ファイバーブラッググレーティングの製作[†]

中 川 清* 江 島 正 毅**

Fabrication of Fiber Bragg Grating Structure

by

Kiyoshi NAKAGAWA* and Seiki EJIMA**

Key words : Bragg gratings, Optical fiber devices, Optical fiber filters, Optical fiber sensors

1 は じ め に

ファイバーブラッググレーティング (Fiber Bragg Grating (FBG)) は、光波の干渉パターンを光ファイバーに照射することで形成された、光ファイバー長手方向に沿った屈折率の周期的変動構造である。¹⁾ 光ファイバー内に形成された FBG は、ブラッグ波長と呼ばれる特定波長の光波を選択的に反射するファイバー型光学部品として使用される。FBG はファイバー内に直接構成されているため、低損失で信頼性が高く、通信用光ファイバーとの親和性がよい。このため、光通信用の光学部品として開発が進められている。²⁾ また、ブラッグ波長は FBG の周辺温度やひずみに敏感に応答して変化することから、光ファイバー型センサーとしての利用も検討されている。³⁾ 本報ではまず、FBG の構成原理とその光学特性の解析原理について述べる。そのあと、著者らがやっている FBG の製作方法を具体的に紹介する。また、FBG 製作の過程で観測された FBG の光学特性についても紹介する。最後に FBG の研究動向と課題について述べる。

2 ファイバーブラッググレーティングの

構造と特性解析原理

光ファイバーは、コアと呼ばれる光を導波する部分とその周りのクラッドと呼ばれる部分で構成されている。コア部は、クラッド部よりも屈折率を高く設定することが必要で、一般的には Ge を添加した石英で作られる。FBG は、この Ge 添加石英が波長 240nm 帯の紫外領域光を吸収したとき、その屈折率が増加する現象を利用して製作される。Ge 添加石英中に存在する吸収準位のひとつである GeE' 中心は、波長 240nm 帯の光を吸収することにより欠陥構造が変化し、吸収スペクトルの形状が変化する。その結果、クラマース・クローニッヒの関係から屈折率変化が発生すると説明されている。⁴⁾ しかし、このメカニズムによる屈折率の変化量は小さく、実際に生じている変化量を充分には説明できない。ガラスの物理的構造の変化など、複数のメカニズムの複合現象で屈

折率変化が発生していると考えられている。⁵⁾ この現象を利用して、紫外領域光の明暗パターンを光ファイバー側面から照射することで FBG 構造は形成される。

FBG の解析モデルを図 1 に示す。光ファイバー中の長手方向について、FBG 構造は屈折率の分布 $n(z)$ として、

$$n(z) = \bar{n} + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z\right) \quad (1)$$

で表せると考える。⁶⁾ ただしここで、 $\bar{n}$ は平均屈折率、 Δn は屈折率変化の振幅、 Λ は屈折率変化の周期である。FBG は $z = 0$ から $z = L$ まで存在するとする。石英ファイバーの場合 $\bar{n} \approx 1.5$ 程度であり、屈折率変化 Δn はたかだか 0.01 程度である。 $(\Delta n \ll \bar{n})$

シングルモードファイバーに形成された FBG に係わる光波の伝ばは、基底モードのみで、お互い反対方向に伝ばする二つの光波のみを考慮すれば良い。そこで、FBG に係わる光電場を、

$$U(z) = A(z) \exp[-i\beta z] + B(z) \exp[i\beta z] \quad (2)$$

のように、FBG に向かって進行する前進伝ば波 $A(z)$ と後退伝ば波 $B(z)$ の和で表す。この時 β は伝ば定数である。この 2 波が屈折率変化周期 Λ の FBG に係わるためには、ブラッグ回折の条件

$$\beta - (-\beta) = \frac{4\pi\bar{n}}{\lambda} = m \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (3)$$

図 1 FBG の解析モデル

[†] 原稿受理 平成 14 年 5 月 23 日 Received May 23, 2002

* 香川大学工学部信頼性情報システム工学科 〒761-0396 高松市林町, Dept. of Reliability Based Information Systems Eng., Kagawa Univ., Hayashi-machi, Takamatsu, 761-0396

** 正 会 員 香川大学工学部材料創造工学科 〒761-0396 高松市林町, Dept. of Advanced Material Sci., Kagawa Univ., Hayashi-machi, Takamatsu, 761-0396

