

# WDM システム用光ファイバグレーティングの開発

## Development of Optical Fiber Gratings for WDM Systems

大田育生\*  
Ikuo Ota

津田寿昭\*  
Toshiaki Tsuda

篠崎敦\*  
Atsushi Shinozaki

淀重人\*  
Shigehito Yodo

太田寿彦\*  
Toshihiko Ota

繁松孝\*2  
Takashi Shigematsu

小柳諭\*3  
Satoshi Koyanagi

指宿康弘\*4  
Yasuhiro Ibusuki

麦野明\*5  
Akira Mugino

**概要** WDM伝送方式が本格的に実用化されるのに伴い、複数の波長を合分波することのできる光部品として、光ファイバグレーティングが注目されている。当社では、光ファイバグレーティングの基礎研究開発、及びWDMシステム用途を含む種々の用途を目的とした製品の開発を行ってきた。

本報は、光ファイバグレーティングの基礎理論、製造方法の紹介とともに、当社におけるWDMシステム用途のグレーティング型光部品を中心にその開発成果をまとめたものである。

### 1. はじめに

光ファイバグレーティングは、光ファイバに紫外線を照射させると屈折率が上昇する「光誘起屈折率変化」を利用したもので、1978年にHillらによりこの現象が発見された<sup>1)</sup>。当時は、ファイバに入射された前進波とファイバ端面での反射による後退波との干渉によるグレーティングであったため、反射波長がファイバに入力されるレーザ光の波長に依存し、任意の波長のグレーティングが形成できないといった問題があった。その後、Meltzらによりファイバ側面から紫外線を照射し、コア内に任意の周期でグレーティングを作製する方法が提案され<sup>2)</sup>、また、ファイバを水素で高圧処理し、感光性を高めることができるようになり<sup>3)</sup>、ファイバグレーティングの研究開発が一気に加速し、最近では実用化されるに至っている。

ファイバグレーティングは、ファイバに直接加工を施すため、低コストで製造可能であり、線路との接続性が良く、また中心波長、バンド幅、反射率といった光学特性も容易に変化させられることから、その応用は広範囲にわたっている。本報で述べるWDMシステム以外にも、線路監視用フィルタとしての応用<sup>4)</sup>、温度、ひずみセンサとしての応用<sup>5)</sup>も考えられている。

WDM通信システムは、近年、インターネットをはじめとして光通信の需要が急増している中、既設の線路を用いて伝送容量を増大させることができるため、技術開発が盛んに行われている。ファイバグレーティングはその中で、波長多重を行うための合分波器、エルビウム添加ファイバ増幅器(Er-Doped Fiber Amplifier; EDFA)の利得を平坦化するための利得等価器、光

源の波長を安定化するための外部共振器部品などに使われている。

本報では、光ファイバグレーティングの原理、製造方法を説明した後、WDMシステムにおけるファイバグレーティングの応用製品を紹介する。

### 2. 光ファイバグレーティングの原理

#### 2.1 概論

光ファイバグレーティングは、ファイバコア上に周期的な屈折率変化を形成したもので、その周期に対応した特定の波長のみを反射するデバイスである。

この周期的な屈折率変化は、側面から照射された紫外線による干渉縞をファイバ上において形成し、そのパターンが光誘起屈折率変化により、ファイバ中に書き込まれ実現される。干渉縞の形成方法としては、以下の2つの方法が一般的である。

一つは二光束干渉法と呼ばれるもので、図1にその光学系の略図を示す。この方法はビームスプリッタにより分けられた紫外光をミラーで反射させ、交差部に干渉縞を形成するものである。ミラーの角度を微調整することで、任意の特性を持つグレーティングを形成できるが、光源に高いコヒーレンシーが要求され、また、振動等の影響を受けやすいといった欠点もある。

