素子全体としては高分子濃度が 2 倍の 10wt%になったにも関わらず駆動電圧は大幅に減少したことがわかる。また、NOA65 が 10wt%以上では、ノーマルモード PDLC の特性が生じた。Fig. 2(b)は、R-167 を混合した時の電気光学特性である。ここでも R-167 の混合率増加と共に、オフ時の透過率は減少し、混合濃度によるわずかな駆動電圧の増加は見られるが、いずれの濃度でもリバースモード特性を示すことが明らかとなった。

RM257 のみ 10wt%混合の R-PDLC と比較し、大幅な駆動電圧の低下が得られており、適切な等方性高分子材料と混合濃度を選択することで、リバースモード特性を保持したまま、機械的な強度の改善が期待できる。他の等方性高分子を添加した結果についても当日発表する。

【参考文献】

[1] S. Nakagawa and R. Yamaguchi, Japanese Liquid Crystal Society, 3A01 (2022).

[2] D. Watanabe and R. Yamaguchi, Japanese Liquid Crystal Society, PA39 (2023).

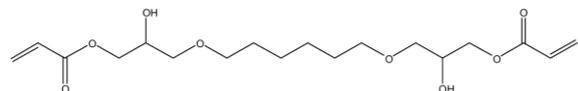
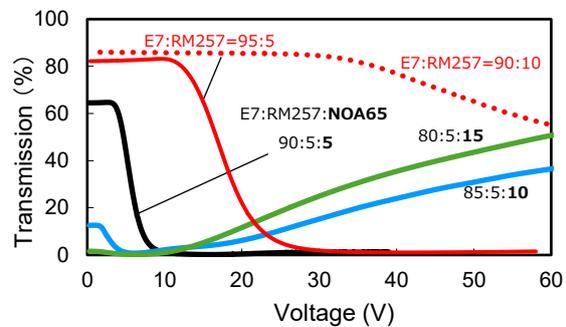
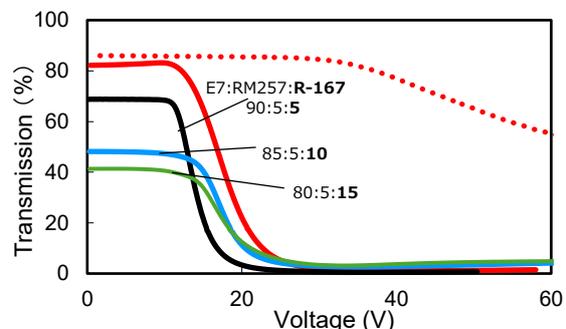


Fig. 1 2-Hydroxypropyl-Modified 1,6-Hexanediol DiAcrylate (R-167)



(a) NOA65



(b) R-167

Fig. 2 V-T curves of R-PDLCs added with isotropic polymer.

偏波無依存性光トリプレクサを構成する交差導波路の伝搬特性

Propagation Characteristics of Waveguide Crossing for Polarization Independent Waveguide Optical Triplexer

芝浦工大院理工[○](M2) 大石 啓斗, (M1) 白石 寛人, 横井 秀樹

Shibaura Inst. of Technol [○]Hiroto Oishi, Hiroto Shiraishi, Hideki Yokoi

E-mail: ma23038@shibaura-it.ac.jp

1. 背景

近年では光ファイバを用いた光通信が普及している。光ファイバ通信において複数の加入者の通信信号を1つの装置に収容するとともに、上り信号と下り信号を1本の光ファイバを用いて双方向伝送する必要がある。そこで波長分割多重(WDM: Wavelength Division Multiplexing)技術を使用した合波器として光トリプレクサが必要となる。光導波路を伝搬する光波にはTE(Transverse-Electric)とTM(Transverse-Magnetic)という2つの偏波モードが存在し、これらは光導波路内における伝搬特性が異なるためそれぞれの導波モードにおいて検討する必要がある。本研究では偏波無依存性の光トリプレクサを構成する交差導波路の設計を行い、素子のさらなる小型化、高性能化を目的とする。

2. 素子構造

光トリプレクサの素子構造を Fig. 1 に示す。光トリプレクサとは、波長の異なる3つの光を合分波するための6つのMMI(Multi Mode interference)カプラと交差導波路からなる素子である。GE-PON(Gigabit Ethernet-Passive Network)の波長帯である1310nm, 1490nm, 1550nmの3つの波長の光波をInputに入射し、各Outputから出射されるように設計する。導波層はSi、クラッド層はSiO₂、オーバークラッド層はSiO₂から構成される。

本研究で解析を行った交差導波路の構造を Fig. 2 に示す。交差導波路ではInput 1 から1490nmTMモードの光波を入射しOutput 2 から出射、またInput 2 から1550nmTEモードの光波を入射しOutput 1 から出射されるように設計する。交差部に縦方向のオフセットを設け、オフセット長Lを0μmから1.4μmまで変更することで所望の伝搬を得られるか解析した。

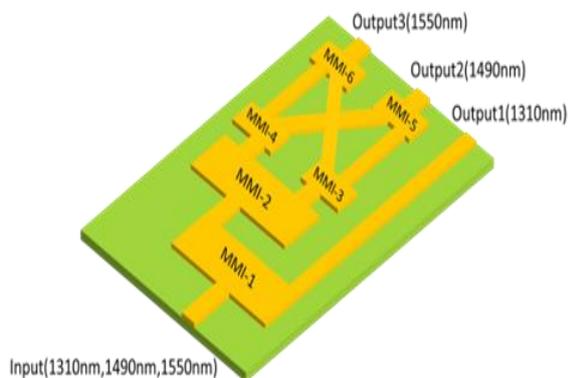


Fig. 1. Structure of waveguide triplexer.

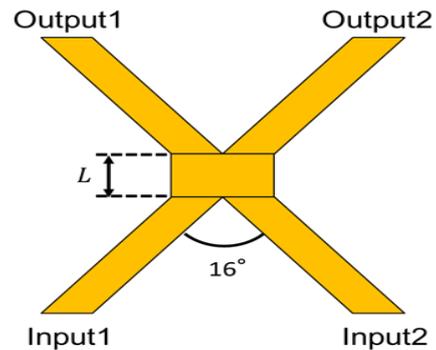


Fig. 2. Structure of waveguide crossing.

3. 解析結果

オフセット長Lを変更した際の伝搬特性の解析結果を Fig. 3 に示す。Lが0.8μmの時に、両モードがスルーポートに出射される光強度が大きく、理想的な構造を見つけることができた。

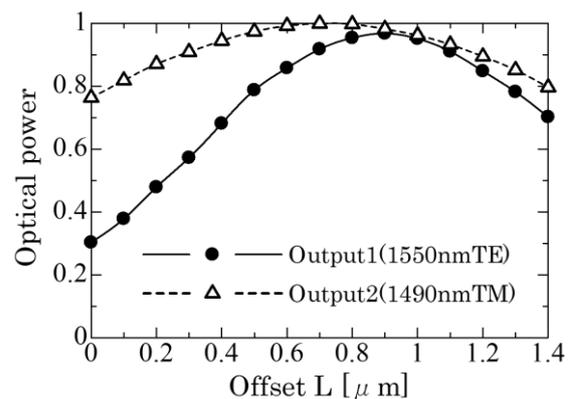


Fig. 3. Relationship between offset length and optical power.

4. 結論

偏波無依存光トリプレクサを構成する交差導波路の構造について検討した。交差部に縦方向のオフセットを設けることにより、所望の伝搬特性が得られた。

参考文献

- Lucas B. Soldano and Erik C. M. Pennings, Optical Multi-Mode Interference Devices Based on Self-Imaging: Principles and Applications, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 13, NO. 4, APRIL 1995

感光性構造形成材料により製作される光導波路を用いた 方向性結合器の設計

Design of Directional Couplers using Optical Waveguides with Photosensitive Materials

芝浦工大院理工 (M2) 今村遥貴、小宮山晃伸、横井秀樹

Shibaura Inst of Technol °Haruki Imamura, Akinobu Komiyama, Hideki Yokoi

E-mail: ma23024@shibaura-it.ac.jp

1. 背景

近年、プラスチックごみに起因する環境問題への懸念が増大している。国際社会では様々な取り組みを行っており、特にプラスチックの排出を削減することが重要視されるが、プラスチックは自然界では分解されない¹⁾ため、これらを分析・回収することも必要である。マイクロプラスチック(以下、MP)の分析には様々な手法が考えられるが、本研究では、低消費電力でコンパクトであるという利点から、光導波路から成る光学素子を用いる方法を採用する。光学素子を構成する光導波路には、感光性構造形成材料を用いることを検討している。今回、感光性構造形成材料の光学素子への様々な応用の一つとして、方向性結合器の設計結果について報告する。

2. 動作原理

MPを分析するための光学素子を説明する。光導波路と、海水等の試料が通過する流路が直交する構造をしているため、交差部分で光導波路を伝搬する光波と流路に存在するMPの分子が相互作用し、ラマン散乱光が発生する。このような散乱光や透過光スペクトル等の評価により媒質が同定される²⁾。将来的には、発生した散乱光からラマン散乱光を分離するために方向性結合器を使用することを想定している。方向性結合器は、二本の導波路を平行に並べ、それらの導波路間を光波が往復する構造である。二本の導波路の導波路幅が等しいとき、片方の導波路の光波パワーがもう片方の導波路に結合し、移行する

3. 実験方法・実験結果

Fig.1に今回設計する方向性結合器を示す。導波路のコア層として、感光性構造形成材料であるTMMR-S2000(東京応化工業製)を用いる。下クラッド層はSiO₂、上クラッド層は空気として方向性結合器を設計する。Table 1に光導波路を構成する材料と屈折率を示す。コアと下クラッド層の屈折率は、波長は1.55 μ mにおいて1.57,1.45である。導波路幅を2 μ mで固定して、ビーム伝搬法を用いて方向性結合器を設計した。導波路間隔が0.5 μ mのとき、Fig.2に示す光伝搬特性が得られた。

	material	refractive index
cladding	air	1.00
core	TMMR-S2000	1.57
substrate	SiO ₂	1.45

Table 1 Refractive index of each layer.

