

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4543128号

(P4543128)

(45) 発行日 平成22年9月15日(2010.9.15)

(24) 登録日 平成22年7月9日(2010.7.9)

(51) Int.Cl.

F I

G O 2 B 6/12 (2006.01)

G O 2 B 6/12 F

G O 2 B 6/13 (2006.01)

G O 2 B 6/12 M

G O 2 B 6/02 (2006.01)

G O 2 B 6/10 C

G O 2 B 6/16

請求項の数 4 (全 22 頁)

(21) 出願番号 特願2004-288086 (P2004-288086)
 (22) 出願日 平成16年9月30日(2004.9.30)
 (65) 公開番号 特開2006-99011 (P2006-99011A)
 (43) 公開日 平成18年4月13日(2006.4.13)
 審査請求日 平成19年9月21日(2007.9.21)

(73) 特許権者 502012705
 伸興電線株式会社
 香川県さぬき市志度1298番地12
 (72) 発明者 江島 正毅
 香川県高松市林町2217-20 香川大
 学工学部内
 (72) 発明者 須崎 嘉文
 香川県高松市林町2217-20 香川大
 学工学部内
 (72) 発明者 水谷 康男
 香川県さぬき市志度1298番地12 伸
 興電線株式会社内
 (72) 発明者 木村 進
 香川県さぬき市志度1298番地12 伸
 興電線株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光導波路ブラッググレーティングの製造方法および製造装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

アポダイゼーション特性を付与するために、紫外線レーザー光を、位相マスクに入射させ、位相マスクの回折現象を利用して2つのビームに分岐し、分岐された2つのビームを位相マスクから、位相マスクへの紫外線レーザー光入射軸に対して対称に出射させ、位相マスク面と略直角で対称に配置された2つのミラーで2つのビームをそれぞれ反射させ、ミラーで反射された2つのビームを光導波路の位置で交差させて2つのビームを干渉させる2光束干渉法を用いて、干渉の周期を調整するため2つのミラーを対称に回転させて、光導波路に反射波長の異なるグレーティングを形成して、反射波長の異なる光導波路ブラッググレーティングを製造する方法であって、2つのミラーを対称に位相マスク面と直角となる角度から 度回転させ、2つのビームが転写する位相マスクの回折格子像を光導波路の位置で交差させて重ね合わせ、作製する光導波路ブラッググレーティングの長さ L_{FBG} と2つのミラーの位相マスクと直角方向からの回転角度 α が

$$2L_{FBG} \times \tan 2\alpha > 0.1 \quad (\text{mm}) \quad (1)$$

の関係を満たし、かつ、用いる紫外線レーザー光がエキシマレーザー光であることを特徴とする光導波路ブラッググレーティングの製造方法。

【請求項2】

アポダイゼーション特性を付与するために、紫外線レーザー光を、位相マスクに入射させ、位相マスクの回折現象を利用して2つのビームに分岐し、分岐された2つのビームを位

相マスクから、位相マスクへの紫外線レーザー光入射軸に対して対称に出射させ、位相マスク面と略直角で対称に配置された２つのミラーで２つのビームをそれぞれ反射させ、ミラーで反射された２つのビームを光導波路の位置で交差させて２つのビームを干渉させる２光束干渉法を用いて、干渉の周期を調整するため２つのミラーを対称に回転させて、光導波路に反射波長の異なるグレーティングを形成して、反射波長の異なる光導波路ブラッググレーティングを製造する方法であって、２つのミラーを対称に位相マスク面と直角となる角度から一度回転させ、２つのビームが転写する位相マスクの回折格子像を光導波路の位置で交差させて重ね合わせ、作製する光導波路ブラッググレーティングの長さ L_{FBG} 、２つのミラーの位相マスクと直角方向からの回転角度、および用いる紫外線レーザー光の可干渉距離 $d_{coherence}$ が

$$d_{coherence} < 2\sqrt{2}L_{FBG} \times \tan 2\alpha \quad (2)$$

の関係を満たしてなることを特徴とする光導波路ブラッググレーティングの製造方法。

【請求項３】

アポダイゼーション特性を付与するために、紫外線レーザー光を、位相マスクに入射させ、位相マスクの回折現象を利用して２つのビームに分岐し、分岐された２つのビームを位相マスクから、位相マスクへの紫外線レーザー光入射軸に対して対称に出射させ、位相マスク面と略直角で対称に配置された２つのミラーで２つのビームをそれぞれ反射させ、ミラーで反射された２つのビームを光導波路の位置で交差させて２つのビームを干渉させる２光束干渉法を用いて、干渉の周期を調整するため２つのミラーを対称に回転させて、光導波路に反射波長の異なるグレーティングを形成して、反射波長の異なる光導波路ブラッググレーティングを製造する方法であって、用いる位相マスクのピリオド p と、作製される光導波路ブラッググレーティングの反射波長 λ_{FBG} との間に

$$|\lambda_{FBG} - 1.447 \times p| > 250 \text{ nm} \quad (3)$$

の関係を満たし、かつ、用いる紫外線レーザーが、エキシマレーザーまたは可干渉距離が１mm以下の紫外線レーザーであることを特徴とする光導波路ブラッググレーティングの製造方法。

【請求項４】

請求項１、請求項２または請求項３に記載する光導波路ブラッググレーティング製造方法を有することを特徴とする光導波路ブラッググレーティングの製造装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【０００１】

本発明は、光導波路に、特定の波長の光を反射させる回折格子である光導波路ブラッググレーティングを、紫外線レーザー光を照射して製造する方法およびその装置に関するものである。

【背景技術】

【０００２】

平面導波路または光ファイバーからなる光導波路に形成したブラッググレーティングは、光導波路のコア部に周期的な屈折率変化を与えたもので、入射した光の特定波長の光のみを反射し、他の光はすべて通過させる光フィルターである。例えば、非特許文献（１）および非特許文献（２）に述べられているように、光導波路ブラッググレーティングは伝送損失が少なく、優れた反射特性および透過特性を有しており、光信号を利用する各種デバイス、装置、システムに、例えば、高密度波長多重光通信機器、レーザーダイオード外部共振器、ファイバーレーザー共振器、温度・歪み等の各種センサー等々に、広く応用展開されている。

【０００３】

光導波路ブラッググレーティング（光ファイバーの場合は、ファイバーブラッググレーティングとも言う）の反射波長 λ_{FBG} は、光導波路のコア部の実効屈折率 n_{eff} と屈折率変調の周期、すなわちグレーティング周期 Λ 、によって、

$$\lambda_{FBG} = 2n_{eff} \times \Lambda \quad (4)$$

として決まる。光ファイバーの屈折率をその長手方向に周期的に変化させてグレーティングを形成するには、通常、被覆樹脂を除去した光ファイバーにその長手方向に側面から、グレーティング周期に対応する周期的な強度分布を持たせた紫外線を照射し、光導波路（光ファイバー）のコア部にドーピングされているゲルマニウム（Ge）の紫外線に対する光誘起反応に基づく屈折率上昇の現象を利用してなされる。形成される屈折率変調の周期は、例えば、光ファイバーの実効屈折率 n_{eff} が約 1.447 で、光通信によく用いられる波長の約 1550 nm に対しては、式（4）の関係から、 $\Lambda = 0.536 \mu m$ となる。良好な光信号の反射特性を得るためにファイバーブラッググレーティングは、通常、この大きさの周期を約 5 mm から約 10 mm の長さ に渡って形成され、10 mm 長のファイバーブラッググレーティングではその周期の個数は、 $10 mm / 0.536 \mu m$ となり、すなわち約 19000 個のグレーティングが形成されている。

【0004】

このような光導波路ブラッググレーティングを形成する方法としては、例えば、非特許文献（1）および非特許文献（2）に述べられているように、大きく分けて、位相マスク法と 2 光束干渉法が知られている。前者の位相マスク法は、特許文献（3）、非特許文献（4）および非特許文献（5）に開示されている。この位相マスク法では、光ファイバーを位相マスクに近接乃至は接触させて配置し、位相マスクを介して光ファイバーに紫外線レーザー光を照射し、位相マスクによって回折される +1 次光と -1 次光を光ファイバーの位置で干渉させ、周期 Λ の干渉縞からなる紫外光強度分布を形成し、これによって光ファイバーの長手方向に周期的屈折率変調をそのコア部に形成する方法である。

【0005】

後者の 2 光束干渉法は、紫外線レーザー光を 2 つのビームに分岐し、その後、2 つのビームを光導波路の位置で交差させて干渉させ、周期 Λ の干渉縞からなる紫外光強度分布を形成し、これによって光導波路の長手方向に周期的屈折率変調をそのコア部に形成する方法である。この方法の最も基本的な実現方法は、特許文献（6）、特許文献（7）および非特許文献（8）に開示されており、そこでは入射紫外線レーザー光は、約 50% を透過させ残りの約 50% を反射させるビームスプリッターを用いて 2 つのビームに分岐し、2 つのミラーを用いてそれぞれのビームを反射させ、光導波路（光ファイバー）の位置で交差させる構成でなされる。2 光束干渉法は、光ファイバーの位置で 2 つのビームが交差する角度を変えることで、干渉縞の周期 Λ を変えることができ、これに比例して式（4）の反射波長 λ_{FBG} が変わるため、作製される光導波路ブラッググレーティングの反射波長を制御することが容易に可能であるという特徴を有している。ビームの分岐の方法および交差させる方法において種々の方法が考案されている。

【0006】

非特許文献（9）では、入射紫外線レーザー光を特許文献（3）、非特許文献（4）および非特許文献（5）に記載されているように、位相マスクによって入射紫外線レーザー光が +1 次光および -1 次光に回折して 2 つのビームに分岐されること、すなわち位相マスクにビームスプリッターの機能を持たせられることを利用して 2 つのビームの分岐し、分岐した 2 つのビームを角型石英ブロックに入射させその内壁側面でそれぞれ反射させて石英ブロックから出射させ、光ファイバーの位置で交差させて干渉縞を形成しファイバーブラッググレーティングを作製する方法が開示されている。さらに、非特許文献（10）および非特許文献（11）では、非特許文献（9）の内容のほかに、三角プリズムを用いたロイドミラー方式についても述べられている。

