

# 次世代高速通信用分散補償ファイバグレーティング

光電子技術研究所 坂元 明<sup>\*1</sup>・木村 直樹<sup>\*1</sup>・奥出 聡<sup>\*2</sup>

## Dispersion Compensation Fiber Grating for Next Generation High Bit-rate Transmission System

A. Sakamoto, N. Kimura & S. Okude

伝送速度が40Gbit/sを超える次世代光通信システムでは、伝送路での波長分散変化を動的に補償するための可変分散補償器が必須となる。これを実現するためにわれわれは分散補償ファイバグレーティングの開発を進めてきた。

今回、製造プロセスの改善により、従来問題となっていた群遅延時間リップルを $\pm 3\text{ps}$ 以下に抑えることに成功し、40Gbit/s用に適用可能な光学特性を実現した。また、ひずみ分布を用いた独自の分散量可変機構により、分散量可変範囲 $\pm 200 \sim 1,500\text{ps/nm}$ を実現し、次世代システムに必要とされる可変範囲を確認したので報告する。

Tunable chromatic dispersion compensators, which can compensate dispersion of transmission line adaptively, are indispensable for the next generation high bit-rate transmission systems of 40Gbit/s or above. To realize the tunable compensator, we have been developing dispersion compensation fiber gratings.

In this work, we have achieved a less than  $\pm 3\text{ps}$  group delay ripple by employing an advanced fabrication method. In addition, we propose and demonstrate a novel tunable dispersion compensator using our original strain applying method. We have achieved  $\pm 200 \sim 1,500\text{ps/nm}$  dispersion tuning range that is large enough for the next-generation transmission systems.

### 1. ま え が き

光ファイバ通信システムにおいては、伝送距離が長くなるほど、また、伝送速度が高速化するほど伝送路の波長分散によって生じる信号の劣化が顕著になる。近年の光通信容量の増大に伴い、伝送路で蓄積した波長分散を補正する分散補償技術がますます重要となっている。特に、1波長あたりの伝送速度が40Gbit/sを超えるような超高速伝送システムでは、許容できる残留波長分散量が非常に小さくなり、これまでは問題とならなかった伝送路周囲の温度などの環境変化による分散量変化により伝送できなくなる場合がある。このため、時間的に変化する分散値を補正するための可変分散補償器が必要不可欠となる。

現在、平面導波路型や空間伝搬型など様々な方式の可変分散補償器が提案されているが<sup>(1)(2)</sup>、中でもファイバグレーティングを用いた可変分散補償器は、小型、低損失、低非線形などの利点があり大きな注目を集めている。しかし、実用化のためには群遅延リップルの低減と可変機

構の確立が課題であった。

今回われわれは、これまで培ってきたファイバグレーティングの作製技術にさらなる改善を加えることで、次世代通信システムで使用可能な水準を達成した。また、独自の可変機構により、次世代システムに必要とされる可変量を満足する分散量可変範囲 $\pm 200 \sim 1,500\text{ps/nm}$ を実現したので報告する。

### 2. 分散補償ファイバグレーティング動作原理

図1に分散補償ファイバグレーティング (DCFG: Dispersion Compensation Fiber Grating) の動作原理を示す。光ファイバ中を伝搬してきた光は光サーキュレータをかいしてDCFGに入射され、グレーティング部で反射