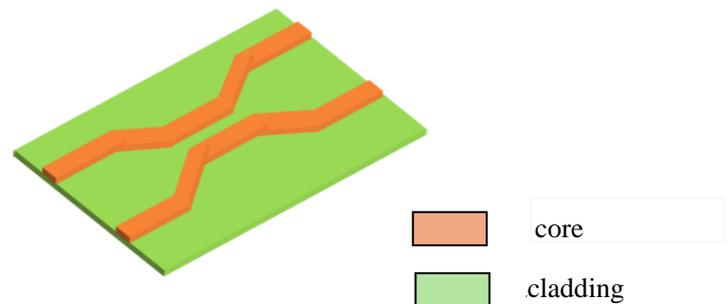


Fig.1 Schematic diagram of directional coupler.

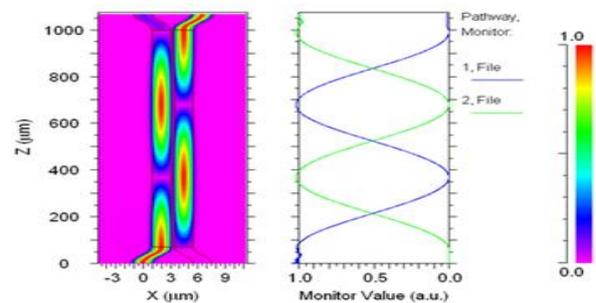


Fig.2 Propagation characteristics.

4. 結論

感光性構造形成材料を用いた方向性結合器を波長1.55 μ mで設計した。導波路間隔を適切に設計することで、所望の光波の結合が実現出来ることが分かった。

参考文献

- 1) J. L. Navarro, M. C. Santana, E. Santesarti, M. D. Marsico, I. Martínez, E. Raymond, M. Gómez, and A. Herrera, IEEE Access, 8, 25249 (2020).
- 2) E. M. H. Dahl, A. Ø. R. Stien, A. J. Sørensen and E. J. Davies, Identification of Marine Plastics using Raman Spectroscopy (Oceans, Seattle, 2019).

高速 BOCDR に基づくプラスチック光ファイバに沿った振動分布の検出

Distributed vibration detection along plastic optical fiber based on high-speed BOCDR

○ 鶴谷 柊人¹、越智 星河²、野田 康平³、水野 洋輔²、李 ひよん¹

¹ 芝浦工業大学 理工学研究科 ² 横浜国立大学 工学研究院 ³ 東京大学 工学系研究科

○ Shuto Tsurugai¹, Seiga Ochi², Kohei Noda³, Yosuke Mizuno², and Heeyoung Lee¹

¹ Shibaura Institute of Technology ² Yokohama National University ³ The University of Tokyo

E-mails: af20095@shibaura-it.ac.jp, hylee@shibaura-it.ac.jp

1. はじめに

多様化する構造物の健全性を診断する技術の重要性が高まっており、ブリルアン散乱の周波数シフト[1]を活用した光ファイバ型歪・温度分布センシングに注目が集まっている。数あるブリルアンセンサの中でも、連続光の相関制御に基づいて位置分解を実現する「ブリルアン光相関領域反射計 (BOCDR)」[2]は、測定ファイバ (FUT) の片端への光入射で動作し、高い空間分解能とランダムアクセス性などの利点を兼ね揃える唯一無二の技術である。

BOCDR の提案当初は、各測定位置でブリルアン利得スペクトル (BGS) を取得するための周波数掃引が律速となり、動作速度が遅いという問題があった。しかし、これまでに種々の方法により、BOCDR の高速動作が実現されている。その一つは、本来周波数領域で観測される BGS の時間領域への変換に基づいており、歪ダイナミックレンジが制限されない唯一の高速 BOCDR である (以下、単に「高速 BOCDR」と呼称する)。

高速 BOCDR は、専らシリカガラス光ファイバを FUT として用いて動作が実証されてきた。しかし、ガラス光ファイバは数%の歪で切断されてしまうため、最近ではプラスチック光ファイバ (POF) を FUT として用いる研究も進んでいる[3]。これまでに POF に沿った静的歪や温度の分布の高速計測は報告されているが[4]、POF に沿った動的歪 (= 振動) の分布検出は報告がない。POF に沿った振動分布が検出できれば、構造物の健全性診断ツールとしての価値が高まると期待される。

そこで本研究では、高速 BOCDR により POF に沿った振動分布を検出できることを実証する。

2. 原理と実験条件

超高速 BOCDR の実験系を Fig. 1 に示す。信号処理系では、電圧制御発振器 (VCO) を用いて周波数が高速に変化する電気信号を生成する。これを周波数領域の BGS とミキシングすると BGS が周波数方向に高速シフトする。このとき、電気スペクトラムアナライザ (ESA) のゼロスパン出力を用いれば、BGS を時間領域に変換できる。ESA での周波数掃引速度に比べ、VCO での電圧掃引速度の方が遥かに高く設定できるため、高速な分布測定が可能となる。

FUT の構成を Fig. 2 に示す。長さ 180 cm、コア径 50 μm の全フッ素化 POF を使用した[3]。中央の 80 cm の区間に 0.5% の静的歪を印加してから、周波数 1 Hz で正弦波状に振動する $\pm 0.5\%$ の動的歪を印加した (印加されている歪は 0–1.0%)。

実験では、変調周波数を 4178.0–4186.0 kHz、変調振幅を 0.7 GHz とした。これは、測定レンジ 12.9 m、理論空間分解能 64 cm に対応する。また、各測定点における BGS を構成する各プロット点のサンプリングレートは 100 kHz とし、ブリルアン周波数シフト (BFS) は 2 回平均した。

3. 実験結果

POF に沿った BFS 分布の時間変動を Fig. 3 に示す。POF 中央の約 80 cm の区間で、1 Hz で BFS が変動していることがわかる (歪印加時の BFS のシフト方向を赤で表示)。これは印加した振動を分布的に検出できていることを示す。しかし、

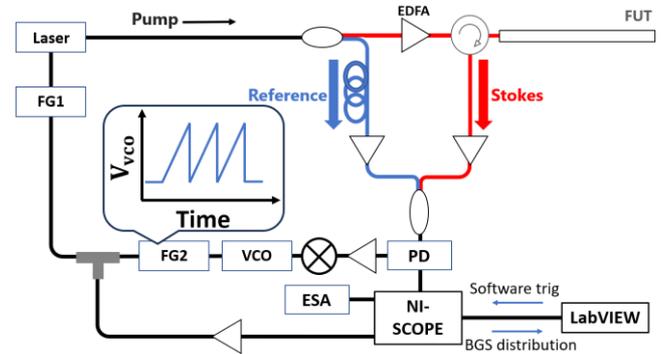


Fig. 1. Experimental setup of high-speed BOCDR. ESA: electrical spectrum analyzer, FUT: fiber under test, PD: photodetector, FG: function generator, VCO: voltage-controlled oscillator, EDFA: erbium-doped fiber amplifier.

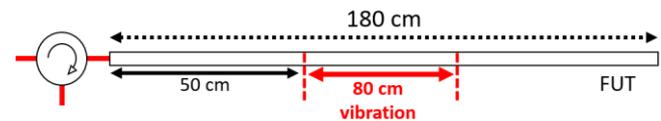


Fig. 2. Schematic structure of fiber under test

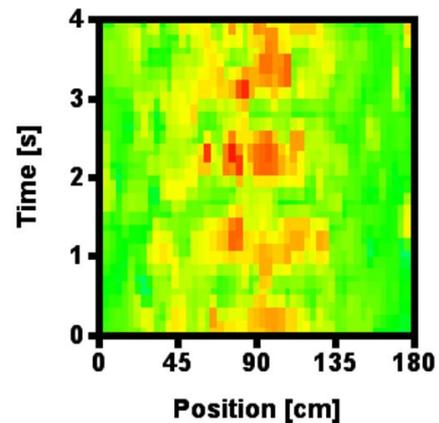


Fig. 3. Temporal variation of BFS distribution.

信号対雑音比は著しく低かった。これは、POF はコア径が比較的大きく多モードファイバであるため、ブリルアン散乱光が微弱であること[3]が主要因であると考えられる。

今後は信号対雑音比を向上させ、より定量的な評価を行うとともに、より高速な振動、あるいは、より高空間分解能での振動の分布検出を実証したい。

参考文献

- [1] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics* (AP, CA, 1995).
- [2] Y. Mizuno, et al., *Opt. Express* **16**, 12148 (2008).
- [3] Y. Mizuno et al, *Appl. Phys. Lett.* **97**, 021103 (2010).
- [4] 越智, 鶴谷, ほか, 信学会 2024 年総合大会, B-13-41.