ビームスプリッター - で分岐した 2 つのビームを 2 つのミラーを用いて交差させ干渉縞を得るには、位相マスクの 2 つの回折格子像の一方を反転させてパリティ整合を取る必要があり、このことは非特許文献 (1 2) に開示されている。

非特許文献 (1 3) では、位相マスクをビームスプリッター - として用いて紫外線レーザー光を 2 つのビームに分岐し、 2 つのミラーでそれぞれのビームを反射させ光導波路の位置で交差させて干渉させる構成で、ミラーの角度を変えるだけでファイバーブラッググレーティングの反射波長を約 2 5 0 n m にわたって変えることが可能であることを、透過阻止量が - 2 8 d B に達する強いファイバーブラッググレーティングを実験で作製して示している。非特許文献 (1 6) では、同じような構成で反射波長を 6 0 0 n m から 1 3 5 0 n m まで変えた光導波路ブラッググレーティングの作製を示し、さらに位相マスクと 2 つのミラーの間に波面制御のためのシリンドリカルレンズを挿入してチャープを付与したファイバーブラッググレーティングの作製も行っている。

また、特許文献 (1 4) および特許文献 (1 5) には、特許文献 (3) 、非特許文献 (4) 、非特許文献 (5) 、非特許文献 (9) 、非特許文献 (1 0) および非特許文献 (1 1) に開示されているように位相マスクを用いて紫外線レーザー光を 2 つのビームに分岐し、非特許文献 (1 0) および非特許文献 (1 1) に開示されているように対称に配置された 2 つのミラーを回転させて、非特許文献 (1 0) および非特許文献 (1 1) に開示されているように、異なる反射波長のファイバーブラッググレーティングを形成する方法が記載されている。

【 0 0 0 7 】

このようにして光ファイバーに紫外線レーザー光を照射してファイバーブラッググレーティングを形成する場合、非特許文献 (1) および非特許文献 (2) に記載されているように、光ファイバーのコア部に紫外線で誘起される屈折率変調が図 1 (a) に示すようにファイバーブラッググレーティング長手方向全長に渡って一様なときは反射スペクトルにおいてサイドローブ (側波帯とも言う) が図 1 (b) のように反射中心波長のとなりに長波長側と短波長側に数多く出て来る。これに対して、屈折率変調の振幅が図 1 (c) のようにスムーズに上昇して下降する屈折率分布を与えれば、図 1 (d) のようにサイドローブは大きく抑えられるか、あるいは皆無とすることが可能である。このような屈折率分布を持たせることはアポダイゼーションと呼ばれ、より単一波長に近い良好なスペクトルが得られることが理論的にも知られ、例えば、非特許文献 (1) および非特許文献 (2) に詳述されている。屈折率変調の周期は通常数万個あるが、図 1 (a) および (c) では理解を容易にするため、その数を少なくして示した。

【 0 0 0 8 】

このようなアポダイゼーションを付与したファイバーブラッググレーティングを形成するには、まず、紫外線レーザー光の干渉を用いて図 2 (a) に示すように屈折率変調を光ファイバー長手方向に形成し、次にこの長手方向屈折率変調分布の包絡線と逆の形状を持つ屈折率分布を紫外線レーザー光の干渉なしで図 2 (b) のように形成して、図 2 (a) に重畳させることで、図 2 (c) に示すようなアポダイゼーション付きファイバーブラッググレーティングが形成される。ここで、図 2 (a) のグレーティングと図 2 (b) のバックグラウンドの屈折率分布は、順序は逆に形成してもよく、あるいは同時に形成してもよい。

【 0 0 0 9 】

図 2 (a) に示すような屈折率変調を光ファイバー長手方向に形成するためには、照射する紫外線レーザーに光ファイバー長手方向に強度分布を持たせることが必要である。特許文献 (1 7) では、位相マスク法で、光ファイバーを位相マスクに近接乃至は接触して配置し、位相マスク側から入射させる紫外線レーザー光を三角形形状のスリットを通して照射し、この三角形形状のスリットを光ファイバーと直角方向に駆動させて、強度分布を持たせてアポダイゼーションを付与する方法が開示されている。この文献では三角形形状のスリットが用いられているが、他の形状のスリットを用いたりあるいはスリットの駆動速度を制御してガウシアン分布やコサイン分布の強度分布を得ることは可能である。また、これら

のスリットと同じ形状で、スリットによる通過とスリットによる阻止を逆にしたパターン
のスリットを作製して、これを介して、位相マスクなしで紫外線レーザー光を光ファイバ
ーに照射すれば、図2(b)のバックグラウンドの屈折率分布を得ることも可能であり、
このこともこの特許文献(17)に開示されている。三角形スリットと位相マスクを介
して紫外線レーザー光を照射して図2(a)の屈折率変調を形成し、次に位相マスクをは
ずして同一形状三角形で逆パターンのスリットを介して同じ紫外線レーザー光を照射して
図2(b)の屈折率を形成してアポダイゼーションを付与した図2(c)のファイバーク
ラッググレーティングを形成する方法も、この文献に開示されている。

特許文献(18)では、位相マスク法で、光ファイバーを位相マスクに近接乃至は接触し
て配置し、紫外線レーザー光をビームスプリッターで2つに分岐し、一方の紫外線レー
ザービームを強度分布を持たせて位相マスクの側から照射して、位相マスクによる回折光を
干渉させて光ファイバーに干渉縞を形成し、同時に他方の紫外線レーザービームを光ファ
イバーの側から強度分布を持たせて、位相マスクなしで光ファイバーに照射して、アポダ
イゼーションを付与したファイバークラッググレーティングを形成する方法が開示されて
いる。前者の紫外線レーザービームが図2(a)の屈折率分布を、後者の紫外線レーザー
ビームが図2(b)の屈折率分布を形成し、その結果、図2(c)の屈折率分布が得られ
る。

【0010】

アポダイゼーションを付与してファイバークラッググレーティングを作製する方法は、こ
れらの方法のほか、非特許文献(1)にレビューされているように、いろいろな方法が考
案されている。位相マスク法および位相マスクを用いる2光束干渉法で、位相マスクに照
射する紫外線レーザービームを、絞りをういて細いビームに絞って位相マスク上を走査さ
せ、絞りの開口率を走査時に制御してアポダイゼーションを付与する方法も記載されてい
る。位相マスクの干渉に寄与しない0次出射光と干渉に寄与する±1次光の出射光の強度
が、位相マスク面内で分布を持つように作製された位相マスクを用いてアポダイゼーシ
ョンを付与する方法も述べられている。また、2光束干渉法で、干渉させる2つのビームの
波長が互いに若干異なる波長を有する2つのビームを用いて、その光周波数の違いによる
干渉を利用して、アポダイゼーションを自動的に付与する方法も記載されている。

非特許文献(19)の2光束干渉法は、ミラーは用いなくて、位相マスクで2段に配置し
て、前段の位相マスクで2つに分岐したビームを、さらに後段の位相マスクでさらに分岐
して、4分岐されたビームの2つを光ファイバーの位置で交差させて干渉させる方法であ
る。この文献では、可干渉距離であるコヒーレント長が比較的長いアルゴンイオン紫外線
レーザー光を用いて、そのビームを小さいスポットサイズのビームとし、小さいスポット
に特有な強度分布を利用して、光ファイバーの位置で2つのビームが互いに交差する部分
の側部に、一方のビームだけが照射される部分ができることを利用してアポダイゼーシ
ョンを付与したファイバークラッググレーティングを形成が可能であることを示している。
ただし、この方法では、一般的に言われている2光束干渉法の特徴である、反射波長を大
きく変えると言うことは困難である。

【0011】

(1) Raman Kashyap: "Fiber Bragg Gratings", Academic Press, (1999).

(2) Andreas Othonos, Kyriacos Kalli; "Fiber Bragg Gratings", Artech House, Inc., (1999).

(3) Kenneth O. Hill, Bernard Y. Malo, Francois C. Bilodeau, Derwyn C. Johnson; "Method of creating an index grating in an optical fiber and a mode converter using the index grating", USP-5,367,588, November 22, 1994.

(4) K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D. C. Johnson, J. Albert; "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask," Appl. Phys. Lett. Vol. 62, No. 10 (1993) 1035-1037.

(5) K. O. Hill, F. Bilodeau, B. Malo, T. Kitagawa, S. Theriault, D. C. Johnson, J. Albert; "Chirped in-fiber Bragg gratings for compensation of optical-fiber

10

20

30

40

50

dispersion,” Opt. Lett. Vol. 19, No. 17 (1994) 1314-1316.

(6) William H. Glenn, Gerald Meltz, Elias Snitzer; “Method for impressing gratings within fiber optics”, USP-4,725,110, February 16, 1988.

(7) William H. Glenn, Gerald Meltz, Elias Snitzer; “Method for impressing gratings within fiber optics”, USP-4,807,950, February 28, 1989.

(8) G. Meltz, W. W. Morey, W. H. Glenn; “Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method,” Optics Letters, Vol. 14, No. 15, pp. 823-825 (1989).

(9) R. Kashyap, J. R. Armitage, R. Wyatt, S. T. Davey, D. L. Williams; “All-fibre narrowband reflection gratings at 1500nm,” Electron. Lett. Vol. 26, No. 11, pp. 730-732 (1990).

(10) R. Kashyap, J. R. Armitage, R. J. Campbell, D. L. Williams, G. D. Maxwell, B. J. Ainslie, C. A. Miller; “Light-sensitive optical fibers and planar waveguides”, BT Technol. J., vol. 11, No. 11, pp. 150-160 (1993)

(11) R. Kashyap, “Photosensitive optical fibers: Devices and applications,” Optical Fiber Technol. No. 1, pp. 17-34 (1994).

(12) C. G. Askins, T. -E. Tsai, G. M. Williams, M. A. Putnam, M. Bashinsky, E. J. Friebele; “Fiber Bragg reflectors prepared by a single excimer pulse,” Opt. Lett. Vol. 17, No. 11, (1992) 833-835.

