

スーパーインポーズド・ファイバークレーティングの 重ね描き制限回数[†]

中山 恵 介* 池 邊 竜 司* 坂 本 賢 志*
毛 利 洵 平* 溝 渕 博 紀* 山 内 誠***
泉 川 栄 二*** 水 谷 康 男*** 横 内 孝 史*
岩 田 弘**** 須 崎 嘉 文** 江 島 正 毅*

Limitations of Superimposed Fiber Bragg Gratings

by

Keisuke NAKAYAMA*, Ryuji IKEBE*, Kenji SAKAMOTO*, Jun-pei MOHRI*, Hiroki MIZOBUCHI*,
Makoto YAMAUCHI***, Eiji IZUMIKAWA***, Yasuo MIZUTANI***, Takashi YOKOUCHI*,
Hiromu IWATA****, Yoshifumi SUZAKI** and Seiki EJIMA*

The authors demonstrate the inscription of several Bragg gratings at the same location of a photosensitive fiber. This superimposed Bragg grating was fabricated by two-beam interference method using UV laser light. Effects due to the inscription of multiple gratings at the same location of the fiber such as changes of reflectivity and shift of wavelength are studied.

Key words: Superimposed fiber gratings, Fiber Bragg gratings, Two-beam interference method

1 緒 言

ファイバークラッググレーティング (Fiber Bragg Grating, FBG) は、光ファイバー長手方向に約 0.5 μ m 間隔でその屈折率に強弱を持たせた周期的構造を有するデバイスで、これに入射する光波は、そのグレーティング格子の周期に合った波長成分のみが反射され、他の波長成分はすべて何ら影響を受けることなく透過する。従って、このデバイスは特定波長の光信号を選択的に反射する光フィルターとして機能する。この光フィルターは、反射信号波長帯域幅が約 0.2nm と極めて狭いことから、波長弁別性に優れた応答特性を有しており、この特長を利用して、ファイバークレーザー共振器、光ファイバー通信網の監視システム、ひずみ・温度等の各種センサー、その他多くの用途に幅広く応用展開が進められている。

FBG 応用分野によっては、波長の異なる複数の光信号を一括して反射させたいという要望がある。そのような光フィルターを単一素子として製作できれば、それは全く新しい機能を有するデバイスとして今後幅広く活用が期待できる。異なる波長の複数の光信号、いわゆる多波長光信号を FBG を用いて反射させるには、

- ① 連結 FBG
- ② サンプルド FBG
- ③ スーパーインポーズド FBG

の三種類の手法が考えられる。① の連結 FBG は、異なる反射波長を有する FBG を直列に複数個つないだもの

で、構成はシンプルだがデバイスが長尺化する欠点があり、また単一素子とは言い難い。② のサンプルド FBG は、所望の多波長光信号スペクトルをフーリエ逆変換して光ファイバー長手方向の変調屈折率分布を計算により求め、これに基づいて照射紫外レーザー光の強度分布を制御して作製される。4 波長反射や 8 波長反射の良好なスペクトル形成が報告^{1),2)}されているが、照射レーザー光の高精度で微細な走査プログラム制御を必要とし、そのため作製時間が長くなってしまいう欠点がある。③ のスーパーインポーズド FBG は、光ファイバーの同一箇所に反射波長の異なる FBG を複数個重ね合せて形成するものであり、これら三つの方法の中では最も簡便な作製方法である。しかしながら、光ファイバー長手方向の変調屈折率分布を複数回重ねるこの FBG では、各屈折率分布の周期が確保されなければ各々の光信号の健全な一括反射は期待し得ず、従って重ね描き回数に制限があることが当然のこととして予想される。この制限がきびし過ぎれば重ね合せ許容回数が少なくなり、実用に供し得る作製方法とは言えなくなる。

我々は、製作が容易で幅広い応用が期待されるスーパーインポーズド FBG に着目し、その重ね描き回数と反射率変動の関係を実験より求めた。本論文では、この実験結果よりスーパーインポーズド FBG の重ね描き制限回数を推定した。なお、FBG 作製には二光束干渉法を用いた。

