

Received April 20, 2007; Accepted January 8, 2008

二光束干渉計を用いて作製したファイバーブラッググレーティングの反射特性におけるアポダイゼーション

岩田 弘^{*1}・安藤 真紀^{*2,*4}・中山 恵介^{*2,*5}・溝渕 博紀^{*2}・泉川 栄二^{*3}・水谷 康男^{*3}
横内 孝史^{*2}・須崎 嘉文^{*2}・江島 正毅^{*2}

*1 高松工業高等専門学校機械工学科 〒761-8058 高松市勅使町 355

*2 香川大学工学部材料創造工学科 〒761-0396 高松市林町 2217-20

*3 伸興電線(株) 〒769-2101 さぬき市志度町志度 1298-12

*4 現所属: アオイ電子(株) 〒761-8014 高松市香西南町 455-1

*5 現所属: マイクロクラフト(株) 〒700-0951 岡山市田中 630-2

Apodization of Fiber Bragg Gratings by Two-Beam Interference Method

Hiromu IWATA^{*1}, Maki ANDO^{*2,*4}, Keisuke NAKAYAMA^{*2,*5}, Hiroki MIZOBUCHI^{*2}, Eiji IZUMIKAWA^{*3}, Yasuo MIZUTANI^{*3}, Takashi YOKOUCHI^{*2}, Yoshifumi SUZAKI^{*2} and Seiki EJIMA^{*2}

*1 Department of Mechanical Engineering, Takamatsu National College of Technology, 355 Chokushi-cho, Takamatsu 761-8058

*2 Department of Advanced Materials Science, Faculty of Engineering, Kagawa University, 2217-20 Hayashi-cho, Takamatsu 761-0396

*3 Shinko Electric Wire Co., Ltd., 1298-12 Shido, Shido-cho, Sanuki 769-2101

*4 Present affiliation: AOI Electronics Co., Ltd., 455-1 Kohzai-Minamimachi, Takamatsu 761-8014

*5 Present affiliation: MicroCraft Co., Ltd., 630-2 Tanaka, Okayama 700-0951

Because fiber Bragg gratings (FBGs) have very sharp, narrow-band reflection spectra, they are well suited to applications involving narrow-band optical signals, such as optical filters in optical telecommunication systems, fiber laser cavities, and various types of fiber sensors. There, the effective apodization techniques are ever strongly desired for spectrum shaping such as suppressing side-lobes. We have developed novel technique of the apodization using two-beam interference method that controls the angle of mirror reflection by very small amount in step-wise or continuously during the time of the FBG formation by UV laser irradiation, which consequently forms superposition of FBGs of slightly different grating period and hence achieves the apodization. Experiments by two-step control of the mirror angle have demonstrated very clear spectrum shaping in suppressing side-lobes. Thus the new technique appears to provide very powerful apodization technique for the FBG fabrication.

Key words: optical fiber, apodization, fiber Bragg grating, two-beam-interference method

1. まえがき

光ファイバーに形成したファイバーブラッググレーティング(以下, FBG)は、光ファイバーのコア部軸方向に、例えは正弦波状の周期的な屈折率変調を与えたもので、光ファイバーに入射した光のうち、周期的屈折率変調の変調周期に依存した特定波長の光のみを反射し他の光は通過させる波長選択フィルターの効果を有する。

このFBGを製造する方法としては、位相マスク法と二

光束干渉法があり、いずれも紫外線レーザーの照射による屈折率増加の効果を有する光ファイバーを用いて光ファイバーコアにグレーティングを形成するものである。

位相マスク法では、まず、FBGを作製する光ファイバーを光路上で位相マスク後方にマスクに近接させて配置する。次に紫外線レーザー光が位相マスクを通過するときマスク後方に生じる干渉縞を用いて、光ファイバーのコア部軸方向に周期的屈折率変調を形成する方法¹⁾である。この