を満たすことが必要である。ここで、 λ は光波の波長、 n は回折次数を表している。式(3)は、周期 Λ の屈折率変化構造のどの部分で反射した光波も位相が等しくなるような条件(位相整合条件)を表している。⁷⁾1次の回折を考えた場合($m=1$)、FBGにより結合される2波の波長はFBGの格子間隔 Λ で制限され、

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (4)$$

で与えられるブラッグ波長 λ_B の光波のみが結合される。つまり、式(1)で特徴付けられるFBGでは、ブラッグ波長 λ_B の光波のみが反射され、それ以外の光波は、FBGを通過する。

FBGに入射された光波が受ける屈折率変動の影響は、結合モード理論で解析される。⁸⁾結合モード理論では、式(1)と式(2)を波動方程式に代入し、高次微分と高次の回折を無視することで、それぞれの電場振幅間の関係が、結合モード方程式:

$$\begin{cases} \frac{dA(z;\lambda)}{dz} = -i\delta A(z;\lambda) - i\kappa B(z;\lambda) \\ \frac{dB(z;\lambda)}{dz} = i\delta B(z;\lambda) + i\kappa A(z;\lambda) \end{cases} \quad (5)$$

で与えられる。ここで、 $A(z;\lambda)$ 、 $B(z;\lambda)$ は波長 λ の前進波、後退波の電場振幅を表している。また、ここでは簡単のために、ファイバー中の伝播の途中で発生する損失は無視している。式(5)中の δ は自己結合定数で、ブラッグ波長からのズレ量による位相の変移を表し、

$$\delta \equiv \frac{2\pi n}{\lambda} - \frac{\pi}{\lambda_B} \quad (6)$$

と与えられる。 δ は前進波から前進波、後退波から後退波間のエネルギー移動を表す定数である。 κ は相互結合定数を表し、

$$\kappa = \frac{\pi \Delta n}{\lambda_B} \quad (7)$$

と表される。 κ は前進波、後退波間のエネルギー移動に関する定数である。屈折率変化の振幅 Δn に比例して大きくなる。ここで、FBG内の任意の位置 z での局所的な反射係数を、

$$\rho(z;\lambda) = \frac{B(z;\lambda)}{A(z;\lambda)} \quad (8)$$

で定義し、式(5)より $d\rho/dz$ を求めると、微分方程式、

$$\frac{d\rho(z;\lambda)}{dz} = 2i\delta\rho(z;\lambda) - \kappa\rho^2(z;\lambda) + \kappa \quad (9)$$

が得られる。この微分方程式は、FBGの一方の端では、後退波は存在しないこと($\rho(L;\lambda)=0$)を境界条件として解かれ、FBGの他方の端 $z=0$ での反射係数 $r(\lambda)=\rho(0;\lambda)$ を得る。ここまでの説明では、 κ 、 δ は空間的に一様として説明してきたが、一般的には空間的な分布を示す。そこで、式(9)はコンピュータを使用した数値的解法で解かれることが一般的である。

3 ファイバーブラッググレーティングの形成と評価

著者らが行っているFBGの書込みについての原理光学系を図2に示す。書込み光源として波長248nmのKrFエキシマレーザーを用いた。使用したエキシマレーザー

図2 原理光学系

光源からは、パルス幅30nsec、エネルギー最大値300mJ、繰返し周波数最大20Hzのパルスレーザー光が出力される。パルスエネルギーと繰返し周波数は光ファイバーへのFBG書込み条件により調整して使用した。エキシマレーザー光パルスは、空間的なエネルギー密度を高くするために円筒レンズを用いて集光させた。円筒レンズは、収差の影響を最小限に押さえるため曲面から光が入射する様に使用する。円筒レンズ集光面近くには、FBGを書込む光ファイバーを配置する。光ファイバーは、ファイバー表面を覆っている樹脂の部分剥がし、クラッド層をむき出しにして配置する。FBGを書込む光ファイバーは、水素ローディングと呼ばれる前処理を行い、エキシマレーザー光に対する感度を向上させた後、FBGを形成する。⁹⁾

光ファイバーと円筒レンズの間には、位相マスクと呼ばれる回折格子を配置する。位相マスクでの回折原理を図3に示す。位相マスクには、一方の面に波形構造の回折格子が刻まれている。この波形構造で、エキシマレーザー光は回折され、0次の回折光(透過光)と ± 1 次の回折光そして高次の回折光を発生する。