[†] 原稿受理 平成 19 年 3 月 22 日 Received Mar. 22, 2007 ©2008 The Society of Materials Science, Japan

* 香川大学工学部 〒761-0396 高松市林町, Faculty of Eng., Kagawa Univ., Hayashi-cho, Takamatsu, 761-0396

** 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

*** 伸興電線(株) 〒769-2101 さぬき市志度町, Shinko Electric Wire Co., Ltd., Shido-cho, Sanuki, 769-2101

**** 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

2 スーパーインポーズド FBG の製作

光ファイバーコア部に屈折率変化を与えるには, コア部が紫外光に反応してその屈折率が上昇することを利用する. FBG の屈折率変化の周期が約 $0.5\mu\text{m}$ と短いため, 作製には干渉法が用いられる. 干渉を起こさせる方法としては, 位相マスク法と二光束干渉法がある. FBG 作製の位相マスクは, 石英ガラス上にグレーティングの2倍周期の回折格子を刻印して, ± 1 次の回折光のみが得られるよう設計されている. この回折光の干渉を利用してコア部に干渉縞を生じさせる手法が, 位相マスク法である. 二光束干渉法は, 紫外光を半透明ミラー等で二つに分岐し, それぞれの光束を反射ミラーで折り曲げ, 再度光ファイバー上で合わせることで, 干渉縞を生じさせる方法である. スーパーインポーズド FBG の作製については, 過去に文献 [3, 4] 等で紹介されている. 文献 [3] では二光束干渉法による製作が報告されているが, ここでの FBG は重ね描きする度に先に描いた FBG の反射率が約 10% ずつ低下しているため, 実用的なものとは言い難い. また文献 [4] では, 高感度ファイバーを用いた位相マスク法による作製例が報告されている.

最近我々は, 位相マスクを利用した二光束干渉法による FBG 作製装置を開発した⁵⁾この方式によれば, 反射ミラーを回転制御するだけで反射波長の異なる FBG を高精度で容易に作製することができる. そこで今回この装置を用いてスーパーインポーズド FBG の製作を行った.

使用した二光束干渉法装置は, KrF エキシマレーザー光を位相マスクに入射させ, その ± 1 次の回折光を左右に配置したミラーで反射させ, そのビーム光を光ファイバー上で交差させることにより干渉縞を生じさせる. これを光ファイバーに転写させ, FBG を得る構成である. 二つのミラーの反射角度を調整することにより作製する FBG の反射波長を任意のブラッグ波長に設定することができる. これにより, 光ファイバーの同一位置に異なる反射波長の FBG を重ね描きしたスーパーインポーズド FBG を作製することができる. 紫外線照射光は, エキシマレーザー (Lambda Physik 社 COMPEX 102MJ, 不安定共振器付き) からの KrF エキシマレーザー光 (波長 248nm, 出射エネルギー 140mJ, 繰返し 20Hz) であり, 光ファイバーは標準的なシングルモードファイバー (Corning 社製 SMF28E, 比屈折率差 = 0.36%, NA = 0.13) を用いた. このファイバーは, 実験に先立ち紫外線照射による屈折率上昇誘起の感光性をあげるため, 水素ローディング (室温にて水素圧 10MPa に 10 日間保持) を施しておいた. なお, FBG 製作の詳細については文献 [5] で報告している. 本実験では, 格子間隔 894.7nm の位相マスクを使用し, ミラーを回転させ FBG 重ね描きを行い, スーパーインポーズド FBG を形成した. 隣接反射波長間隔は 4nm とし, FBG 全長は 7mm とした. 製作は, FBG の反射および透過スペクトルをエキシマレーザー光照射中も含めて, 常時モニターしながら行った. 観測には, ASE 光源 (ASE-7701-AP, Thorlabs 社) およびスペクトラムアナライザー (Q8384, Advantest 社) を使用した.

