

# 位相シフト超構造ファイバブラッググレーティング

情報通信研究機構 片岡伸元<sup>1</sup>・和田尚也<sup>2</sup>  
光電子技術研究所 寺田佳弘<sup>3</sup>・坂元明<sup>4</sup>・西出研二<sup>5</sup>  
プリント回路事業部 西脇賢治<sup>6</sup>

## Phase-Shifted Superstructured Fiber Bragg Grating

N. Kataoka, N. Wada, Y. Terada, A. Sakamoto, K. Nishide, and K. Nishiwaki

光符号分割多重アクセス (OCDMA) 技術は、ユーザ毎に異なる符号を割り当てることで多重化を行うアクセス技術であり、光アクセスネットワークの高速化・大容量化を実現する技術として注目されている。今回われわれは、位相シフト超構造ファイバブラッググレーティング (SSFBG) を用いた光符号・復号器の改良を行い、また、中央局にマルチポート光符号・復号器、各ユーザ端末装置に SSFBG 光符号・復号器を配置した OCDMA ネットワークを構築し、10 Gbps × 8 ユーザでのフィールド伝送試験を行った。

Optical Code Division Multiple Access (OCDMA) is one of the multiplexing access techniques that assign different codes to each user. It is a promising candidate for new-generation broadband multiple access techniques. In this report, we modify phase-shifted Super Structured Fiber Bragg Grating (SSFBG) en/decoders. We also construct an optical network that uses multiport en/decoder at central office and SSFBG en/decoders at each Optical Network Unit (ONU), and successfully demonstrate field trials of 10 Gbps, 8-user Differential Phase Shift Keying (DPSK)-OCDMA system.

### 1. ま え が き

インターネットを用いたデータサービスの多様化により、これまでテレビや新聞から情報を受け取るだけであった個人が、自ら情報の発信源となったり、大量の情報を個人間でやり取りすることが可能となってきた。インターネットの急激な普及は日常における情報通信量の爆発的な増大を招いており、情報通信ネットワークのさらなる高速化、大容量化が求められている。このような要求に対し、光アクセスネットワークの高速化・大容量化を行う多重アクセス方式として、光符号分割多重アクセス (Optical Code Division Multiple Access, 以下 OCDMA と記す) 技術が注目を浴びている。OCDMA 方式は、ユーザ毎に異なる符号で情報ビットを光符号化することにより、1 つの伝送線路を多くのユーザで共有可能とする多重アクセス技術で、完全非同期性、低遅延アクセス性、高秘匿性などの優れた性能を有する。また、既存の波長分割多重 (Wavelength Division Multiple,

WDM) アクセス技術と組み合わせることが可能であり、通信容量の増大だけでなく、光アクセスネットワークに多様な機能を持たせることが可能となる<sup>1)</sup>。

OCDMA 方式では、同符号間の相関は 1 となり、異符号間の相関は 0 となるような直交符号を用いており、ユーザ毎に異なる符号を割り当て、受信側で符号が一致した信号のみが再生される仕組みである。符号不一致により再生されなかった信号は干渉雑音の原因となり、信号品質を悪化させる。これまでの多くの報告では、干渉雑音を除去するための方法として、時間ゲート処理、光閾値処理などが用いられてきた<sup>2)3)</sup>。時間ゲート処理とは、復号化された信号と同期する信号を用いて、特定の時間窓の中にある信号以外を除去することでノイズレベルを低減する方法であり、また、光閾値処理とは、ある閾値以下の強度レベルの信号を除去することでノイズレベルを低減する方法である。これらの手法はシステムの制御が複雑となり、また、装置の規模も大きくなるため、光アクセスネットワークには不向きであると考えられる。そこでこれらの処理を用いず、光符号の特性を向上することで OCDMA システムを構築する技術が望まれている。

今回われわれは、光符号の特性向上を目的とし、位相シフト超構造ファイバブラッググレーティング (Super Structured Fiber Bragg Grating, 以下 SSFBG と記す) を用いた光符号・復号器の開発を行った。本稿では、位相シフト SSFBG の作製結果と、位相シフト SSFBG を