もう一つの方法はフェーズマスクを用いる方法である。フェーズマスクは石英基板上に電子ビーム露光等により細かいスリットを形成したもので、図2に示すようにフェーズマスクを透過した光は、直進する0次光がほとんど抑えられるため、±1次光による干渉をファイバ上に形成することができる。フェーズマスクの周期  $MASK$  とファイバに形成されるグレーティングの周期  $FBG$  は

$$MASK = 2 \cdot FBG \quad \dots (1)$$

の関係がある。したがって波長の異なるファイバグレーティ

\* 研究開発本部 光技術研究所 WPプロジェクトチーム

\*2 設備部 生産技術開発センタ

\*3 ファイタル製品事業部 光デバイス部 第二課

\*4 ファイタル製品事業部 生産技術課

\*5 研究開発本部 横浜研究所 WAプロジェクトチーム

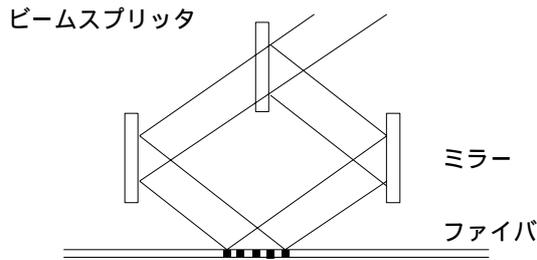


図 1 二光束干渉法  
Holographic method

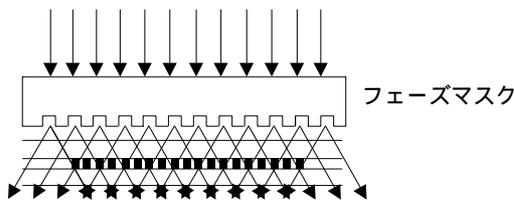


図 2 フェーズマスク法  
Phase-mask method

ングを作製するには、グレーティングの周期に応じた複数のフェーズマスクが必要となり、二光束干渉法と比較してコスト的に不利であるが、安定した特性が得られ、量産性に優れているため、グレーティングの製造方法として一般的に利用されている。

光ファイバグレーティングの光学的な特性は、屈折率変化量の大きさ、グレーティングの周期、長さの3つのパラメータで決定される。屈折率変調の大きさ、グレーティング長は主に反射率、バンド幅に大きく影響する。一方、グレーティング周期は中心波長を決定するほか、その大きさを長手方向に変化させたりすることにより、いろいろな種類のグレーティングを実現できる。

ファイバ長手方向に周期が一定なものはユニフォームグレーティングと呼ばれ、一般的には鋭いピークを持つ急峻な波長特性が特徴である。グレーティング長によっては0.1nm以下のバンド幅も可能であり、光Add-Drop用や狭帯域WDM用として広く使用されている。中心波長は、

$$\lambda_B = 2n \quad \dots(2)$$

$\lambda_B$ : プラッグ中心波長

で表される。モードの実効屈折率 $n$ 及びグレーティング周期が温度、歪みに対して変化することから、中心波長をモニターすることにより、温度、歪みセンサとして使用することができる。

一方、長手方向に周期が変化しているものはチャープトグレーティングと呼ばれている。反射波長は2式で表されるので周期の連続的な変化は反射波長の連続的な変化となり、広帯域な波形が得られる。チャープトグレーティングは応用範囲が広く、帯域カットフィルタ以外にも、図3に示すように反射点が波長により異なるため、分散補償器としての応用<sup>6)</sup>も考えられる。

ユニフォームグレーティングやチャープトグレーティングは0.5  $\mu\text{m}$ 程度の周期であるが、100~500  $\mu\text{m}$ 程度の周期を持つものは長周期グレーティングと呼ばれている。長周期グレー