3 スーパーインポーズド FBG の特性

先ず, 透過阻止量を -10dB (透過率 10%) として, 反射波長の異なる FBG を 5 個重ね描きしたスーパーインポーズド FBG を作製した. その透過および反射スペクトルを Fig. 1 に示す. 図は, 透過スペクトルを左側に, 反射スペクトルを右側に示している. 1 回目の描き込みスペクトルを最上段に, その下に反射波長を変えて重ね描きした FBG スペクトルを順次示している. 図より, 4 回目までの重ね描きでは, 良好なスーパーインポーズド FBG が得られていることが分かる. 5 回目の重ね描きではそれまでに描き込んだスペクトルが乱され, 透過阻止量は -10dB から -5dB 前後に減っている. また後述するように所望の透過阻止量 -10dB を得るまでの紫外線エキシマレーザー光照射時間も急激に増えている (Fig. 4). この条件において良好なスーパーインポーズド FBG が得られるのは, 4 回目までの重ね描きが限界であると推定される.

重ね描き回数の制限は, FBG 形成で生じる屈折率変化の大きさ, すなわち屈折率変調の振幅に影響され, この振幅が大きければ大きいほど重ね描き回数の制限はきびしく, 逆に屈折率変調の振幅が小さいほどこの制限は少ないものと予測される. 透過阻止量 -10dB (透過率 10%) の FBG に対して, この予測に基づき, 透過阻止量を -5dB (透過率 32%) と小さくした FBG を作製し, その特性を測定した. 結果を Fig. 2 に示す. 図より 6 回目までは良好な重ね描きを得られ, 7 回目の描き込みでそれまでに描き込んだスペクトルが乱されることが分かる. 予測された通り有効な重ね描き回数は, 増加した.

報告した全てのスペクトルについて, 横軸を重ね描き回数, 縦軸を反射率としてプロットした結果を Fig. 3 に

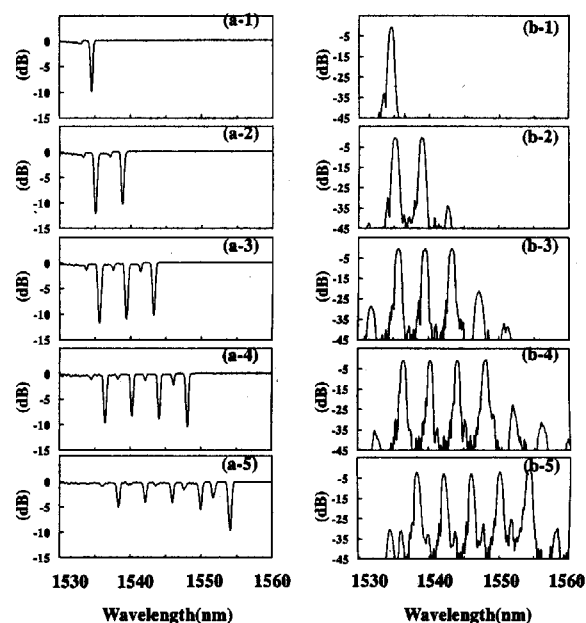


Fig. 1 Superimposed fiber Bragg gratings at the same location on photosensitive optical fiber with reflectivity of 90%. (a-1~a-5) transmission and (b-1~b-5) reflection spectra for each of the Bragg gratings.

