

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011~2011

課題番号：23656261

研究課題名（和文） 光ファイバブリルアンダイナミックグレーティングの二次回折特性の究明とセンサ応用

研究課題名（英文） Research on the Second Bragg Diffraction from Brillouin Dynamic Grating in an Optical Fiber and its Sensing Application

研究代表者

保立 和夫 (KAZUO HOTATE)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：60126159

研究成果の概要（和文）：申請者らが発見した誘導ブリルアン散乱に伴うブリルアンダイナミックグレーティング(BDG)に関し、2次ブラッグ回折の観測に挑戦して理論検討も行った。まず、ファイバグレーティング(FBG)での2次ブラッグ反射の観測に挑み、分散により1次の半分より6nm波長がずれるとの計算と、これと良く合う実験結果を得た。BDGの2次スペクトル幅は10MHz以下であることも計算し、それに対応した測定系を構築した。再現性の点から断定には至っていないが、可能性を有するスペクトルを779.94nmに見出した。

研究成果の概要（英文）：It has been tried to observe the second Bragg diffraction from the Brillouin dynamic grating (BDG), for which our group had discovered to be associated with stimulated Brillouin scattering. Theoretical consideration on this phenomenon has also been performed. At first, the second Bragg diffraction from a FBG has successfully been observed at the wavelength of 6nm shorter than half the first diffraction wavelength, which has met well with the theoretical estimation. It has also been calculated that the spectral width of the BDG second diffraction is narrower than 10MHz, and the experimental setup to meet the requirements has been constructed. A possible spectrum has been observed around 779.94nm, though it has not yet been confirmed because of the repeatability.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：計測システム、光ファイバセンサ、スマート材料・構造、分布型センシング、防災危機・管理技術

## 1. 研究開始当初の背景

申請者らが提案・実証した「ブリルアンダイナミックグレーティング：BDG」、すなわち、ある偏波状態の光によって光ファイバ中に誘起された誘導ブリルアン散乱に伴って発生している超音波回折格子が直交偏波光もブラッグ反射させるという現象は、温度と歪の同時・分離・分布センシングを可能とし、時間領域分布型歪センシングの機能向上も実現してきた。しかし、BDGの観測・利用には偏波維持光ファイバが必須であった。そこで、通常の単一モード光ファイバにおいて

もBDGを観測可能とする手法を開拓することを目的に、BDGによる2次ブラッグ反射の観測に挑戦し、合わせて理論的検討を加える研究を計画・申請した。

## 2. 研究の目的

申請者らが最近提唱し、初めて実験的に実証した「ブリルアンダイナミックグレーティング：BDG」は、ある偏波状態の光によって光ファイバ中に誘起された誘導ブリルアン散乱に伴って発生している超音波回折格子が、直交偏波状態にある光波もブラッグ回折

(反射) させるという現象である。この現象の概念を拡張して、誘導ブリルアン散乱を発生させている光波の半分の波長を有する光波が2次ブラッグ反射を受けることを実験的に実証することに挑戦し、また理論的検討も進めて、その回折(反射)特性を精緻に把握することを目的とする。これにより、これまでは特殊光ファイバである偏波維持光ファイバを利用しない限り観測できなかったBDG現象を単一モード光ファイバでも観測することが可能になり、cmオーダの空間分解能を有する時間領域での分布型歪センシング等、BDGによって初めて実現可能となった新機能に偏波維持光ファイバを用いずとも実現できる可能性が付与される。

### 3. 研究の方法

上記の研究目的を達成するために、以下のような研究計画・方法を設定して、実施した。

#### (1) 光ファイバブラッググレーティングにおける2次ブラッグ反射の観測と理論検討

光ファイバ中のコア部分のGeO<sub>2</sub>を紫外線照射で変質させて屈折率の周期構造を書き込んだ光ファイバブラッググレーティング(FBG)も、BDG同様に位相回折格子である。このことに着目して、FBG理論を基にしてBDGの2次ブラッグ反射特性を理論的に検討する。あわせて、FBGにおける2次ブラッグ反射を実験的に観測して、BDGの2次回折スペクトルを観測する実験系の設計指針を得る。

