

連結ファイバーグレーティングのスペクトル評価†

須崎 嘉文* 今竹 史典** 澤村 容平**
岡田 圭伊太*** 岡田 憲明**** 岩田 弘*****
横内 孝史***** 江島 正毅*****

Evaluation of Optical Spectrum of Concatenated Fiber Bragg Grating

by

Yoshifumi SUZAKI*, Fuminori IMATAKE**, Yohei SAWAMURA**, Keita OKADA***, Noriaki OKADA****,
Hiromu IWATA*****, Takashi YOKOUCHI***** and Seiki EJIMA*****

Fiber Bragg grating (FBG) is an optical fiber device that selectively reflects only those light signals with the wavelength matched to the grating period of refractive index modulation. When two FBGs with identical index modulation period are concatenated in series, the signal light reflected by the FBGs may interfere with itself by the process of multiple reflections between adjacent FBGs, and the reflection spectrum may behave in a complicated manner with spectrum completely different from that of a single FBG. This paper analyzes the optical spectrum reflected by the concatenated FBGs both experimentally and theoretically, and demonstrates how the spectrum varies depending on which is larger between coherency length of the light signal and separation distance of the concatenated FBGs.

Key words: Fiber grating, FBG, Coherency length, Interference

1 緒 言

光ファイバーをベースにした光通信は、近年のインターネット等の普及に見られるように爆発的成長を続けており、今後、末端近くにおける携帯電話等の無線通信との組み合わせとあいまって、幅広い一般ユーザーの根強い要求を満たすべく、さらに大きく発展していくものと予測されている。異なる複数の光信号を扱う波長多重通信のシステムにおいては、特定信号のみを取り出す波長弁別フィルタはキーコンポーネントのひとつであり、そのデバイスとしては誘電体多層膜、AWG (Array Wave Guide) 器、ファイバーグレーティング (FBG) 等がある。中でも、光ファイバーの中に回折格子を形成したFBGは鋭い狭帯域特性を有しており、その構成のシンプルさのため大きく有望視され、すでに広く利用されている。また、このFBGは、動作原理の単純さゆえに、各種デバイスへの応用で高いポテンシャルを有しており、光通信用途のみならず、温度センサー、ひずみセンサー等々のセンシング用途へも広く展開されている。^{1), 2)}

FBGの反射スペクトル評価に関しては、その理論計算では、通常、コヒーレント長は無制限長として求められる。¹⁾しかし、実際には光源にはそれぞれ有限なコヒーレント長があり、場合によっては、信号光源のコヒーレント長に応じて異なった応答特性が得られる可能性がある。す

なわち、FBGの反射スペクトルは、入射光が数万個の周期的屈折率変調からなる周期的回折格子のFBGによって複合的に繰り返される多重反射によって決まるものであり、理論的にはコヒーレント長は無制限長であるとして反射特性が求められる。³⁾しかし、例えば同一周期からなる2つのFBGを近距離に連結配置した場合、FBGの中での光反射はそれぞれのFBGの中だけでなく2つのFBGにまたがって複合的に反射されるため、単独のFBGスペクトルの重ね合わせとは異なって、2つのFBG間で干渉した複雑なスペクトルが予想される。

このような事情は、たとえば、Fig. 1のように3軸方向のひずみセンシングのため、FBGを立方体に直交して貼り付けた3次元のひずみセンサーにおいてあり得るこ

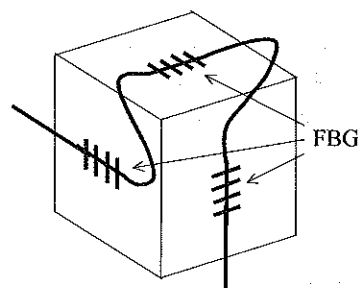


Fig. 1 Schematics of three axes stress sensor.

† 原稿受理 平成 21 年 2 月 9 日 Received Feb. 9, 2009 ©2009 The Society of Materials Science, Japan
* 正 会 員 香川大学工学部 〒761-0396 高松市林町, Faculty of Eng., Kagawa Univ., Hayashi-cho, Takamatsu, 761-0396
** 香川大学大学院工学研究科 〒761-0396 高松市林町, Graduate School of Eng., Kagawa Univ., Hayashi-cho, Takamatsu, 761-0396
*** 香川大学大学院工学研究科 (現在 アオイ電子㈱) 〒761-0396 高松市林町, Graduate School of Eng., Kagawa Univ., Hayashi-cho, Takamatsu, 761-0396
**** 香川大学大学院工学研究科 (現在 日本ゼオン㈱) 〒761-0396 高松市林町, Graduate School of Eng., Kagawa Univ., Hayashi-cho, Takamatsu, 761-0396
***** 高松工業高等専門学校 〒761-8058 高松市勅使町, Takamatsu National College of Tech., Chokushi-cho, Takamatsu, 761-8058
***** 香川大学工学部 〒761-0396 高松市林町, Faculty of Eng., Kagawa Univ., Hayashi-cho, Takamatsu, 761-0396