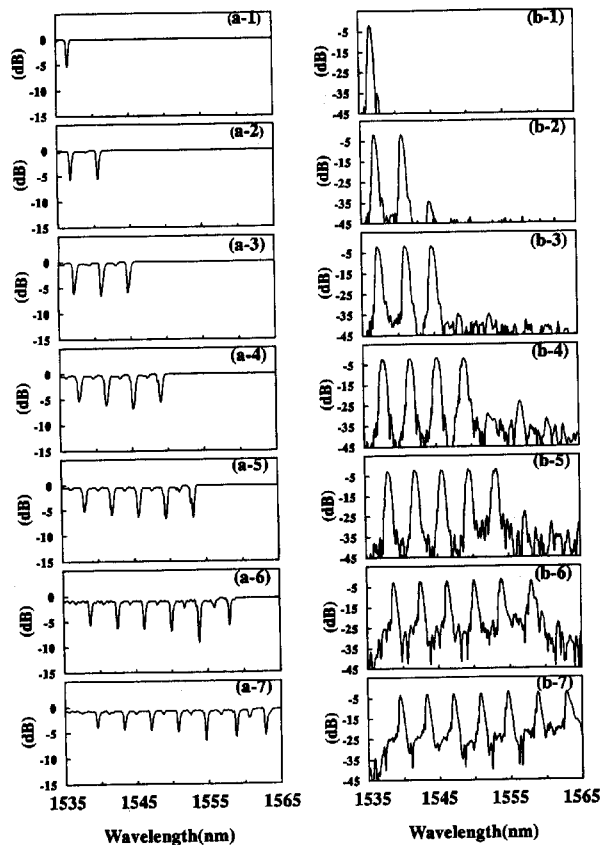


Fig. 2 Superimposed fiber Bragg gratings at the same location on photosensitive optical fiber with reflectivity of 68%. (a-1~a-7) transmission and (b-1~b-7) reflection spectra for each of the Bragg gratings.

示す。透過阻止量-10dB に対する結果が Fig. 3 (a), -5dB に対する結果が Fig. 3 (b)であり、反射率はパーセントで示している。-10dB で異なる FBG を 5 個書き込んだ場合は、Fig. 3 (a)からわかるように、5 つ目の FBG 書き込み後に先に書き込んだ FBG の反射率が最大で 60% まで低下する結果となった。そして、-5dB で異なる FBG を 7 個書き込んだ時は、7 個目の FBG 書き込み直後に、先に書き込んだ FBG の反射率が最大で 57% まで低下する結果となった。

同様に、FBG 書き込みのためのエキシマレーザー照射時間の書き込み回数に対する依存性を Fig. 4 (a)および (b)に示す。Fig. 4 (a)においては、重ね書き回数 5 回目でレーザー照射時間が 1656 秒と急激に長くなることが明確に分かる。そして、Fig. 4 (b)では、書き込み回数 7 回目で 3365 秒と急激に照射時間が増える結果となった。この結果と Fig. 3 の結果を比較すると、反射率が低下する重ね書き回数とレーザー照射時間が急激に増加する重ね書き回数が良好に一致しているのが分かる。このことから、長時間のレーザー照射が、先に書き込んだ FBG を劣化させ反射率低下を招いたものと推定される。

Fig. 5 (a)および (b)には、重ね書きによる各 FBG 中心波長の変化をプロットしている。図から、全ての反射波長は、重ね書き回数が増えるに従って長波長側へシフトしていることが分かる。これはレーザー照射時間の増加