1 新世代ネットワーク研究センター  
超高速フォトニックネットワークグループ (博士 (工学))  
2 新世代ネットワーク研究センター  
超高速フォトニックネットワークグループ  
グループリーダー (博士 (工学))  
3 応用電子技術研究部  
4 光技術研究部  
5 光電子技術研究所長  
6 キーデバイス技術部

| 略語・専門用語リスト             |                                       |  |
|------------------------|---------------------------------------|--|
| 略語・専門用語                | 正式表記                                  | 説明   |
| OCDMA                  | Optical Code Division Multiple Access | 光符号分割多重アクセス<br>ユーザ毎に異なる符号で情報ビットを光符号化することにより、1つの伝送線路を多くのユーザで共有可能とする多重アクセス技術 |
| WDM                    | Wavelength Division Multiple          | 波長分割多重   |
| SSFBG                  | Super Structured Fiber Bragg Grating  | 超構造ファイバブラッググレーティング<br>特定の波長（ブラッグ波長）を反射する単位FBG（FBGチップ）を複数個、直列に並べた構造         |
| PLC                    | Planar Lightwave Circuits             | 平面光回路  |
| AWG                    | Arrayed Waveguide Grating             | アレイ導波路回折格子   |
| ONU                    | Optical Network Unit                  | 加入者宅用の光配線終端装置  |
| DPSK                   | Differential Phase Shift Keying       | 差動位相偏移変調   |
| OLT                    | Optical Line Terminal                 | 光アクセスネットワークにおける中央局   |
| Japan Gigabit Network2 | Japan Gigabit Network 2               | 情報通信研究機構が運営する通信研究用光ケーブル設備  |

用いた、OCDMA システムによるフィールド伝送実験の結果について述べる。

## 2. 位相シフト SSFBG の作製

### 2.1 SSFBG を用いた光符号・復号器について

光符号の特性と干渉雑音レベル（ ）の関係は、光符号のチップ数(N)およびパワーコントラスト比(Power Contrast Ratio, 以下 PCR と記す)を用いて、式(1)で表される<sup>4)</sup>。

$$= \frac{1}{N \times PCR} \dots (1)$$

ここで、PCR とは自己相関（符号一致）出力と相互相関（符号不一致）出力の光強度比を表している。つまり、チップ数を増やすか、PCR を大きくすることで干渉雑音を低減でき、信号品質の向上が期待できる。

光直交符号を作製する光符号・復号器としては、光ファイバ遅延回路、平面光回路(Planar Lightwave Circuits, PLC)、アレイ導波路回折格子(Arrayed Waveguide Grating, 以下 AWG と記す)<sup>5)</sup>、SSFBG などが挙げられる。現在の光アクセスネットワークでは、加入者宅では各ユーザ固有の光符号処理機能のみが必要であり、また各家庭に設置されることから、小型で低価格な光符号・復号化装置が必要とされている。SSFBG

を用いた光符号・復号器は、光ファイバベースのデバイスのため、小型化、低価格化が可能であり、偏波無依存、波長分波機能を有するなど、加入者宅用の光配線終端装置(Optical Network Unit, 以下 ONU と記す)として非常に有効である。

位相シフト SSFBG は、特定の波長（ブラッグ波長）を反射する単位 FBG (FBG チップ) を複数個、直列に並べた構造となっており(図1参照)、配置する FBG チップ数が光符号のチップ数に相当する。FBG の製法上、光符号のチップ数を増やすことも可能である。また、個々の FBG チップ間の位相を制御することにより、各 FBG チップからの反射信号光の位相を任意に制御できる仕組みとなっており、PCR 値が高いコヒーレント OCDMA 方式の符号・復号器に用いることができる<sup>6)</sup>。

これらの特徴をいかし、1) 光符号のチップ数を増やす、2) PCR を大きくする、という2つのアプローチで位相シフト SSFBG を作製した。

### 2.2 511 チップ SSFBG の作製

まず、光符号のチップ数を増やすことで干渉雑音レベルの低減を狙い、位相シフト SSFBG を設計、作製し、これを光符号器・復号器に用いて実証試験を行った。作製した位相シフト SSFBG は、FBG チップ長が 0.156 mm、FBG チップ数が 511 であり、世界最多符号チップ数の SSFBG である。位相符号パターンは、0 の 2 値で構成し、符号系列数が多くマルチユーザへの適