とである。問題提起を明りょう化させるため、次の実験を行った。すなわち、7mm長の同じFBGを2つ作製し、(a) 約100mm離して連結させた場合のスペクトル（太線）と、(b) 両FBGを間隔3mmに近接して連結させた場合のスペクトル（細線）を、Fig. 2に比較して示す。両FBGを離して配置した(a)の場合は、個別のFBG反射スペクトルとほぼ同じスペクトルが得られるが、近接して配置した(b)の場合は、明らかに両FBG間で光の反射が互いに干渉していることが分かる。干渉であるため、両FBGの配置間隔、使用する光源のコヒーレント長のみならず、評価用スペクトルアナライザ (Optical Spectrum Analyzer, OSA) の分解能も絡んで出て来るのが、当然、予想される。実際の応用に際しては、どのような条件でこのような干渉が起こるのか、そしてこれらのパラメータがどのように相互に絡むかを理解しておく必要がある。本論文の目的は、このような問題点を、実験での確認を含めて明りょう化させ、FBGスペクトル評価での留意点等を整理することである。

本論文では、第2章で、まず広帯域光源 (ASE 光源⁵⁾) の出力からFBGを用いて半値幅 $\Delta\lambda_w$ の異なる信号を切り出し、これを光源信号としてマイケルソン干渉計に入射して、そのコヒーレント長 d_{coh} を実測し、半値幅 $\Delta\lambda_w$ を用いたコヒーレント長の理論式⁶⁾

$$d_{coh} = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda_w} \quad (1)$$

と比較した実験結果について述べる。

次に、第3章で、ASE光源からの広帯域信号をマイケルソン干渉計に入射して、干渉距離を変えて得られた干渉出力信号を、FBGのスペクトル評価に最もよく用いられるスペクトルアナライザで測定した結果について説明する。この測定では、スペクトルアナライザの分解能 $\Delta\lambda_{res}$ をいくつか変えて可干渉距離 ($=d_{res}$ と置く) を評価したところ、半値幅 $\Delta\lambda_w$ を用いたコヒーレント長の理論式 (1) において、半値幅 $\Delta\lambda_w$ を分解能 $\Delta\lambda_{res}$ に置き換えた式、

$$\frac{\lambda^2}{\Delta\lambda_{res}} (=d_{res}) \quad (2)$$

と良好に一致することが確認された。このことは広帯域光源の信号を測定系に入射して、スペクトルアナライザを用いて可干渉距離を評価する場合、スペクトルアナライザの分解能 $\Delta\lambda_{res}$ に等しいスペクトル半値幅 $\Delta\lambda_w$ の信号

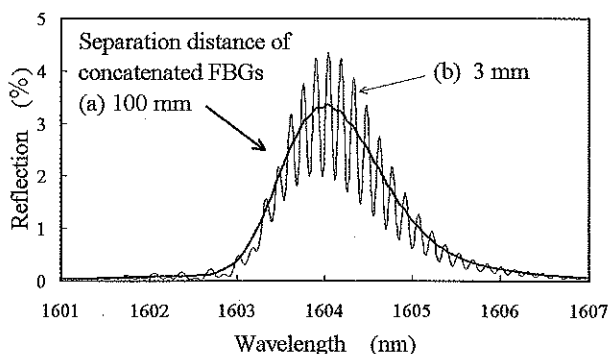


Fig. 2 Typical spectra of concatenated FBGs.

を入射して得られる場合の可干渉距離と同一であることを意味している。すなわち干渉特性の評価においては、スペクトルアナライザの分解能 $\Delta\lambda_{res}$ とスペクトル半値幅 $\Delta\lambda_w$ は等価であることが結論づけられるということについて説明する。

第4章においては、これらの結果を踏まえて、2つのFBGを、間隔 d_{sep} をおいてつないだ2連結FBGの反射スペクトルをスペクトルアナライザを用いて評価した実験結果を述べ、前章の結果から予測されるように、 d_{sep} と d_{res} の大小関係によってスペクトルが大きく異なることを示す。