#### (2) BDGの2次ブラッググレーティング測定系の構築とその観測

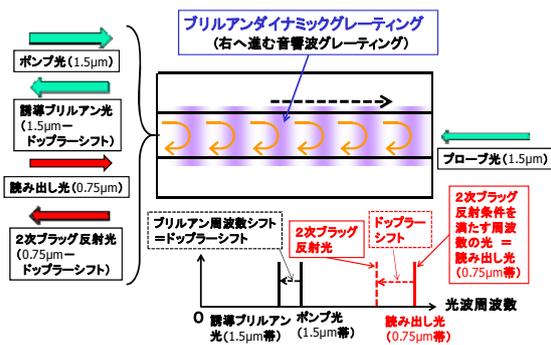


図1 BDGの発生機構と2次回折波の測定

図1にBDGの発生機構と、2次ブラッグ反射の測定原理を示した。通常の単一モード光ファイバ中に1.55μm帯レーザ光をポンプ光とプローブ光として対向伝搬させる。この両光の周波数差をブリルアン周波数シフト程度(BFS:約11GHz)にすることで、誘導ブリルアン散乱を発生させる。このとき、誘導ブリルアン散乱に伴って比較的強い超音波が生じ、位相回折格子としてBDGが形成さ

れる。この回折格子により2次ブラッグ反射が生じることを、0.78μm帯の波長可変レーザ光を入射することで実証する。ここで、(1)の研究で得られるFBGに関する理論的ならびに実験的検討結果から、本実験系が有すべきパラメータを明確にする。

### 4. 研究成果

#### (1) 光ファイバブラッググレーティングにおける2次ブラッグ反射の観測と理論検討

本研究では、まずBDGと同じ位相回折格子である光ファイバグレーティング(FBG)での2次ブラッグ反射特性の測定系を構築し、合わせてFBG理論から2次ブラッグ反射の有する特性を把握して、BDG測定系の具体的な構築法を検討した。

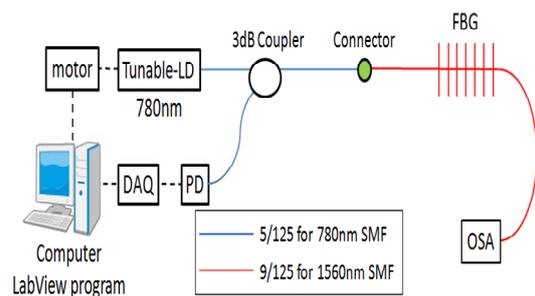


図2 FBGの2次ブラッグ回折の測定系

図2が、本研究において作成したFBGの2次ブラッグ反射スペクトルの測定系である。まず、光源として1.5μm帯の半導体レーザを用い、1次ブラッグ回折スペクトルを測定した。その結果を図3に示す。

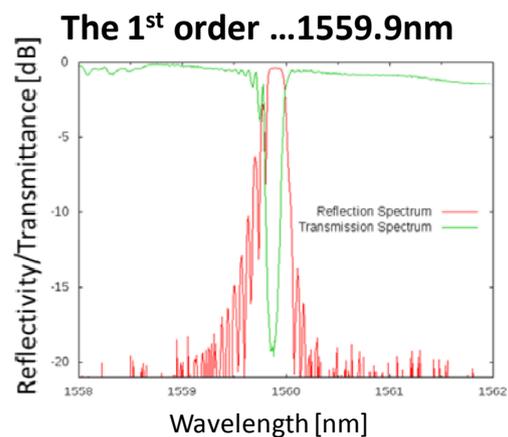


図3 FBGの1次ブラッグ回折スペクトルと透過スペクトルの測定結果

つづいて、本研究費にて購入した780nm帯の波長可変レーザを光源として、2次回折光の観察を行い、その取得に成功した。結果を図4に示す。図4に得られた2次回折スペクトルのピーク波長は、1次のそれの半分より長波長側にずれていた。

この点につき検討を深めるために、光ファイバの屈折率分散の理論式であるセルマイヤーの式を活用して、2次回折波長を評価した。その結果、光ファイバの分散の影響により、2次回折スペクトルピーク波長は1次回折波長の半分より約6nm長くなり、785nmとなることが計算できた。図4に示した測定値は796nmとなっており、上記の計算値より約1nm大きい。これは周囲環境温度の変化の影響もあるが、光ファイバはSiO<sub>2</sub>だけでなくGeO<sub>2</sub>がドープされている(特にFBGでは多くドープされる)影響が大きいと考えられる。いずれにしても、セルマイヤーの式による2次回折波長の評価は有効であることが分かった。