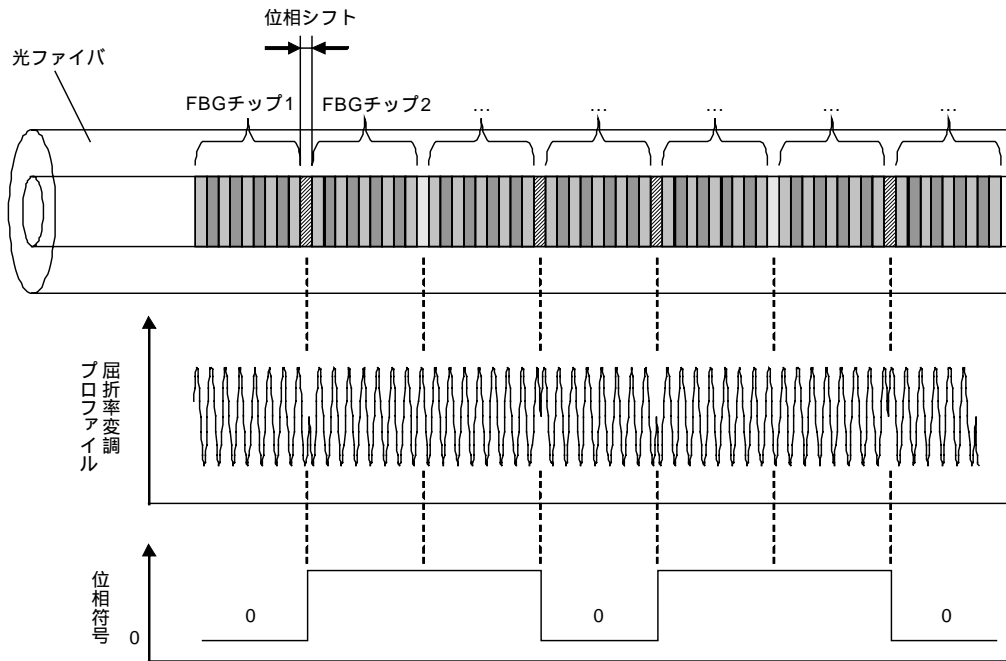


図1 位相シフト SSFBG 概略  
Fig. 1. Schematic illustration of phase-shifted SSFBG.

用に有利なゴールド符号系列を用いた。各 FBG チップは、光ファイバに石英ガラス製の回折格子（位相マスク）を介して紫外レーザを照射することで作製されており、個々の FBG チップの位相は、位相マスクと光ファイバの位置関係を nm オーダーで精密に制御することで達成した。作製した位相シフト SSFBG について、反射スペクトルを計測し、シミュレーション結果と比較を行った。SSFBG の反射スペクトル実測値とシミュレーション値を図2に示す。シミュレーション値と実測値のスペクトル形状がよく一致しており、FBG チップ間の位相シフトを高精度で制御できていることが確認された。

続いて、上記の 511 チップ位相シフト SSFBG を用いて 2 多重光符号・復号化実験を行い、雑音レベルの評価を行った。実験は、LN 変調器で強度変調した、中心波長 1551 nm、パルス幅 1.8 ps、繰り返し周波数 1.25 GHz の光パルス列を用いた。なお、FBG は、周囲の温度変化で光ファイバを構成する石英ガラスの屈折率変化および線膨張によりブラッグ波長が変化する特性を持つため、SSFBG に引っ張り応力を付加できる機構を設け、SSFBG の全長を調整することでブラッグ波長を可変できるようにした。光符号・復号化実験の結果を図3に示す。1.25 Gbps において干渉雑音レベルは -27 dB まで抑制され、511 チップ SSFBG を用いた光符号器・復号器の有効性が実証された。

### 2.3 16 値位相シフト SSFBG の作製

続いて、高 PCR 特性の光符号・復号器を用いることで干渉雑音を低減し、信号品質を向上させる検討を行った。位相符号パターンを 0 ~ 2 の均等刻みになるように多値化し、ランダム符号系列ではなく、周期性を持つ

た符号系列を用いることで PCR を向上させることができる。また、前項の 511 チップ SSFBG では、符号長によりビットレートが制限されたが、本方式では FBG チップ数を少なくする、すなわち符号長を短くすることができるため、高ビットレート伝送が可能となる。今回の検討では、OCDMA システムを用いた光アクセスネットワークを構築する上で、中央局（Optical Line Terminal, 以下 OLT と記す）側を想定した光符号・復号器には AWG を用いたマルチポート光符号・復号器を用い、ONU を想定した光符号・復号器には SSFBG を用いる、ハイブリッド光符号・復号器構成を検討した。OLT では、複数種の光符号を生成・復号する必要があるため、入出力ポートの組み合わせによって、一台の装置で異なる光符号を同時に生成・復号することができるマルチポート光符号・復号器が適している。また、ONU では、各ユーザ固有の光符号処理のみが出来ればよく、かつ、各家庭に設置されることから小型化、低コスト化する必要があるため、SSFBG を用いた光符号・復号器が非常に有効である<sup>7)</sup>。