傾斜利用 BOCDR による振動分布計測の実証

Distributed vibration detection in slope-assisted BOCDR

○田中 伸輔¹、鈴木 之大¹、捧 治紀¹、水野 洋輔²、李 ひよん¹

¹ 芝浦工業大学 大学院理工学研究科 ² 横浜国立大学 大学院工学研究院

○Shinsuke Tanaka, Yukihiro Suzuki¹, Haruki Sasage¹, Yosuke Mizuno², and Heeyoung Lee¹

¹ Shibaura Institute of Technology ² Yokohama National University

1. はじめに

建造物の老朽化や自然災害による損傷が増加し、建造物の健全性を診断する技術のニーズが高まっている。そこで注目されているのが、歪や温度変化の測定が可能な「ブリルアン光相関領域反射計 (BOCDR)」である[1]。BOCDR は、mm オーダの空間分解能、ランダムアクセス性、破断箇所までの測定が可能というメリットがある。従来の BOCDR では、ブリルアン周波数シフト (BFS) の分布情報を取得するために、各測定点においてブリルアン利得スペクトル (BGS) 全体を測定する必要があり、そのために電気スペクトラムアナライザ (ESA) の周波数掃引機能を用いていた。しかし、ESA の周波数掃引速度は比較的低速であるため、システムのリアルタイム動作のためには工夫が必要であった。

その工夫の 1 つとして提案された方式が、「傾斜利用 BOCDR」である[2,3]。傾斜利用 BOCDR では、ESA のゼロスパン機能を用いることで、BGS 全体を取得することなく、スペクトル上の特定周波数におけるパワーのみを取得する。そして、そのパワー変化と BFS を一対一対応させることで、歪や温度変化を算出することができる。また、ESA の周波数掃引を用いないので、リアルタイム測定が実現できる。しかし、これまでの実験では、静的な歪の高速分布測定は実証されているものの、動的な歪、すなわち振動を分布的に検出したという例はない。

そこで本研究では、傾斜利用 BOCDR を用いて振動の分布検出を実証するとともに、高い信号対雑音比を実現するためには偏波変動の影響の抑制が重要であることを実験的に示す。

2. 実験系

今回用いた傾斜利用 BOCDR の実験系を Fig. 1 に示す[2,3]。光学系ではブリルアン散乱を観測するために自己ヘテロダイン検波を用いており、光源には波長 1550 nm の半導体レーザを使用した。分布測定を実現するために、出力光には正弦波で周波数変調を施した。FUT への入射光のパワーは約 24 dBm とした。電気系では、ESA のビデオ帯域幅を 1 kHz、分解能帯域幅を 3 MHz とした。また、オシロスコープの平均回数は 128 回、繰り返し時間は 10 ms とした。理論空間分解能は約 17 cm に設定した。

この実験系を用いて、2 種類の振動分布検出を行った。まず、1 つ目の実験では、長さ 5 m のシリカ単モードファイバ (SMF) を FUT として用いた。その際、Fig. 1 にある偏波スクランブラ (PSCR) は OFF とした。続いて、2 つ目の実験では、偏波変動の影響を抑制すべく、長さ 5 m の偏波保持ファイバ (PMF) を FUT として用い、PSCR も ON とした。どちらの場合においても、Fig. 2 に示すように、FUT 中の 1 m の区間に 1 Hz の振動を印加した。

3. 実験結果

1 つ目の振動測定の結果 (紙面の都合でグラフは省略)、正しい位置でスペクトルパワーの 1 Hz での時間変動が観測され、振動分布を検出することができた。しかし、振動を印加していない箇所においてもパワー

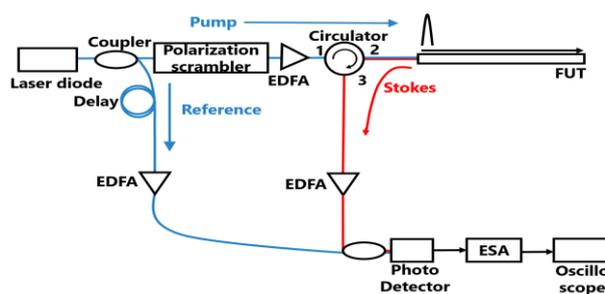


Fig. 1. Experimental setup. EDFA: erbium-doped fiber amplifier, ESA: electrical spectrum analyzer.

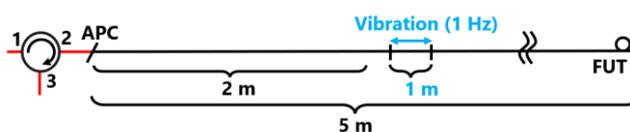


Fig. 2. Structure of FUT.

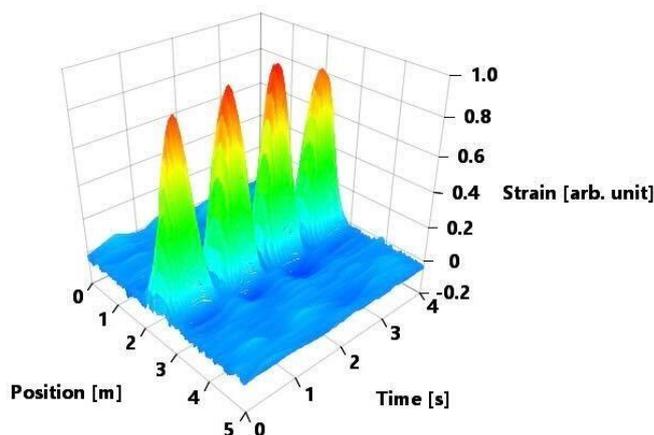


Fig. 3. Temporal variations of BFS distribution along a polarization-maintaining fiber measured when a polarization scrambler was used.

の時間変動が観測されてしまった。

次に、2 つ目の振動分布検出の結果を Fig. 3 に示す。正しい位置でスペクトルパワーが 1 Hz で時間変動しており、振動分布を正しく検出できたといえる。また、振動を印加していない箇所ではスペクトルパワーはおおよそ一定であり、1 つ目の実験結果に比べ、信号対雑音比が劇的に向上した。以上の結果から、傾斜利用 BOCDR で振動分布を検出する際には、偏波変動の影響を抑制することが重要であることを明らかになった。

今後は、より高い振動周波数を印加し、本システムで測定可能な周波数の上限を調査していく。

参考文献

- [1] Y. Mizuno et al., Opt. Express **16**, 12148 (2008).
- [2] H. Lee et al., IEEE Photon. J. **8**, 6802807 (2016).
- [3] H. Lee et al., Opt. Express **24**, 29190 (2016).

ヘテロダイン検出ファイバーキャビティリングダウン温度センサー II

Fiber cavity ring-down temperature sensor based on heterodyne detection II

北里大理¹, [○](M2) 池口 泰樹¹, 黒田 圭司¹Department of Physics, School of Science, Kitasato University¹, [○](M2) Taiki Ikeguchi¹, Keiji Kuroda¹,

E-mail: ikeguchi.taiki@st.kitasato-u.ac.jp

ファイバーループリングダウン分光法 (FLRD) はキャビティリングダウン分光法 (CRDS) から派生した分光法の一つである。CRDS は 2 枚の高反射ミラーを用いて光を試料内で多数回往復させることで相互作用長を伸ばし、分子の微小な濃度や状態変化を測定する方法である。それに対して FLRD はミラーの代わりにファイバーを用いてループを形成し、試料濃度やセンサーヘッドによる周囲環境 (圧力、温度、歪など) の変化を高精度に検出する方法である [1]。

温度センサーヘッドとして使用するファイバースラックグレーティング (FBG) は光ファイバーのコアに回折格子が形成されているデバイスで、ブラック反射条件を満たす波長のみを反射する。FBG は熱変化や歪が加わることで周期や屈折率が変化しセンサーヘッドとして使用できる。FBG をセンサーヘッドとして用いた FLRD では、FBG スペクトルのスロープにパルスの波長を調整し、FBG スペクトルのシフトに依存した透過強度の変化をループ内の損失として測定する。我々のグループはループの代わりに FBG を疑似的なミラーとして用いた線形キャビティによる透過型キャビティリングダウン温度センサーを提案した [2]。そこでは 2 台の DFB (Distributed Feedback) レーザー (以下、DFB) を用いたヘテロダイン検出技術による高感度化を行っている。リングダウン時間から求めたセンサーの精度は 0.018°C (周波数で約 25.3MHz) であった。我々の方法の精度の限界を評価するには、この周波数精度が光源であるレーザーの揺らぎによるものなのか測定する必要がある。本研究では光ビート法を用いた DFB の周波数揺らぎの評価を行ったので報告する。

光ビート法とは同種の 2 台のレーザーを独立に発振させ、そのビート信号からレーザーの線幅や発振周波数の時間変化を測定する手法である。図 1 に実験セットアップ図を示す。2 台の DFB を連続波で発振させ温度と注入電流で波長を調整する。出力光をカプラーで干渉させビートを発生させる。カプラー出力の一方は光検出器で検出しオシロスコープで表示する。検出バンド幅に収まっているのを確認し、もう一方の出力は電気スペクトルアナライザー (ESA) を用いてスペクトルを測定した。DFB は安定するまで放置した後、スペクトルの中心周波数を 1 分間隔で多数回測定した。

図 2 に ESA スペクトル、図 3 に 60 分間の測定結果を示す。中心周波数は 204MHz から 210MHz までの間に分布している。図 4 は中心周波数のヒストグラムで、実線はガウス関数によるフィッティングの結果である。中心周波数 $\mu = 207\text{MHz}$ 、標準偏差 $\sigma = 0.88\text{MHz}$ であった。光ビート法で得られる揺らぎは 2 台のレーザーの揺らぎの和になると仮定すれば、1 台のレーザーの揺らぎはこの半分値 $\sigma/2$ になる。

ヘテロダイン検出キャビティリングダウンセンサーではループ内を周回後に出力される信号光パルス列と連続波の参照光を混合することでビートを検出し高感度化している。典型的な信号を図 5 に示す。つまり信号光の周波数揺らぎは温度測定精度に影響するが、参照光の揺らぎは観測するビート周波数の揺らぎになるだけで精度には影響しないと考えられる。よってリングダウン測定精度への信号光レーザーの影響として、標準偏差の 2 倍を仮定すると $2\sigma/2 = 0.88\text{MHz}$ となる。その結果、上記の FBG センサーの分解能に対応する精度約 25.3MHz と比較するとレーザーの揺らぎは約 3.4% であり、キャビティリングダウン温度センサーの測定精度は光源レーザーの揺らぎが原因ではないと結論付けられた。

[1] C. Wang, Sensors, 9, 7595-7621 (2009).