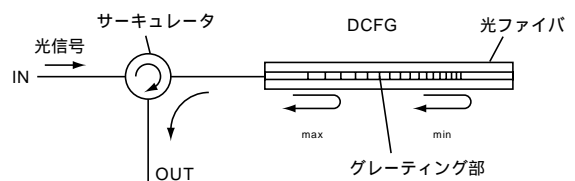


図1 分散補償ファイバグレーティング動作原理  
Schematic diagram of DCFG

\*1 光通信研究部

\*2 光通信研究部グループ長

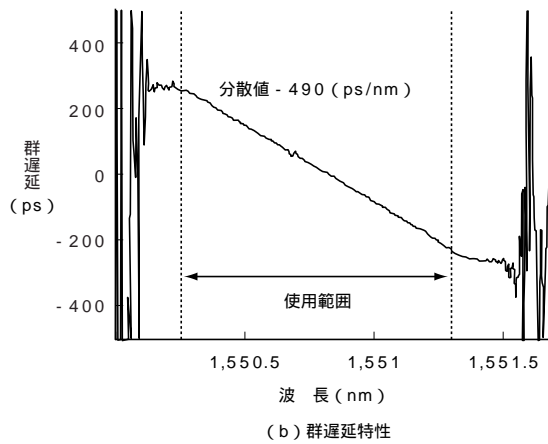
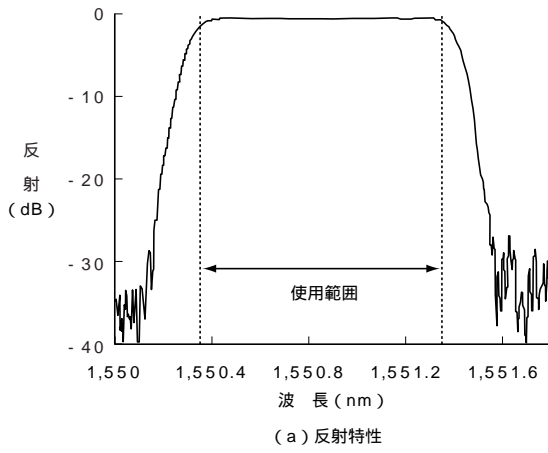


図2 分散補償ファイバグレーティング光学特性例  
Optical spectra of DCFG

して再びサーキュレータをかいして取り出される。DCFGでは、グレーティングの周期が光ファイバの長手方向に変化しており、異なる波長の光はDCFG中の異なる点で反射する。これにより、波長による光路長差が生じ、反射光の群遅延時間は大きな波長依存性を示す。この群遅延時間の波長依存性が波長分散であり、DCFGは大きな波長分散特性を有することとなる。このDCFGの波長分散値を伝送路による波長分散と逆特性になるように設計することにより、波長分散補償器として使用可能となる。

図2にはDCFGの典型的な波長特性を示す。(a)が反射特性であり、(b)が群遅延特性である。使用可能な帯域は1nm程度と狭いが、その帯域内での反射率はほぼ100%であり、挿入損失が小さいことが確認できる。また、帯域内での群遅延特性はほぼ線形となっており、その傾きとして表される波長分散は - 490ps/nmが得られている。この群遅延特性の線形近似からの差として表される細かい振動成分が群遅延リップル特性と呼ばれ、分散補償特性を悪化させる原因となっていた。現在の主流となりつつある10Gbit/sのシステムにおいては、群遅延リップルの大きさが ± 10ps程度でも使用可能であるが、40Gbit/sのシステムで使用するためには ± 3ps以下程度にする必要があった。

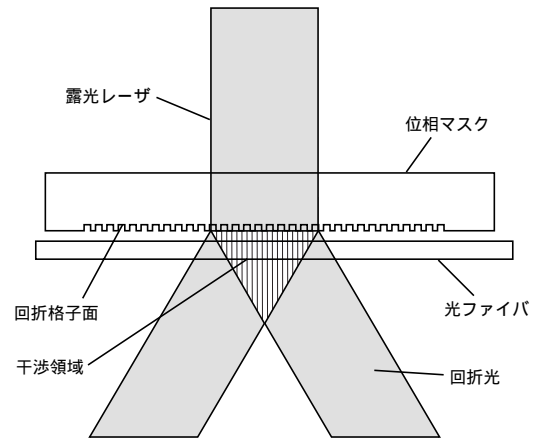


図3 グレーティング露光方法  
Fabrication method of fiber grating

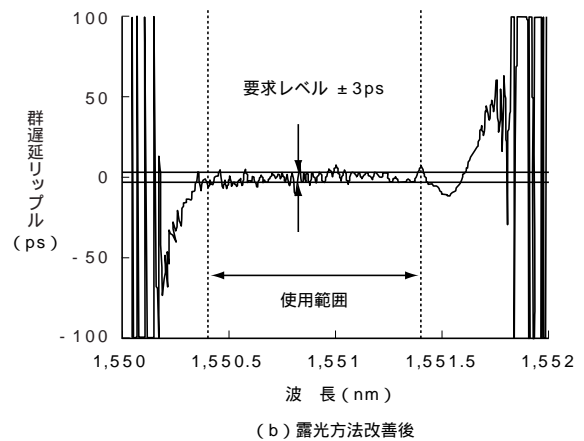
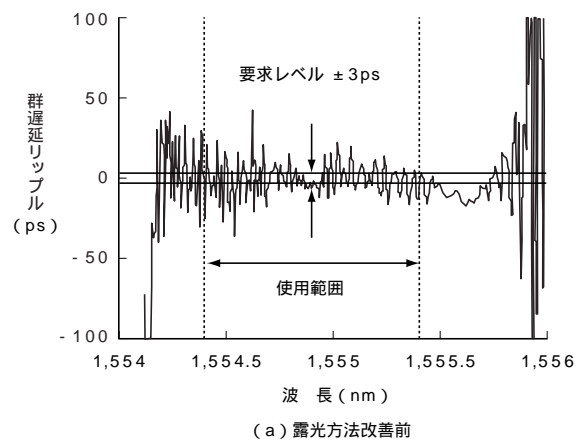