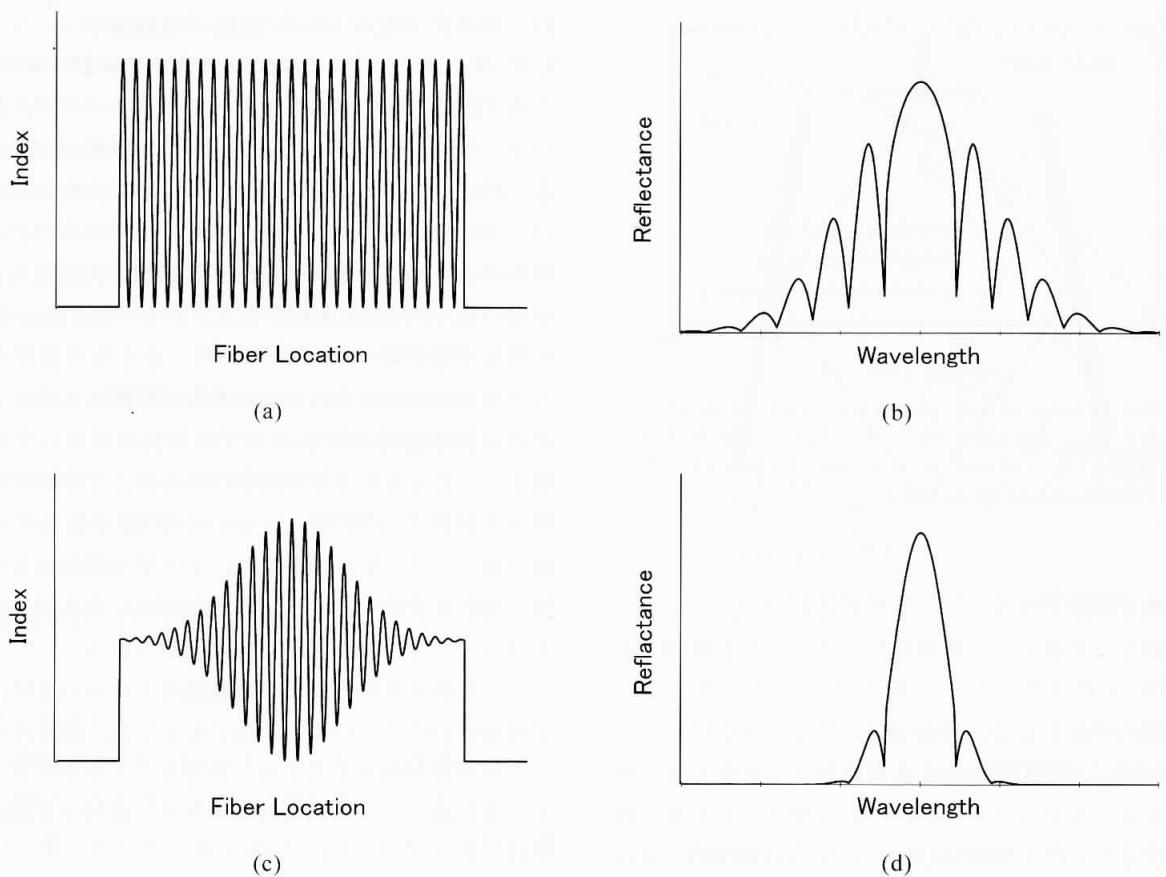


Fig. 1 Schematic illustration of apodization effect on the FBG reflectivity spectrum. Distribution of refractive index modulation along the fiber and resulting reflectivity spectrum are depicted in (a) and (b) with no apodization control, and are compared with the apodization control in (c) and (d) for the same parameters. Note that the actual number of index modulations is tens of thousand whereas the number is reduced to ten or twenty in the figure in order to ease the understanding.

ときの干渉縞は使用した位相マスクに固有の干渉縞周期を有するため、作製されるFBGの反射波長は特定の波長に限定される。

一方、二光束干渉法においてはまず紫外線レーザー光を、位相マスクなどを用いて2光束に分岐し、その後ミラーを用いて光路を曲げ、2光束を再び集光し交差させることにより干渉縞を生成する。ここで位相マスク法と同様、この干渉縞上に光ファイバーを置くことによってコア部に周期的屈折率変調を形成する方法¹⁻⁴⁾である。二光束干渉法においては、2つのビームが交差する角度を何らかの方法で制御することによって干渉縞周期を自在に変化させることが可能である。このとき、この干渉縞によって作製されたFBGは干渉縞周期に比例してFBGの反射波長 λ_{FBG} が変化するため、この方法では任意の反射波長を有するFBGを作製することが容易である。

しかしながら、以上の方法を用いてFBGを作製したとしても、光ファイバーコアのグレーティング部軸方向全長において、グレーティングの屈折率振幅分布がFig. 1 (a)

に示すように一様な振幅を有する場合、このFBGの反射スペクトルはFig. 1 (b)に示すようなサイドロープを生じる^{1,2)}。これに対して、FBGのグレーティング部屈折率振幅分布について何らかの方法で、Fig. 1 (c)のように、紡錘形の屈折率変調分布を与えることによってFBGの反射スペクトルをFig. 1 (d)のようにサイドロープを大きく抑えることが可能である。これをアポダיזエーションという。屈折率周期は、通常、 $0.5 \mu\text{m}$ くらいの大きさで、全長が10 mmのFBGでは2万個の周期を有しているが、図では理解を容易にするため10~20個の周期で示した。

このようなアポダיזエーションをFBGに付与する手法として、遮光板やスリットを用いて光ファイバーの軸方向に紫外線レーザーの照射量分布を制御する方法⁵⁾がある。これはFBG作製時の紫外線レーザーの照射時間中に、例えばスリットを用いて光ファイバーの軸方向に駆動することによって部分的に照射時間を制御し、グレーティングの屈折率の振幅に分布をもたせるものである。この方法は、スリットの形状や駆動方法で任意のグレーティングの屈折

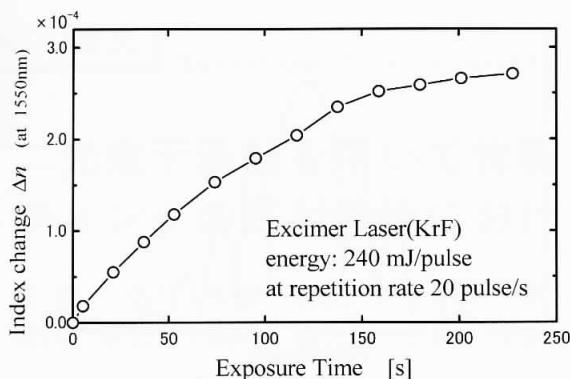


Fig. 2 The growth of the refractive index modulation against UV laser exposure time. The laser used is KrF excimer laser ($\lambda=248$ nm) with output energy 240 mJ/pulse at repetition rate 20 pulses/s.