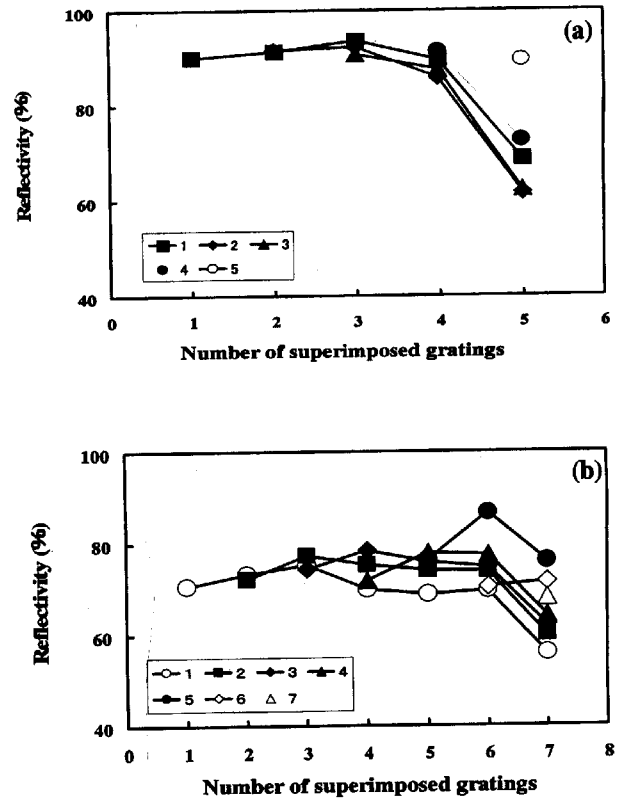


Fig. 3 Reflectivities for each of Bragg gratings as function of number of gratings superimposed at the same location.

(a) reflectivity = 90%, (b) reflectivity = 68%

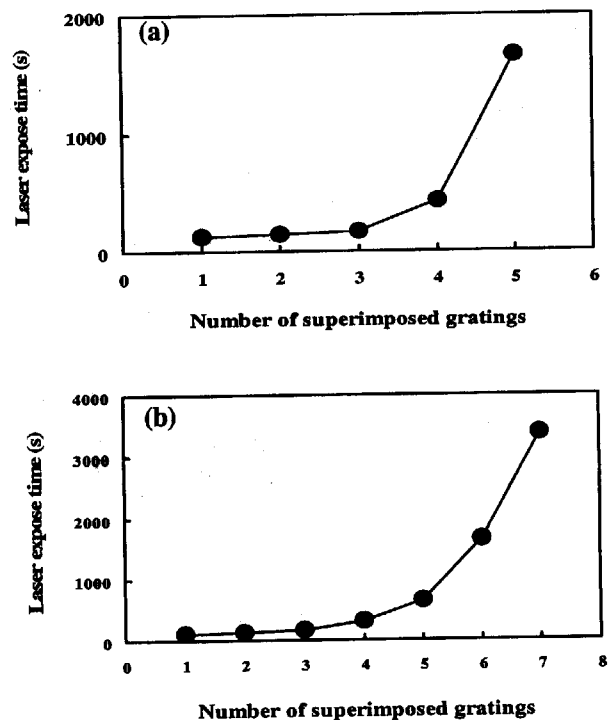


Fig. 4 Laser exposure time for each of Bragg gratings as function of number of gratings superimposed at the same location.

(a) reflectivity = 90%, (b) reflectivity = 68%

に伴い各 FBG の実効屈折率が上昇したためと推定される。なお, FBG 反射波長 λ_B は次の式 (1) で与えられる。

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Lambda \quad (1)$$

ここで, n_{eff} は実効屈折率, Λ は屈折率変調の周期である。

最後に Fig. 4 (b) および Fig. 5 (b) のデータと式 (1) を用いて, レーザー光照射による既存 FBG (透過率 32%) の単位時間当たりの実効屈折率の増加量を求めた。結果を Fig. 6 に示す。横軸は重ね描き回数, 縦軸は屈折率変化量である。図の 1st FBG の最初のプロット点は 2nd FBG 作製のためのレーザー照射による 1 分間当たりの屈折率増加量であり, 1st FBG の 2 番目のプロット点と 2nd FBG の最初のプロット点は 3rd FBG 作製のためのレーザー照射による 1 分間当たりの屈折率増加量を示している。図より, 重ね描きが進むにつれ既存 FBG の屈折率上昇量は減少する性質であり, その増加量/分は $10^{-4} \sim 10^{-5}$ のオーダーであることが分かる。また, Fig. 6 のグラフが直線的に変化している範囲においては, 重ね描きが有効であることが Fig. 2 の実験結果から読み取れる。

4 む す び

報告してきたように, 位相マスクを利用した二光束干渉法により作製したスーパーインポーズド FBG は, 透過阻止量を -10dB としたとき 4 回まで, -5dB としたとき 6 回まで重ね描きが可能であることが分かった。この実