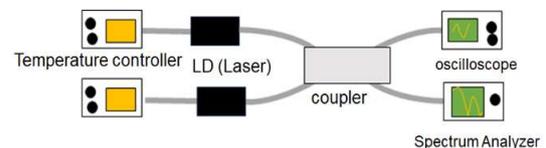
[2] 池口泰樹, 岡寿樹, 黒田圭司,
第 84 回応用物理学会秋季学術講演会 23p-A308-8.

Figure 1

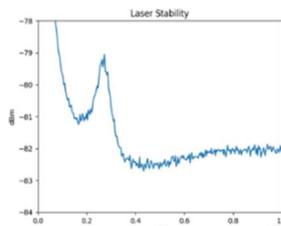


Figure 2

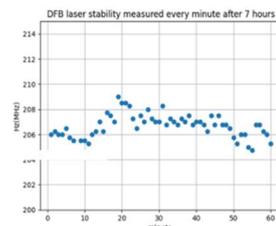


Figure 3

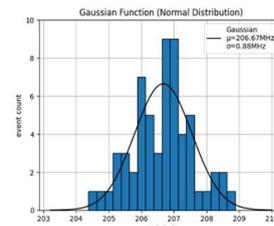


Figure 4

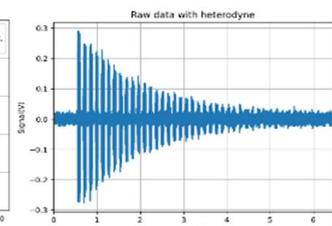


Figure 5

二波長差動検波リアルタイム FBG センサー

Real-time FBG sensor based on dual-wavelength differential detection technique

北里大理¹, [○](M1) 鬼村 拓実¹, 黒田 圭司¹

Department of Physics, School of Science, Kitasato University¹, [○](M1) Takumi Onimura¹, Keiji Kuroda¹,

E-mail: onimura.takumi@st.kitasato-u.ac.jp

Fiber Bragg Grating(FBG)は、光ファイバーのコアに回折格子が形成されている光ファイバー型デバイスで、回折格子の周期によるブラッグ反射条件を満たす波長の光のみ反射する。FBG に温度変化や歪みが加わると、その周期や屈折率が変化することで反射波長がシフトするためセンサーヘッドとして活用されている。我々は FBG センシングにおいて二波長差動検波法を用いてセンサーシステムの高機能化を目指している。二波長差動検波とは二波長パルスの FBG からの反射強度の差をとり、FBG 反射のピーク波長を測定する方法である(図 1(a))。FBG の反射スペクトルをガウス関数と仮定し、同じ強度の二波長パルスペアを入射した時の FBG 反射強度を対数領域で差し引くと次式のパルス電力比(PPR: Pulse Power Ratio)を導出することができる。

$$PPR = E + F \times \lambda_B.$$

ここで各係数は

$$E = 10\log_{10} 2 \times \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{B_g^2}, \quad F = -10\log_{10} 2 \times \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{B_g^2}.$$

と表され、 λ_B は FBG のブラッグ波長、 λ_1 と λ_2 はパルスペアの波長、 B_g は FBG 反射スペクトルの半値全幅を示している。PPR はブラッグ波長 λ_B に対して線形に変化し、平均波長 $(\lambda_1 + \lambda_2)/2$ が λ_B に一致したとき 0 になる。これにより PPR を測定することで光源の波長掃引無しで FBG の温度変化がモニターでき、さらに高精度化が可能というメリットがある。これまでの研究[1]ではこの二つのメリットに焦点を当て研究がされてきたが、上式からパルスペアの平均波長 $(\lambda_1 + \lambda_2)/2$ 、パルスペアの波長差 $(\lambda_2 - \lambda_1)$ 、FBG の半値全幅 B_g を正確に決定すれば、波長 λ_B は $(PPR - E)/F$ からリアルタイムでの決定が可能だと期待される。本研究ではこのような観点から、二波長差動検波リアルタイム FBG 温度センサーについて報告する。

光源である DFB(Distributed Feedback)レーザーアレイは複数の DFB レーザー(LD)と半導体光増幅器(SOA)から構成され、LD と SOA を直接変調することでパルスを発振させる。LD にパルス電圧を印加した場合、キャリア注入による熱の影響で共振器長が変化し、パルス内で周波数ドリフトが発生することが知られている。同時に SOA を幅の狭い 2 パルス電圧で励起することでゲートとして用いることができる。その結果二波長パルスペア($\lambda_1 < \lambda_2$)を 1 台のレーザーから発振させることが可能である。DFB レーザーアレイからの出力光をサーキュレーター透過後 FBG に入射させる。FBG からの反射光は光検出器で電気信号に変換された後オシロスコープで検出する。FBG のスペックは中心波長 1550.1nm、バンド幅(FWHM) 0.2nm、反射率 1%である。

波長 λ_B の計算に用いるパルスペアの平均波長 $(\lambda_1 + \lambda_2)/2$ はパルス発振時の波長を光スペクトルアナライザーで、FBG の半値全幅 B_g はメーカーによる値ではなく DFB レーザーを用いたレーザー分光によって、波長差 $(\lambda_2 - \lambda_1)$ は Mach-Zehnder 干渉計による遅延自己相関測定でそれぞれ決定した値を用いた。図 1(b)に典型的な入射パルス波形、図 1(c)に FBG の反射パルス波形を示す。上段が $(\lambda_1 + \lambda_2)/2 > \lambda_B$ 、中段が $(\lambda_1 + \lambda_2)/2 \sim \lambda_B$ 、下段が $(\lambda_1 + \lambda_2)/2 < \lambda_B$ の条件で、それぞれ 2 パルスの強度比が変化しており、ここから λ_B を算出することができる。測定したパルス強度は PC に取り込まれ Labview プログラムを用いて自動で λ_B の計算までを行い表示できるようにした。パルスペアは 1kHz の繰り返しで発振しておりパルス 10 回分を積算している。よって 100Hz 動作となっている。現在、測定精度の評価と実際の温度測定を行っており、詳細については講演で述べる予定である。

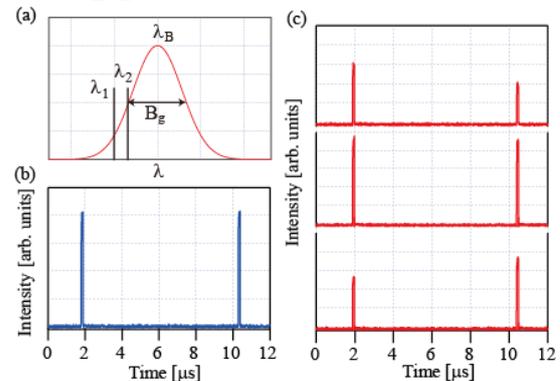


Figure 1

[1] 稲葉初, 黒田圭司, 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会 23a-P02-1.

時間・波長分割多重 Bus Topology FBG センサー

Time- and Wavelength-division multiplexed Bus Topology FBG sensor

北里大理¹, °(M2)松本孝広¹, 黒田圭司¹

Department of Physics, School of Science, Kitasato University¹, °(M2)Takahiro Matsumoto¹, Keiji

Kuroda¹

E-mail: matsumoto.takahiro@st.kitasato-u.ac.jp

FBG(Fiber Bragg Grating)は光ファイバーセンサーにおける温度・歪みセンサーヘッドとして利用される。昨年の秋季講演会でヘテロダイン検出時間・波長分割多重(TDM, WDM : Time-, Wavelength- Division Multiplexing)ハイブリッド FBG センサーシステムを単一のファイバーラインに対して実現したことを報告した[1]。微弱な FBG 反射光を強度検出ではなく、その振幅を参照光との混合によるヘテロダイン検出で高感度化できること、TDM 多点化した場合に後方 FBG に対しての信号減衰を軽減できることを示した。一方で単一ラインはシンプルな構成になる反面、ある点で断線が生じた場合、それ以降のセンサーにアクセスできないという脆弱性も持つ。この点を克服する目的で Bus-topology のセンサーネットワークが提案されている[2]。Bus-topology では母線ファイバーからカプラーを介して光を分け、各分岐にセンサーヘッドを組み込む。つまりセンサーヘッドに断線が生じてても他の分岐には影響しないというローバスト性を持つネットワークが構築できる。しかしカプラーの分岐比を大きくすると、センサーヘッドからの反射光が小さくなり S/N 比が低下する。一方で分岐比を小さくすると、後方の分岐へ伝達できる光強度が低下するというトレードオフの関係が存在する。90:10 カプラーを用いた場合の FBG 反射光の規格化強度をカプラー個数でプロットしたものが図 1 である。青線が強度検出で $I=k^{2(n-1)}$ である。ここで k は分岐比 0.9、 n が個数である。20 個並べると -17dB(0.05 倍)程度にまで減少することがわかる。一方でヘテロダイン検出の場合、反射光の振幅を測定するので、この関数にルートがかかりオレンジの線のようになる。20 個で -9dB(0.15 倍)程度まで減少が緩和されている。つまりヘテロダイン検出の振幅測定という面が Bus-topology においても有利に働くことが期待できる。また我々の時間・波長分割多重ハイブリッドシステムを用いることで各分岐に配置する FBG 数の増加が見込まれる。これらを考慮し Bus-topology において TDM・WDM ハイブリッド FBG センサーの原理実証を行ったので報告する。

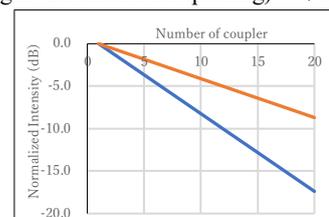


Fig. 1. Normalized Intensity (Blue: Intensity detection, Orange: Heterodyne detection)