最後に、第5章で連結FBGを実際に評価する際ににおける留意点を記し、第6章で結論をまとめる。

2 光源のコヒーレント長

本研究では、まず使用する光源のコヒーレント長を定量化しておく必要がある。このため、マイケルソン干渉計を組上げて、我々が用いたASE光源⁵⁾のコヒーレント長を実測した。干渉計をFig. 3に示す。ASE光源の広帯域光信号を、サーキュレータを介して自作したFBG⁴⁾に入射して狭帯域信号 (半値幅はFBGの反射スペクトル幅) を切り出し、これを光ファイバー経由でコリメータに供給して平行光として干渉計に入射して、ビームスプリッターで分岐した光をミラー1およびミラー2でそれぞれ反射して、両者を光路差 $x=2(l_2-l_1)$ を持たせてコリメータで集光しスペクトルアナライザに取り込み、光路差に依存した干渉を調べるマイケルソン光干渉回路である。

Fig. 4に用いた光源の大き目の広帯域ASE光源⁵⁾の出力信号スペクトル (ピーク波長 $\lambda=1560\text{nm}$, 半値幅 $\Delta\lambda=16\text{nm}$) を示す。狭帯域光信号を切り出すために自作したFBGには、反射スペクトル幅の異なる2つのFBGを用いた。この狭帯域信号光は、中心波長はFBG反射波長の約1560nmで、スペクトル半値幅 $\Delta\lambda_w$ は0.27nm, および、1.47nmであった。

この実験では、 piezo素子を約100Hzで振動させ、これに取り付けたミラー1を光源波長の1波長分の振幅で前後させフォトダイオードを介した信号をオシロスコープ上で帯状とした。そうすることで、光路差 x を変えた距離ごとの干渉の最大と最小を検出した。広帯域ASE光

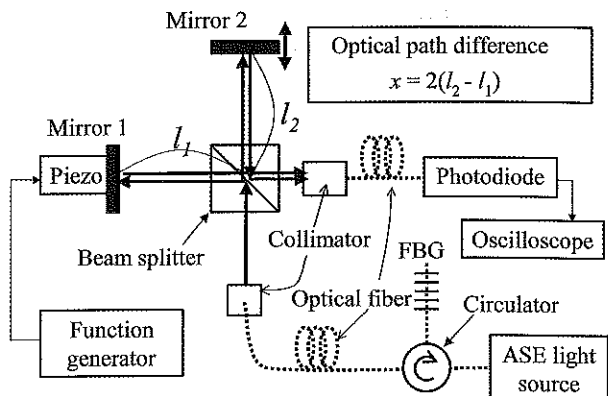


Fig. 3 Optical circuit of Michelson interferometer system (1).

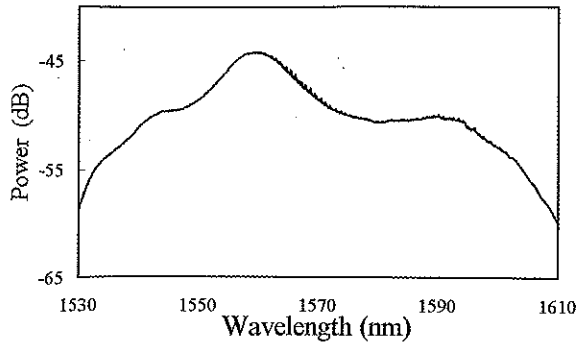


Fig. 4 Spectrum of ASE light source.

源信号を直接入力した半値幅 $\Delta\lambda_w = 16\text{nm}$ の光源に対する測定結果を Fig. 5 に示す。フォトダイオード出力の半値の幅から、この場合は、図から分かるようにコヒーレント長は $70\mu\text{m}$ となった。FBG を用いて広帯域 ASE 光源信号から切り出した狭帯域信号（半値幅 $\Delta\lambda_w = 0.27\text{nm}$ および 1.47nm ）に対して同様に測定したコヒーレント長の結果を含めて Fig. 6 にまとめる。図中の直線は、スペクトル半値幅 $\Delta\lambda_w$ と中心波長 λ を用いて式 (1) で表わされるコヒーレント長の理論式⁹⁾であり、実験結果はこの式で良好に記述されることが確認できた。