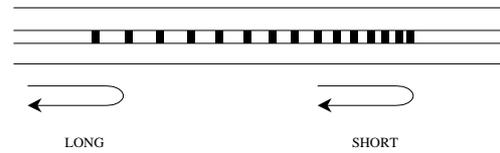


図 3 分散補償グレーティングの原理  
Principle of dispersion compensating grating

ティングは、導波モードから同じ方向に進むクラッドモードへの結合を利用したもので、結合条件を満たす波長の光はカットされ、帯域カットフィルタとして機能する。カットされたエネルギーはクラッドモードに変換されるため、対応する反射ピークは現れない。EDFAの利得等価器<sup>7)</sup>やセンサとしての応用が考えられる。

### 2.2 光誘起屈折率変化

前述のように光ファイバグレーティングは、ファイバのコア部分に屈折率上昇部を周期的に形成したものである。この屈折率上昇は、紫外線をファイバに照射するだけで容易に実現されるが、そのメカニズムに関してはまだ完全には解明されていない。しかしながら、これまでいくつかのモデルが提案され、また、それらが複合的に作用していると考えられている。ここでは、複合的なメカニズムの中でも中心的なモデルとされているクラマース・クローニヒモデル<sup>8)</sup>を紹介する。

Geドープファイバの光スペクトルは、240nm付近に吸収帯を持ち、紫外線を照射することにより、この240nm近傍の吸収帯はブリーチされ、代わりにより短波長側の吸収帯が発生する。この吸収帯は、GeE センターによるものと考えられている。この吸収スペクトルの変化からクラマース・クローニヒの関係により屈折率上昇が説明される。

また、光ファイバグレーティングの製造においては、屈折率変化量を増大させるため、紫外線を照射する前にファイバ内に水素を高濃度で添加する手法が用いられる場合が多い。水素の効果については、まだ十分に議論されていないが、反応の活性化、欠陥の固定に寄与しているものと考えられる。

### 2.3 モード結合理論

ファイバ中の電界分布  $E(z)$  は、前進波の振幅を  $A(z)$ 、後退波の振幅を  $B(z)$  とすると、

$$E(z) = A(z) \exp(-i\beta z) + B(z) \exp(i\beta z) \quad \dots(3)$$

で表される。また、 $A(z)$   $B(z)$  は以下のモード結合方程式を満たす。

$$\begin{aligned} \frac{dA}{dz} &= -i\kappa B \exp(2i\delta z) \\ \frac{dB}{dz} &= i\kappa A \exp(-2i\delta z) \end{aligned} \quad \dots(4)$$

ここで  $\kappa$  は結合係数、 $\delta = \beta - \frac{\pi}{\Lambda}$  である。

(4) を解くと、ピーク近傍における解は、

$$\begin{pmatrix} A(z) \exp(-i\delta z) \\ B(z) \exp(i\delta z) \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} A(0) \\ B(0) \end{pmatrix} \quad \dots(5)$$

$$M = \begin{pmatrix} \cosh(\gamma z) - i \frac{\delta}{\gamma} \sinh(\gamma z) & -i \frac{\kappa}{\gamma} \sinh(\gamma z) \\ i \frac{\kappa}{\gamma} \sinh(\gamma z) & \cosh(\gamma z) + i \frac{\delta}{\gamma} \sinh(\gamma z) \end{pmatrix} \quad \dots(6)$$

となる。ここで  $\gamma = \sqrt{\kappa^2 - \delta^2}$  である。

(5),(6)においてグレーティング長を  $z=L$  とすると,  $B(L) = 0$  とおくことにより, 反射率  $R$  は,

$$R = \frac{\kappa^2 \sinh^2(\gamma L)}{\gamma^2 + \kappa^2 \sinh^2(\gamma L)} \quad \dots(7)$$

となる。

ピーク波長における反射率は,(7)式において  $\gamma = \kappa$  とおくことにより,

$$R = \tanh^2(\kappa L) \quad \dots(8)$$

となる。

チャープグレーティングの場合は, グレーティングをいくつかのセクションに分割し, それぞれのセクションにおける行列  $M$  を掛け合わせるにより特性が得られる。