率振幅分布を形成できるメリットがあるものの、スリット駆動系が新たに必要となり複雑になることなどが課題であった。

このほかの手法として、Frohlich ら⁶⁾は、インコヒーレントなレーザー光源のスペクトル分布によって生じるアポダイゼーションを示しているが、これは使用する光源の特性に依存するため汎用性に乏しく、必ずしも実用的とはいえない。また、彼らは同論文において、他の方法として、二光束干渉法を用いて、一方の光路に微小角のプリズムを挿入してこれを回転させ、レーザー照射の途中で入射角を変化させることにより、屈折率変調にモアレ干渉効果をもたらすことによってアポダイゼーションを実現可能であることを示している。しかしながら、この方法では、干渉縞位置の移動などにより FBG 反射波長の条件が限定されるなど、FBG 製法として多くの課題を有している。

筆者らは、これまでこれらに代わる方法として、光源のコヒーレンス長が有限であることを利用したアポダイゼーション法を提案⁷⁾してきた。これは、光源に用いるエキシマーレーザーのコヒーレンス長と 2 光束の交差角によって生じる干渉縞の強度分布を利用するもので、実用的な方法である。

本報においては、さらに新たな方法として、二光束干渉法を用いて FBG を製造する際に、光路上のミラーを微小角だけ回転することにより干渉縞への入射角を制御し、これを利用することによって任意波長の FBG においてアポダイゼーションの可能性を理論的に予測して、これを実験で実証することができた。この理論の原理と実験の結果について、以下に報告する。

2. アポダイゼーション創成の理論解析

2.1 紫外線レーザー照射による屈折率変調の変化

コア部に GeO_2 が添加された光ファイバーに、紫外線レーザー光を照射すると、屈折率が増加する性質がある。Fig. 2 は、コア部に GeO_2 が添加された光ファイバー SMF-28 (Corning 社) に KrF エキシマーレーザー (Lambda Physik 製 COMPex-102MJ, 発振波長 248 nm) を用いて、1 パルスあたりのエネルギー 240 mJ/pulse, 繰り返し 20 pulses/s の条件で照射したときの光ファイバーコア部の屈折率変調の変化の推移を計測した結果である。この屈折率変調の変化は、FBG 作製時のレーザー照射時間と、このときの FBG の中心波長およびその透過率の推移から計算式^{1,8,9)}で求めたものである。Fig. 2 によると、紫外線レーザー照射初期には、レーザー照射とともにコア部の屈折率変調はほぼ一定の増加傾向にあるが、徐々に傾きが小さくなり飽和に至る傾向がみられる。

この実験結果から、この実験条件下においては、屈折率変調振幅が約 2.5×10^{-4} に達するまでは、照射時間に比例して屈折率が増加するものとみなすことができる。このとき、紫外線レーザーの入射エネルギーに対する屈折率変化率は、約 $3.3 \times 10^{-7} \text{ J}^{-1}$ であった。

この屈折率変化とレーザー照射エネルギーの比例関係を利用することにより、FBG 作製時の光ファイバーコア部の屈折率増加を紫外線レーザーの照射エネルギーによって制御することが可能となる。

2.2 光ファイバーコア部の屈折率分布

本研究において、二光束干渉法による FBG 作製実験には、Fig. 3 に示す左右対称な干渉光学系を用いた。Fig. 3 の光学系においては、図の上方から入射する紫外線レーザー光が位相マスク（格子間隔 $1.07 \mu\text{m}$ ）を通過し、回折角 13.4 度で生成した土 1 次回折光を左右それぞれ回転駆動系の上に設置したミラーで反射させ、再び光ファイバー上で交差させることによって、2 光束の干渉縞が得られる。

この光学系においてミラー回転角 α を 0, すなわち両ミラーを平行とし、FBG を作製する光ファイバーを位相マスクと上下対称に配置した場合、光ファイバー軸上の各点において位相マスク通過後の 2 光束の光路差は幾何学的にゼロとなる。文献 7 においては、本実験で使用したのと同じエキシマーレーザーのコヒーレンス長が最大 0.12 mm であり、1 度以上のミラー偏角によって生じる干渉縞のコヒーレンス度が FBG のグレーティング両端部で低下するという結果を得ている。一方、本研究において制御するミラー偏角は約 $6 \mu\text{rad}$ と微小角であり、このとき FBG

のグレーティング端部において干渉縞の位相が π rad だけシフトすることから、2光束の光路差は最大でもレーザー光源の波長程度と考えられ、コヒーレント長が有限であることは十分に無視できるものと考えられる。したがって、以下の議論においては、FBG を作製する光ファイバー上における2光束のコヒーレンス度は1と仮定した。