(13) R. Kashyap; “Assesment of tuning the wavelength of chirped and unchirped fibre Bragg grating with single phase mask,” Electronic Letters, Vol. 34, No. 21, pp. 2025-2026 (1998).

(14) Robert A. Modavis; “Method of forming a grating in an optical waveguide”, USP-5,818,988, October 6, 1998.

(15) ロバートアダムスモダヴィス ; “光導波路に格子を形成する方法”、特開平 10 - 54915、(1998)。

(16) Y. Wang, J. Grant, A. Sharma, G. Myers; “Modified Talbot interferometer for fabrication of fiber-optic grating filter over a wide range of Bragg wavelength and bandwidth using a single phase mask”, Journal of Lightwave technology, vol. 19, No. 10, pp. 1569-1573 (2001).

(17) 村山学、竹田亨、藤田盛行 ; “ファイバークレーティングの製造装置及び製造方法”、特開 2004 - 29488 (2004)。

(18) 今村一雄、中井忠彦、須藤恭秀 ; “ファイバークレーティングの作製方法及び作製装置”、特開 2000 - 66041 (2000)。

(19) B. J. Ashton, J. Canning, N. Groothoff; “Two-point source interferometric grating writing,” Applied Optics, vol. 43, no. 15, (2004) 3140-3144.

(20) 小瀬輝次、斉藤弘義、田中俊一、辻内順平、波岡武編集 ; “光工学ハンドブック”、朝倉書店、pp. 475-476 (1986)。

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0012】

図 2 (c) に示すアポダイゼーションを光導波路ブラッググレーティングに付与するには、屈折率変調の強度分布 (図 2 (a)) を形成するグレーティング形成のための紫外線レーザー光照射と、バックグラウンドの屈折率分布 (図 2 (b)) を形成するための紫外線レーザー光照射の 2 つの手段が必要である。前者の手段で図 2 (a) の屈折率変調の分布が光ファイバーに形成され、後者の手段で図 2 (b) のバックグラウンドの屈折率分布が光ファイバーに形成され、両者の重ね合わせとして図 2 (c) のようなアポダイゼーションを付与した光導波路ブラッググレーティングが形成される。2 つの手段はどちらを先に適用してもよく、あるいは同時に適用してもよい。

光導波路ブラッググレーティング形成のための光学系に 2 つの手段を別々に取り込む従来

10

20

30

40

50

技術では、上記背景技術で述べたように、スリットと逆パターンスリットの取り付けとその駆動や、位相マスクを含む紫外線レーザー光ビーム光学系と含まない紫外線レーザー光ビーム光学系の2つの構成、等々が必要となり、光学系は複雑さを増してくる。2つの手段を同時に適用する従来技術では、例えば、紫外線レーザー光ビームを小さく絞って走査する従来技術では走査のための駆動系等が必要であり、アポダイゼーション機能を位相マスクに持たせる従来技術では高価な位相マスクが必要である。波長が若干異なる2つの紫外線レーザー光源を用いる2光束干渉では、用いる2つの紫外線レーザー光源の波長をきわめて正確に制御することが必要である。このように、従来技術のいずれの方法でも、光導波路ブラッググレーティングを形成する装置が複雑になって製造歩留まりを低下させたり、あるいはコスト高になったりする欠点がある。

10

本発明の課題は、これらの従来技術のアポダイゼーションを付与する方法に替わって、2つの手段を同時に、かつ自動的に、アポダイゼーションを高精度で付与する方法を確立し、これを光導波路ブラッググレーティングの製造方法および製造装置に提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0013】

アポダイゼーションを付与する従来技術の方法に替わって、我々が開発した高精度でしかも容易に実現できる新しいアポダイゼーションを付与する方法の基本的な理論について以下に説明し、その後、本発明の特徴を述べる。

【0014】

20

紫外線レーザー光を、位相マスクを用いて2つのビームに分岐し、これらをミラーで反射させて重ね合わせる2光束干渉法において、光導波路の位置で重なる2つのビームを、光導波路ブラッググレーティングの中央部で強く干渉させ、端部で弱く干渉させたりあるいは干渉しないようにすることが出来れば、アポダイゼーションを付与することが可能である。そのように干渉の強弱を光導波路の長手方向につけるには、2つのビームによる位相マスクの回折格子像が光導波路の位置で交差し、さらに可干渉距離 $d_{\text{coherence}}$ が短ければ可能となる。

【0015】

2光束干渉法は、通常、図3(a)の光学部品配置で行われる。紫外線レーザー光ビームを位相マスクの回折現象を利用して2つに分岐し、分岐したそれぞれのビームを、入射紫外線レーザー光ビームの光軸に対して対称に反射させ、光ファイバーの位置で重ね合わせて2つのビームを干渉させて、光導波路ブラッググレーティングが形成される。反射波長の異なる光導波路ブラッググレーティングを形成することは2つのミラーを対称に図3(b)のように回転させて、光導波路の位置でできる干渉縞の周期を拡大または縮小することで容易にできる。2つのミラーを対称に、平行からの回転角度 θ だけ回転させた場合、位相マスクの回折格子の転写像は図4(a)に示すようにミラーの平行からの回転角度の2倍の 2θ だけ傾いて光ファイバーの位置で重なる。この場合、左右からの2つのビームによる位相マスク回折格子の転写像が可干渉幅 $2d_{\text{coherence}}$ の幅の中であって重なれば干渉が起こり、2つのビームの可干渉幅 $2d_{\text{coherence}}$ の幅の外側にあれば干渉しない。図4(a)では、2つのビームによって転写される位相マスクの回折格子像を入射レーザー光の可干渉距離 $d_{\text{coherence}}$ の2倍の幅 $2d_{\text{coherence}}$ をもって表した。従って、光ファイバーの中央で強く干渉し、側部へ向けて干渉は弱くなり、端部では干渉は起こらない。干渉を起す中央部では屈折率変調を有するグレーティングが強く形成され、干渉を起さない端部では屈折率分布の変調は起こらないで、屈折率のバックグラウンドが上昇する。このようにして、図4(b)の屈折率分布が形成され、アポダイゼーションを付与した光導波路ブラッググレーティングが形成される。2つのミラーが完全に平行である場合は、左右2つのビームで転写された位相マスクの回折格子像は光導波路の位置で完全に重なって、光導波路ブラッググレーティング全長にわたって干渉し、図1(a)のようなアポダイゼーションを付与していない屈折率分布が得られる。また、可干渉距離 $d_{\text{coherence}}$ が大きすぎると、位相マスクの転写像の可干渉幅が広がって屈折率変調部分は端部まで拡がり

30

40

50

、良好なアポダイゼーションを得ることはできなくなる。従って、良好なアポダイゼーションを付与するには、2つのミラーをある角度以上に回転させて、可干渉距離 $d_{\text{coherence}}$ は光導波路ブラッググレーティングの長さ $2L_{\text{FBG}}$ と2つの位相マスク転写像の傾き 2θ から決まるある値より短くなければならないという関係がある。次に、この関係を導出する。

【0016】

2光束干渉法における、位相マスク、2つのミラー、ミラー回転軸、光導波路、および紫外線レーザー光のビームの位置関係を図5のようにとる。2つのミラーは角度 θ だけ図示するように回転しているとする。位相マスク1に入射する紫外線レーザー光5は角度 θ で $+1$ 次光と -1 次光に回折され図示するように左右に出射される。この角度 θ は

10

$$\sin \theta = \frac{\lambda_E}{p} \quad (5)$$

である。ここで p は位相マスクのピリオド、すなわちその回折格子の周期であり、 λ_E は照射する紫外線レーザーの波長である。位相マスクによる回折で2つのビームに分岐された ± 1 次光は垂直方向から角度 θ だけ傾いたミラー2で反射され、光導波路4の位置で重なる。角度 θ で光導波路に入射する $+1$ 次光と角度 $-\theta$ で入射する -1 次光が干渉し、干渉縞の間隔 Λ は

20

$$2\Lambda \sin \beta = \lambda_E \quad (6)$$

で規定され、屈折率変調の周期が Λ の光導波路ブラッググレーティングが形成される。実効屈折率 n_{eff} の光ファイバーでは反射波長 λ_{FBG} は式(6)の λ_E を式(4)に代入して、

$$\lambda_{\text{FBG}} = n_{\text{eff}} \lambda_E / \sin \beta \quad (7)$$

30

となる。図5に示すように、2つのミラーの間隔を $2s$ 、ミラー回転軸3と位相マスク1の垂直方向距離を L_1 、ミラー回転軸3と光ファイバー4の垂直方向距離を L_2 、位相マスク1と光ファイバー4の距離を L とすると、ミラー2の回転角は θ であるから、

$$s = L_1 \tan \theta = L_2 \tan(\theta - 2\alpha) \quad (8)$$

$$L = L_1 + L_2 = s \left(\frac{1}{\tan \theta} + \frac{1}{\tan(\theta - 2\alpha)} \right) = s \frac{\tan \theta + \tan(\theta - 2\alpha)}{\tan \theta \times \tan(\theta - 2\alpha)} \quad (9)$$

40

が得られ、この L の位置で2つのビームが干渉し、その位置に光導波路4を設置すれば光導波路ブラッググレーティングが形成される。光導波路ブラッググレーティングの反射波長 λ_{FBG} は、2つのビームの入射角 β は

$$\beta = \theta - 2\alpha \quad (10)$$

を式(4)に代入して、

$$\lambda_{FBG} = n_{eff} \lambda_E / \sin(\theta - 2\alpha) \quad (11)$$

となる。実効屈折率 n_{eff} は標準的なシングルモードファイバー SMF 28 では、 $n_{eff} = 1.447$ である。

【0017】

紫外線レーザー光の波長を $\lambda_E = 248 \text{ nm}$ 、位相マスクの回折格子間隔 p を 1072.34 nm 、2つのミラー回転軸の間隔の半値 s を 27.7143 mm として、式(9)および式(11)を用いて、光導波路ブラッググレーティングの反射波長 λ_{FBG} および位相マスクから光導波路までの距離 L をミラーの回転角度 α に対して計算した結果を図6(a)および図6(b)に示す。光導波路を位相マスクからの垂直方向距離 L を 250 mm に配置すれば、2つのミラーが平行 ($\alpha = 0$) にあるとき、反射波長 λ_{FBG} が 1551.7 nm の光導波路ブラッググレーティングが形成され、この状態から2つのミラー回転角度を $\alpha = -3.82$ 度回転させ、光導波路を位相マスクから垂直方向距離 $L = 202.3 \text{ mm}$ の位置に置けば、反射波長 λ_{FBG} が 1000 nm の光導波路ブラッググレーティングが形成される。