3 スペクトルアナライザの分解能を変えた実験

次に、広帯域 ASE 光源の信号をそのままマイケルソン干渉計 (Fig. 7) に入射して、干渉光出力信号をスペクトルアナライザで測定した結果について述べる。

スペクトルアナライザには、アドバンテスト社の

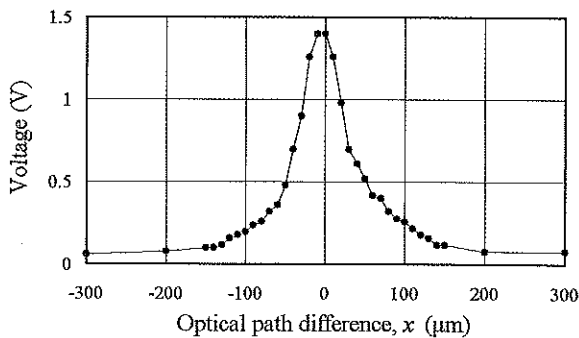
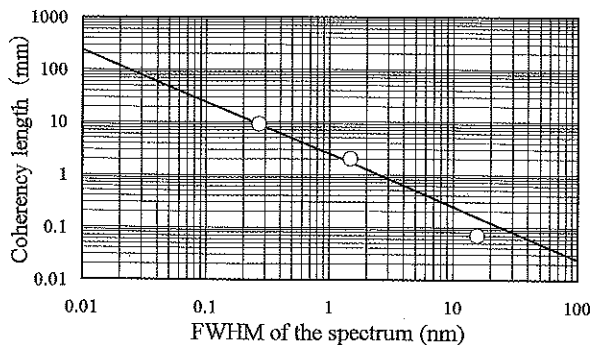

 Fig. 5 Dependence of photodiode output voltage on optical path difference x in Michelson interferometer system (1).


Fig. 6 Dependence of coherency length on FWHM of the spectrum.

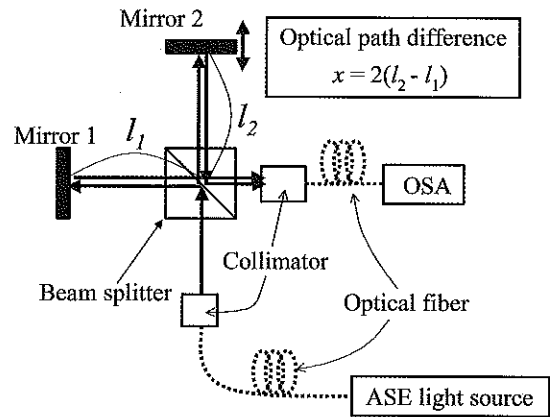


Fig. 7 Optical circuit of Michelson interferometer system (2).

Q8384 を用いた。干渉計における光路差 $x = 2(l_2 - l_1)$ をゼロとした場合、光源のスペクトルそのものが得られ、光路差を 0.5mm とした場合は大きく波打った干渉スペクトルとなり、光路差を増やしていくと干渉の数が増えてその振幅は小さくなっていき、 90mm の光路差では振幅はほぼゼロとなった。その様子を Fig. 8 に示す。図は、波長分解能 $\Delta\lambda_{res}$ を 0.05nm としたときの結果である。

スペクトルアナライザの分解能とは、スペクトル分光した後の光信号を、スペクトル掃引時にある一定の波長幅にわたって積算して出力表示する平均操作のその波長幅 $\Delta\lambda_{res}$ で定義される。すなわち、Fig. 8 に示すように、分解能が低いときは、平均操作の範囲であるこの波長幅 $\Delta\lambda_{res}$ が広くて微細変化は犠牲にされ荒っぽい表示となるが、掃引が早く行える利点がある。逆に分解能が高いと、微細な変化まで検出できる利点があるが、掃引に長い時間を要する欠点がある。Fig. 9 にそのイメージ図を示す。

分解能を下げてその波長幅 $\Delta\lambda_{res}$ を 0.2nm 、 0.5nm と広くすると、信号強度は、Fig. 9 から予想されるように掃引中の各時間においては検知される積分光量が増えるため、当然、大きくなっていく。Fig. 8 で波打って見られる干渉の大きさは、波長分解能 $\Delta\lambda_{res}$ を広げたとき、光路差 x が大きくなると急激に小さくなった。この干渉の振幅を光路差 x の 2 乗を横軸にして片対数プロットすると整理できて、可干渉距離のコヒーレント長 d_{res} と光路差 x に対する依存として予測される式、

$$I = I_0 \times \exp\left(-\frac{x^2}{d_{res}^2}\right) \quad (3)$$

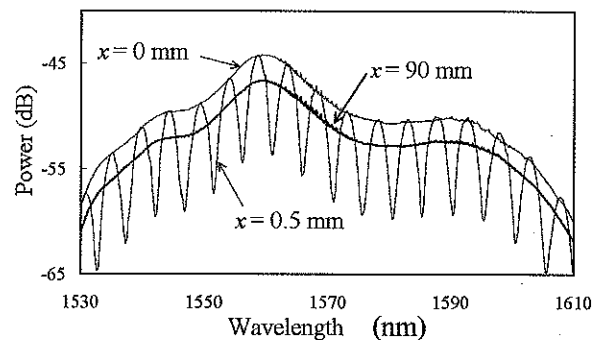


Fig. 8 Typical spectra of Michelson interferometer system (2).