図4 分散補償ファイバグレーティングの群遅延リップル特性  
Group delay ripple spectra of DCFG

### 3. 光学特性の改善

図3にファイバグレーティングの作製原理を模式的に示す。波長244nmの紫外光レーザーを位相マスクに入射し、位相マスクによる ± 1次回折光の干渉パターンを光ファイバ中に焼き付けることにより、周期的な屈折率変化を実現する。屈折率変化の周期は約0.5 μmである。

図4(a)には、今回検討した露光方法改善前のDCFGにおける群遅延リップル特性を示す。帯域内で ± 15ps程度

表1 DCFG光学特性まとめ  
Optical properties of DCFG

項目	群遅延 リップル	帯域幅	挿入損失	損失 リップル	PDL	PMD
単位	ps	nm	dB	dB	dB	ps
40Gbps 要求特性	< ±3	> 1.0	< 1.2	< 0.5	< 0.1	< 0.3
実現特性	±3	1.0	0.9	0.1	0.05	0.25

の群遅延リップルがみられ、10Gbit/sの伝送システムでも使用ができない程大きい値であった。この様な群遅延リップルの原因としては、

- ・露光レーザーの強度変動
- ・露光中の光ファイバと位相マスクの位置ずれ

などが考えられ、これらについて低減の検討を進めた。その結果得られた群遅延リップル特性を図4(b)に示す。改善により、群遅延リップルは改善前の±15psから40Gbit/s伝送システムに必要な±3ps程度まで低減できることを確認した。

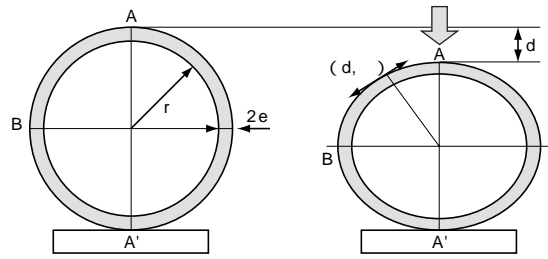
表1には40Gbit/sシステムで要求される分散補償器の光学特性と、今回われわれが達成した光学特性を示す。群遅延リップル特性も含めすべての項目で要求特性を満たしており、40Gbit/sシステムに適用可能であることが確認できる。