位相マスクで回折された ± 1 次の回折光は、位相マスク下方に干渉縞を発生させる。位相マスクの波形構造のピッチを Λ_m とすると、発生する干渉縞の間隔 Λ は Λ_m となる。この ± 1 次の回折光により発生する間隔 Λ の干渉縞がFBG書込みに使用される。縞間隔 Λ の干渉縞が光ファイバーに照射されると、明るい縞の部分の屈折率は高くなり、暗い部分の屈折率は変化しないので、縞間隔 Λ で屈折率の変動構造が発生することになる。この縞間隔 Λ の屈折率変化は、FBG構造そのものである。実際の書込みの際に異なった格子間隔のFBG構造を形成するためには、形成したい格子間隔に対応した位相マスクが必要である。

図3 位相マスクによる回折

位相マスクは、熔融石英ガラス板で作られており、紫外領域光の吸収は無視できる程小さい。0次の回折光強度は、FBGの書込みに使用する干渉縞のコントラストを低下させるため、通常の位相マスクでは波形構造の凹凸の深さ Δ を制御することで、0次の回折光（透過光）強度が最小になり、 ± 1 次の回折光強度が最大になるように設計されている。使用した位相マスクの0次の回折光強度は入射光強度の約3%である。これに対して ± 1 次の回折光強度は約35%で、残りの27%の入射光は高次の回折光となっている。 ± 1 次を含む高次の回折効率に波長依存性はない。しかし、0次の回折光（透過光）の回折効率は波形構造の凹凸深さと入射レーザー光波長の関係で決定されるため、位相マスクは設計された波長でのみ使用できる。¹⁰⁾

FBGの書込み時には、図4に示す実時間観測システムによりFBG構造形成の時系列過程を実時間で観測しながら書込みを行った。FBG書込み用ファイバーは、水素ローディングの後、実時間観測システム中に融着接続してから書込みが行われる。このシステムでは、広帯域光源としてASE (Amplified Spontaneous Emission) 光源を使用した。光源からの光波は、光アイソレータ、3dBカプラーを介して、書込み用ファイバーに導かれ、その後光スペクトルアナライザTに入力される。このスペクトルアナライザでは、FBGの透過特性が観測される。3dBカプラーの一方の出力は光スペクトルアナライザRに接続される。これは、FBGの書込により発生する反射光のスペクトル観測に使用する。

光スペクトルアナライザTで観測された透過スペクトル例を図5(a)に示す。図5(a)にはFBG書込み前・後の透過スペクトルも示している。

FBGを書込む前に観測されたスペクトルは光源の発光スペクトルである。広帯域光源からの出力光は約-30dBm程度で波長が長くなるに従って、少しだけ弱くなる様なスペクトル分布を示す。書込み前のこの様なスペクトルが参照スペクトルである。FBGの書込みを行った後では、ブラッグ波長 $\lambda_B = 1573\text{nm}$ 近辺の光波スペクトルが遮断され、透過しなくなっている。

光スペクトルアナライザRで観測された反射スペクトル例を図5(b)に示す。FBG書込み前には、反射光は存在しないので、図5(b)中、-70dBm程度のほぼ平らなスペクトルの分布がまず観測される。一旦FBGが書込まれると、透過スペクトルの変化と対応して、波長1573nm近辺に反射信号が発生する。反射スペクトルの最大値は、透過スペクトルの場合に定義した参照スペクトルとなる。図5(b)の場合、波長1573nm付近のスペクトル

図4 実時間観測システム

図5 観測されたスペクトル、(a) FBG書込み前後の透過スペクトル、(b) FBG書込み前後の反射スペクトル

が参照スペクトルと一致する。反射スペクトルの測定結果では、ブラッグ波長以外の波長域でもスペクトル強度が増加する。これはFBG構造形成のために発生した散乱により発生する雑音である。光通信用光学部品としてFBGを利用する場合、この雑音成分は可能な限り除去する必要がある。

通常の実時間観測の場合、参照スペクトルをあらかじめ測定しておき、参照スペクトルを基準にした変化量のみを観測する。透過・反射スペクトルの参照スペクトルとの偏差を図6に示す。