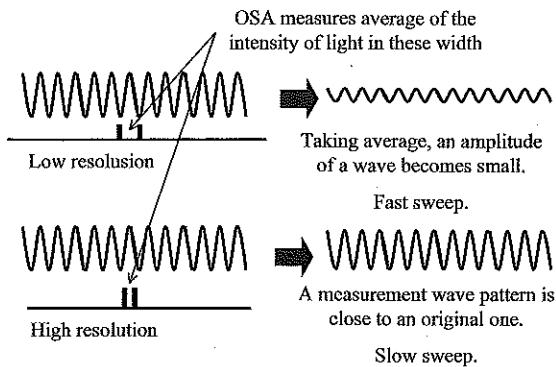


Fig. 9 Comparative diagram of the difference of spectrum analyzer output with low resolution and that with high resolution.

で表されることが分かった。ここで I_0 は光路差 x がゼロのときの干渉の振幅である。これを Fig. 10 に示す。図には、それぞれの分解能 $\Delta\lambda_{res}$ に対してこの式に基づいて得られたこの可干渉距離のコヒーレント長 d_{res} の値も、付記しておく。

Fig. 10 の解析から得られたコヒーレント長 d_{res} を分解能 $\Delta\lambda_{res}$ を横軸として、スペクトル半値幅 $\Delta\lambda_w$ に対して得られたコヒーレント長 d_{coh} (○のデータ) をプロットした Fig. 6 に重畳させてプロットした結果 (▲のデータ) を Fig. 11 に示す。図から明かなように、コヒーレント長 d_{coh} の半値幅 $\Delta\lambda_w$ に対する依存性は、コヒーレ

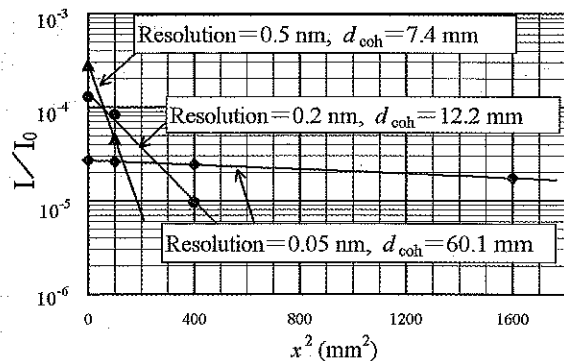


Fig. 10 Dependence of interferometer output amplitude on optical path difference x for three different resolutions optical spectrum analyzer.

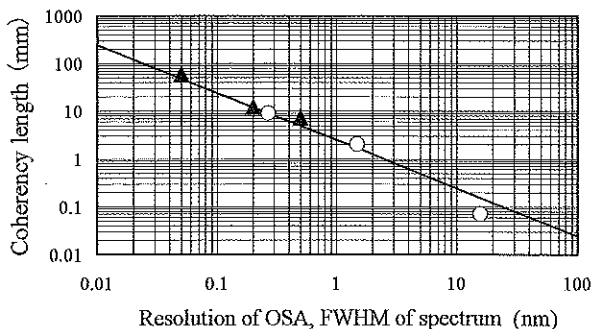


Fig. 11 Dependence of coherency length on FWHM of the spectrum; ▲ from coherency length study and ○ from resolution study of spectrum analyzer.

ント長 d_{res} の分解能 $\Delta\lambda_{res}$ に対する依存性に完全に一致していることが分かる。このことは、スペクトルアナライザの波長分解能 $\Delta\lambda_{res}$ は光源波長幅 $\Delta\lambda_w$ と等価であることを意味している。すなわち、波長軸を掃引するスペクトルアナライザの出力スペクトル表示は、その分解能 $\Delta\lambda_{res}$ に対応する波長幅 $\Delta\lambda_w$ の光信号が波長を掃引して出力されていることになる。

この結果から、FBG の反射スペクトル評価をスペクトルアナライザで行うとき、掃引光信号のコヒーレント長はスペクトルアナライザの分解能 $\Delta\lambda_{res}$ によって異なることになり、FBG を連結させた場合、FBG 相互間の干渉は FBG 間距離のみならずスペクトルアナライザの分解能によって異なる干渉結果が得られることが予測される。これを確認するため、2 連結 FBG を作製して異なる分解能に対して行ったスペクトル評価の実験について次に述べる。