光源は分布帰還型半導体レーザー(DFB-LD)アレイとし、任意波形発生器で LD を直接変調し 500ns パルスを生じる。出力光を 2 分割し 10%を C₂H₂ セルへ、90%をさらに 2 分割しそれぞれ信号光と参照光とする。信号光は強度変調器で 60ns パルスに短縮され、サーキュレーター経由で FBG へ入射する。FBG からの反射光はカプラーで 500ns 参照光と混合する。カプラーからの 2 つの出力は差動検出器により検出され、オシロスコープを通して PC に取り込む。LD の温度コントローラーに周期 10 秒の Ramp 電圧を印加することで波長自動掃引を行っている。用いた FBG は反射率約 92%、FWHM 0.2nm±0.1nm で中心波長 1531.1nm±0.1nm、1540.5nm±0.1nm の 2 種類である。図 2 に示すように 90:10 カプラーを用い、分岐路内の FBG は WDM、異なる分岐の同一波長 FBG はカプラー間の遅延による TDM で識別するハイブリッド構造とした。

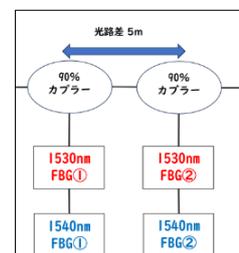


Fig. 2. Bus Topology

LD への直接変調による共振器の熱膨張で周波数ドリフトが発生し、かつ参照光と信号光の間には遅延があるため検出信号にはビートが観測される。1531.1nm FBG に対する典型的なビート波形を図 3(a)に示す。図 3(b)に示すようにビート振幅を 2 乗し、パルス幅内全体の面積和を反射光強度 I_{sum} としてプロットしたものが図 3(c)の青点・である。図 3(d)に波長校正に用いる C₂H₂ スペクトルを示す。図 3(c)の朱色の実線はガウス関数によるフィッティングの結果である。これから FBG の中心波長および FWHM は 1531.05nm、0.22nm となり FBG のスペックをよく再現できた。講演ではさらに温度センサーとしての動作も報告する予定である。

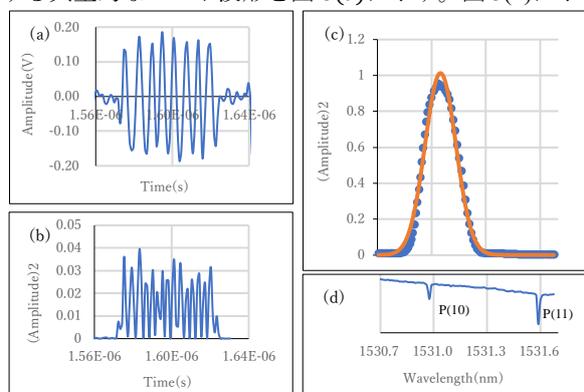


Fig. 3. (a)Beat signal, (b)Square of beat amplitude, (c)Blue circles: I_{sum} , Orange line: Gaussian fitting, (d)Acetylene spectrum for wavelength calibration

[1]松本孝広、岡寿樹、黒田圭司、第 84 回応用物理学会 秋季学術講演会 23p-A308-9.

[2] S. Diaz, et. al., Laser, & Photon. Rev., 2(6) 480-497 (2008).

マルチモード干渉構造光ファイバ屈折率センサの長さ と局所的な径変化にもなう干渉スペクトルの変化

Variation of interference spectra of multimode interference-structured fiber optic refractive index sensors with local taper processing

高知工科大学システム工学群 ○(B)田中 翔稀, 田上 周路

Kochi Univ. of Tech., °Shoki Tanaka, Shuji Tause

E-mail: 250102y@ugs.kochi-tech.ac.jp

光ファイバセンサは電磁干渉性に優れ、その細線形状を利用して様々な計測対象への利用が期待されている。近年ではテーパ構造[1]やマルチモード干渉(MMI)構造による外部物質との相互作用を利用した高感度な屈折率センサが実証されている[2]。本研究ではマルチモード干渉構造にテーパ加工を施すことを想定し、その干渉スペクトルの変化について検証を行った。

実験にはシングルモードファイバ(SMF)の間にマルチモードファイバ(MMF)を融着接続した MMI 構造を構築し、図 1 に示すように融着点の MMF 側をテーパ化と拡張化の加工を行うことでスペクトルの変化を観測した。光源には白色光源を用い、光スペクトラムアナライザを用いて MMI 透過後の光スペクトルを取得した。検証を行う干渉スペクトルには次式の干渉次数 $m=4$ で示される干渉ピークを用いた。

$$\lambda = \frac{4n_f r^2}{L} m$$

ここで n_f , r , L はそれぞれ MMF の屈折率、センサ部の半径、センサ部の長さを表す。実験に用いた MMF は $2r$ が $125 \mu\text{m}$ のコアレスファイバとし、 L を 57 mm として作製することで干渉ピーク波長 λ を 1600 nm に設定した。図 2 に結果の 1 例として加工によって直径を $140 \mu\text{m}$, $110 \mu\text{m}$ とした MMI 構造の干渉スペクトルを示す。加工にもなうセンサ部の長さや径の変化によってピーク波長が変化しているが、干渉スペクトル形状は保たれていることがわかる。

発表では、より大きな径変化による干渉スペクトルの変化や、センサの中央部を加工した場合との比較について示す。

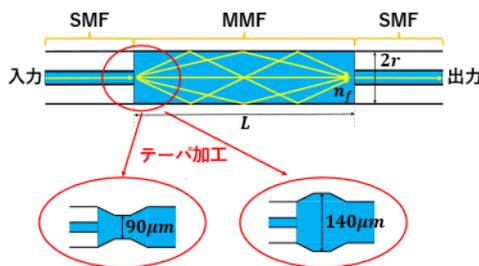


Fig.1 MMI 構造と局所的な径変化

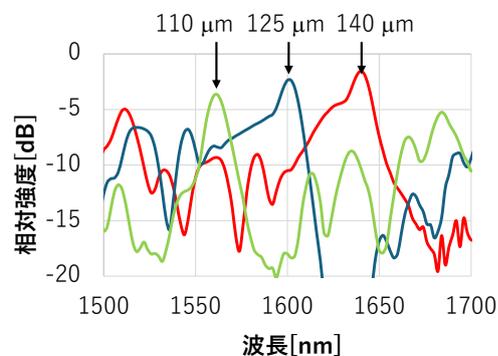


Fig. 2 MMF の局所径を変化させた時の干渉ピーク

[1] Ujah, E., Lai, M. & Slaughter, G., *Sci Rep* **13**, 4495 (2023).

[2] Miyamura, S., Oe, R., Nakahara, T. et al., *Sci Rep* **13**, 14541 (2023).

光相関領域反射計における GHz 周波数シフトを用いたゴーストピークの抑制

Suppression of Ghost Peak in Optical Correlation-Domain Reflectometry through Gigahertz-Order Frequency Shift

○清住 空樹¹, 吉田 総司², 野田 康平¹, 水野 洋輔², 山下 真司¹

○Takaki Kiyozumi¹, Soshi Yoshida², Kohei Noda¹, Yosuke Mizuno², and Shinji Yamashita¹

¹The University of Tokyo, ²Yokohama National University

Emails: kiyozumi-takaki@g.ecc.u-tokyo.ac.jp, syamacntp.t.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

光相関領域反射計 (OCDR) は、任意の位置で高い信号対雑音比で反射率測定が可能な光反射計であり、周波数領域反射計や時間領域反射計に並ぶ手法として知られている[1]。しかし、OCDR は、特定の実験条件の下で、本来反射点がない位置にゴーストピークが出現するなどの実験結果が報告されている[2]。そこで、本研究では、両側波帯変調器を用いて反射光に GHz オーダの周波数シフトを施すことにより、ゴーストピークが除去できることを実験的に示す。

2. 原理

標準的な OCDR 実験系を Fig. 1 に示す。正弦波によって周波数変調を施されたレーザー光を FUT に入射し、その反射光にヘテロダイン検波を行うという構成になっている。ここで、被測定ファイバ (FUT) の各位置にて反射光に対して検波を行った場合のスペクトルは、周波数 f [m]と位置 x [m]を変数とする関数として

$$S(f, x) = \frac{1}{2} \sum_{v=-\infty}^{\infty} \left| J_v \left(2 \frac{\Delta f}{f_m} \sin \left(\frac{2\pi f_m n x}{c} \right) \right) \delta(f - f_A + v f_m) \right| \quad (1)$$

$$+ \frac{1}{2} \sum_{v=-\infty}^{\infty} \left| J_v \left(2 \frac{\Delta f}{f_m} \sin \left(\frac{2\pi f_m n x}{c} \right) \right) \delta(f + f_A + v f_m) \right|.$$

と表現される。ここで、 J_v は v 次ベッセル関数、 f_m は変調周波数、 Δf は変調振幅、 n はファイバコアの屈折率、 f_A は反射光をヘテロダイン検波する際の周波数シフト値である。

OCDR では、このスペクトルから反射点の情報を得るために、 f_A を中心とする狭帯域のバンドパスフィルタリング(ゼロスパン処理)をおこなう[3]。式(1)において、中心周波数 f_A のバンドパスフィルタ処理を行うことを想定すると、OCDR における単一反射点に対応するピークが

$$\gamma(x) = J_0 \left(2 \frac{\Delta f}{f_m} \sin \left(\frac{2\pi f_m n x}{c} \right) \right) \quad (2)$$

$$+ J_{N_z} \left(2 \frac{\Delta f}{f_m} \sin \left(\frac{2\pi f_m n x}{c} \right) \right)$$

$$N_z(f_A) = \left\lfloor \frac{2f_A}{f_m} + 0.5 \right\rfloor \quad (3)$$

と導出される。Eq.(2)において、第一項が反射点に対応するピークであり、第二項がゴーストピークとなる。そして、周波数シフト f_A がビートスペクトルの帯域幅よりも大きいならば、第二項は0に近似できる。ビートスペクトルの帯域は、変調振幅 Δf によって決定され、それはたいいてい数 GHz である。よって、ヘテロダイン検波の際の周波数シフトを GHz オーダにすることで、ゴーストピークを抑制することができる。