この図の場合、ブラッグ波長において透過阻止量-30dB 反射量 100%が観測されている。透過阻止量や反射量を制御する場合、書込みを行いながらその光学特性を観測することで、エキシマレーザーの照射時間を調整し、FBGの特性制御を行った。

エキシマレーザー光の照射時間の経過に従った透過スペクトル形状の変化についての観測結果を図7に示す。露光時間が経過すると透過阻止量が増大する。同時に、阻止中心波長が長波長側にシフトする。透過阻止量の増加は、露光により屈折率変動振幅 Δn が増加するためである。また、阻止中心波長の長波長側へのシフトは、露光に従って屈折率の変動構造が形成され結果的に平均屈折率が増加するために、式(4)のブラッグ波長が大きくなる。

図6 反射透過スペクトル

図7 透過スペクトルの時系列変化

なるからである。

露光時間と最大透過阻止量および中心波長の関係を図8に示す。この図には、中心波長だけでなく、透過スペクトルが、-3dBを示す波長も示した。最大透過阻止量は露光時間の経過に従って小さくなり、露光時間200secでほぼ飽和量に達している。阻止中心波長は露光時間の増加とともに長波長側に变化している。短波長側の-3dBを示す波長は露光時間によりあまり変化せず長波長側がより長波長側にシフトする特徴が顕著に表れている。長波長側の-3dBを示す波長は、中心波長のシフトに対応して長波長側にシフトしている。

FBGの書き込みに際して、光ファイバーを位相マスクの下部に確実に固定するために、光ファイバーに張力を与えた状態でFBGの書き込みを行った。光ファイバーに張力を与えた機構を図9に示す。

光ファイバーの書き込み部分の両端をそれぞれステージ上に固定した。ステージの一方は固定ステージで、他方は移動ステージになっており、移動ステージは一定の重りで引っ張られている構造とした。この構造によりファイバーに与える張力は、移動ステージに与える重りを変化させることにより正確に制御できる。

書き込み時に与えた張力の値に対する書き込まれた

図8 FBG 特性の露光時間依存性

図9 光ファイバーへの張力印加機構

FBGの特性を図10に示す。図では、張力を与えた状態で、書き込み終了時の最大透過阻止波長と、張力を除いた状態での最大透過阻止波長を示している。また、得られた最大透過阻止量も示す。張力の有無で透過阻止波長が変化する。これはブラッグ波長の張力依存性で、ひずみ計測センサーとして応用されている。¹¹⁾

書き込み時に与えた張力に従って書き込み時に観測される透過阻止中心波長が線形に変化し、張力を除いたあとでも線形に変化する。結果的に書き込み時張力によって張力解放状態での中心波長（ブラッグ波長）が線形に変化し、単位重さあたりの中心波長（ブラッグ波長）の変化比は約16pm/gである。これは書き込み時に与えた張力による残留応力のためと考えられる。また、光ファイバー自身が、張力の有無により伸縮し、実質的な格子間隔が変化していると考えられる。この性質は、書き込み時張力の制御で、異なるブラッグ波長のFBG構造を形成できることを示している。0から250gの間の錘で張力を調整することで約4nmの範囲でFBGの示すブラッグ波長を変化させることが可能である。¹²⁾

最大透過阻止量も書き込み時張力に依存して変化する。錘の重さが200g以下の時は同程度の阻止量を示すが、張力が大きい場合に阻止量が小さくなる傾向がある。これは張力が大きい場合、光ファイバーの固定部分が滑ったり、レーザー光の照射によって光ファイバーが伸縮するためと考えている。しかし、適当な張力を与えないで書き込みを行うと、レーザー照射中のファイバー固定が不安定で十分な書き込みを行えない。適当な張力を与えた状態で書き込みを行うのが効果的である。

FBGを書き込む光ファイバーの光感度や屈折率変化量を増大させるために、水素ローディングと呼ばれる前処理を行う。水素ローディング条件と形成されたFBG特性の関係について考察した。光ファイバーは、通信用ファイバーとして一般的なSMF28（コーニング社製）と、低カットオフ波長ファイバーとして良く使われるCS980（コーニング社製）を使用した。水素ローディングは、室温で気圧10MPaの水素雰囲気中に光ファイバーを封入することで実行した。水素雰囲気中での封入日数と形成したFBGの光学特性の関係を図11に示す。