4 連結 FBG の干渉スペクトル

前章の予測を明りように検証するため、また冒頭で提起した Fig. 1 のような応用における評価法の問題点を明確にするため、完全に同一の特性を有する FBG を 2 個近接して連結させるべく、10mm 長の FBG を通常の方法⁴⁾で作製する条件に、Fig. 12 に示すように 5mm 長の SUS 板で紫外線エキシマレーザー光を遮蔽して 2 つの 2.5mm 長 FBG を 5mm の間隔をおいて作製した。このように 2 つを同時に同一条件で作製することで、中心波長が 1554.2nm でほぼ完全に同一特性の FBG を作製することができた。

このようにして作製した 2 連結 FBG に、Fig. 4 のスペクトルの広帯域 ASE 光源を入射して、その反射スペクトルを前述のスペクトルアナライザで、2 つの異なる分解能に対して測定した結果を Fig. 13 に示す。図の (a) は、スペクトルアナライザの分解能 $\Delta\lambda_{res}$ が 0.5nm に対するスペクトルで、図の (b) は 0.05nm に対するものである。分解能 $\Delta\lambda_{res} = 0.5$ nm に対応するコヒーレント長は Fig. 11 の結果から $d_{res} = 4.8$ mm となり、これは光路差 $d_{path-diff} = 10$ mm (往復で FBG 間距離 5mm の 2 倍) の約半分となり、 $d_{path-diff} > d_{res}$ の関係にある。これに対して、分解能 $\Delta\lambda_{res} = 0.05$ nm の (b) の場合はコヒーレント長は $d_{res} = 48$ mm となって、光路差よりもはるかに大きく、すなわち $d_{path-diff} < d_{res}$ の関係にある。Fig. 13 (b) に示すように、 $d_{path-diff} < d_{res}$ の場合、予測通り相互に強く干渉し

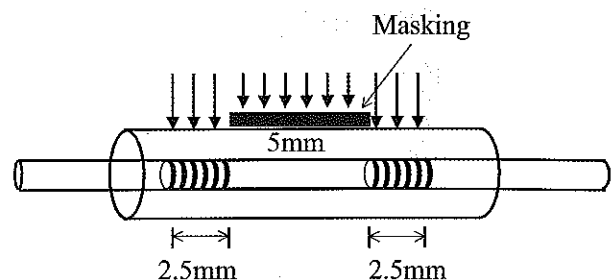


Fig. 12 Schematic diagram of fabrication of concatenated FBGs.

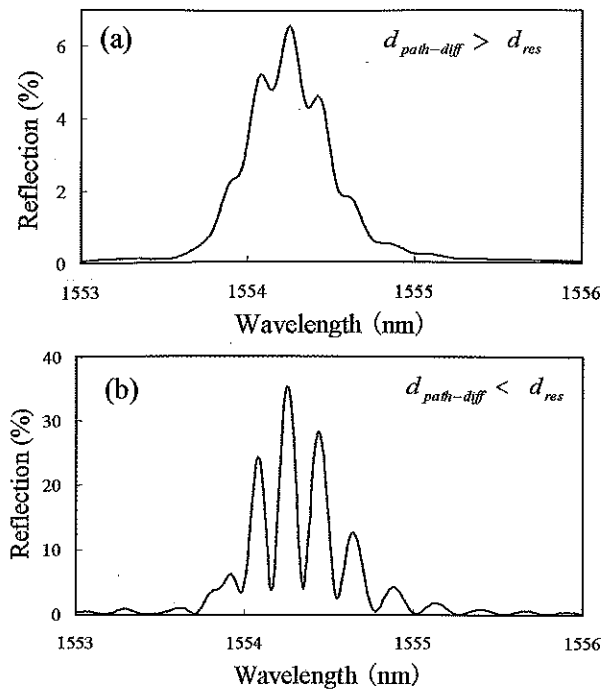


Fig. 13 Typical spectra of concatenated FBGs ;
(a) $d_{\text{path-diff}} > d_{\text{res}}$ and (b) $d_{\text{path-diff}} < d_{\text{res}}$.