### 3. OADM 用光ファイバグレーティング

WDM通信システムにおいて, 特定の信号波長のみを線路に加えた(Add), 線路から取り出したりする(Drop)ための合分波器(OADM; Optical Add-Drop Multiplexer)が必要となる。光ファイバグレーティングは, 急峻な波長特性を持つ波長選択性の良いデバイスであるため, OADMシステムへの応用が考えられる。サーキュレータと組み合わせた応用例を図4に示す。グレーティングの反射波長  $\lambda_0$  の信号はINポートからDROPポートに落とされ, また, ADDポートからの信号  $\lambda_0$  はグレーティングで反射され, OUTポートの線路に付加される。

このOADM用途の光ファイバグレーティングに要求される特性として以下の2点があげられる。

- (1) 透過・反射特性におけるリップルの無い急峻なスペクトル
- (2) 透過帯域の低損失化

グレーティングの屈折率変調が図5に示すようにファイバ長手方向に対して一定な場合(a), 反射スペクトルにおいてメインピークの両側にサイドローブと呼ばれる複数のピークが発生する。このサイドローブは, アポダイズと呼ばれるグレーティングの両サイドの屈折率変調を抑える手法(b)によって抑制するこ



図4 ファイバグレーティングのOADMへの応用  
Schematic optical add-drop multiplexer with fiber bragg grating

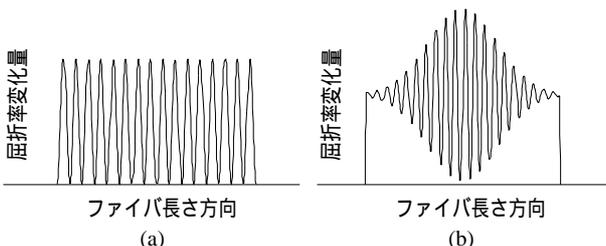


図5 ファイバ長手方向の屈折率変化  
Refractive index perturbation of uniform and apodized grating

とができる<sup>9)</sup>。図6,7にアポダイズを行わない場合, また, ガウス分布のアポダイズを行った場合の反射スペクトルの計算値を示す。アポダイズは, グレーティング書き込み中に機械的あるいは光学的に紫外線の照射量を変化させることで比較的容易に行うことができる。

もう一つの問題は, 透過スペクトルにおけるメインピークの短波長側における過剰損失である。図8に通常のシングルモードファイバにグレーティングを書き込んだ場合の透過スペクトルを示す。これは, 導波モードからそれと逆方向に進むクラッドモードへの結合によるものだが, この解決方法として, 結合自体を抑制する方法と過剰損失の発生する領域を使用波長帯域外にもっていく方法がある。いずれもファイバのプロファイルを変化させることにより実現可能である。結合自体を抑制する方法には, クラッドにもGeをドープするファイバ<sup>10)</sup>やW型プロファ