今回の検討では、OLT の光符号・復号器として 16 × 16 マルチポート光符号・復号器を用い、2 / 16 刻みの 16 値で、チップ数 16 の周期的な位相符号パターンを生成した。これに合わせ、ONU の光符号・復号器には、FBG チップ数 16 で、FBG チップ間の位相を 2 / 16 刻みで制御した SSFBG を用いた。また、本 16 × 16 マルチポート光符号器が生成する 16 チップ (200 GChip/sec) の光符号に合わせ、FBG チップ長は 0.516 mm に設計した。また、SSFBG の反射帯域制限による信号パルス幅の広がりを抑制するため、図4に示すよう

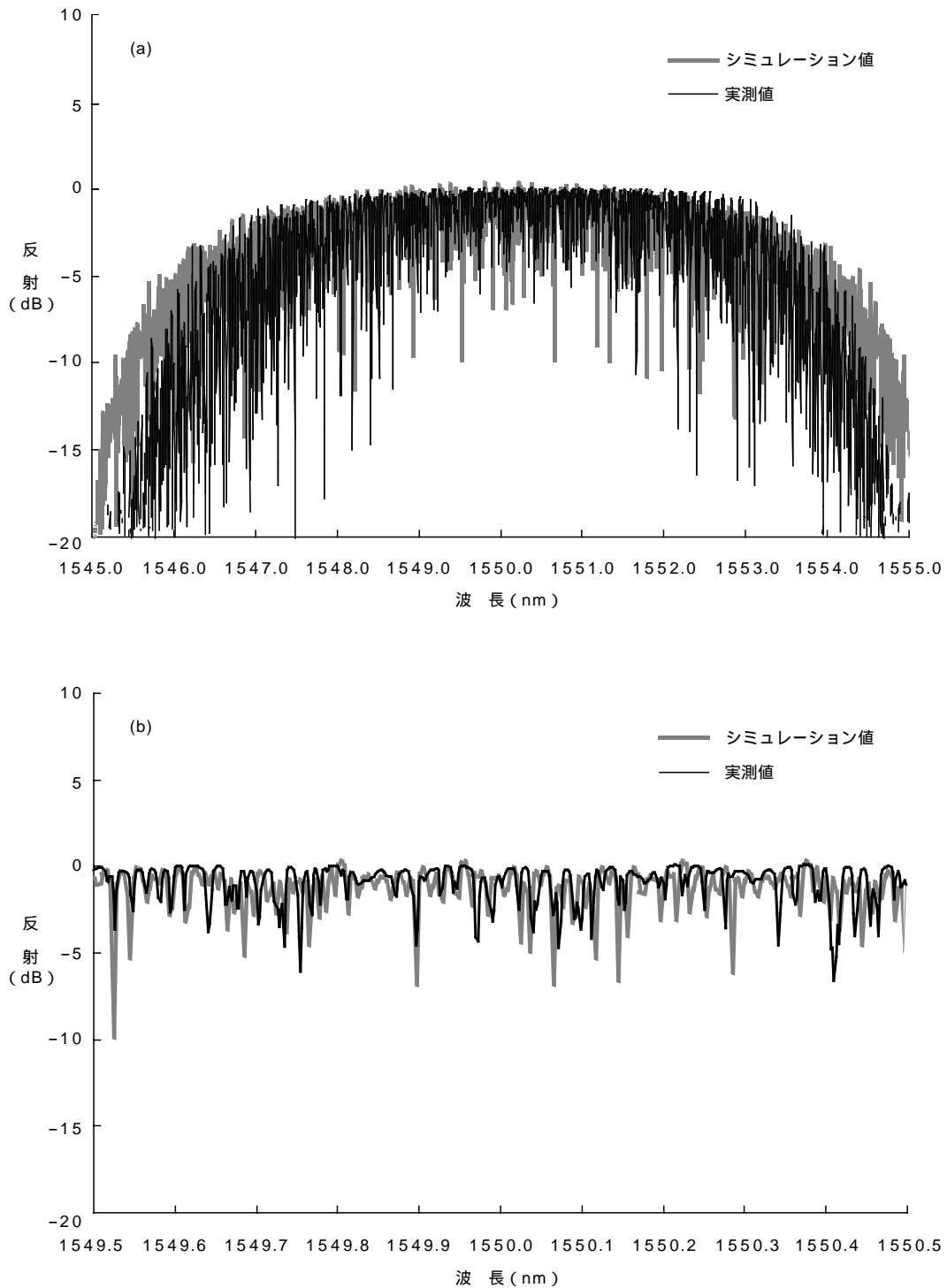


図2 (a) 511チップ位相シフトSSFBG反射スペクトル,(b)拡大図  
 Fig.2.(a) Reflection spectrum of 511 chip phase-shifted SSFBG ,(b) Enlargement .