【0018】

2つのミラーを α 度対称に回転させたとき、図4(a)に示すように、光導波路の位置での位相マスクの回折格子転写像 6 は 2α 度傾いており、反対側のミラーで反射される転写像 6' は同じ角度だけ逆方向に傾いている。位相マスク1の中央から角度 $\pm \alpha$ で回折する2つの光線は、光導波路の中央の図4(a)の点Oに結び、位相マスクから点Oまでの光路長は互いに等しい。しかし、位相マスクの端部に近い点で回折する2つの光線は、図4(a)の点Pおよび点Qに来て、光導波路の上では光路差 Δ を持っている。2つの転写像6および6'の傾き角度 2α は、上の計算で示したように小さいので、この光路差 Δ はPQ間の間隔であり、

$$\Delta = 2x \cdot \tan 2\alpha \quad (12)$$

と近似される。可干渉距離、すなわちコヒーレント長が $d_{coherence}$ の光線は、光線方向にガウシアン状の $\exp(-(z/d_{coherence})^2)$ の可干渉分布を持っており、図7に示すように、この可干渉分布を持つ2つの光線が光路差 Δ を持って重なるときの干渉強度分布は、両者の分布をかけて、

$$\begin{aligned} I_{int}(x, z) &= \exp\left(-\left(\frac{z - \Delta}{d_{coherence}}\right)^2\right) \times \exp\left(-\left(\frac{z + \Delta}{d_{coherence}}\right)^2\right) \\ &= \exp\left(-2\frac{z^2}{d_{coherence}^2}\right) \times \exp\left(-2\frac{\Delta^2}{d_{coherence}^2}\right) \end{aligned} \quad (13)$$

となる。光ファイバーの長手 x の方向への干渉強度分布 $I_{int}(x)$ は、式(12)のを通して、この式の積の第2項に出て来るから、式(12)を代入して、

$$I_{int}(x) = \exp\left(-2\frac{\Delta^2}{d_{coherence}^2}\right) = \exp\left(-2\frac{(2x \tan 2\alpha)^2}{d_{coherence}^2}\right) \quad (14)$$

となる。この干渉強度分布の x に対する依存性が、図4(b)の屈折率変調分布の包絡線に対応し、これがアポダイゼーションの形状そのものとなる。ガウシアン状のアポダイゼーションの場合は、

$$I_{apod}(x) = \exp\left(-\frac{x^2}{d_{apod}^2}\right) \quad (15)$$

となる。ここで d_{apod} はアポダイゼーションの実効長である。式(14)と式(15)から使用する紫外線レーザーの可干渉距離 $d_{coherence}$ とアポダイゼーションの実効長 d_{apod} の関係式が、

$$d_{coherence} = 2\sqrt{2} \tan 2\alpha \times d_{apod} \quad (16)$$

と得られる。

式(14)の指数部から分るように、アポダイゼーションの有効性は式(12)で規定される光路差と紫外線レーザーの可干渉距離 $d_{coherence}$ の大小関係で決まる。光導波路ブラッググレーティングの中央($x = 0$)では $I_{int}(x) = 1$ となり、中央から離れるにつれて干渉が弱くなる。ミラーの回転角度に対する依存性は、2つのミラーが平行($\theta = 0$)のとき、 $I_{int} = 1$ と一定になって図1(a)のようになり、アポダイゼーションは付与されない。2つのミラーを平行($\theta = 0$)から回転したとき、 x 方向依存性が図4(b)のように現れ、 $d_{coherence}$ が大きいほどその強度分布は光導波路ブラッググレーティングの中央に集中する。紫外線レーザーの可干渉距離 $d_{coherence}$ に対する依存性は、無限大の可干渉距離で $I = 1$ と一定になりアポダイゼーションは付与されず、 $d_{coherence}$ が短いほど強度分布が光導波路ブラッググレーティングの中央に集中したアポダイゼーションとなる。すなわち、干渉する度合いが弱い低コヒーレンスのレーザーほど良好なアポダイゼーションが得られる。アポダイゼーションの有効性は、干渉強度分布 $I_{int}(x)$ が光導波路ブラッググレーティングの端部($x = L_{FBG}$)での大きさが中央部の大きさ $I_{int}(x)$ より $1/e$ 以下であれば期待することが出来るので、これは式(14)～式(16)から

$$d_{coherence} < 2\sqrt{2} \tan 2\alpha \times L_{FBG} \quad (17)$$

の関係が得られる。また、このアポダイゼーションの有効性は見方を変えて、図4(b)で位相マスクの回折格子像を可干渉距離の幅 $2d_{coherence}$ をつけて表したが、この幅よりも光導波路ブラッググレーティングの端部での光路長の差 Δ_{edge} が大きければ期待され、この大小関係は、

$$\Delta_{edge} = 2L_{FBG} \times \tan 2\alpha > \left(\frac{d_{coherence}}{\sqrt{2}}\right) \quad (18)$$

と表すことも出来る。これらの式の関係は実験で確認されなければならない。このことについては後述実施例で実証する。

なお、本発明のアポダイゼーションは2つのミラーによって反射される紫外線レーザー光に光路差を持たせることによって発現されるものであるため、図4(a)に示す6および6'の位相マスク転写像は図示とは左右逆に交差しても構わない。すなわち、2つのミラーは平行方向から「八」の字の方へ回転させてもその逆さまの「逆八」の字の方向へ回転させてもよく、ミラーの回転角度は上述の理論ではその絶対値を意味している。

【0019】

上述したアポダイゼーションを付与する新規の方法の基本理論に基づいて得られる本発明の特徴を、以下に述べる。

【0020】

本発明の第1の特徴は、紫外線レーザー光を、位相マスクに入射させ、位相マスクの回折現象を利用して2つのビームに分岐し、分岐された2つのビームを位相マスクから、位相マスクへの紫外線レーザー光入射軸に対して対称に出射させ、位相マスク面と略直角で対

10

20

30

40

50

称に配置された2つのミラーで2つのビームをそれぞれ反射させ、ミラーで反射された2つのビームを光導波路の位置で交差させて2つのビームを干渉させる2光束干渉法を用いて、干渉の周期を調整するため2つのミラーを対称に回転させて、光導波路に反射波長の異なるグレーティングを形成して、反射波長の異なる光導波路ブラッググレーティングを製造する方法において、2つのミラーを対称に位相マスク面と直角となる角度から一度回転させ、2つのビームが転写する位相マスクの回折格子像を光導波路の位置で交差させて重ね合わせ、このとき2つの位相マスク転写像が交差する角度を式(1)で規定される値以上に設定し、かつ紫外線レーザー光としてエキシマレーザー光を用い、光導波路の中央部で交差した位相マスク転写像の干渉を強く干渉させ、端部で弱い干渉または干渉を起さないようにし、これによって図1(c)に示すようなアポダイゼーションを形成して光導波路ブラッググレーティングを製造する方法である。

10

紫外線レーザー光の干渉を利用して形成する光導波路ブラッググレーティングの作製では、通常、干渉しやすいレーザー、すなわち可干渉距離の長いレーザーが適しているとされている。前述の背景技術で引用した文献の多くではアルゴンイオンレーザー(発振波長244nm)やエキシマレーザー(例えば、KrFエキシマレーザー(発振波長248nm)やArFエキシマレーザー(発振波長193nm))が光導波路ブラッググレーティング作製によく用いられている。非特許文献(20)によれば、アルゴンイオンレーザーの可干渉距離は数cmで、エキシマレーザーの可干渉距離は1mmあるいはそれ以下である。後述する実施例で示すKrFエキシマレーザーを用いた我々の実験では可干渉距離 $d_{\text{coherence}}$ は約0.2~0.5mmであった。これを式(17)に代入すれば $2L_{\text{FBG}}\tan 2$

20

$> 0.14 \sim 0.35$ となり、このことから、式(1)を規定した。本発明の特徴は、式(1)の関係から、エキシマレーザーのように低コヒーレントのレーザーで、その効果が明瞭に発揮される。

【0021】

本発明の第2の特徴は、紫外線レーザー光を、位相マスクに入射させ、位相マスクの回折現象を利用して2つのビームに分岐し、分岐された2つのビームを位相マスクから、位相マスクへの紫外線レーザー光入射軸に対して対称に出射させ、位相マスク面と略直角で対称に配置された2つのミラーで2つのビームをそれぞれ反射させ、ミラーで反射された2つのビームを光導波路の位置で交差させて2つのビームを干渉させる2光束干渉法を用いて、干渉の周期を調整するため2つのミラーを対称に回転させて、光導波路に反射波長の異なるグレーティングを形成して、反射波長の異なる光導波路ブラッググレーティングを製造する方法において、2つのミラーを対称に位相マスク面と直角となる角度から一度回転させ、2つのビームが転写する位相マスクの回折格子像を光導波路の位置で交差させて重ね合わせ、このとき、2つの位相マスク転写像が交差する角度、光導波路ブラッググレーティングの長さ L_{FBG} 、および2つのミラーの回転角度、および用いる紫外線レーザー光の可干渉距離 $d_{\text{coherence}}$ が式(17)で規定される関係にあることを満たし、これによって図1(c)に示すようなアポダイゼーションを形成して光導波路ブラッググレーティングを製造する方法である。式(17)と式(2)は同じである。