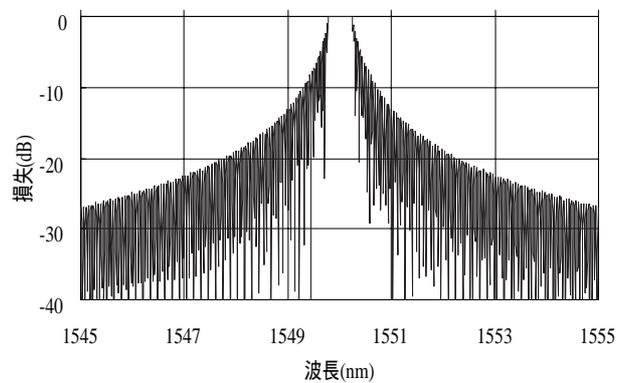


図6 ユニフォームグレーティングの反射スペクトル (計算値)  
Reflection spectrum of uniform grating

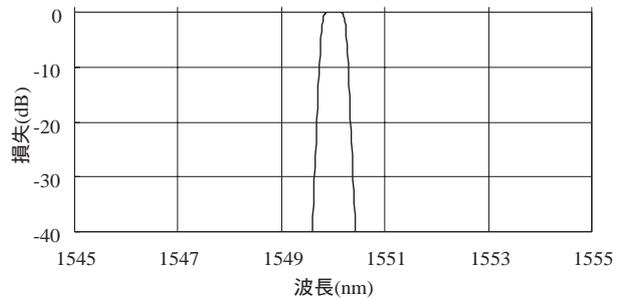


図7 アポダイズグレーティングの反射スペクトル (計算値)  
Reflection spectrum of apodized grating

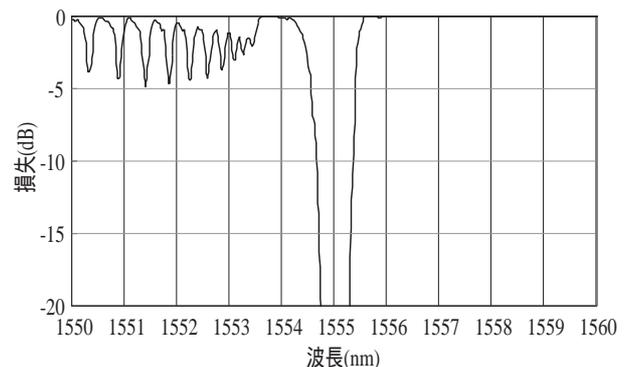


図8 透過スペクトル (通常のSMF)  
Transmission spectrum of fiber grating written in a single mode fiber

イルを持つファイバ<sup>11</sup>が提案されている。また、使用波長帯域外にピークを移動させるには高 NA ファイバが有効である<sup>12</sup>。我々は独自に設計した高 NA ファイバを用いることにより、メインピークから 12nm 以上の範囲でクラッドモードの影響を受けないグレーティングを作製している。

図 9 に高 NA ファイバを用いたときの透過・反射スペクトルを示す。紫外光光源には KrF エキシマレーザを用い、フェーズマスク法により作製した。透過帯域で過剰損失が無く、かつ、急峻な波長特性を有するグレーティングが得られた。

また、WDM システムにおいては、波長間隔が狭いため、波長制御技術も重要なポイントとなる。通常のファイバグレーティングでは、温度による中心波長の変化は 0.01nm/°C である。温度変化による中心波長のグリッド波長からのずれは伝送特性の劣化を招くので、グレーティングの中心波長は温度の影響を受

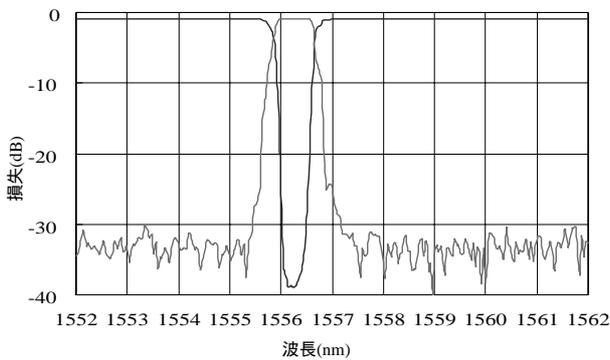


図 9 透過・反射スペクトル (高 NA ファイバ)  
Transmission and reflection spectra of fiber grating written in a high NA fiber