あったスペクトルが明りょうに見られ、そして $d_{\text{path-diff}} > d_{\text{res}}$ の (a) の場合、これとは逆に干渉のスペクトルでなく個別スペクトルに近いスペクトルとなった。

連結 FBG が互いに干渉する場合、すなわち光路差がコヒーレント長よりも短いとき、干渉の波打ち具合は、光路差が波長オーダーで周期的に変化することが、正確には両 FBG 間での光路差が $\lambda/2$ ごとに干渉スペクトルが繰り返して変化することが、予想される。ファイバー

中での実際の波長は、波長 λ を実効屈折率 n_{eff} で割った値だから、本実験では $\lambda/n_{\text{eff}} = 1.55\mu\text{m}/1.447 \sim 1.1\mu\text{m}$ で、光路差は 10mm (= FBG 間距離 5mm の往復) とこの実効波長 $1.1\mu\text{m}$ の約 1 万倍と大きく異なるため、半波長 $\lambda/2$ オーダーで FBG 間距離を制御することは、すなわち FBG 間距離が $\lambda/2$ の偶数倍か奇数倍か、実験で制御することは困難である。このことは、連結 FBG を融着接続等で作製したときは、ほぼランダムとなって現れることを意味している。Fig. 13 の FBG 作製の実験では、ファイバーをセットした後に SUS 遮蔽板を取り付けているので、この場合は、なおさら困難である。そこで実験では、2 連結 FBG を 10 個続けて作製したところ、干渉スペクトルはランダムになって観測されることが確認された。この結果を、Fig. 14 に示す。図には、FBG 間距離が $\lambda/2$ の偶数倍に対して得られたシミュレーション結果のスペクトルに酷似して現れたものと、同じように奇数倍に対して得られたスペクトルとを対比させて示す。なお、シミュレーション計算の理論ではコヒーレント長は無限大とし、上述の議論を適用すれば、スペクトル半値幅が無限に狭いときとして求められたものである。⁷⁾

Fig. 14 では、FBG 間隔が光信号の半波長 $\lambda/2$ オーダーの微弱な量で、FBG 干渉スペクトルの現れ方が大きく変化することを FBG の作製過程に対して示したが、このことは、連結 FBG を使用する場合も環境温度変化やファイバー固定で印加される荷重の微弱な変化でも、当然にあり得ることと考えられる。