図では、SMF28、CS980について書込んだFBGの透過阻止中心波長と透過阻止最大値を、水素ローディング日数について測定した結果である。水素ローディング日

図10 FBG 書き込み時の張力に対するFBGの特性変化

図 11 FBG の光学特性と水素ローディング日数

数が増加するに従って、最大透過阻止量は増加する。両ファイバーともに水素ロード日数 10 日を過ぎるとほぼ安定した最大透過阻止量を示す。透過阻止中心波長は、水素ロード日数の増加に従って長波長側にシフトする。こちらも 10 日を過ぎるとほぼ一定になっている。水素ローディング日数の増加は、光ファイバー中に拡散される水素分子量を増加させる。観測結果から、今回行った実験条件下では、約 10 日間で、水素分子の光ファイバー内での拡散が、飽和状態となると考えられる。水素ローディングによってエキシマレーザー光に対する光感度は向上し、屈折率の変化量 Δn も大きくなり、最大透過阻止量が大きくなっている。また、 Δn が水素ローディングにより大きくなるので、結果的に屈折率平均値も大きくなり、ブラッグ波長も長波長側にシフトする。CS980 は、SMF28 に比べてカットオフ波長が短い。これはコアを形成する石英の Ge 添加量が多いためである。このため、SMF28 に比べて CS980 は大きい屈折率変化と大きい平均屈折率を示す。

4 多段型 FBG 光学フィルターデバイスの製作

FBG はそのブラッグ波長相当の光波のみを反射する選択的デバイスである。そこで、異なったブラッグ波長をもつ FBG を直列に多段型に配置することで、それぞれの反射・透過特性の線形結合の反射・透過スペクトル特性を得ることが可能である。図 12 に多段型 FBG の構成原理を示す。一本の光ファイバーに屈折率格子の格子間隔で決定するブラッグ波長が異なる FBG を直列に多段型で構成すると、個々の FBG ではそれぞれのブラッグ波長に相当する光波をフィルタリングする。したがって全体的には多波分の光波のフィルタリングを行うフィルターとして使用できる。

格子間隔の異なる位相マスクを使用して、一本の光ファイバーの異なった部分部分に異なる FBG を形成する

図 12 多段型 FBG フィルターの構成原理

ことで多段型 FBG を構成した。8 枚の位相マスクを用いて作成した 8 波対応の多段型 FBG の反射・透過スペクトルを図 13 (a)(b) に示す。この多段型 FBG は水素ローディングを行った SMF28 光ファイバーを用いて構成した。それぞれの FBG のブラッグ波長は、1530.03、1534.676、1539.352、1544.024、1548.656、1553.476、1558.282、1563.068nm となった。これらの波長は、ITU-T (国際電気通信連合) の SG15 G692 で標準化された光通信で使用される光波長である。

反射スペクトルの各チャンネルの相似性も良好で、それぞれの反射率も 0dB と均一に作成できた。反射スペクトルが示すノイズレベルは -25dB で、光通信用光学部品としてはさらなる改善が必要である。また、透過スペクトルでは各チャンネル間で、最大透過阻止量にばらつきが生じ、0dB 近辺にノイズも観測されている。

図 14 に特性を示した多段型フィルターは光通信部品評価用光源のフィルターに使用されている。反射型フィルターとして使用されているため透過スペクトルのばらつきは問題とならなかった。また、反射スペクトルのノイズレベルは、多段型フィルターを 2 段にして使用することで、-50dB まで改善して使用出来た。

多数枚の位相マスクを用いて多段型 FBG を形成する方法の他に、図 10 で示したブラッグ波長の書き込み時張力依存性を利用することで、一枚の位相マスクのみで多段型 FBG が構成できる。

図 13 8ch 対応多段型 FBG フィルターの特性

図 14 多段型フィルターの特性スペクトル

図 10 より, 16pm/g の割合で書込み時張力によりブラッグ波長が変化することが明かとなった. そこで, 格子間隔 1073.1nm の位相マスクを用いて実際に水素ローディングした SMF28 光ファイバーに FBG 構造を形成した. 製作した多段型デバイスが示した透過・反射スペクトルを図 14 に示す. 製作はまず, 書込み時張力 250g を与え FBG を形成した. 結果的に形成された FBG のブラッグ波長は, 張力解放時で 1549.2nm であった. つぎに書込み時張力を 200g と設定して, 同じ光ファイバーの別の部分に FBG を形成した. ブラッグ波長は, 1549.8nm であった. 書込み時張力を 150g, 100g, 50g と変化させて, それぞれ書込み場所を変えて FBG を形成した. それぞれのブラッグ波長は, 1550.7nm, 1551.2nm, 1552.2nm であった. それぞれの FBG の長さは 15mm で, 間隔は 5mm とした. 5 つの FBG からなる多段型フィルターの全長は 100mm ほどであった.