4. 分散量可変機構

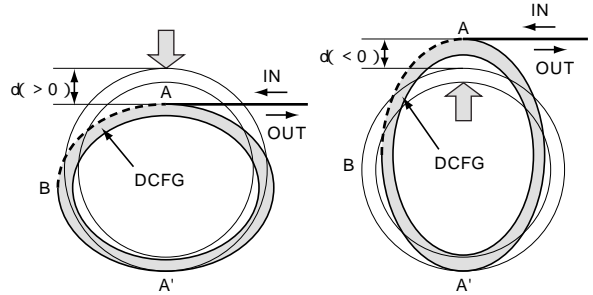
次に、もう一つの課題である分散量の可変性について検討を行った結果を報告する。

4.1 分散可変原理

DCFGの分散量を変化させるためには、図2(b)で示した群遅延スペクトルの傾きを変化させる必要がある。ファイバグレーティングは、周囲の温度変化や歪みによって動作波長を変化させることができるが、グレーティング全体に様な温度変化や歪みを与えても、グレーティングの波長特性全体がシフトしてしまい、傾きである分散値は変化しない。DCFGの分散値を変化させるためには、光ファイバ長手方向に沿って連続的に変化する温度変化や歪みを加える必要がある。また、その時に動作中心波長が変化しないことも重要であり、温度分布の場合は冷却から加熱への連続的な変化、歪み分布の場合は圧縮から引張への連続的な変化が必要となる。これらの可変機構を温度分布を用いて実現する方法としては、光ファイバ長手方向にマイクロヒータ列を作製してそれぞれの温度を制御する方法<sup>3)</sup>や、光ファイバ周囲に膜厚の異なる金属を蒸着し通電する方法<sup>4)</sup>などが提案されている。また、歪み分布を用いて実現する方法としては、光ファイバの外径を変化させた上で張力を掛ける方法<sup>5)</sup>や、線膨張係数の異なる二つのリングを組み合わせて温度変化を歪み変化に変換する方法<sup>6)</sup>なども提案されている。ただ、いずれの方法も作製が困難であったり、分散と共に中心波長が変化してしまったり、さらに、可変範囲が十分とれなかったりといった問題点があった。



(a) リング基本構造



(b) 分散補償ファイバグレーティング固定時

図5 リング構造可変分散補償器の動作原理  
Operation principle of the tunable dispersion compensator based on ring structure

4.2 リング構造による分散可変原理

今回、われわれはリングの表面にグレーティングを固定してそのリングを変形させる非常に単純な構造で、正分散から負分散の広い範囲で分散可変となるデバイスを実現した<sup>7)</sup>。

リング構造による分散量の可変原理を図5に示す。図5(a)に示す様な、内半径r、肉厚2eのリングが、A-A間で距離dだけ圧縮されたとすると、リングの外周で発生する半径方向の歪み分布は、リングの角度と変位量dの関数となり以下の式(1)で表すことができる<sup>8)</sup>。

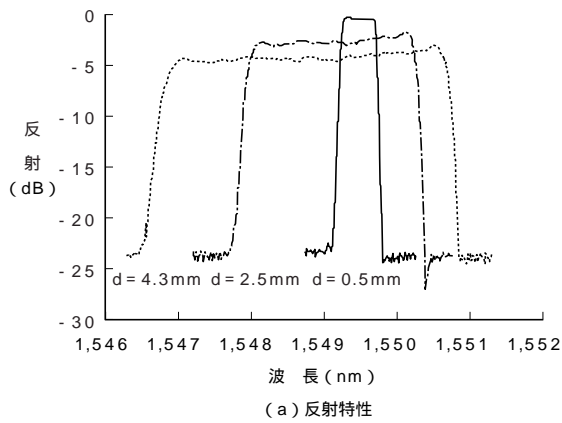
$$(d, \alpha) = C_1 \cdot d + C_2 \cdot d \cdot |\sin \alpha| \dots \dots \dots (1)$$

ここで、C<sub>1</sub>とC<sub>2</sub>はリングの内径および肉厚で決まる定数である。この時、図5(b)に示すように、グレーティングをリング表面に固定し、リングの歪みが光ファイバグレーティングに伝わるようにすることで、光ファイバの長手方向に沿って連続的な歪みを掛けることができる。また、リングの変位方向を逆にすることで、分散変化の方向を逆にすることができ、正分散から負分散の可変範囲が実現できる。

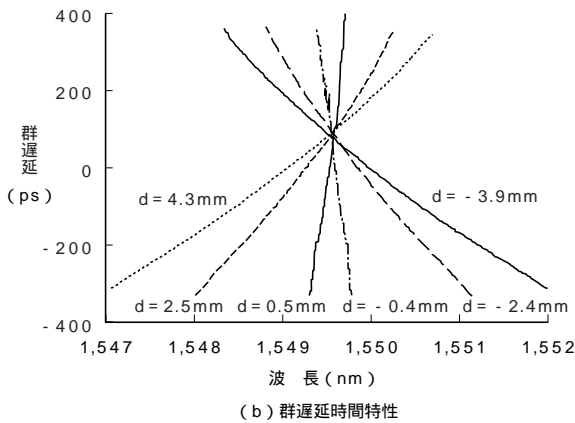
4.3 光学特性

図6には内半径80mm、肉厚5mmのリング表面に、一樣周期の位相マスクで作製した長さ90mmのDCFGを固定し、リングを変形させた場合の反射スペクトルと群遅延時間スペクトルを示す。図中のdがリングの変位量である。リングの変位量を大きくすることにより反射帯域が広がり、それに伴い分散値も大きく変化していることが確認できる。