このとき、本実験装置で光ファイバー上に生じる干渉縞の縞周期を Λ とする。ここで、光源に使用する紫外線レーザーの出力を P とし、紫外線レーザー照射前の光ファイバーコア部の初期屈折率を n_0 とする。また、光ファイバー光軸上の座標 x の原点を実験光学系の対称軸との交点とする。時間 t における干渉縞周期を $\Lambda(t)$ とすると、このとき Fig. 3 の光ファイバー上の座標 x における干渉縞の光エネルギー分布 $I(x, t)$ は、

$$I(x, t) = P \cos^2\left(\frac{\pi \cdot x}{\Lambda(t)}\right) = \frac{P}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda(t)} \cdot x\right)\right] \quad (1)$$

と表すことができる。

一方、時間 $T (-T/2 \leq t \leq T/2)$ の間、干渉縞を光ファイバーに照射したものとすると、照射後に得られる光ファイバーコア部の屈折率分布 $n(x, T)$ は、前節の実験結果に基づいて、屈折率変調の変化が紫外線レーザーによる累積照射光エネルギーに比例するものと仮定し、このときレーザー照射光単位エネルギーあたりの屈折率変動率を e_n とすると、

$$n(x, T) = n_0 + e_n \int_{-T/2}^{T/2} I(x, \tau) d\tau \quad (2)$$

として得られる。

この式(2)に、式(1)を代入して整理すると、

$$n(x, T) = n_0 + \frac{e_n P}{2} T + \tilde{n}(x, T) \quad (3)$$

ただし、ここで、

$$\tilde{n}(x, T) = \frac{e_n P}{2} \int_{-T/2}^{T/2} \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda(\tau)} x\right) d\tau \quad (4)$$

として得られる。

ここで、式(3)右辺の第1項は光ファイバーコア部の初期屈折率であり、同式第2項はFBGのグレーティング領域における平均屈折率の増分を表している。さらに、同式第3項はグレーティング領域の屈折率変調成分を表しており、具体的には、式(4)のように干渉縞のエネルギー分布の時間積分で与えられる。

以上の解析から、紫外線レーザーを光源にして二光束干渉光学系を用いて得られる干渉縞を光ファイバーに照射したとき、式(3)および式(4)を用いて、作製されるFBGの屈折率変調の分布を求めることができる。さらに、

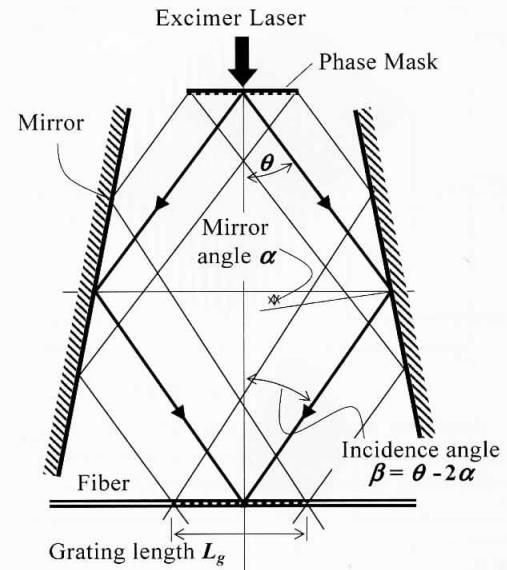


Fig. 3 Two-beam interference geometry.

同式を用いれば、紫外線レーザー照射中に干渉縞周期 $\Lambda(t)$ を制御して変化させた場合についても、結果として得られるFBGの屈折率分布を推定することが可能となる。

2.3 アポダイゼーション創成理論

次に、Fig. 3に示す二光束干渉光学系を用いて、紫外線レーザー照射中にミラーを微小角だけ回転させ干渉縞周期を制御することによって、FBGのアポダイゼーションの実現可能性について検討する。

2.3.1 干渉縞周期を連続制御してレーザー照射した場合

最初に、紫外線レーザー照射中に、干渉縞周期 Λ を一定の変動速度で連続して変化させる連続制御の場合について検討する。

全照射時間を T とし、この間の干渉縞周期 Λ を、平均 Λ_0 、最大変動比 Δ で変化させるものとする。すなわち、光ファイバーコア上で時間 t とともに変化する干渉縞周期 $\Lambda(t)$ を、

$$\Lambda(t) = \Lambda_0 \left(1 + \frac{\Delta}{T} t\right) \quad (-T/2 < t \leq T/2) \quad (5)$$

として時間とともに連続制御する。このとき、式(4)に代入すると屈折率変調分布関数 $\tilde{n}(x, T)$ は、

$$\tilde{n}(x, T) = \frac{e_n P}{2} \int_{-T/2}^{T/2} \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda_0} \left(\frac{T}{T+\Delta\tau}\right) x\right) d\tau \quad (6)$$

である。

ここで、上式の \cos 関数内の $T/(T+\Delta\tau)$ を級数展開し、一般的なFBGにおいてグレーティング長 L_g と干渉縞周期 $\Lambda(t)$ は $L_g \gg \Lambda(t)$ の関係を有することから、高次の微小項を無視することにより、式(6)は次式のように

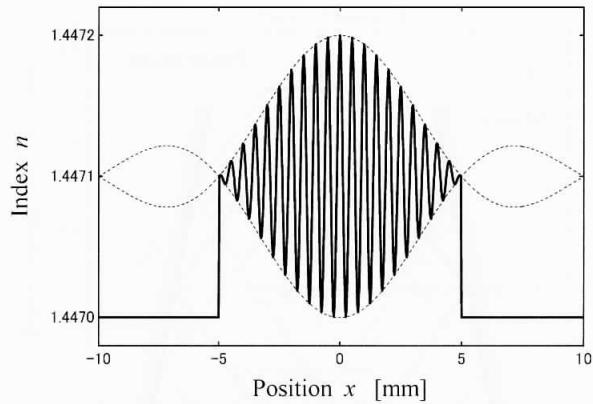


Fig. 4 Apodized profiles of refractive index modulation along the fiber when the mirror angle is continuously varied during the entire period of UV laser irradiation.