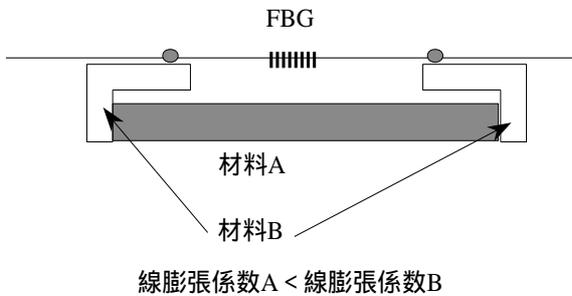


図 10 温度補償パッケージの構造  
Temperature compensated package composed of two materials

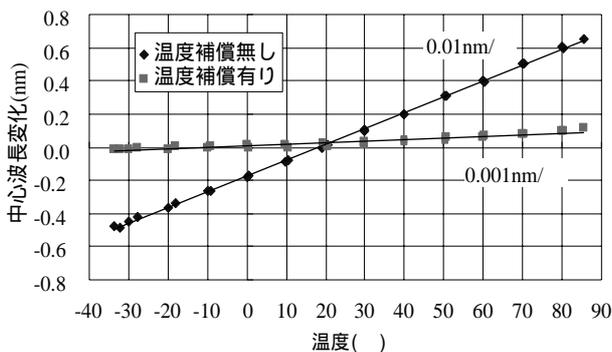


図 11 ファイバグレーティングの中心波長の温度依存性  
Temperature dependence of center wavelength of temperature compensated package

けず、グリッド波長に固定されていなければならない。

中心波長が温度依存性を持つのは、(2 式)における  $n$  と  $d$  が温度の上昇とともに増加するからである。 $n$  の温度依存性はファイバの材料が本質的に持つものであるので変化させるのは困難であるが、 $d$  の温度依存性は比較的簡単に制御できる。 $d$  が温度に対して負の依存性をもてば、 $n$  の増加分を相殺して中心波長を一定に保つことができる。

負の依存性を持たせるには、負の線膨張係数を持つ材料によるパッケージ<sup>13</sup>、あるいは図 10 のように 2 種類の線膨張係数を持つ材料によるパッケージ構造<sup>14</sup>がある。

図 11 に 2 種材料によるパッケージを施したファイバグレーティングの中心波長の温度依存性を示す。温度依存性は 0.001nm/°C 以下で、OADM の使用温度範囲においてもその変動量を無視できるレベルのものである。

写真 1 に温度補償パッケージを施したファイバグレーティングの外観写真、写真 2 にサーキュレータと組み合わせた OADM モジュールの外観写真を示す。

OADM モジュールは、サイズが 108 × 80 × 8.5mm と非常にコンパクトに実装されており、使い勝手の良いものとなっている。

#### 4. レーザ波長安定化用ファイバグレーティング

EDFA の励起光光源として 1.48 μm 帯、0.98 μm 帯の半導体レーザが使われている。EDFA の高出力化を実現するため、キーデバイスであるポンプ LD 自体の高出力化、及び波長多重化や偏波多重化が求められている。