3. 実験

3.1 100 MHz 周波数シフトによるゴーストピークの確認

Fig. 1 の実験系にて、100MHz の周波数シフトを用いることで、ゴーストピークの発生が確認されることを確認する。まず、レーザーの電流制御により直接変調を施された、変調振幅 $\Delta f=7.5$ GHz の入射光スペクトル持つ光は、カプラーによって入射光と参照光に分岐される。入射光路には、出力 11.6 dBm の光増幅器(EDFA)を挿入し、参照光路には 300 m の遅延線ファイバを挿入した。FUT

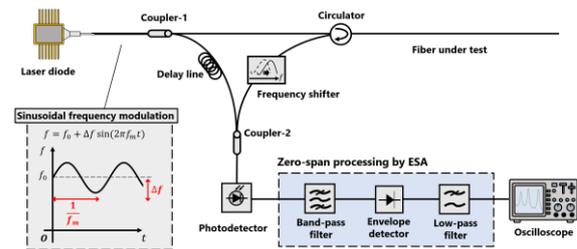


Fig. 1. Experimental setup of OCDR.

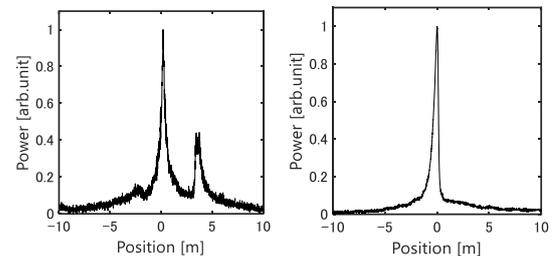


Fig. 2. Experimental results of OCDR using (a) 100 MHz frequency shift and (b) 10 GHz frequency shift.

からの反射光は出力 0.9 dBm の EDFA で増幅されたのち、音響光学変調器により、100 MHz の周波数シフトがなされる。そして、反射光と参照光はフォトダイオードにてヘテロダイン検波され、その出力信号の 100 MHz における信号強度変化が、ESA のゼロスパン機能にて記録される。なお、この時のビデオ帯域幅(VBW)、および分解能帯域幅(RBW)はそれぞれ 1MHz に設定した。

FUT にはシリカのシングルモードファイバを用い、サーキュレータから 1 km の地点に反射点を設け、変調周波数 f_m を 125.7 kHz から 129.43 kHz の範囲で掃引することで、反射点の周囲 20m を測定した。最大値をとして正規化した結果を Fig. 2(a)に示す。中央に反射点を示すピークが確認できるものの、-2m 付近と、4m 付近にゴーストピークが生じていることが確認できる。

3.2 10 GHz 周波数シフトによるゴーストピークの抑制

Fig. 1 の実験系にて、10 GHz の周波数シフトを用いることで、ゴーストピークが抑制されることを確認する。反射光に対して、両側波帯変調器によって 10GHz の周波数シフトを施し、入射光路と反射光路の EDFA の出力をそれぞれ 11.7 dBm、5.3dBm に、ESA の VBW と RBW をいずれも 3MHz に設定し、ゼロスパン機能にて検波信号の 10 GHz における信号強度の変化を記録した。なお、その他のパラメータは、前節の実験と同じものを用いた。最大値を 1 として正規化した実験結果を Fig. 2(b)に示す。0m 地点に、反射点を表すピークが現れているものの、その左右にはゴーストピークが確認されない。これにより変調周波数以上の値 (GHz オーダ)での周波数シフトが、ゴーストピークの抑制に対して、効果的であることが示された。

4. 参考文献

- [1]K. Hotate, et al., J. Lightw. Technol., **11**, 10, 1701, (1993).
- [2]S. Yoshida, et al., OFS 2023, Tu3.71, Hamamatsu, Japan (2023).
- [3]T. Kiyozumi, et al., OFS 2023, Tu3.25, Hamamatsu, Japan, (2023).

周期的ランダム変調方式による OCDR の折り返しノイズの抑制

Suppression of folded noise in OCDR using periodic random modulation

○比嘉 祐太¹、元田 圭佑¹、吉田 総司¹、大坪 謙太¹、朱 光韜¹、清住 空樹^{1,2}、
石丸 貴大³、高橋 央^{1,3}、古敷谷 優介³、水野 洋輔¹

¹横浜国立大学 工学研究院 ²東京大学 工学系研究科 ³NTT アクセスサービスシステム研究所

○Yuta Higa¹, Keisuke Motoda¹, Soshi Yoshida¹, Kenta Otsubo¹, Guangtao Zhu¹, Takaki Kiyozumi^{1,2},
Takahiro Ishimaru³, Hiroshi Takahashi^{1,3}, Yusuke Koshikiya³, and Yosuke Mizuno¹

¹Yokohama National University ²The University of Tokyo ³NTT Access Network Service Systems Laboratories

E-mails: higa-yuta-fc@ynu.jp, mizuno-yosuke-rg@ynu.ac.jp

1. はじめに

光ファイバ通信は我々の生活に必要な不可欠なものとなっており、その不具合の発生を未然に防ぐため、光ファイバネットワークの健全性診断の需要が高まっている。そこで、光ファイバ上の接続不良箇所や損傷などの位置と、その反射率を計測できる反射率分布センサが注目されている。主な方式として、光時間領域反射計 (OTDR) [1] と光周波数領域反射計 (OFDR) [2] が知られており、それぞれ長い測定レンジや高い空間分解能などの利点を有する。しかし、OTDR には動作速度が遅い、OFDR には狭線幅光源のコストが高いという課題が存在する。一方、光相関領域反射計 (OCDR) [3] はリアルタイム動作が可能で、光源のコストが比較的安く、ランダムアクセス性などの利点も有する。

一般に、OCDR では、低周波ノイズを避けるために音響光学変調器 (AOM) を用いることが多い。OCDR の最終的な出力は、測定ファイバ (FUT) に沿った反射パワー分布である。ここで、FUT 上の反射点 1 つに対し、1 つの反射パワーのピークが立つことが理想的である。しかし、正弦波変調に基づく OCDR では、反射点 1 つに対し、本来のピークに加えて前後にノイズピークが発生する可能性がある。これは、AOM を用いた OCDR では、正弦波変調に基づく放射状のビートスペクトルの折り返しが重畳するためである [3]。

そこで本研究では、正弦波変調ではなく周期的ランダム変調に基づく OCDR を提案し、ノイズピークの抑制に有効であることを実証する。

2. 原理と実験条件

OCDR では、レーザに周波数変調を施すことで、FUT 中に相関ピーク (測定位置として機能) を生成し、変調周波数を制御することで、相関ピークの位置を FUT に沿って掃引し、反射パワーの分布測定を可能とする。

AOM を用いた OCDR の実験系を Fig. 1 に示す。まず、レーザの出力光を、FUT への入射光 および ヘテロダイク検波のための参照光に分ける。FUT からの信号光と参照光のビート信号をフォトディテクタで電気信号に変換し、電気スペクトラムアナライザ (ESA) に入力する。ESA のゼロスパン機能により、ある固定の周波数におけるスペクトルパワーを高速取得し、これを各測定位置に対しプロットすることで、FUT に沿った反射パワーの分布情報を得る。なお、用いた FUT の構成を Fig. 2 に示す。多数のシリカ単モードファイバを PC・APC コネクタで連結して構成した。

本実験では、レーザの変調波形を正弦波および周期的ランダム波形とし、両者の結果を比較した。どちらの変調波形の場合も、変調周波数 (ランダム変調の場合はランダム波形の周期の逆数) は 230 kHz から 270 kHz まで、掃引時間 20 ms で掃引した。ESA のゼロスパン機能を用い、AOM の周波数シフト量に合わせ、40 MHz におけるスペクトルパワーの変化を、測定位置の掃引と同期させてオシロスコープに表示した。

3. 実験結果

正弦波変調および周期的ランダム変調の場合に、FUT に沿った反射パワー分布の測定結果を Fig. 3(a) および Fig. 3(b) にそれぞれ示す。横軸はサーキュレータからの距離である。両者とも、反射パワーのピークが、4 つの PC コネクタおよび APC コネクタの開放端 (B, C, D, F および G) に対応する位置に現れた (反射率が低い APC コネクタ (A および E) での反射ピークは明瞭には検出されなかった)。一方、正弦波変調では、各反射ピークの前後に特徴的な形状のノイズピークが観測されたが、周期的ノイズ変調ではノイズピークは観測されなかった。これは、周期的ランダム変調

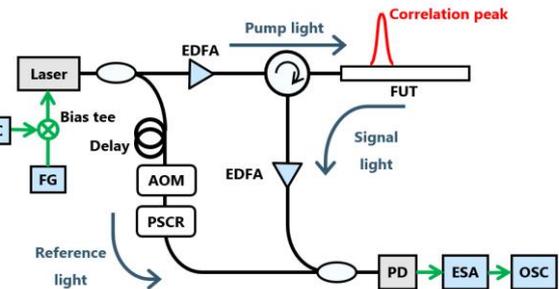


Fig. 1 Experimental setup of AOM-based OCDR. FG: function generator, DC: direct current, AOM: acousto-optic modulator, PSCR: polarization scrambler, EDFA: erbium-doped fiber amplifier, FUT: fiber under test, PD: photodetector, ESA: electrical spectrum analyzer, OSC: oscilloscope.