に、個々のFBGチップの屈折率変調に対しアポダイズ(平滑化)をかけることで屈折率分布を最適化し、符号認識性を向上させている。

作製したSSFBGについて、反射スペクトルを計測し、シミュレーション結果と比較を行った。SSFBGの反射スペクトル実測値とシミュレーション値を図5に示す。計算値と実測値のスペクトル形状がよく一致しており、 $2/16$ 単位の位相シフト制御が高精度で実現できていることが確認された。また、各光符号・復号器のPCR

値を計測したところ、前項で述べた2値ランダム符号系列の511チップSSFBGを用いた光符号・復号器では、PCR値は1dB程度であったのに対し、16値周期性符号系列を生成するマルチポート光符号・復号器では、20dB以上のPCR値が達成できた。同じ周期性符号系列の16値位相シフトSSFBGでも20dB以上の高PCR値が実現できている。

続いて、OLTに $16 \times 16$ マルチポート光符号・復号器を用い、ONUの光符号・復号器に上記の16値位相シ

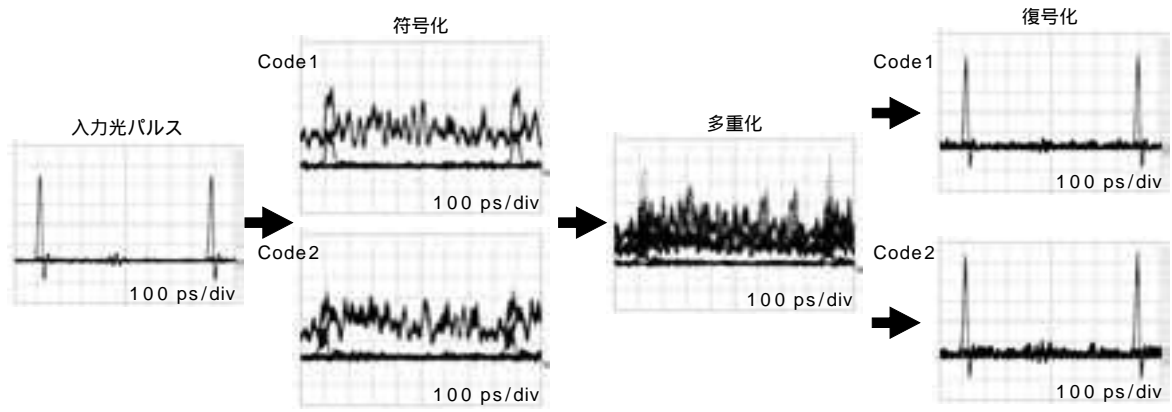


図3 光符号・復号化による信号波形  
Fig. 3. Encoding and decoding waveforms.