### The 2<sup>nd</sup> order ...785.95nm

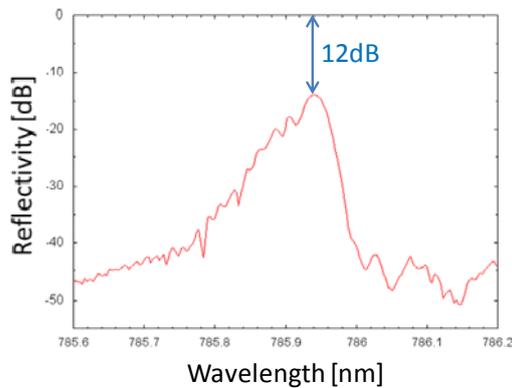


図4 FBGの2次ブラッグ回折スペクトルの測定結果

また、図4より、2次回折波のスペクトル幅は1次回折のそれの約1/8であることも分かった。BDGの2次回折波のスペクトル幅も、同様に、1次回折波のそれより細くなるものと考えられ、測定系の構築にあたっては考慮すべき重要な点である。

位相回折格子で2次回折が生じる条件は、FBG理論によれば、回折格子が単純な正弦波的屈折率変動をしておらず、高調波成分を伴っている場合である。実際、FBGにおいては2次回折効率の方が1次回折効率よりも大きくなることもある。本実験では、2次回折の方が12dB小さくなっており、回折格子形状の高次高調波成分は大きくはないFBGであったことが分かる。

#### (2)BDGの2次ブラッググレーティング測定系の構築とその観測

つづいて、光ファイバ中で強い誘導ブリルアン散乱を起こせる実験系を構築して、BDGによる2次ブラッグ回折スペクトルの観測に挑んだ。

図5が構築した実験系である。1548nmの半導体レーザ光を光ファイバカップラで2分し、一方を単一サイドバンド変調器(SSBM)でBFS程度周波数を低下させてプローブ光と

して通常の単一モード光ファイバに入射する。他方は光源の周波数のままで光ファイバの他端から入射させてポンプ光とする。両光が光ファイバ中で対向伝搬することによって、誘導ブリルアン散乱が生じる。

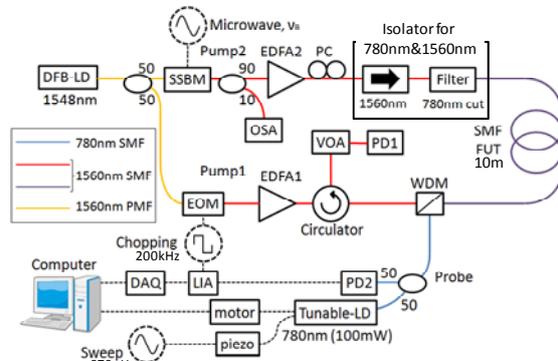


図5 BDGによる2次回折スペクトルの測定系

図5の系では、ポンプ光を光強度変調器でチョップすることにより、ロックインアンプを用いて高いS/N比で測定できるようにしている。誘導ブリルアン散乱スペクトルの測定結果を図6に示す。

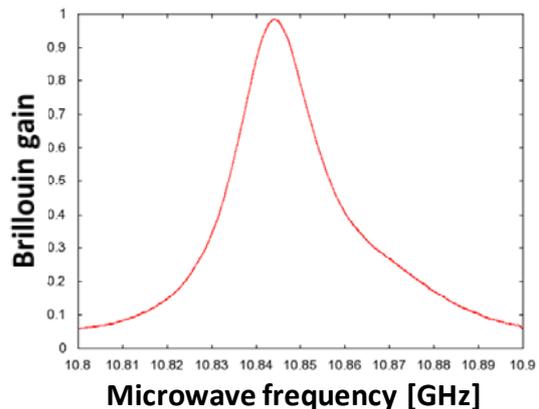


図6 誘導ブリルアン散乱スペクトルの測定結果

BDGによる1次回折特性を測定してFBGの理論と対比した他の研究機関での研究成果によると、BDGの1次回折特性はFBGのそれと良く一致する。また、同様にFBG理論から考えると、1次回折光のスペクトル幅はBDG長に反比例することになる。これらを考慮すると、本実験では光ファイバ長を10mとしたので、1次ブラッグ回折光のスペクトル幅は10MHz程度であることが分かる。

また、上述したように、本研究でのFBGにおける実験データによれば、2次ブラッグ回折スペクトルの半値幅は1次ブラッグ回折光のそれの1/8程度になることもわかっている。すなわち、本実験でのBDGによる2次ブラッグ回折光の半値幅は数MHz程度に過ぎないと考えられる。これは波長に換算する

と数 10 $\mu$ m 程度であり、非常に細い。従って、2 次ブラッグ回折特性の測定光である 780nm 帯レーザーの波長は、非常に精緻に掃引する必要がある。