30

【0022】

本発明の第3の特徴は、紫外線レーザー光を、位相マスクに入射させ、位相マスクの回折現象を利用して2つのビームに分岐し、分岐された2つのビームを位相マスクから、位相マスクへの紫外線レーザー光入射軸に対して対称に出射させ、位相マスク面と略直角で対称に配置された2つのミラーで2つのビームをそれぞれ反射させ、ミラーで反射された2つのビームを光導波路の位置で交差させて2つのビームを干渉させる2光束干渉法を用いて、干渉の周期を調整するため2つのミラーを対称に回転させて、光導波路に反射波長の異なるグレーティングを形成して、反射波長の異なる光導波路ブラッググレーティングを製造する方法において、使用する位相マスクのピリオド p と、作製されるファイバーブラッググレーティングの反射波長と λ_{FBG} が式(3)で規定される関係にあることを満たし、これによって図1(c)に示すようなアポダイゼーションを形成して光導波路ブラッググレーティングを製造する方法である。式(3)は我々の実験結果に基づいており、後述

40

50

実施例で導出する。

【 0 0 2 3 】

本発明の第 4 の特徴は、上述の第 1、第 2、または第 3 の特徴を実現する光導波路ブラッググレーティング製造装置に関するもので、これによって図 1 (c) に示すようなアポダイゼーションを形成して光導波路ブラッググレーティングを製造する装置が実現できる。この特徴によって光導波路ブラッググレーティングの作製を高い再現性で実現し、高い歩留まりで作製することが可能となる。

【 発明の効果 】

【 0 0 2 4 】

アポダイゼーションを光導波路ブラッググレーティングに付与する本発明の新規の方法によれば、ほぼ完璧なアポダイゼーションをグレーティング形成と同時に付与することが出来る。これによってサイドローブを完全に抑制した反射スペクトルが得られ、高性能の光導波路ブラッググレーティングの作製が容易になる。位相マスク法で干渉による周期的変調分の屈折率分布とバックグラウンドの非周期的屈折率分布を別々の手段で形成する等々の従来技術の方法に較べて、本発明の方法では光導波路ブラッググレーティング製造工程が短縮され、コストダウンも可能となる。

これは、図 4 に示すように、2 光束干渉法を用いて、位相マスクで回折される 2 つのビームを、2 つの対称に配置されたミラーで反射させ光導波路の位置で干渉させるとき、ミラーを回転させて、2 つのビームによる位相マスクの回折格子像を、光導波路の位置で交差させて重ね合わせることによって、光導波路の中央部で強く干渉させ端部で弱くあるいは干渉しないようにすることで実現される。

紫外線レーザー光の干渉を利用する光導波路ブラッググレーティング作製では、従来から、干渉しやすい高コヒーレンスのレーザーを用いることが指向されていたが、本発明による新規の方法では低コヒーレンスのレーザーほどその効果が発現される。光導波路ブラッググレーティング作製では、K r F エキシマレーザー（発振波長 2 4 8 n m ）、A r F エキシマレーザー（発振波長 1 9 3 n m ）、アルゴンイオンレーザー（発振波長 2 4 4 n m ）等がよく用いられているが、本発明によれば、高コヒーレンスのアルゴンイオンレーザーよりも低コヒーレンスの K r F や A r F 等のエキシマレーザーが適している。従って、本発明の方法を光導波路ブラッググレーティング製造に採用すれば、高品質の高コヒーレンスレーザーは必要としない。これによって光導波路ブラッググレーティング製造設備の低コスト化も可能となる。

【 発明を実施するための最良の形態 】

【 0 0 2 5 】

本発明の最良の実施形態は、2 光束干渉法による光導波路ブラッググレーティングの作製で、2 つのミラーを対称に回転させて、図 4 (a) のように光ファイバーの位置での位相マスクの回折格子の転写像 6 および 6 ' を傾けて重ね合わせ、光導波路ブラッググレーティングの中央部で 2 つのビームを強く干渉させ、端部で弱く干渉させあるいは干渉させないようにすることで得られる。このことを実験およびコンピュータシミュレーションで確認した結果を次の実施例で説明する。

【 実施例 】

【 0 0 2 6 】

本実施例の実験では、位相マスク、2 つのミラー、光ファイバーを図 5 に示すように配置した。紫外線レーザー光（K r F エキシマレーザー、発振波長 $E = 248 \text{ nm}$ ）を 2 つのビームに分岐する位相マスクには、位相マスク法で作製する場合に $1.5 \mu\text{m}$ 帯の反射波長のファイバーブラッググレーティングが得られる位相マスクと $1 \mu\text{m}$ 帯の反射波長のファイバーブラッググレーティングが得られる位相マスクを用いた。実験では、前者の位相マスクで、反射波長が $1.5 \mu\text{m}$ 帯、 $1.3 \mu\text{m}$ 帯および $1 \mu\text{m}$ 帯で、長さが 7.5 mm のファイバーブラッググレーティングを、ミラー回転角度を変えて作製し、後者の位相マスクでは、反射波長が $1.5 \mu\text{m}$ 帯で、長さが 7.5 mm および 3 mm のファイバーブラッググレーティングを、計 5 個作製した。位相マスクは、StockerYale社製のLasiris位

相マスクを用いた。

これらのパラメータ、位相マスク諸元、用いた2光束干渉実験装置の諸元、実験で得られたファイバーブラッググレーティング反射波長等を表1にまとめる。表の項目1は、実験に用いた位相マスクを、位相マスク法でファイバーブラッググレーティングを作製する場合に得られる反射波長の帯域と、本実施例の2光束干渉法実験で得られた反射波長の帯域である。項目2は使用した位相マスクのピリオド p 、すなわち回折格子周期で、項目3はその位相マスクがKrFエキシマレーザー光（波長 $\lambda_E = 248\text{ nm}$ ）を回折する角度（式（5））である。項目4はその位相マスクを用いて、位相マスク法でファイバーブラッググレーティングを作製する場合に得られる反射波長であり、周期 $\Lambda = p/2$ として式（4）で計算した値である。項目5～項目11は本実験に用いた2光束干渉法のファイバーブラッググレーティング製造装置の、図5に記載する幾何学的パラメータである。使用した光ファイバーは、項目12に示すように、 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ および $1.3\text{ }\mu\text{m}$ 帯域のファイバーブラッググレーティング作製では標準シングルモードファイバーSMF28を用い、 $1\text{ }\mu\text{m}$ 帯域ではSMF28と同じ特性を有し $1\text{ }\mu\text{m}$ の光伝送に最適化されたHI1060を用いた。これらの光ファイバーは、エキシマレーザー光に対する感光性を高めるために、実験に先立って、 100 気圧の水素ガス雰囲気中に室温で10日間保持し、水素ローディング処理を施した。ファイバーブラッググレーティングの長さ $2L_{\text{FBG}}$ は、項目13に示すように、#1～#4で 7.5 mm とし、#5で 3.0 mm とした。項目14はファイバーブラッググレーティングの端部での2つのビームの光路長の差で、式（12）の x に L_{FBG} を入れて計算した値である。作製した5個のファイバーブラッググレーティングの反射波長を項目15に示す。使用した紫外線レーザーはKrFエキシマレーザー（波長 $\lambda_E = 248\text{ nm}$ ）で、実験ではいずれのファイバーブラッググレーティング作製でも、1パルスあたりのエネルギーは 30 mJ で、パルスくり返し周波数 20 Hz で、3分間照射とした。項目16は後述するコンピュータシミュレーションの結果から求めたアポダイゼーションの実効長 d_{apod} であり、項目17は実験で得られたアポダイゼーションの結果である。使用した紫外線レーザーKrFエキシマレーザー（ラムダフィジックス社製CompeX-102MJ、不安定共振器付き）の出射ビームは#1～#4の実験では $7.5\text{ mm} \times 7.5\text{ mm}$ のスリットで整形し、#5の実験ではさらに 3 mm 幅スリットで整形した。エキシマレーザー光の出射エネルギー密度は、 $30\text{ mJ} / (7.5\text{ mm} \times 7.5\text{ mm})$ とした。ファイバーブラッググレーティング製造装置への入射では、焦点距離 451.9 mm のシリンドリカルレンズで絞った後、図5の5のように入射させた。シリンドリカルレンズによる絞りは、位相マスクで2つに分岐されたビームの面および入射エキシマレーザー光の光軸と垂直方向に絞り、単位面積あたりのエネルギーを光ファイバーの位置で約12倍に高めた。位相マスクから回折される0次光は、2つのミラーの中間に遮蔽物を置くことでその影響を除去した。ファイバーブラッググレーティングの反射および透過スペクトルは、光ファイバーにASE光源（ファイバーラボ社製ASE-FL7004光源、ファイバーラボ社製ASE-FL7510光源）の光を入れ、2台のスペクトラムアナライザー（アドバンテスト社製Q8384）でそれぞれ測定した。

10

20

30

40

表 1

項目	作製したファイバーブラッググレーティングの番号	#1	#2	#3	#4	#5	(単位)
1	位相マスク法での波長帯域→作製したファイバーブラッググレーティングの波長帯域	1.5→1.5	1.5→1.3	1.5→1	1.3→1.5	1.3→1.5	μm
2	位相マスクの回折格子周期 p	1072.34	1072.34	1072.34	894.70	894.70	nm
3	位相マスク回折角度 θ	13.37	13.37	13.37	16.09	16.09	度
4	位相マスク法で作製する場合の反射波長	1551.7	1551.7	1551.7	1294.6	1294.6	nm
5	ファイバー位相マスク間距離 L	295.8	271.2	248.2	336.4	336.4	nm
6	ミラー間隔 $2s$	70.3	70.3	70.3	88.0	88.0	nm
7	ミラー回転角 α	0.00	-1.27	-2.97	+1.32	+1.32	度
8	ファイバーへの入射角 β ($=\theta-2\alpha$)	13.36	15.91	19.31	13.46	13.46	度
9	$\tan(\theta-2\alpha)$	0.238	0.285	0.350	0.239	0.239	
10	$\tan 2\alpha$	0.000	-0.044	-0.104	0.046	0.046	
11	$\tan \theta$	0.238	0.238	0.238	0.288	0.288	
12	使用ファイバー	SMF28	SMF28	HI1060	SMF28	SMF28	
13	ファイバーブラッググレーティングの全長 $2L_{\text{FBG}}$	7.5	7.5	7.5	7.5	3.0	mm
14	ファイバーブラッググレーティング端部での光路長の差 Δ	0.00	0.332	0.781	0.345	0.138	mm
15	ファイバーブラッググレーティングの反射波長 λ_{FBG}	1552.7	1309.4	1085.0	1542.1	1542.1	nm
16	アポダイゼーション実効長 d_{apod}		2.0	1.5	2.0	1.5	mm
17	アポダイゼーションのレベル		良好	良好	良好	限界に近い	