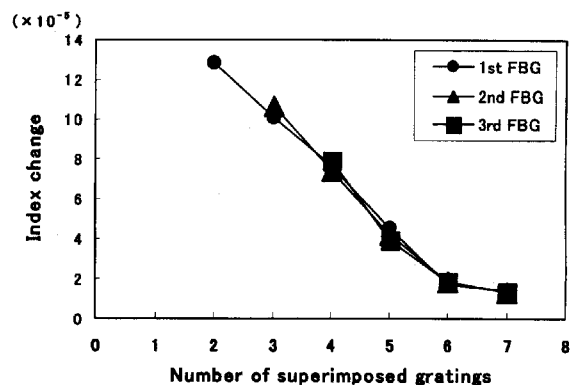


Fig. 6 Index change per minute for each of Bragg gratings as function of number of superimposed gratings.

験結果は, 重ね描きを行う度に反射率が低下している文献[3]の FBG と比べて良好なものであると言える。またこの二光束干渉法による製作は, 当然のことながら文献[4]等で報告されている位相マスク法による製作より波長設定の自由度並びにコスト面等で有利であることは疑いない。

今回の作製法によるスーパーインポーズド FBG は, 数波長までの一括反射フィルタとしては有効であると言えるが, アプリケーションが更に多波長の反射を要求する場合は対応が難しい。今後, 社会の要求を調査するとともに多波長一括反射フィルタの更なる開発に取り組んで行く予定である。

参 考 文 献

- 1) Morten Ibsen, Michael K. Durkin, Martin J. Cole and Richard I. Laming, "Sinc-sampled fiber bragg gratings for identical multiple wavelength operation", IEEE Photonics Technology Letters, Vol.10, No.6, pp.842-844 (1998).
- 2) W. H. Loh, M. J. Cole, M. N. Zervas, S. Barcelos and R. I. Laming, "Complex grating structures with uniform phase masks based on the moving fiber-scanning beam technique", Optics Letters, Vol.20, issue 20, p.2051 (1995).
- 3) A. Othonos, X. Lee and R. M. Measures, "Superimposed multiple bragg gratings", Electron. Lett., Vol.30, No.23, pp.1972-1974 (1994).
- 4) A. Arigiris, M. Konstantaki and A. Ikiades, "Fabrication of high-reflectivity superimposed multiple-fiber bragg gratings with unequal wavelength spacing", Optics Letters, Vol.27, No.15, pp.1306-1308 (2002).
- 5) 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).

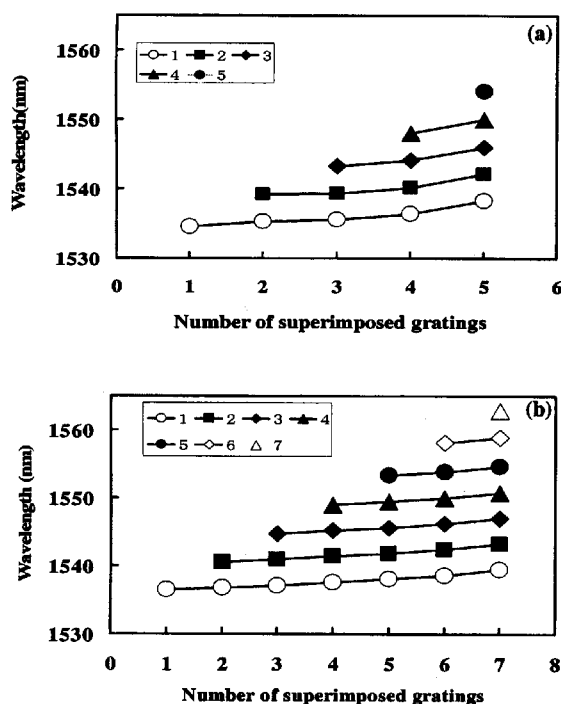


Fig. 5 Wavelength shift for each of Bragg gratings as function of number of gratings superimposed at the same location.

(a) reflectivity = 90%, (b) reflectivity = 68%