図では, それぞれの書込み時張力に対応する反射・透過ピークが観測できる. 5 波対応の光フィルターとして利用できる. しかし, 書込み時張力制御で得られるブラッグ波長の変化幅は高々 4nm である. 現状の光通信技術で要求されるチャンネル幅は約 4nm であり, 張力制御の方式では対応できない. しかし, 今後ますます光波長の多重化が進むのは確実であり, 次世代の高密度多重光通信技術に対応できる技術と考えている.

5 ファイバーブラッググレーティング形成技術に関する研究動向

光ファイバー内での屈折率格子の形成は 1978 年に発見された.¹³⁾ 当時は, 光ファイバーに入射した光と, ファイバー端面での反射光との干渉で発生した干渉しまを介して形成された屈折率格子であった. このため屈折率格子で反射される光波長の制御も困難であった. その後, 紫外線レーザーを用い, 本報で紹介した位相マスクを用いる方法¹⁴⁾や, 二光束干渉により発生する干渉しまを光ファイバー側面から照射する方法等¹⁵⁾が紹介され, FBG の製造研究は広く行われるようになり, 現在に至っている.

最近では, 微細加工技術の進展に伴い光ファイバー内で形成する屈折率変化構造の分布形状の制御が可能になり, FBG の示すフィルター特性の応答スペクトル分布を指定し, そのスペクトル形状を出力できる FBG の屈折率変化構造をコンピューターシミュレーションにより最適化する探究研究が行われている.^{16), 17)}

近年行われている屈折率変化構造 $n(z)$ を図 15(a)~(d) に示す. 図 1 で示した FBG の原理同様, FBG で反射される光波の中心波長 (ブラッグ波長) はそれぞれの屈折率変化構造を形成する基本周期 Λ で決定される. しかし, 基本周期 Λ の振動構造で形成される屈折率変化構造の包絡線により, FBG フィルターの応答スペクトル形状が変化する.

図 15 (a) はアポダイゼーション格子である.^{18), 19)} 図 1 の矩形の包絡をもつ FBG よりもサイドローブやノイズ強度を低減できる. FBG の発見以来, 反射スペクトルの整形手法として, その製作技術は検討されている. 図

図 15 近年研究されている屈折率変化構造 $n(z)$, (a) アポダイゼーション格子, (b) チャープ格子, (c) 位相ずれ格子, (d) サンプルド格子

15 (b) はチャープ格子である. 基本振動周期が, 軸に沿って変化しているため, ブラッグ波長に幅が発生し広い波長範囲の光波に応答する FBG となる.²⁰⁾ 近年, 超短パルス光の利用が注目され, チャープ FBG はパルス光の分散制御²¹⁾への利用の可能性から注目されている. これは, 異なった波長成分が, 空間的に異なった部分で反射されるため, 反射される場所によって時間遅れを発生できることを利用したものである. 図 15 (c) は位相ずれ格子である.²²⁾ FBG を連続的に形成する際に基本振動の位相を制御することで, その反射スペクトルの形状が制御できる. 図 15 (d) はサンプルド格子である. 近年スーパーストラクチャーとも呼ばれている.²³⁾ 通常の FBG を図 15 (d) に示すように特定周期で連続的に形成して, 特有のスペクトル形状を実現する. 個々の FBG の反射スペクトルに, 周期的に配置された構造の影響が重畳されると理解できる. サンプルド格子を形成する基本格子にチャープ格子を用いることで, スペクトル形状を変化させたり,²⁴⁾ 基本格子間の屈折率を制御してスペクトル形状を整えるなど設計上の自由度の多さから, 今後有望である.