整理できる。

$$\tilde{n}(x, T) = \frac{e_n P}{2} \int_{-T/2}^{T/2} \cos\left(\frac{2\pi}{A_0}\left(1 - \frac{\Delta\tau}{T}\right)x\right) d\tau \quad (7)$$

この積分を計算すると、グレーティング領域の屈折率変調分布関数として次式が得られる。

$$\tilde{n}(x, T) = \frac{e_n P T}{2} \operatorname{sinc}\left(\frac{\pi \Delta x}{A_0}\right) \cos\left(\frac{2\pi x}{A_0}\right) \quad (8)$$

上式から、最終的に光ファイバーのコア部の屈折率分布は、

$$n(x, T) = n_0 + \frac{e_n P T}{2} + \frac{e_n P T}{2} \operatorname{sinc}\left(\pi \frac{x}{A_0 / \Delta}\right) \cos\left(2\pi \frac{x}{A_0}\right) \quad (9)$$

として得られる。グレーティング領域の屈折率変調成分を表す式(9)の右辺の第3項内において、 \cos 関数の周期は干渉縞周期の平均値と同じ A_0 となっており、これがグレーティングの周期的屈折率変調を表しFBGの反射スペクトルの中心波長を決定する因子である。一方、同式第3項内の sinc 関数の周期は $2A_0/\Delta$ となっており、干渉縞周期の最大変動比を十分小さくしたとき、すなわち $\Delta \ll 1$ の場合、干渉縞周期 A_0 に比べると大きな周期となるため、グレーティング領域における屈折率変調の振幅分布を表す因子である。

ここで、干渉縞周期の全変動比 Δ を調整して、グレーティング領域の屈折率振幅分布を表す sinc 関数の周期を、

$$L_g = 2A_0 / \Delta \quad (10)$$

のように、FBGのグレーティング長 L_g に一致させることによって、FBGの両端で屈折率変調の振幅をゼロにすることができる。このとき、Fig. 1 (c) のような紡錘形の屈折率分布を得ることができる。

Fig. 4 に、紫外線レーザー照射中に干渉縞周期を連続して変化させたときの屈折率分布の計算例を示す。ここで、

干渉縞周期の全変動比 $\Delta = 1 \times 10^{-4}$ 、グレーティング長 $L_g = 10$ mm、平均干渉縞周期 $A_0 = 0.5 \mu\text{m}$ 、初期屈折率を1.447、変調屈折率の最大振幅を 1×10^{-4} としている。ただし、同図では説明のために、屈折率の変動周期のみ1000倍に拡大して表示している。このとき、図のように、FBG領域の中心 $x=0$ において屈折率変動は最大の振幅になるが、 sinc 関数がゼロとなるグレーティングの両端 $x = A_0 / \Delta = \pm 5$ mmにおいては屈折率変調の振幅がゼロに収束しており、結果としてアポダイゼーションを実現している。

2.3.2 干渉縞周期を2段階制御してレーザー照射した場合

次に、紫外線レーザー照射途中で干渉計のミラーに1回だけ微小な偏角を与えることによって、干渉縞周期を2段階に変化させて照射する2段階制御の場合について検討する。

このとき、光ファイバーコア上の干渉縞周期 $A(t)$ の時間変化を次式で表す。

$$\begin{aligned} A(t) &= A_0 (1 - \Delta/2) & (-T/2 < t \leq 0) \\ &= A_0 (1 + \Delta/2) & (0 < t \leq T/2) \end{aligned} \quad (11)$$

これから、FBGの屈折率変調成分 $\tilde{n}(x, T)$ は、式(11)を式(4)に代入して整理すると、

$$\begin{aligned} \tilde{n}(x, T) &= \frac{e_n P}{2} \left[\int_{-T/2}^0 \cos\left(\frac{2\pi}{A_0(1-\Delta/2)}x\right) d\tau \right. \\ &\quad \left. + \int_0^{T/2} \cos\left(\frac{2\pi}{A_0(1+\Delta/2)}x\right) d\tau \right] \end{aligned} \quad (12)$$

として得られる。これを干渉縞周期の連続制御の場合と同様に積分を実行して、光ファイバーコア部の屈折率分布を求めると、

$$n(x, T) = n_0 + \frac{e_n P T}{2} + \frac{e_n P T}{2} \cos\left(2\pi \frac{x}{2A_0/\Delta}\right) \cos\left(2\pi \frac{x}{A_0}\right) \quad (13)$$

として得られる。この場合も、グレーティング領域の屈折率変調成分を表す式(13)右辺第3項において、最後の \cos 関数は周期 A_0 となっており、グレーティング領域の周期的屈折率変調を表す因子となっている。一方、同じ項左側の \cos 関数の周期は $2A_0/\Delta$ であり、これはグレーティング領域の屈折率の振幅分布を表す因子である。