【 0 0 2 7 】

作製したファイバーブラッググレーティング # 1、# 2、# 3 の反射スペクトルをそれぞれ図 8 (a)、(b)、(c) に、透過スペクトルを図 8 (d)、(e)、(f) に示す。2つのミラーが完全に平行のとき、すなわちミラー回転角 がゼロの # 1 のときは、光ファイバーの位置での 2 つの位相マスクの回折格子転写像は完全に重なってアポダイゼーションは付与されずに図 1 (b) のような反射スペクトルが予想され、実験では # 1 がこれに対応しており、図 8 (a) に示すように反射波長を中心にしてその短波長側および長波長側に数多くの細かなサイドローブが見られる。透過スペクトルの図 8 (d) において、反射波長より短い波長で見られる小振幅の変動はクラッドモードと呼ばれる現象によるものである。

ファイバーブラッググレーティング # 1 を作製したパラメータから、ミラー回転角度 を - 1 . 2 7 度、- 2 . 9 7 度とした # 2、# 3 のファイバーブラッググレーティングの反射スペクトルがそれぞれ図 8 (b)、(c) で、透過スペクトルがそれぞれ図 8 (e)、(f) である。この場合、図 4 (b) のアポダイゼーション付与が予想され、実験では図 8 (b)、(c) に見られるように、サイドローブはまったく見られず、完璧に抑制されている。ミラーの回転角度 が # 1 から # 2 へ、# 2 から # 3 へと増えるにつれ、屈折率変調の光ファイバー長手方向実効長 (図 4 の d_{apod}) が短くなり、ファイバーブラッググレーティングの透過阻止量は - 3 0 d B (図 8 (d))、- 2 0 d B (図 8 (e))、- 1 2 . 5 d B (図 8 (f)) と予測される通り小さくなって行った。サイドローブを完璧に抑制することが出来たこの実験で、本発明の特徴であるアポダイゼーション付与の方法がきわめて有効であることが証明された。

1、# 2、# 3 の実験では、1 0 7 2 . 3 4 n m の格子間隔 p のひとつの位相マスクを用いたが、# 4、# 5 の実験では 8 9 4 . 7 0 n m の格子間隔 p のひとつの位相マスクを用い、ミラー回転角度 は + 1 . 3 2 度とし、ファイバーブラッググレーティングの長さ $2 L_{\text{FBG}}$ は # 4 で 7 . 5 m m、# 5 で 3 . 0 m m としてファイバーブラッググレーティングを作製した。この実験の目的は、図 4 (b) のように形成されたアポダイゼーションによる屈折率変調の長手方向分布を両側の側部で切り落としたときの影響を見ることである。実験で得られた反射スペクトルを図 9 (a)、(b) に示す。7 . 5 m m 長の # 4 の

ファイバーブラッググレーティングでは、サイドローブは完全に抑制されているが、# 5 の 3.0 mm 長ファイバーブラッググレーティングではサイドローブが - 30 数 dB で現れている。これは図 4 (b) のアポダイゼーションが付与される光学系配置で、エキシマレーザー光のビームをスリットでその幅を狭く整形し、図 4 (b) の屈折率分布の両側部を切り落とし、実効的に図 1 (a) の屈折率分布へ近づけ、アポダイゼーションを意図的に不完全にしたものである。サイドローブの大きさの許容量は、ファイバーブラッググレーティングの用途によるが、通常、- 20 dB 以下にあれば充分であり、この実験で得られた 3.0 mm 長のファイバーブラッググレーティングでの - 30 数 dB は十分に許容できるものではあるが、許容限界に近づいていることが分る。

【0028】

本発明のアポダイゼーションの有効性は、式 (14) ~ 式 (18) のところで説明したように、2つのミラーを対称に 度回転させたときの図 4 (a) に示す光路差 と位相マスク転写像の幅 $2d_{\text{coherence}}$ との大小関係で決まる。しかし、サイドローブの大きさがアポダイゼーションによって定量的にどれだけ抑制されるかは、非特許文献 (1) および非特許文献 (2) に述べられているように、光導波路ブラッググレーティングの理論と比較して検討しなければならない。我々はこれをコンピュータシミュレーションと比較することで行った。シミュレーションには、信頼性の優れている “IFO_grating” コンピュータソフトウェア (Optiwave Corporation 社) を用いた。このソフトウェアでは、光ファイバーのコア部およびクラッド部の屈折率分布を与え、コア部に屈折率変調のグレーティングの周期 とその長さ $2L_{\text{FBG}}$ および屈折率の変調成分と非変調成分をインプットして、このグレーティングに光が入ったときの反射および透過のスペクトルが計算される。アポダイゼーションに関しては、式 (15) の長手方向依存性が入力できる。シミュレーションのための入力パラメータは、光ファイバーの屈折率分布は、実験で用いた SMF 28 シングルモードファイバーに合わせて、コア径 $8.14 \mu\text{m}$ 、クラッド径 $125 \mu\text{m}$ 、コア屈折率 1.45015 、クラッド屈折率 1.4443 のステップインデクス型とした。ファイバーブラッググレーティングの周期 は 536.538 nm とし、その長さ $2L_{\text{FBG}}$ は実験に合わせて 7.5 mm および 3.0 mm とし、アポダイゼーションの強度分布は式 (15) のガウシアン分布を持たせ、 d_{apod} は無限長から 3 、 2 、 1.5 mm と変えて反射および透過のスペクトルを計算した。シミュレーションの結果を図 10 に示す。左の列がアポダイゼーションの形状で、中央の列が反射スペクトル、そして右の列が透過スペクトルである。ファイバーブラッググレーティングの中央部における屈折率変調の振幅は 0.000355 とした。光ファイバーに本実施例実験で照射した紫外線レーザー光の絶対光量は、ファイバーブラッググレーティング全長に渡って一様であるから、グレーティング周期での屈折率の平均値も一様である。これを、アポダイゼーション形状を示す左列の図中に、それぞれ点線で示す。非変調屈折率分布は、屈折率分布の平均値が一様になるように入力して計算した。アポダイゼーションのパラメータ d_{apod} 、およびファイバーブラッググレーティング長 $2L_{\text{FBG}}$ は、図の左の列に記入する。

図 10 (a)、(b)、(c)、(d) から、アポダイゼーションのパラメータ d_{apod} を短くして行くと、反射スペクトルのサイドローブが抑制されて行く様子が分る。また、図 10 (d) と同じ条件で、 $2L_{\text{FBG}}$ を 7.5 mm から 3 mm へ短くすると、図 10 (e) のようにサイドローブが現れ、シミュレーションが実験結果を良好に再現していることが分った。

次にこのシミュレーション結果のスペクトル (図 10) と実験で得られたスペクトル (図 8、図 9) を比較する。アポダイゼーションが付与されていない # 1 の条件でのスペクトル (図 8 (a)) は、シミュレーションの図 10 (a) に良好に対応している。アポダイゼーションが付与された # 2 の条件の反射スペクトル (図 8 (b)) は、シミュレーション結果の図 10 (c) にもっとも似ており、アポダイゼーション実効長 d_{apod} は約 2.0 mm と言える。同様に # 3 の反射スペクトル (図 8 (c)) は図 10 (d) に酷似しており、この場合、 d_{apod} は約 1.5 mm と言える。2つのミラー回転を逆方向にした実験で作製した # 4 および # 5 のファイバークレーティングのスペクトル (図 9 (a)、(b))

10

20

30

40

50

）はシミュレーションの図10（d）、（e）にそれぞれ似ており、 d_{apod} はそれぞれ約2.0 mm、1.5 mmと言える。これらを表1の項目16に記す。

なお、実験の反射波長 λ_{FBG} とシミュレーションの反射波長 λ_{FBG} は一部異なっているが、これはシミュレーションでグレーティングの周期 p を調整して実験と同じ反射波長を得ることは出来るが、そのように調整しても反射および透過のスペクトル形状は微弱に変わるだけで、本実施例実験との比較には影響しない。

【0029】

ファイバーブラッググレーティングに付与するアポダイゼーションの有効性を確保するための関係式は、式（17）および式（18）に導出した。これらの式で重要なパラメータは紫外線レーザーの可干渉距離 $d_{coherence}$ であり、これを求めるため、上述した本実施例実験結果とシミュレーション結果を式（17）と比較した。その結果を図11に示す。図の横軸はミラー回転角度 θ で、たて軸はアポダイゼーション実効長 d_{apod} で、可干渉距離 $d_{coherence}$ をいくつかの数値にして式（16）から計算した結果を実線で示す。図中に記す実験データは、表1の項目16のアポダイゼーション実効長 d_{apod} を項目7のミラー回転角度 θ の絶対値に対してプロットしたもので、表1の項目1（ファイバーブラッググレーティング番号）を付記した。図から分るように、実験データの点は可干渉距離 $d_{coherence}$ が0.2 mm～0.5 mmの範囲にあり、これが我々が使用したKrFエキシマレーザーの可干渉距離となる。式（17）の不等式の関係は、我々のこのKrFエキシマレーザーの場合は、図に矢印で示す範囲で表される。この範囲にあれば良好なアポダイゼーションを付与することが出来る。なお、この可干渉距離 $d_{coherence}$ の値は、非特許文献（20）に記載されている値とよくつじつまが合っている。