図7には横軸をリングの変位量とした場合の分散値を示す。リングの変位量と分散値はほぼ反比例の関係にあり、リングへの変位向きを変えることで、±200~1,500



(a) 反射特性



(b) 群遅延時間特性

図6 リング型可変分散補償器の光学特性  
Optical properties of ring dispersion compensator

ps/nmと、正から負の大きな分散可変範囲が得られ、40 Gbit/sシステムに必要とされる可変範囲である250ps/nmを十分満たしていることが確認できた。また、中心波長の変動も小さく、動作波長を1,549.5nmとすることで、すべての波長分散可変範囲で使用可能であることを確認した。これらの結果より、当初の目標であった

- ・単純な構造
- ・中心波長の変動なし
- ・広い可変範囲

のすべてが実現できることを確認した。

### 5. 結び

次世代通信システムである40 Gbit/s用の分散補償ファイバグレーティングの開発を行った。露光方法や露光装置の改善を行うことで、群遅延時間リップルの低減を行った。群遅延時間リップルは、振幅 $\pm 3$ ps/nmを達成し、40Gbit/sシステムに必要な光学特性を実現した。

また、独自のリング構造による可変分散補償器を提案し、非常に単純な構成でありながら、動作中心波長が変化することなしに $\pm 200 \sim 1,500$ ps/nmと大きな分散可変範囲を実現した。

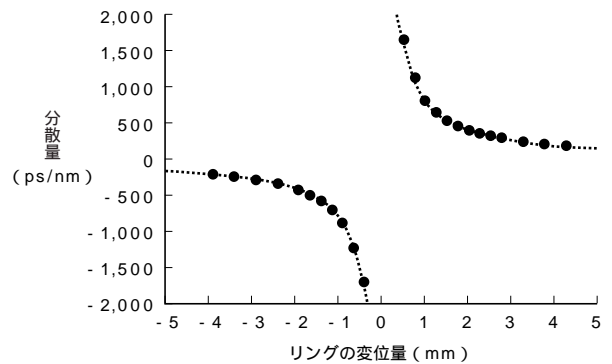


図7 リング型分散補償器の分散量可変範囲  
Dispersion tunable range of ring dispersion compensator

### 参考文献

- 1) H. Takenouchi, T. Goh and T. Ishii: 2 x 40-channel dispersion compensator for 40-Gbit/s WDM transmission systems covering entire C- and L-bands, OFC2001, TuS2, 2001
- 2) M. Shirasaki, Y. Kawahata, S. Cao, H. Ooi, N. Mitamura, H. Isono, G. Ishikawa, G. Barabrossa, C. Yang and C. Lin: Variable dispersion compensator using the virtually imaged phase array (VIPA) for 40-Gbit/s WDM transmission systems, ECOC2000, PD2.3, 2000
- 3) S. Matsumoto, T. Ohira, M. Takabayashi, K. Yoshiara and T. Sugihara: Tunable dispersion equalizer with divided thin-film heater for 40-Gb/s RZ transmissions, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 13, No. 8, pp.827-829, 2001
- 4) B. J. Eggleton, J. A. Rogers, P. S. Webtbrook and T. A. Strasser: Electrically tunable power efficient dispersion compensating fiber Bragg gratings for dynamic operation in nonlinear lightwave systems, OFC99, PD27, 1999
- 5) D. Gauden, A. Mugnier, E. Goyat, M. Derrien, P. Yvernault and D. Pureur: Multi-Channel Fiber Bragg Grating Dispersion Compensator based on Fused-Tapered Fiber, ECOC2002, 10.4.3, 2002
- 6) A. Sakamoto, S. Okude, D. Tanaka and A. Wada: Tunable dispersion compensator with double ring structure, ECOC2002, 10.3.2, 2002
- 7) S. Okude, N. Kimura, A. Sakamoto, D. Tanaka and A. Wada: Tunable dispersion compensator with a simple ring structure, ECOC2003, Mo3.2.3, 2003
- 8) M. Tanaka and K. Hotate: Application of correlation-based continuous-wave technique for fiber Brillouin sensing to measurement of strain distribution on a small size material, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 14, No. 5, pp.675-677, 2001