ここで、この屈折率の振幅分布の周期をグレーティング長 L_g に一致させることによって、紡錘形の屈折率変調の分布を得ることができる。すなわち、 \cos 関数の $1/2$ 周期ごとにゼロ点を有することを考慮して、

$$L_g = A_0 / \Delta \quad (14)$$

となり、これは前述の連続制御の場合のグレーティング長(式(10))の2分の1の値となる。

2.3.3 干渉縞周期を多段階制御してレーザー照射した場合

最後に、紫外線レーザー照射中に干渉縞周期を任意の M 段階の等時間間隔で変化させて照射する多段階制御の場合について検討する。

このとき、時間 t とともに光ファイバーコア上で変化する干渉縞周期 $\Lambda(t)$ は、次式のように表すことができる。

$$\left. \begin{aligned} \Lambda(t) &= \Lambda_0 \left\{ 1 - \frac{\Delta}{2} \right\} & \left(-\frac{T}{2} \leq t \leq -\frac{T}{2} + \frac{T}{M} \right) \\ &= \Lambda_0 \left\{ 1 - \frac{\Delta}{2} + \frac{\Delta}{(M-1)} \right\} & \left(-\frac{T}{2} + \frac{T}{M} < t \leq -\frac{T}{2} + 2 \frac{T}{M} \right) \\ &\quad \dots \\ &= \Lambda_0 \left\{ 1 - \frac{\Delta}{2} + i \frac{\Delta}{(M-1)} \right\} & \left(-\frac{T}{2} + i \frac{T}{M} < t \leq -\frac{T}{2} + (i+1) \frac{T}{M} \right) \\ &\quad (i=0, \dots, M-1) \\ &\quad \dots \\ &= \Lambda_0 \left\{ 1 - \frac{\Delta}{2} + \frac{(M-2)\Delta}{(M-1)} \right\} & \left(\frac{T}{2} - 2 \frac{T}{M} < t \leq \frac{T}{2} - \frac{T}{M} \right) \\ &= \Lambda_0 \left\{ 1 + \frac{\Delta}{2} \right\} & \left(\frac{T}{2} - \frac{T}{M} < t \leq \frac{T}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

このとき連続制御や 2 段階制御と同様にして解析を行うと、屈折率分布は、

$$n(x, T) = n_0 + \frac{e_n P T}{2} + \frac{e_n P T}{2M} \sum_{i=0}^{M-1} \cos \left\{ 2\pi x / \Lambda_0 \left(1 - \frac{\Delta}{2} + i \frac{\Delta}{(M-1)} \right) \right\} \quad (16)$$

として得られる。ここで、屈折率変動比 $\Delta \ll 1$ のとき、光ファイバーコア部の屈折率分布は次式のように近似して得られる。

$$n(x, T) \approx n_0 + \frac{e_n P T}{2} + \frac{e_n P T}{2} \frac{\sin \left\{ \pi \frac{M \Delta x}{(M-1) \Lambda_0} \right\}}{M \sin \left\{ \pi \frac{\Delta x}{(M-1) \Lambda_0} \right\}} \cos \left(2\pi \frac{x}{\Lambda_0} \right) \quad (17)$$

この場合も、グレーティング領域の周期 Λ_0 の屈折率変調因子は式 (17) 右辺第 3 項内の \cos 関数である。一方、グレーティング領域の振幅分布は同じ項左側の \sin 関数を含む分数因子であり、その周期は $2(M-1)\Lambda_0/M\Delta$ となる。この場合も屈折率振幅分布の周期をグレーティング長 L_g に等しくすると、紡錘形の屈折率変調振幅分布を得られる。すなわち、次式、

$$L_g = 2 \frac{(M-1)}{M} \frac{\Lambda_0}{\Delta} \quad (18)$$

である。ここで式 (18)において、 $M=2$ とすると 2 段階

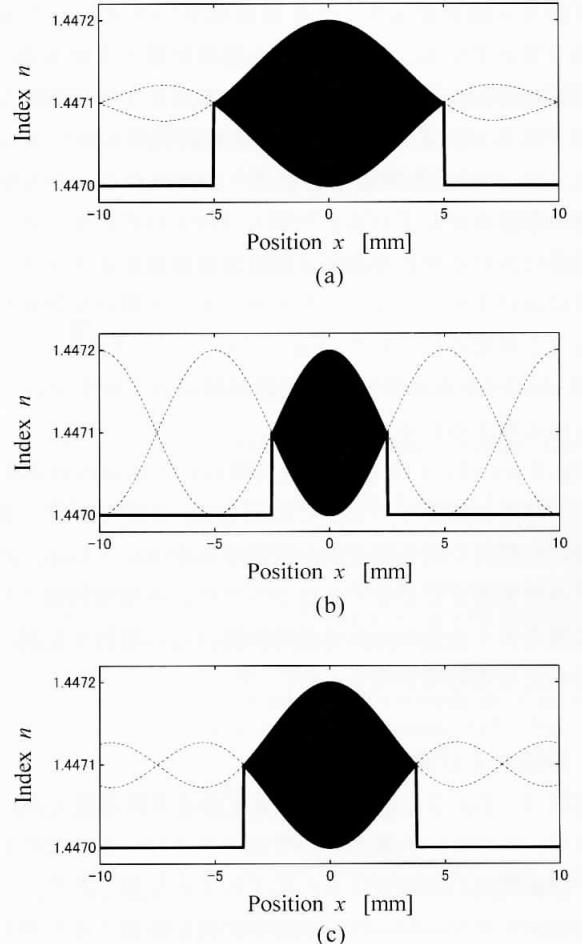


Fig. 5 Apodized profiles of refractive index modulation for three different controls of mirror angle during UV laser irradiation, (a) for continuous control, (b) for two-step control and (c) for four-step control of the mirror angle.