【0030】

本発明のアポダイゼーションの有効性を判定する別の見方は、光路長の差 ΔL_{edge} を用いた式（18）で説明した。式（12）で $x = L_{FBG}$ として、ファイバーブラッググレーティングの端部での光路長の差 ΔL_{edge} をいくつかの数値にして、ファイバーブラッググレーティングの全長 $2L_{FBG}$ をミラー回転角度 θ に対してプロットした結果を図12に実線で示す。図は、横軸がミラーの回転角度 θ で、たて軸がファイバーブラッググレーティングの全長 $2L_{FBG}$ である。実験データの点は、表1の項目13のファイバーブラッググレーティング全長 L_{FBG} を項目7のミラー回転角度 θ の絶対値に対してプロットしたもので、表1の項目1（ファイバーブラッググレーティング番号）を付記した。図から分るように、実験で得られた良好なアポダイゼーションのデータ点を包含するには、ファイバーブラッググレーティングの端部での光路差 ΔL_{edge} が0.1 mmより大きければよい。すなわち、式（18）の不等式と較べて、

$$2L_{FBG} \times \tan 2\alpha > 0.1 \quad (\text{mm}) \quad (19)$$

の関係にあればよいことになる。この実験結果は、図11で求めた可干渉距離 $d_{coherence}$ の下限が0.2 mmであることを用いて式（18）右辺に入れて得られる0.14 mmとよく一致している。この式（19）は、式（1）と同じである。

【0031】

2つのミラーを回転させて、光導波路の位置で2つのビームによる2つの位相マスクの回折格子像を傾けて交差させて干渉させる本発明の方法では、作製される光導波路ブラッググレーティングのグレーティング周期 p は、位相マスク法で作製したときのグレーティング周期と大きく異なっている。位相マスク法による場合、位相マスクに近接乃至は接触して配置された光導波路に、位相マスクの回折格子が光導波路にそのまま転写され、干渉によってその回折格子ピリオド p の半値が光導波路ブラッググレーティングの周期 p となり、その反射波長 λ_{FBG} は式（4）から求められる。この反射波長とミラーを回転させて作製される光導波路ブラッググレーティングの反射波長が同じになるのは、ミラーの回転角度 θ がゼロのとき、すなわち2つのミラーが完全に平行のときであり、この場合はアポダイゼーションは得られない。作製したファイバーブラッググレーティング#2～5では、

表 1 の項目 4 と項目 15 の比較から、反射波長は約 250 nm あるいはそれ以上違っていることが分る。このことから、本発明の特徴が発揮されるためには、使用する位相マスクの回折格子ピリオド p と作製される光導波路ブラッググレーティングの反射波長 λ_{FBG} は

$$|\lambda_{FBG} - 1.447 \times p| > 250 \text{ nm} \quad (20)$$

の関係がある。この式 (20) は式 (3) と同じである。

【0032】

以上の実験結果から、光導波路ブラッググレーティングにアポダイゼーションを付与する本発明の方法の有効性は十分に証明された。

10

【図面の簡単な説明】

【0033】

【図 1】アポダイゼーションについて示す図である。

【図 2】アポダイゼーションを形成する過程を示す図である。

【図 3】2 光束干渉法における光学部品および光導波路の位置関係を示す図である。

【図 4】2 光束干渉法で光導波路ブラッググレーティングを作製する装置で、2 つのミラーを対称に回転させて、2 つの位相マスクの回折格子像を傾けて光導波路ブラッググレーティングの位置に転写し、2 つの回折格子像を交差して重ね合わせ、光導波路ブラッググレーティングにアポダイゼーションを付与する原理を示す図である。

【図 5】本発明における理論を説明する 2 光束干渉法の光学部品および光導波路の幾何学的位置関係を示す図であり、かつ本発明の実施例に用いた光学部品および光導波路の位置関係を示す図である。

20

【図 6】本発明における理論を説明する 2 光束干渉法によって得られる光導波路ブラッググレーティング反射波長および位相マスクから光導波路ブラッググレーティングまでの距離のミラー角度依存性を示す図である。

【図 7】可干渉距離 $d_{\text{coherence}}$ の 2 つの光が光路差を持って重なるときに互いに干渉する様子を示す図である。

【図 8】本発明の方法でアポダイゼーションを付与したファイバーブラッググレーティングの作製を実施したときのファイバーブラッググレーティングの透過スペクトルおよび反射スペクトルを示す図である。

30

【図 9】本発明の方法でアポダイゼーションを付与したファイバーブラッググレーティングの作製を実施したときのファイバーブラッググレーティングの反射スペクトルを示す図である。

【図 10】光導波路ブラッググレーティングのシミュレーションコンピュータソフトウェアを用い、本発明の実施例の実験パラメータに合わせて、透過スペクトル (中列)、反射スペクトル (右列) を求めたシミュレーション結果を示す図である。シミュレーションに入力したパラメータおよび屈折率分布を左列に示す。

【図 11】異なるいくつかの可干渉距離に対して、アポダイゼーション実効長 d_{apod} をミラー回転角度に対して計算した結果を示す図である。データ点は実施例の実験結果である。

40

【図 12】異なるいくつかの光路差 ΔL_{edge} に対して、ファイバーブラッググレーティング全長 $2L_{\text{FBG}}$ をミラー回転角度に対して計算した結果である。データ点は実施例の実験結果である。