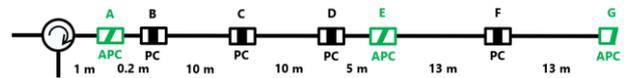


Fig. 2 Structure of FUT with PC and APC connectors.

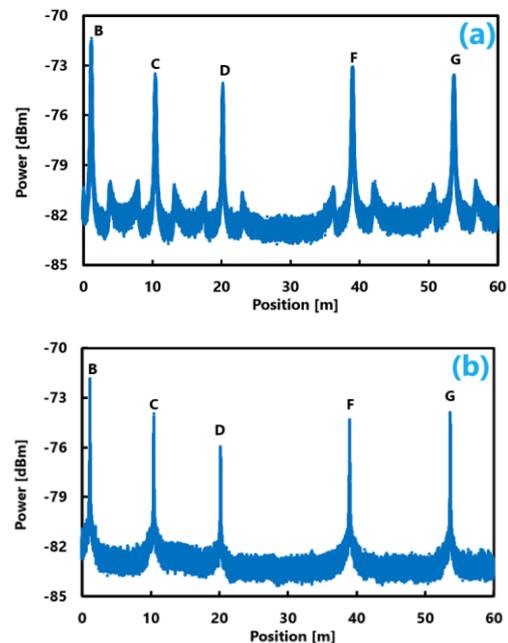


Fig. 3 Reflected power distributions measured with OCDR based on (a) sinusoidal modulation and (b) periodic random modulation.

のビートスペクトルは 2 次元デルタ関数状となるため [4]、折り返しノイズが発生しないと考えられる。

今後はより定量的な評価を行い、周期的ランダム変調に基づく OCDR を新技術として確立していく。

参考文献

- [1] M. K. Barnoski, et al., Appl. Opt. **16**, 2375 (1977).
- [2] W. Eickhoff, et al., Appl. Phys. Lett. **39**, 693 (1981).
- [3] T. Kiyozumi, et al., IEEE Trans. Instr. Meas. **73**, 7001711 (2024).
- [4] K. Otsubo, et al., J. Lightw. Technol., under review.

単側波帯変調器を用いた外部変調 BOCDR の提案

Proposal of external-modulation BOCDR using single-sideband modulator

○尾崎 滉太¹、菊地 啓太²、李 ひよん²、水野 洋輔¹

¹横浜国立大学 大学院工学研究院 ²芝浦工業大学 大学院理工学研究所

○Kouta Ozaki¹, Keita Kikuchi², Heeyoung Lee², and Yosuke Mizuno¹

¹Yokohama National University ²Shibaura Institute of Technology

E-mails: ozaki-kouta-pm@ynu.jp, mizuno-yosuke-rg@ynu.ac.jp

1. はじめに

構造物の健全性診断ツールとして注目が集まっている光ファイバセンサは、軽量・細径で取り回しが良く、電磁ノイズの影響を受けない、センサ部に電源が不要、分布測定が可能、といった利点を有する。数ある光ファイバセンサの中でも、我々は、自然ブリルアン散乱に基づく歪・温度の分布センシング技術「ブリルアン光相関領域反射計 (BOCDR)」[1,2]の性能向上に注力している。BOCDRは、測定ファイバ (FUT) の片端からの光入射のみで動作し、高い空間分解能やランダムアクセス性などの特徴を備える。

標準的な BOCDR では、狭線幅レーザの出力光に正弦波で周波数変調を施し、FUT への入射光と参照光に二分する。FUT からのブリルアン散乱光と参照光を干渉させることで FUT 中に相関ピーク (測定点として機能) を生成し、変調周波数を制御することでこれを掃引し、各位置におけるブリルアン利得スペクトル (BGS) およびブリルアン周波数シフト (BFS) を測定する。FUT 中の特定の位置に歪や熱が印加されると、その箇所における BFS が高周波側にシフトするため、歪や熱の分布情報を得ることができる。測定レンジを確保するため、参照光路に遅延線挿入し、高次の相関ピークを用いる。また、BOCDR の空間分解能は式(1)で与えられる[2]。

$$\Delta z = \frac{c\Delta\nu_B}{2\pi n f_m \Delta f} \quad (1)$$

ここで、 c は真空中の光速、 $\Delta\nu_B$ はブリルアン線幅 (シリカ光ファイバでは約 30 MHz)、 n は光ファイバのコアの屈折率、 f_m は変調周波数、 Δf は変調振幅である。

BOCDR における周波数変調方式として、直接変調方式と外部変調方式が知られている。直接変調方式は、レーザの駆動電流を直接変調する方式である[1]。簡素な構成と低廉性が利点であり、従来提案されている相関領域法の多くは直接変調方式を採用している。一方で、意図しない強度変調を伴うことや、使用可能なレーザに限られることが欠点であった。一方、外部変調方式では、レーザの出力光に対し、外部デバイスを使用して周波数変調を印加する[3,4]。直接変調方式の問題点を回避できるとともに、変調振幅と変調周波数を独立に制御可能といった利点がある。

従来の外部変調 BOCDR では、専ら両側波帯変調器 (DSBM) が用いられていた。実験系を Fig. 1 に示す。DSBM では、入力された RF 信号に対応するサイドバンドがキャリア光を挟んで両側に生成される。これが変調光となり、直後の狭線幅バンドパスフィルタでその成分のみを切り出す。このとき、パワーが大幅に低下するため、エルビウム添加光ファイバ増幅器による増幅が必要となり、信号対雑音比や安定性が低いという問題点があった。また、フィルタで抑制しきれない残留キャリアが変調されたサイドバンドと干渉し、DSBM を用いた外部変調方式に特有のノイズが発生することも知られている[5]。このノイズによって、空間分解能を決定する変調振幅が制限されていた。

そこで本研究では、これらの問題点を解決するために、DSBM の代わりに単側波帯変調器 (SSBM) を用いた外部変調 BOCDR を提案し、その利点を明らかにする。

2. 提案

SSBM はデュアルパラレルマツペンダ構造となっており、3 つのバイアス電圧を調整することで、出力光のキャリアやサイドバンドのパワーを自在に制御可能なデバイスである。従って、狭線幅フィルタを使用せずに変調されたサイドバンドのみを取り出すことが可能である。残留キャリアも十分抑制できるため、DSBM を用いた場合に現れる特有のノイズの発生も回避できると考えられる。また、キャリアのみを抑えて両側のサイドバンドを同時に用いることで、信号対雑音比を向上できる可能性もある。

SSBM を用いた外部変調系の構成を Fig. 2 に示す。まず、ファンクションジェネレータで時間的に正弦波状に変動する電圧を生成し、電圧制御発振器 (VCO) に印加する。VCO では入力電圧と同期した、時間的に正弦波状に周波数が変動する RF 信

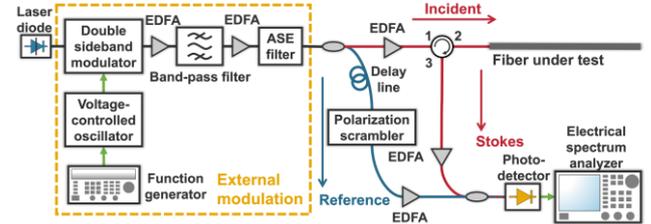


Fig. 1. Experimental setup of external-modulation BOCDR using double-sideband modulator. ASE: amplified spontaneous emission, EDFA: erbium-doped fiber amplifier.

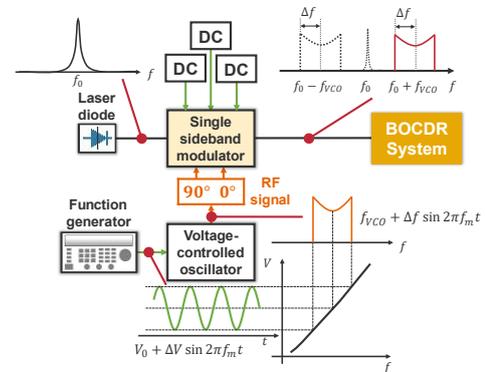


Fig. 2. Schematic setup of external modulation using single-sideband modulator.

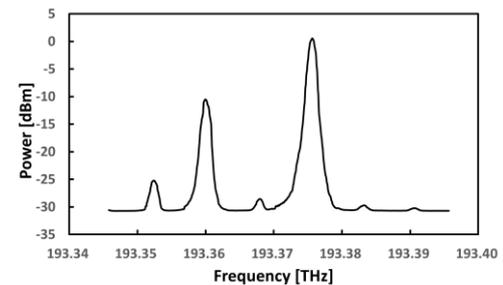


Fig. 3. Measured spectrum of modulated light with suppressed carrier at ~193.37 THz.

号 (スペクトル形状は逆正弦分布となる) が出力される。SSBM には 90° の位相差をつけて 2 つに分けた RF 信号と 3 つのバイアス電圧を入力する。バイアス電圧は、キャリアを抑えて一方あるいは両方のサイドバンドのみが残るように、光スペクトラムアナライザで確認しながら調整する。高周波側のサイドバンドのみを取り出した光スペクトルの例を Fig. 3 に示す (バイアスを最適化することで、低周波側のサイドバンドをさらに抑制することが可能)。このとき、電圧の継続的な印加や温度変化により生じる DC ドリフト現象に注意して微調整を行う必要がある。

本発表では、従来の DSBM を用いた外部変調 BOCDR の課題を解決するため、SSBM を用いた構成を新たに提案した。今後は、本手法で分布測定が実現可能であることを実証する。また、片側および両側のサイドバンドを用いた場合で、信号対雑音比の比較を行う。

参考文献

- [1] Y. Mizuno, et al., *Opt. Express* **16**, 12148 (2008).
- [2] Y. Mizuno, et al., *J. Lightwave Technol.* **28**, 3300 (2010).
- [3] K. Noda, et al., *Appl. Phys. Express* **12**, 022005 (2019).
- [4] K. Noda, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **58**, 068004 (2019).
- [5] K. Ozaki, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, submitted.