制御法における式 (14) と一致し、 $M \rightarrow \infty$ の極限では連続制御法の式 (10) に一致する。

2.3.4 屈折率分布の計算結果

以上の解析結果から、紫外線レーザー照射の各制御方法を用いた場合の屈折率変調の分布の計算結果の例を Fig. 5 に示す。図は、干渉縞周期の変動比などを Fig. 4 と同一条件で計算したものである。ただし、グレーティング部の屈折率変調周期を Fig. 4 のように拡大していないため、軸方向で屈折率変調の変化が細かい屈折率変調部で黒く塗りつぶされた表示となっている。また、グレーティングの屈折率振幅分布を表す曲線を図中の破線で示している。

図中、Fig. 5 (a) は干渉縞周期を紫外線レーザー照射中に連続制御した場合であり、グレーティング長を式 (10) に従って中央部の紡錘形部の幅に一致させている。次に Fig. 5 (b) は、干渉縞周期を 2 段階制御して照射した場合で、連続制御の場合と同様に中央の紡錘形部にグレーティ

ング部を一致させるべく、式(14)によってグレーティング長を定めている。Fig. 5(a)の連続制御とFig. 5(b)の2段階制御の結果を比較すると、全体的にはほぼ同様な紡錘形であるが、グレーティング領域両端部においては、Fig. 5(a)の連続制御の場合のほうが少しだらかな振幅分布の収束を示している。一般にFBGのグレーティング両端部における屈折率振幅分布の急激な変化はスペクトル特性におけるサイドローブを大きくする不都合な効果を有することが知られており、Fig. 5(a)と(b)を比較すると、FBGのスペクトル特性上、連続制御のほうがすぐれているものと考えられる。

Fig. 5(c)は、4段で多段階制御したときの屈折率変調分布の結果を表している。この場合は、2段階制御と連続制御の中間的な屈折率変調の振幅分布を示している。図にはすべてを示すことはできなかったが、多段階制御において段数を多くするにつれて連続制御に近い屈折率変調の振幅分布となる結果が得られた。

3. 実験および実験結果

実験は、Fig. 3に示した二光束干渉法実験装置を用いて行った。ただし、実験において光ファイバーコア上に生じる干渉縞周期の制御量はきわめてわずかな量であり、このためにエキシマーレーザー照射中に回転駆動する干渉光学系のミラーの回転角は、2段階制御法の場合、約 $6\text{ }\mu\text{rad}$ (1.2秒)という微小角である。

前章で示した干渉縞周期制御によるアポダイゼーション方法を用いるFBG作製実験の結果をFig. 6に示す。実験に用いた紫外線レーザーはKrFエキシマーレーザーで、その波長は248 nm、また位相マスクの格子間隔は1071.29 nmである。使用した光ファイバーはSMF-28(Corning社)で、ファイバーコア部の屈折率は1.447である。光ファイバーコア上に生じる干渉縞周期は約0.54 μm で、このとき作製されるFBGの中心波長は1550 nmとなる。また、屈折率変調の振幅分布がFig. 5(b)に示す紡錘形になるように、グレーティング長 L_g を11 mmとした。Fig. 6には、FBGシミュレーションツールIFO_Gratis⁹⁾を用いて得られた実験と同一条件における計算機シミュレーションの結果も比較のために示している。ただし、同ツールでは、干渉縞周期のレーザー照射時間中の制御による屈折率変調の効果をシミュレーションできないため、前章において得られた理論的な屈折率変調の振幅分布の包絡線をあらかじめ与えて計算したものである。