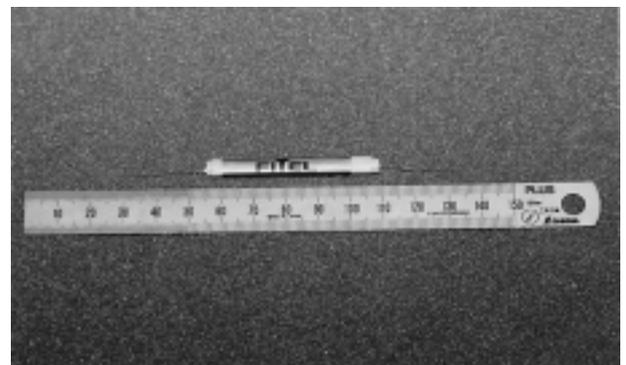


写真 1 ファイバグレーティングの外観  
Temperature compensated fiber grating

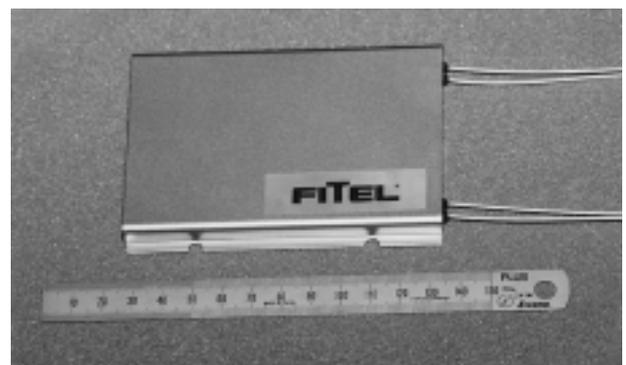


写真 2 OADM モジュールの外観  
OADM module

波長多重化を行うためには、ポンプLDの発振波長がLDの使用環境条件に対して安定であり、かつスペクトル幅の狭帯域化を行うことが重要である。

通常の半導体レーザでは、チップの端面を用いたファブリペロ共振器により発振している。そのため多モードが同時に発振することによりスペクトルが広がってしまう。また、注入電流の変化や温度変化により、活性領域の屈折率変化が生じ、このことによる実効共振器長の変化がレーザ発振波長の変化となって表れる。

反射率が数%程度のファイバグレーティングをポンプLDの外部に配置すると、グレーティングを外部共振器としてレーザ発振が行われる。この場合、レーザの発振はファイバグレーティングによる発振が主となり、レーザ発振波長はファイバグレーティングの中心波長とほぼ一致する。

ファイバグレーティングの温度に対する中心波長の変動は上述のレーザ発振波長の変動に比べると十分小さいため、ファイバグレーティング付きレーザの発振波長は温度に対して安定している。

また、ファイバグレーティングのバンド幅を細くすることにより、レーザのスペクトルの狭帯域化も可能である。

図12にファイバグレーティング付きポンプLDの構成を示す。LDのARコート側のレンズによりファイバに結合された光の一部はファイバグレーティングで反射され、LDのHR面と外部共振器を構成する。

ファイバグレーティングは、高圧水素処理したファイバにKrFエキシマレーザによる紫外線を、フェーズマスクを介して照射することにより作製している。また、グレーティングの書き込み部分は、ハードパッケージあるいはリコートにより保護している。パッケージの場合は、その構造、材質を工夫することにより、リコート品より更に温度に対して安定なグレーティング

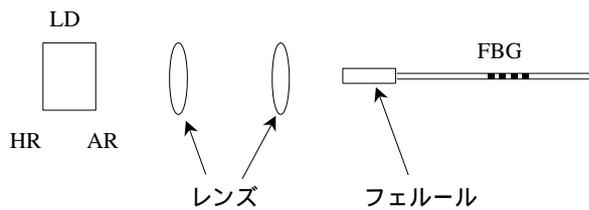


図12 グレーティング付きレーザの構成  
Pump LD with a fiber grating

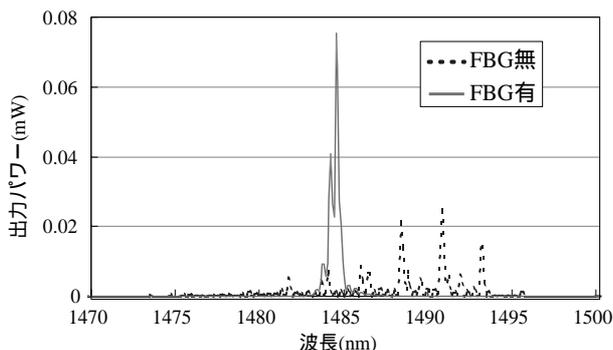


図13 グレーティング付きレーザの発振スペクトル  
Output spectrum of LDs with and without fiber grating

を供給することができる。

図13にファイバグレーティング付き1.48 μm帯ポンプLDの発振スペクトルを示す。図中点線で示したのは、グレーティングを付けていないレーザのスペクトルである。グレーティングを付けていないレーザは発振スペクトルが広がっており、また、ピークレベルも低いのに対し、グレーティング付きのレーザは出力パワーがグレーティングに引き込まれ、スペクトルの狭帯域化、高出力化が達成されていることがわかる。

図14にファイバグレーティング付き1.48 μm帯ポンプLDの発振波長のLD温度に対する依存性を示す。グレーティングを付けていないLDがLD温度の上昇とともにその発振波長が長波長側にシフトするのに対し、グレーティングを付けたLDはLD温度の影響をほとんど受けない。