5 連結 FBG のスペクトル評価での留意点

以上の結果から、連結 FBG のスペクトル評価に際して留意すべき点をまとめると、以下ようになる。

- (1) 連結 FBG の反射スペクトルは、それぞれの FBG

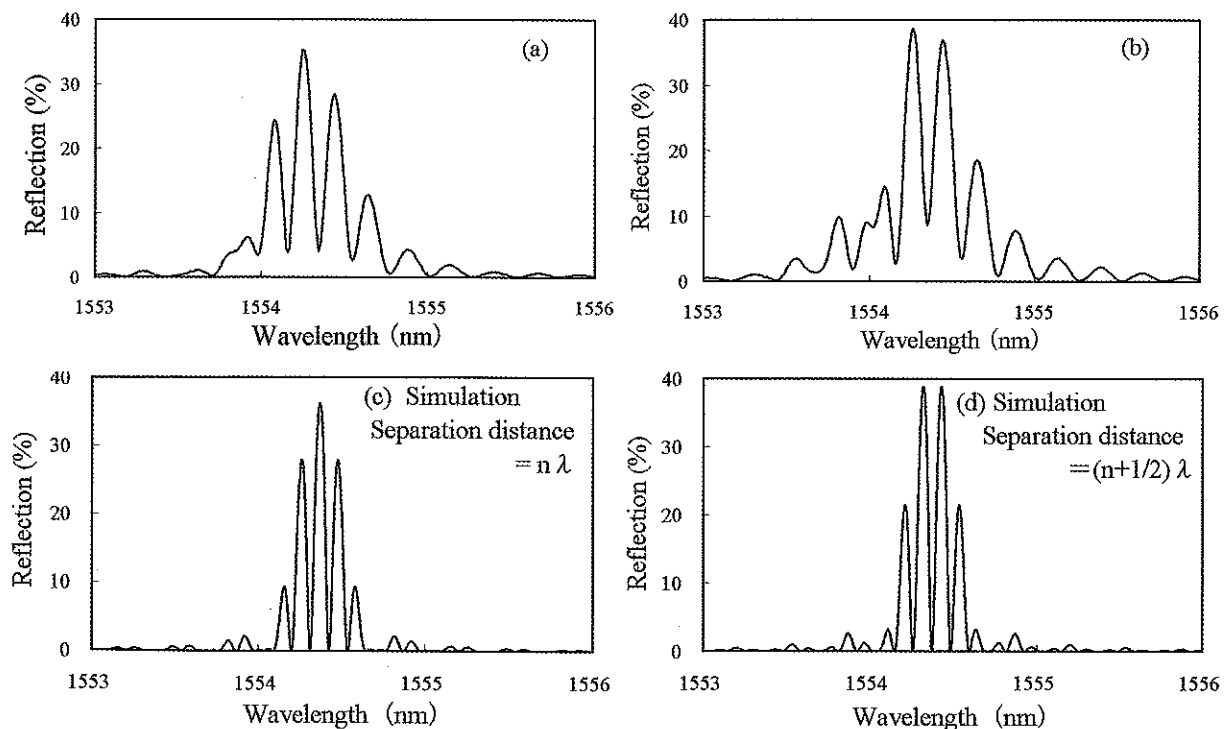


Fig. 14 Typical spectra of concatenated FBGs ; (a) and (b) are experimental and (c) and (d) are simulation results.

の間の間隔を d_{sep} , 使用する光信号光源のコヒーレント長を d_{coh} としたとき, ① $d_{sep} > d_{coh}$ である場合, すなわちコヒーレント長が FBG 間隔より短いときは FBG 間相互の干渉はなく, 個別の FBG スペクトルの足し算となり, 逆に② $d_{sep} < d_{coh}$ である場合, すなわちコヒーレント長が FBG 間隔より長いときは FBG 相互間の干渉した反射スペクトルとなる。

(2) スペクトルアナライザ (Optical spectrum analyzer) を用いてスペクトル評価をする場合, スペクトルアナライザの波長分解能 $\Delta\lambda_{res}$ を用いて $d_{res} = \lambda^2/\Delta\lambda_{res}$ として得られる d_{res} をコヒーレント長 d_{coh} と等価であるとして, d_{res} と FBG 相互間距離 d_{sep} の大小関係をもとに上の (1) と同じ議論が可能である。

(3) 連結 FBG のそれぞれの FBG 相互間で干渉する場合, FBG 全体の反射スペクトルは, FBG 相互間距離 d_{sep} に非常に敏感に左右され, 使用波長 λ の半分ごと (すなわち, $1.5\mu\text{m}$ 帯では, $1.5\mu\text{m}/2 = 0.75\mu\text{m}$ ごと) に干渉の様子が繰り返し変化することに留意すべきである。Fig. 1 に示すような連結 FBG を構成する応用においては, 上述 (2) の内容を踏まえて, 評価スペクトルアナライザの分解能 $\Delta\lambda_{res}$ を用いた $d_{res} = \lambda^2/\Delta\lambda_{res}$ と FBG 間距離の大小関係に注意が必要である。

6 結 論

連結 FBG のスペクトル評価においては, 使用する光源のコヒーレント長 d_{coh} とそれぞれの FBG 間距離 d_{sep} の大小関係によって, 連結 FBG 全体の反射スペクトルは, $d_{sep} < d_{coh}$ の場合, 2つの FBG 間での複合的反射による干渉スペクトルが得られ, 逆に $d_{sep} > d_{coh}$ の場合は, そ

れぞれの FBG の反射スペクトルを足し合わせた反射スペクトルとなる。広帯域光源を用いてスペクトルアナライザで反射スペクトルを評価する場合, スペクトルアナライザの波長分解能 $\Delta\lambda_{res}$ を用いて $d_{res} = \lambda^2/\Delta\lambda_{res}$ として得られる信号光のコヒーレント長と等価であることを, 理論を踏まえて実験で証明することができた。連結 FBG のスペクトル評価ではこのことを含めて, 光源のコヒーレント長 d_{coh} とそれぞれの FBG 間距離 d_{sep} の大小関係をもとに評価すべきである。

参 考 文 献

- 1) A. Othonos and K. Kalli, "Fiber Bragg Gratings", Artech House Optoelectronics Library (1999) Artech House Publishers, London.
- 2) K. Hotate, "Fiber Sensor Technology Today", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.45, No.8B, pp.6616-6625 (2005).
- 3) K. Okamoto, "Hikaridouharo no kiso" (1992) Corona Publishing Co., Ltd, Tokyo.
- 4) Y. Suzuki, H. Iwata, K. Nakayama, Y. Mizutani, M. Yamauchi, E. Izumikawa, T. Yokouchi and S. Ejima, "Apodization Method Owing to the Finite Length of UV Laser Coherence in Fabricating Fiber Bragg Gratings", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.45, No.12, pp.9100-9102 (2006).
- 5) FiberLabs Inc., "ASE-C-10S (1530~1560nm ASE light source)".
- 6) K. Shimoda, "Laser butsuri nyumon" (1983) Iwanami Shoten, Tokyo.
- 7) "IFO_Grating", integrated & fiber optical gratings design software program (2001) Optiwave Corporation, Ottawa.