まず、比較のために、レーザー照射中に干渉縞周期を一定に保つことによって、屈折率変調の振幅分布が一様で短

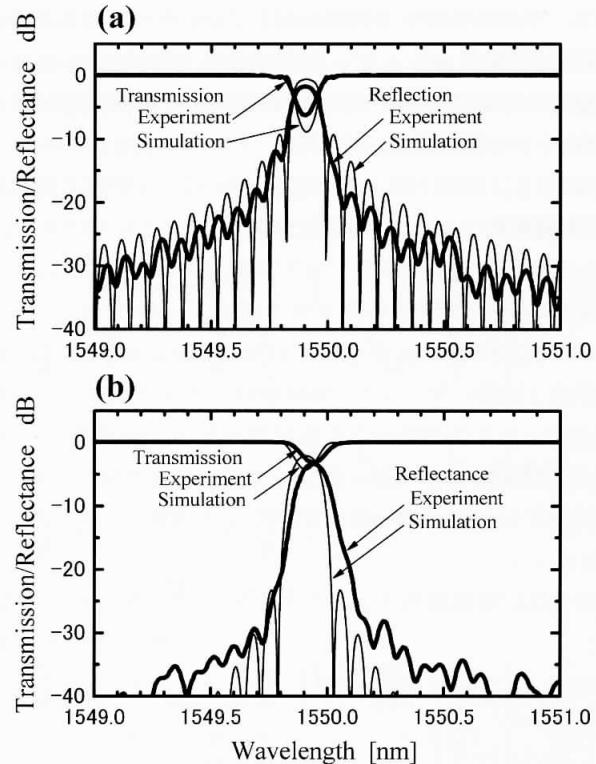


Fig. 6 Experimentally obtained transmission and reflection spectra under the apodization with two-step mirror angle control in (b) are compared with those without the apodization with fixed mirror angle in (a). Theoretical predictions by FBG computer simulation are shown with thin lines for each spectrum. Suppression of side-lobes by around 10 dB is clearly visible with spectral behaviors very similar to those theoretically predicted.

形状の場合の結果を、Fig. 6(a)に示した。このときのサイドローブの大きさは実験値で-11.9 dB、シミュレーション計算では-9.29 dBであった。

次に、本研究で提案しているFBG作成方法のうち、干渉縞周期2段階制御法を用いて作製したFBGのスペクトル特性をFig. 6(b)に示した。この実験では干渉縞周期を変化させるため、干渉計のミラーを $5.71\text{ }\mu\text{rad}$ だけ回転させている。実験結果のスペクトル特性は、Fig. 6(b)に示したように、反射スペクトルのサイドローブが大幅に抑制されている。実験で作製されたFBGでは、中心スペクトル幅の拡大によって直近両サイドのサイドローブが明確に現れなかった。このため、さらに外側のサイドローブで比較すると、このピーク値はシミュレーションでは-30.3 dBであるが、実験では最大-28.1 dBであった。なお、中心スペクトルがシミュレーションと実験において異なるのは、シミュレーションにおいては紫外線レーザー照射の最初の段階の干渉縞周期のグレーティングを設定して計算したことによるものであり、実験においては2段階

の紫外線レーザー照射で平均の干渉縞周期を有するグレーティングが生成されるため、これに伴って FBG 中心スペクトルが約 0.045 nm だけシフトしたものである。

この実験で示したように、FBG 作製実験結果とシミュレーション結果はおおむね一致している。このことから、前章に示した紫外線レーザー照射中における干渉縞周期の制御が、FBG のアポダイゼーションを実現するために有効であるものと考えられる。

4. 結 論

本研究では、二光束干渉法を用いた FBG 作製実験装置において、紫外線レーザー照射中に干渉縞周期を制御することによるアポダイゼーション創成について、理論的に明らかにするとともに、そのうちの一方法について実験的に実証確認した。ここで得られた知見をまとめると、以下のようになる。

- 1) FBG 製法のうち二光束干渉法において、紫外線エキシマーレーザー照射中に干渉縞周期をいくつかのパターンで制御することによって、FBG のグレーティング領域全般にわたって屈折率変調の振幅分布を紡錘形にすることが可能で、アポダイゼーションの効果が得られることを理論的に示した。
- 2) 紫外線レーザー照射中の干渉縞周期の制御を 2 段階変調制御から連続変調制御までの場合について、アポダイゼーションの効果を計算によって示した。FBG のスペクトル特性が最もよいと考えられるのは連続変調制御であり、多段階制御の場合、段数が少なくなるほどスペクトル特性が低下する。

- 3) 二光束干渉法実験装置を用いて、紫外線レーザー照射中に、ミラーを微小角回転することによって干渉縞周期を微小変化させて、2 段階で照射する 2 段階制御法で FBG を作製した。この実験の結果、ほぼシミュレーション結果と一致する実験結果を得ることができ、本方法によってアポダイゼーションの効果が得られることを実験的に確認した。

文 献

- 1) R. Kashyap: *Fiber Bragg Gratings* (Academic Press, London, 1999) 195–226.
- 2) A. Othonos and K. Kalli: *Fiber Bragg Gratings* (Artech House, Boston, 1999).
- 3) G. Meltz, W. W. Morey and W. H. Glenn: “Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method,” Opt. Lett., **14** (1989) 823–825.
- 4) R. Kashyap: “Assessment of tuning the wavelength of chirped and unchirped fibre Bragg grating with single phase mask,” Electron. Lett., **34** (1998) 2025–2026.
- 5) 村山 学, 竹田 亨, 藤田盛行: 特開 2004-29488.
- 6) H. G. Frohlich and R. Kashyap: “Two methods of apodisation of fibre-Bragg-grating,” Opt. Commun., **157** (1998) 273–281.
- 7) 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,” Jpn. J. Appl. Phys., **45** (2006) 9100–9102.
- 8) Y. Masuda, M. Nakamura, C. Komatsu, K. Fujita, M. Yamauchi, M. Kimura, T. Mizutani, S. Kimura, Y. Suzuki, T. Yokouchi, K. Nakagawa and S. Ejima: “Wavelength evolution of fiber Bragg gratings fabricated from hydrogen-loaded optical fiber during annealing,” J. Lightwave Technol., **22** (2007) 934–941.
- 9) “IFO_Grating,” *Integrated & Fiber Optical Gratings Design Software Program* (Optiwave Corporation, Ottawa, 2001).