著者らは, 図 15 (b) に示す, チャープ格子を実際に作成し, その透過・反射スペクトルを測定した. 作成したチャープ FBG の示す反射・透過スペクトルを図 16 に示す. 図 16 では, チャープ格子の一部を形成せず, 狭帯域透過型フィルター (バンドパスフィルター) を形成した例を示している.²⁰⁾

チャープ格子は, チャープ付位相マスクを用いて形成

図 16 狭帯域透過型フィルターの特性スペクトル

した。チャープ付位相マスクは、位相マスクの波型の凹凸周期が一樣ではなく、一方の端のピッチが狭く他方の端のピッチが広くなっており、ピッチの変化量は一定割合で変化する様に設計された位相マスクである。本実験で使用した位相マスクは全長 40mm である。ピッチの変化の割合は、2nm/cm で、位相マスク全体で、ブラッグ波長が 8nm 変化する FBG が作成できることになる。測定結果から、ほぼ同等のスペクトル分布が得られている。

6 ま と め

光ファイバー中に屈折率分布構造を形成するだけで高性能なフィルターデバイスとなる FBG は今後ますます必要とされるであろう。また、光ファイバー中に形成する屈折率分布のより正確な制御技術が確立すれば、光ファイバーデバイスの性能向上も期待できる。

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の地域新生コンソーシアム研究事業として実施された「光通信波長多重ファイバー型デバイスの開発」プロジェクト（研究代表者：江島正毅）で得られた結果をまとめたものである。御協力いただいた、関係者各位に感謝する。

参 考 文 献

- 1) K. O. Hill and G. Meltz, J. Lightwave Technol., **15**, 1263 (1997).
- 2) C. R. Giles, J. Lightwave Technol., **15**, 1391 (1997).
- 3) A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam and E. J. Friebele, J. Lightwave Technol., **15**, 1442 (1997).
- 4) D. P. Hand and P. St. Russel, Opt. Lett., **15**, 102 (1990).
- 5) T.-E. Tsai, G. M. Williams and E. J. Friebele, Opt. Lett., **22**, 224 (1997).
- 6) T. Erdogan, J. Lightwave Technol., **15**, 1277 (1997).
- 7) 小山次郎, 西原 浩, “光波電子工学” 4 章 (1978) コロナ社.
- 8) A. Yariv and P. Yeh, “Optical waves in crystal”, Chap. 11, (1984) Wiley, New York.
- 9) B. Zhang and K. Raghavachari, Appl. Phys. Lett., **66**, 2656 (1995).
- 10) Z. Xiong, G. D. Peng, B. Wu and P. L. Chu, J. Lightwave Technol., **17**, 2361 (1999).
- 11) A. D. Kersey, Opt. Fiber Technol., **2**, 291 (1996).
- 12) K. Nakagawa, Y. Takemura, R. Kunimoto, Y. Mizutani, S. Kimura, Y. Fukuyama, Y. Suzaki and S. Ejima, Jap. J. Appl. Phys. Pt.2, **41**, L599 (2002).
- 13) K. O. Hill, F. Fujii, D. C. Johnson and B. S. Kawasaki, Appl. Phys. Lett., **32**, 647 (1978).
- 14) K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D. C. Johnson and J. Albert, Appl. Phys. Lett., **62**, 1035 (1993).
- 15) G. Meltz, W. W. Morey and W. H. Glenn, Opt. Lett., **14**, 823 (1989).
- 16) G. Cormier, R. Boudreau and S. Theriault, J. Opt. Soc. Am. B, **18**, 1771 (2001).
- 17) R. Feced, M. N. Zervas and M. A. Muriel, IEEE J. Quantum Electro., **35**, 1105 (1999).
- 18) C. Martinez, S. Magne and P. Ferdinand, Appl. Opt., **41**, 1733 (2002).
- 19) S. J. Mihailov, F. Bilodeau, K. O. Hill, D. C. Johnson, J. Albert and A. S. Holmes, Appl. Opt., **39**, 3670 (2000).
- 20) K. Sugden, L. Zhang, J. A. R. Williams, R. W. Fallon, L. A. Everall, K. E. Chisholm and I. Bennion, J. Lightwave Technol., **15**, 1424 (1997).
- 21) M. Sumetsky, B. J. Eggleton and C. Martijn de Sterke, Opt. Express, **10**, 332 (2002).
- 22) L. Wei and J. W. Y. Lit, J. Lightwave Technol., **15**, 1405 (1997).
- 23) C. Martijn de Sterke and N. G. R. Broderick, Opt. Lett., **20**, 2039 (1995).
- 24) C.-H. Wang, L. R. Chen and P. W. E. Smith, Appl. Opt., **41**, 1654 (2002).