本実験では 780nm 帯レーザー装置に内蔵されたピエゾ素子に外部発振器により三角波電圧をゆっくり印加することによって波長を掃引した。これにより中心波長に対して  $\pm 0.03$ nm にわたり掃引することができる。さらに、共振器中の回折格子をモーター駆動して中心波長を 0.25nm ずつずらすことで、広い波長領域をカバーした。

本実験では、ピエゾ素子により、毎秒 0.08pm で波長掃引し、LabView プログラムで作成したデータロガーによってロックインアンプ出力を毎秒 100 サンプルで取得した。つまり波長 0.8 $\mu$ m 毎にサンプリングされるので、スペクトル幅が数 10 $\mu$ m であっても十分 2 次回折波が観測可能な実験系が構築できた。

セルマイヤーの式から 2 次回折光は 779.1nm 付近に生じるものと計算した。一方で、FBG での実験から、セルマイヤーの式の予測値より約 1nm 長波長側に 2 次回折が生じたことを考慮して、本実験では 2 次回折は 779nm から 780.5nm の間に生じるものと見積もって実験を進めた。

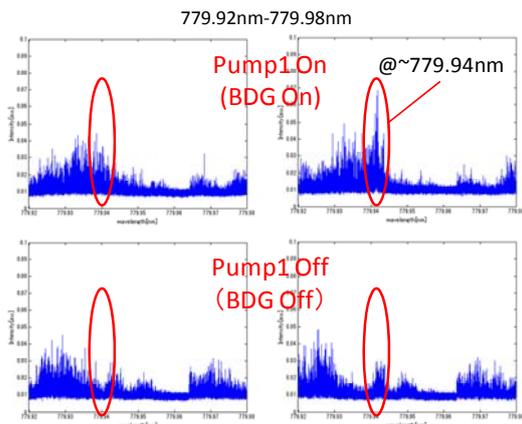


図 7 BDG の 2 次ブラッグ回折である可能性を有するスペクトルの観測結果

図 7 は、779.22nm から 779.98nm までを精緻に波長掃引したときに得たスペクトルである。上段の 2 つのデータは光ファイバにポンプ光を入射した際のスペクトル、下段はポンプを切った際のスペクトルである。上段で 779.94nm に見出した反射は、2 次回折光である可能性がある。しかし、ポンプ光を切った上で実験した下段のデータでも反射と思われる成分が若干観測されており、十分な再現性が得られたとは言えない。

### (3) まとめ

以上のように、本研究では、まず、ファイバブラッググレーティング(FBG)での 2 次ブ

ラッグ回折の観測を行い、光ファイバの分散により 1 次ブラッグ回折の半分より 6nm 長波長側に回折ピーク波長がずれるとの理論計算結果、ならびにこれと良く合う実験結果を得た。

つづいて、BDG の 2 次スペクトル幅は FBG 理論に基づく検討により 10MHz 以下であることも計算し、それに対応した測定系を構築した。再現性の点から断定するには至っていないが、BDG の 2 次回折の可能性のあるスペクトルを 779.94nm に見出した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 3 件)

- 1) T. Ashida, M. Kishi, Z. He, and K. Hotate: “Discriminative distributed measurement of strain and temperature based on Brillouin dynamic grating by BOCDA with time-division pump-probe generation scheme,” CLE2012, San Jose, CM4B.5, May 6-11, 2012.
- 2) 芦田哲郎, 岸 真人, 何 祖源, 保立和夫: “ポンプ・プローブ時分割発生法を用いた BOCDA 法によるブリルアンダイナミックグレーティングに基づく温度と歪の分離・分布測定,” 応用物理学会第 49 回光波センシング技術研究会, 東京理科大学, LST-49-18, Jun. 5-6, 2012.
- 3) 芦田哲郎, 岸 真人, 何 祖源, 保立和夫: “ポンプ・プローブ時分割発生法を用いた BOCDA 法によるブリルアンダイナミックグレーティングに基づく温度と歪の分離・分布測定,” 2012 年度電子情報通信学会総合大会, 岡山大学, B-13-10, p.514, Mar.20-23, 2012.

[その他]

ホームページ等

<http://www.sagnac.t.u-tokyo.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

保立 和夫 (HOTATE KAZUO)  
 東京大学大学院工学系研究科・教授  
 研究者番号：6 0 1 2 6 1 5 9

### (2) 連携研究者

何 祖源 (HE ZUYUAN)  
 東京大学大学院工学系研究科・特任教授  
 研究者番号：7 0 3 2 2 0 4 7

岸 真人 (KISHI MASATO)  
 東京大学大学院工学系研究科・助教  
 研究者番号：0 0 1 5 0 2 8 5