【符号の説明】

【0034】

1 位相マスク

2 ミラー

3 ミラー回転軸

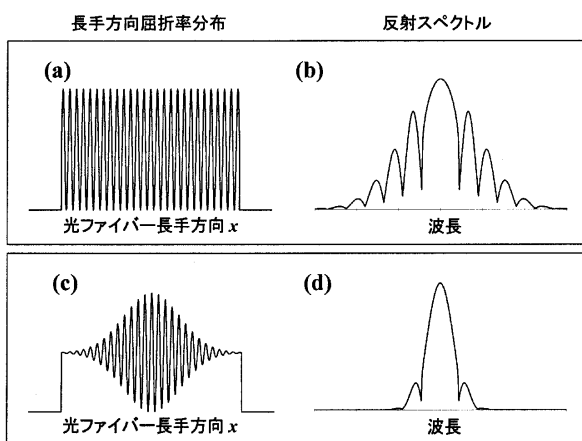
4 光導波路

5 紫外線レーザー光

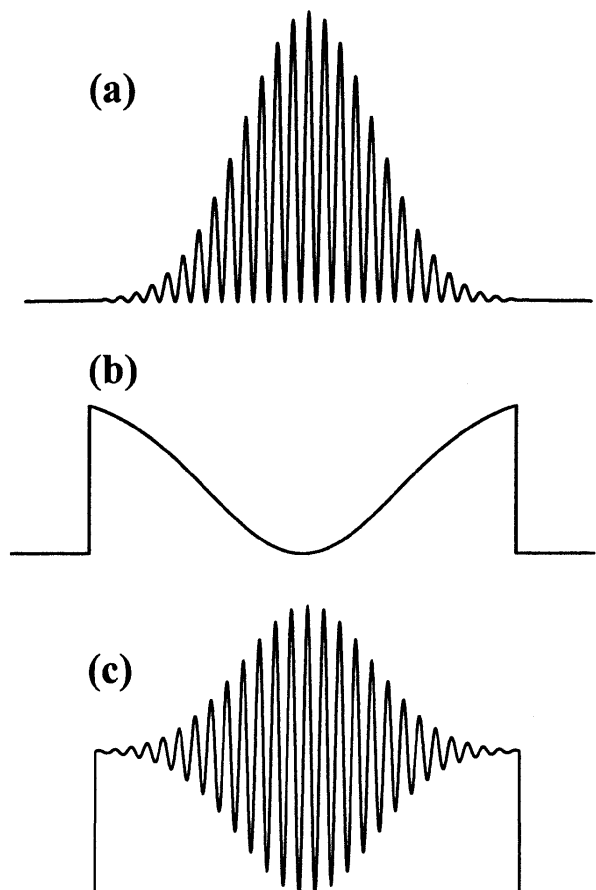
50

6、6' 位相マスクの回折格子の転写像

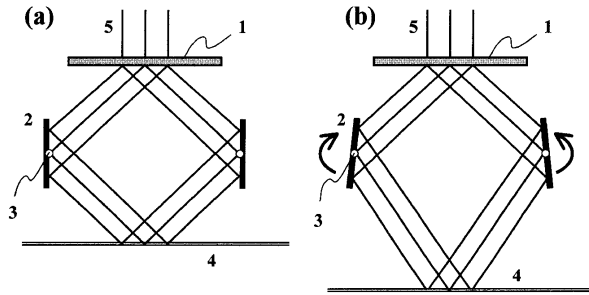
【図 1】



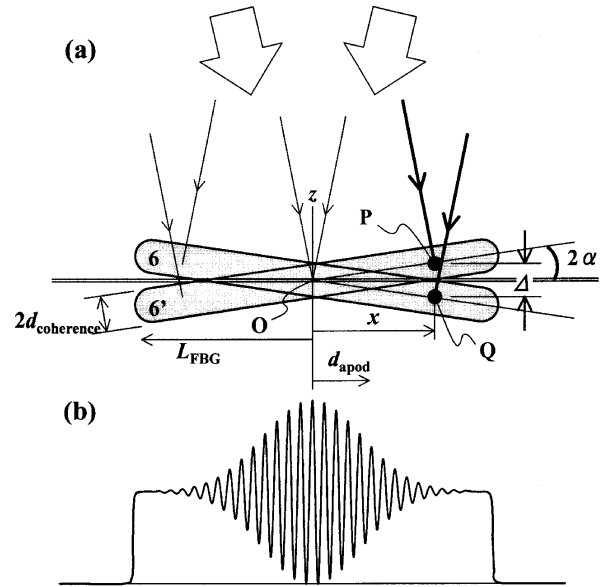
【図 2】



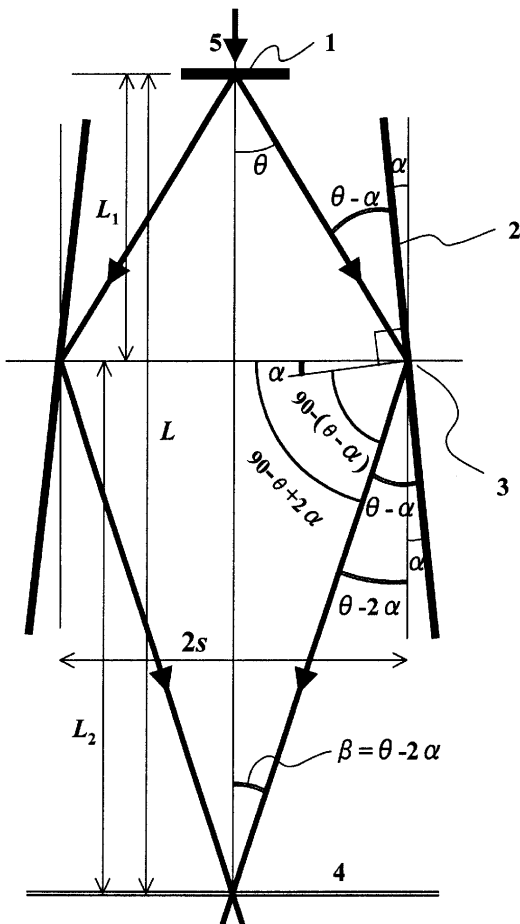
【図3】



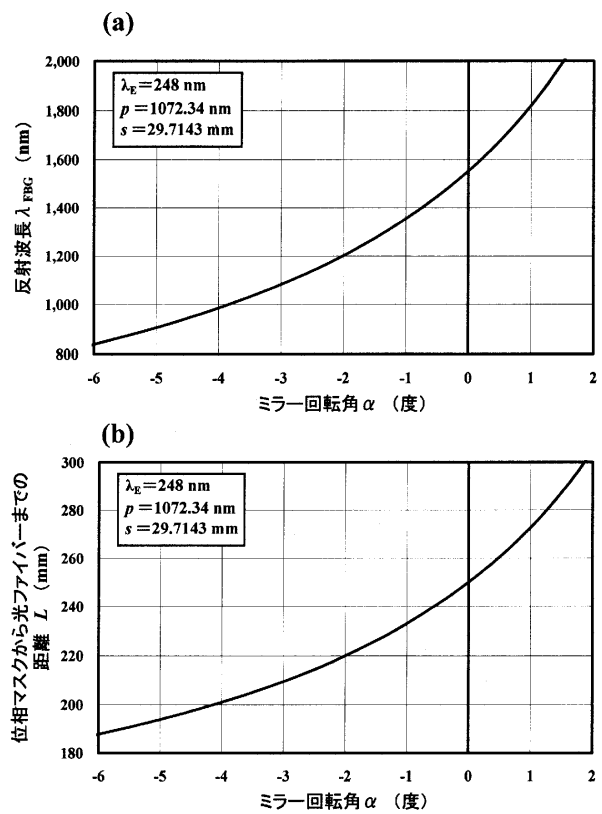
【図4】



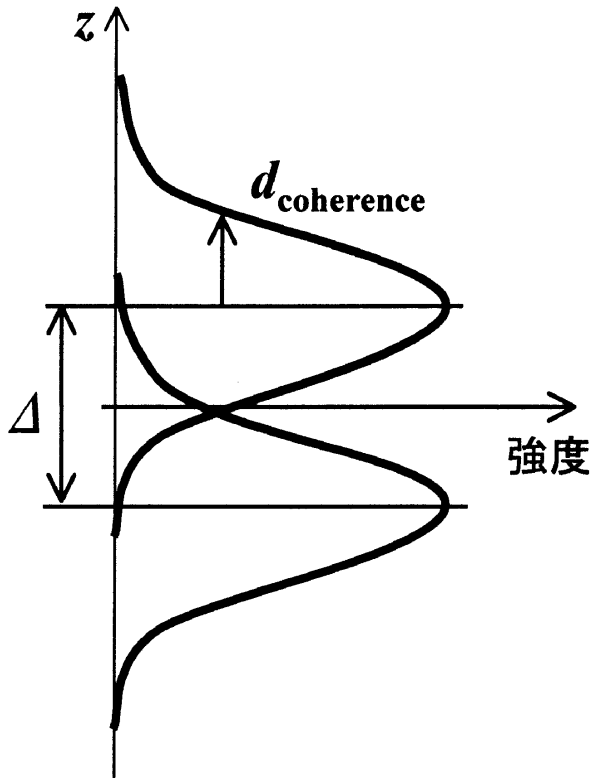
【図5】



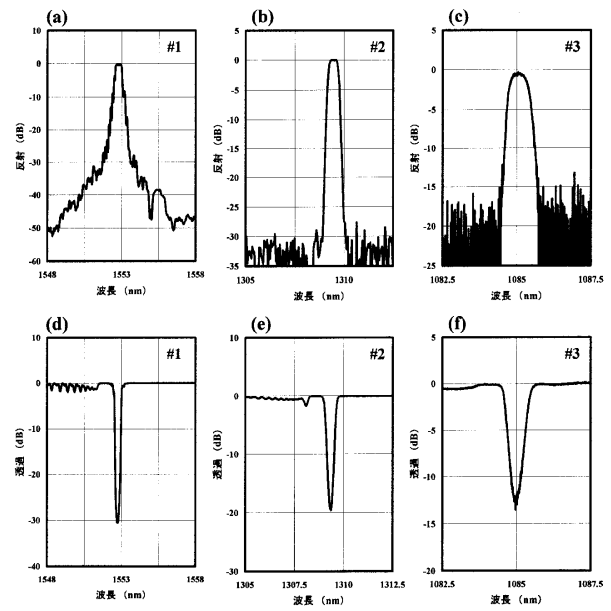
【図6】



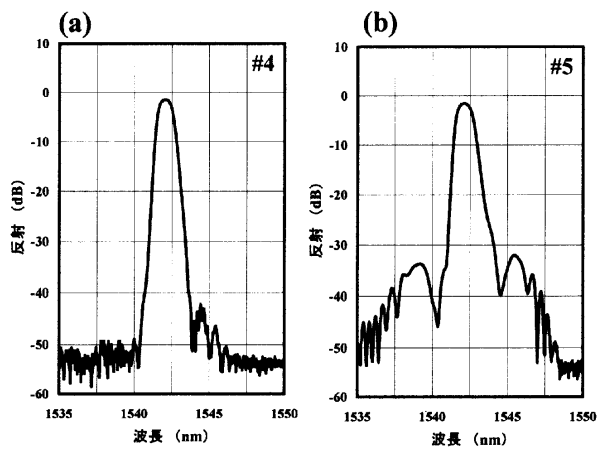
【図 7】



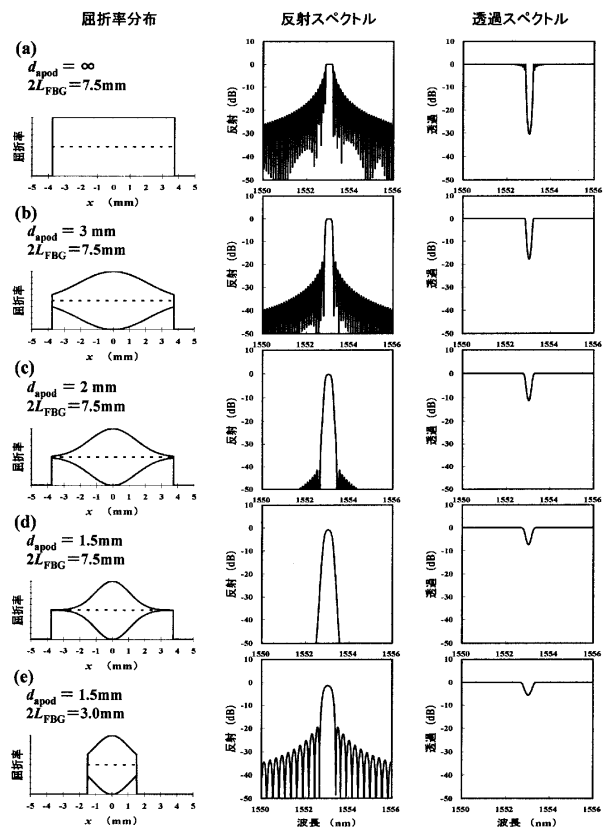
【図 8】



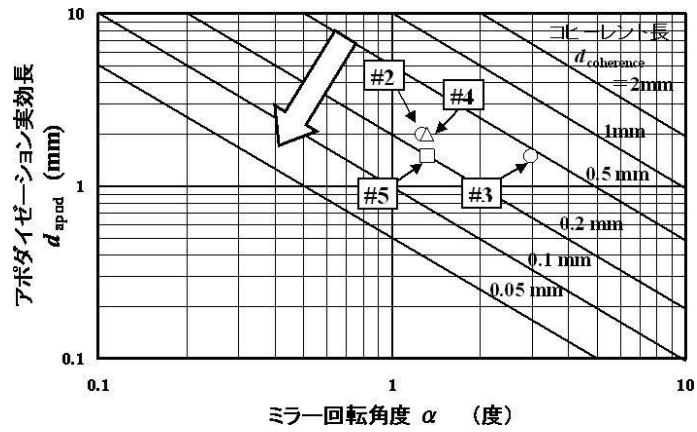
【図 9】



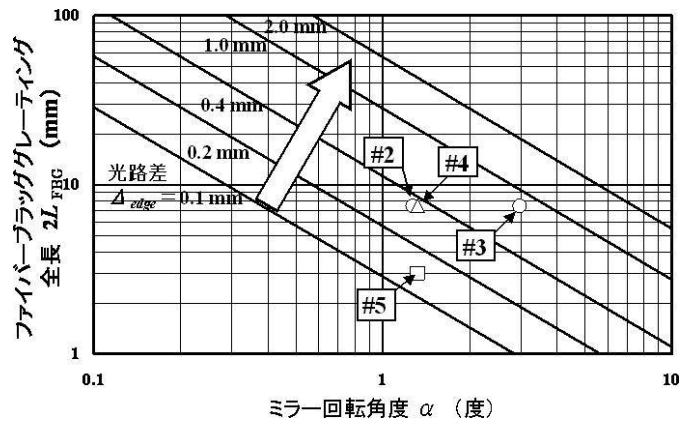
【図 10】



【図 1 1】



【図 1 2】



フロントページの続き

- (72)発明者 山内 誠
香川県さぬき市志度1298番地12 伸興電線株式会社内
- (72)発明者 木村 雅則
香川県さぬき市志度1298番地12 伸興電線株式会社内

審査官 井口 猶二

- (56)参考文献 特開平10-054914(JP,A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G02B 6/12-6/14

G02B 6/02