Proposal of pump-probe technique for fiber-optic temperature sensing using Raman spectrum near Rayleigh peak

Hamza Javid and Yosuke Mizuno

Faculty of Engineering, Yokohama National University, Yokohama 240-8501, Japan

E-mails: hamza-javid-mg@ynu.jp, mizuno-yosuke-rg@ynu.ac.jp

Introduction

Fiber-optic sensors use light as the propagation medium to transmit the signals they detect. Immunity to electromagnetic interference is their key feature. They can be divided into two categories: (i) distributed sensors, often based on Rayleigh, Brillouin, and Raman scattering phenomena [1], and (ii) single-point or multiplexed sensors, which include fiber Bragg grating (FBG) sensors [2]. Various physical quantities have been measured with them, such as temperature [3], strain [3], and refractive index [4], among others.

In the first category, distributed temperature sensors based on Raman scattering are well known, which take advantage of the temperature dependence of the Raman scattering power. However, their compatibility with simple point-type sensors, such as FBG-based strain sensors, leaves room for improvement.

Herein, we will focus on such compatible Raman scattering-based temperature sensor. Many of the existing simple FBG-based strain sensors share three common characteristics [5]: (i) they use a continuous light source at the communication wavelength of 1550 nm (193 THz), including an amplified spontaneous emission (ASE) source, (ii) they incorporate standard silica single-mode fibers (SMFs), and (iii) they are capable of real-time operation. Despite this, the observation of weak Raman scattered light usually requires the use of either short wavelength light, optical pulses, or highly nonlinear optical fibers, coupled with time-consuming signal processing, especially for distributed sensing [6]. However, a recent study has shown the potential development of a Raman scattering-based temperature sensor that incorporates all these features (i)-(iii) [7]. However, the peak power around the reported frequency (195 THz) is significantly low, which represents a low signal-to-noise ratio (SNR).

In this work, we propose a pump-probe method to significantly improve the SNR around the frequency of interest, 195 THz.

Principle and setup

Raman scattering spectrum of a silica SMF for incident light in the 193 THz band manifests in the bands shifted by approximately 10-13 THz on both the low-frequency and high-frequency sides, referred to as the Stokes and anti-Stokes components, respectively as depicted in Fig. 1. The intensity of these components changes with temperature fluctuations. Generally, the temperature T is calculated by the ratio between the intensities of the anti-Stokes and Stokes components (I_{AS} / I_S), according to the expression:

$$R(T) = \left(\frac{I_{AS}}{I_S}\right) = \left(\frac{\lambda_S}{\lambda_{AS}}\right)^4 \exp\left(-\frac{hcv'}{kT}\right),$$

where $v' = \Delta v / c$ is the wavenumber separation from the source wavelength, c is the light speed, k is the Boltzmann's constant, and h is Planck's constant. The coefficients λ_{AS} and λ_S represent the wavelengths of the anti-Stokes and Stokes signals, respectively.

However, for short-range applications, system simplicity and high-speed operation, the anti-Stokes component can be independently exploited as its power exhibits a pronounced temperature dependence. Moreover, it has been demonstrated that the temporal stability at a frequency of 195 THz is significantly higher than at a frequency of 206 THz (represented as point B and point A in Fig. 1 respectively) [7]. Although the signal strength at point B is considerably higher than at point A, the SNR remains suboptimal. To improve the SNR at point B, we propose a pump-probe technique, whose experimental setup is depicted in Fig. 2. The output from two semiconductor lasers in the communication

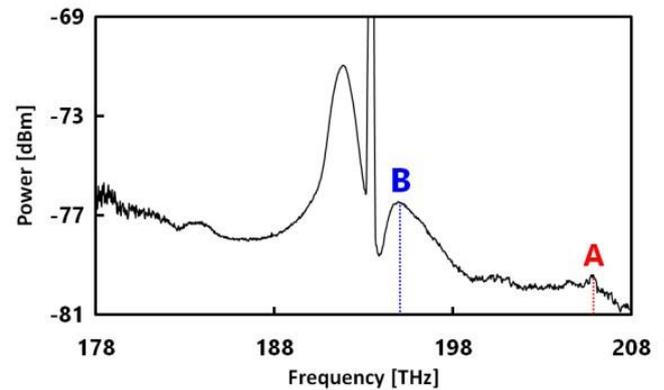


Fig. 1 Raman scattering spectrum in wide frequency range.

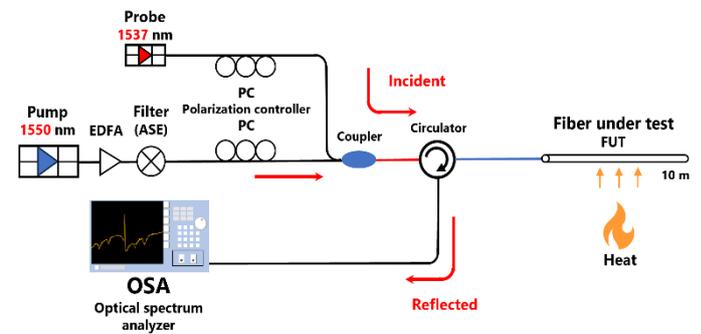


Fig. 2 Proposed experimental setup of pump-probe configuration for temperature sensing using Raman spectrum near Rayleigh peak. EDFA: erbium-doped fiber amplifier.

wavelength band (frequency: 193 THz and 195 THz) will be injected into a fiber under test (FUT) via an optical circulator. The output from pump will be amplified to, for example, 25 dBm by an erbium-doped fiber amplifier (EDFA) and subsequently filtered to reduce the influence of the ASE noise. It should be noted that the output of the probe will not be amplified. Prior to the coupling of both signals from the pump and probe, their co-polarization will be ensured by a polarization controller. The backscattered light from the FUT was fed into an optical spectrum analyzer (OSA) via the optical circulator, where its spectrum will be observed.

When a pump beam is launched into the fiber together with a weak probe beam, it is amplified because of the Raman gain as long as the frequency difference lies within the bandwidth of the Raman gain spectrum. Silica fibers are distinguished by their Raman gain spectrum which extends over a broad frequency range (up to 40 THz) and exhibits a pronounced peak around 13 THz. Consequently, by taking advantage of this phenomenon, the injection of a weak probe signal beam at the frequency of 195 THz allows for the significant amplification of power and the improvement of the SNR at this frequency due to the Raman gain.

References

- [1] Y. Mizuno, et al., *Light: Sci. Appl.* **5**, e16184 (2016).
- [2] R. Kashyap, *Fiber Bragg Gratings* (Academic, San Diego, CA, 1999).
- [3] F. Farahi, et al., *J. Lightwave Technol.* **8**, 138 (1990).
- [4] A. Iadicco, et al., *IEEE Photonics Technol. Lett.* **16**, 1149 (2004).
- [5] Y. Fan, et al., *Sens. Actuators A: Phys.* **121**, 297 (2005).
- [6] J. Li, et al., *Light: Sci. Appl.* **11**, 128 (2022).
- [7] Y. Mizuno, et al., *Opt. Fiber Technol.* **85**, 103804 (2024).

分子動力学シミュレーションを用いた シリカガラスの冷却速度と仮想温度に関する研究

The study on the correlation between cooling rate and fictive temperature of
Silica glass using Molecular Dynamics simulation

東北大工¹, Rensselaer Polytechnic Institute² ○ (M1) 日色 駿介¹, 木崎 和郎¹, 小
野 円佳¹ Liping Huang²

Tohoku Univ.¹, Rensselaer Polytechnic Institute², ○Shunsuke Hiiro¹, Kazuro Kizaki¹,
Madoka Ono¹, Liping Huang²

E-mail: hiiro.shunsuke.s6@dc.tohoku.ac.jp

光ファイバは世界中に張り巡らされており、現代の情報社会を支えている。

光ファイバの母材として広く利用されているシリカガラスは SiO_2 からなるガラスで、その熱膨張率は $5 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ と極めて小さく、光学ギャップが 6 eV 以上であるため、広い波長範囲の光に対して透明性が高く、非線形光学効果が小さい。

現在一般に利用されている光ファイバの伝送損失は約 0.2 dB/km であり、空気より透明な光の伝送体といえる。しかし、光信号の増幅器の削減や、原理的に増幅ができない量子通信の普及のために、伝送損失のさらなる抑制が求められている。これに対し、近年シリカガラス光ファイバの低損失化は頭打ちとなっている。

光ファイバの伝送損失の 80% 以上がレイリー散乱の損失である。レイリー散乱損失は密度揺らぎと組成揺らぎに起因し、シリカガラスの構成元素が二種類のみであることを考えると組成揺らぎは小さい。このため、損失の低減には密度揺らぎの抑制が重要となる。密度揺らぎはガラス構造における原子配置の揺らぎであり、ガラスを凍結する温度（仮想温度）によって変わる。

光ファイバの仮想温度は通常 1400 °C 以上である。これは光ファイバを製造する際に、ガラスを 2000 °C 以上の高温から室温まで音速に近い速度で急冷するためである。このように、極めて高い温度からの極めて速い冷却過程におけるガラス構造の変化や、仮想温度の変化に関して、系統的に調べられていない。

そこで本研究では、分子動力学シミュレーションを用いて、シリカガラスにおける冷却速度と仮想温度の関係を調べた。分子動力学シミュレーションには LAMMPS を用い、ポテンシャル関数には SHIK ポテンシャル[1]を用いた。

当日はガラスの構造との関係についても議論したい。

[1] S. Sundararaman et al, J, Chem, Phys, 148, 19 (2018): 194504.