図15に注入電流による発振波長の変化を示す。この場合も、グレーティング付きのLDは、発振波長が安定していることがわかる。

5. おわりに

WDMシステムに使用されるOADM用ファイバグレーティングとポンプレーザ波長安定化用グレーティングの開発成果を報告した。

OADM用グレーティングは、ファイバの最適化及びアポダイズを行うことにより、目標の波長特性を得ることができ、また、温度補償パッケージを行うことにより、OADMシステムに使用できる光ファイバグレーティングを製品化した。

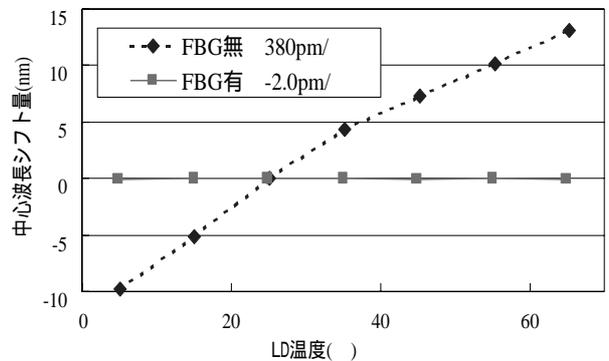


図14 発振波長のLD温度特性  
Temperature dependence of peak wavelength of LD with fiber grating

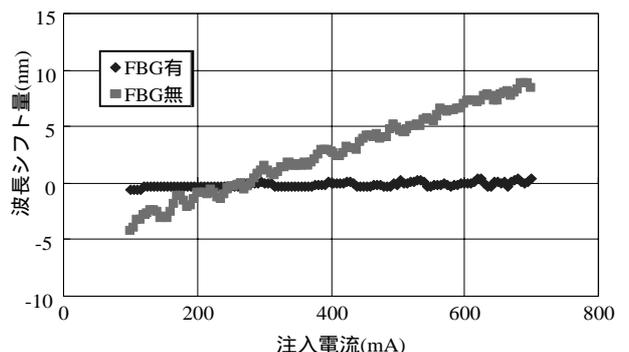


図15 発振波長の注入電流特性  
Current dependence of peak wavelength of LD with fiber grating

更に、サーキュレータとファイバグレーティングを組み合わせた非常にコンパクトなOADMモジュールの製品化も行った。

ポンプLDはグレーティングを組み込むことにより、その効果を確認し、ファイバグレーティング付きポンプレーザの製品化を達成した。

#### 参考文献

- 1) K.O.Hill et al.: Appl. Phys. Lett. , vol.32 , p647 , 1978.
- 2) G.Melts et al.: Opt. Lett. , vol.14 , p823 , 1989.
- 3) P.J.Lemaire et al.: Electron. Lett. , vol.29 , no.13 , p1191 , 1993.
- 4) K.Hogari et al.: Electron. Lett. , vol.32 , p1230 , 1996.
- 5) W.W.Morey et al.: Proc. SPIE , 1169 , p98 , 1989.
- 6) F.Quellete: Opt. Lett. , vol.12 , p847 , 1987.
- 7) N.S.Bergano et al.: ECOC'95 , PD Session 1 , p967 , 1995.
- 8) D.P.Hand et al.: Opt. Lett. , vol.15 , p102 , 1990.
- 9) B.Malo et al.: Electron. Lett. , vol.31 , p223 , 1995.
- 10) E.Delevaque et al.: OFC'95 PD5 , 1995.
- 11) L.Dong et al.: ECOC'96 MoB.3.3
- 12) T.Komukai et al.: Jpn. J. Appl. Phys. , vol.34 , p1286 , 1995.
- 13) D.L.Weidman et al.: ECOC'96 MoB.3.5.
- 14) G.W.Yoffe et al.: Appl. Opt. Vol.34 , No.30 , 1995.