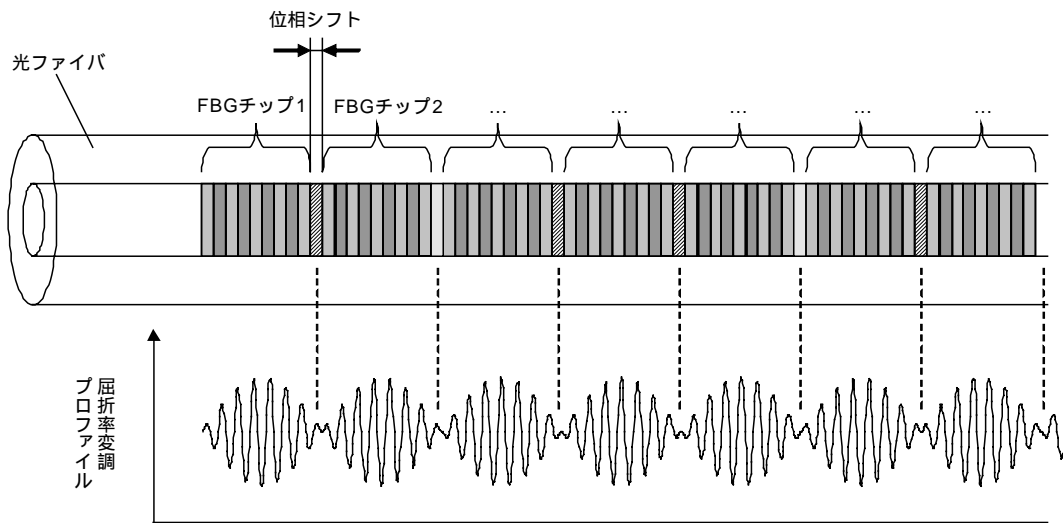


図4 アポダイズ付加 SSFBG 概略  
Fig. 4. Schematic illustration of apodized SSFBG.

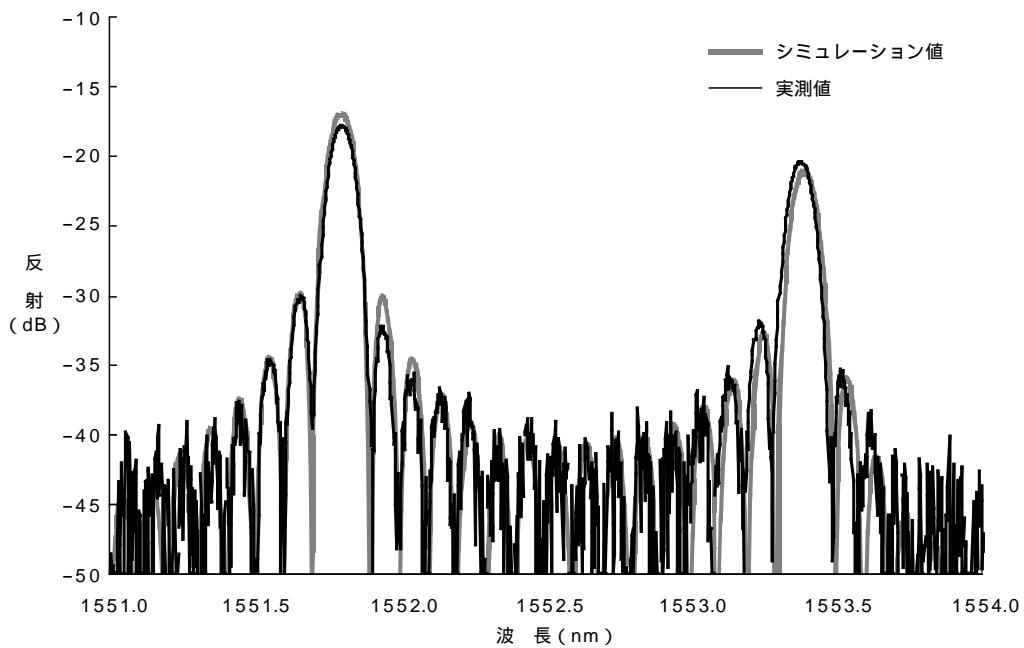


図5 16 値位相シフト SSFBG 反射スペクトル  
Fig. 5. Reflection spectrum of 511 chip phase-shifted SSFBG.



フト SSFBG を用いた OCDMA システムを構築し, 100 km フィールド伝送実験および双方向同時伝送実験を行った. フィールド伝送実験では, 情報通信研究機構が運営する Japan Gigabit Network 2 で実際に敷設されているダークファイバ (小金井~大手町) を用い, 実環境下で評価することを目的とし, DPSK 変調した繰り返し周波数 10.3125 GHz の光パルス列を用いて伝送特性を評価した. 評価の結果, 8 ユーザ (8 符号多重)  $\times$  10 Gbps の完全非同期 OCDMA 通信で, エラーフリー (BER  $< 10^{-9}$ ) を達成した (図 6 参照). また, 双方向同時伝送実験では, 1 心ファイバに上り下り方向の OCDMA 信号を同一波長で, かつ, 同時に通信を行い, ファイバ内の波長利用効率向上の実証を目的とし, 誤り訂正符号を含む 10.7 GHz の DPSK 光パルスを用いて 50 km の伝送特性を評価した. 評価の結果, 8 ユーザ (8 符号多重)  $\times$  10 Gbps の双方向同一波長完全非同期 OCDMA 信号のエラーフリー (BER  $< 10^{-9}$ ) 伝送を達成した (図 7 参照). これらの結果より, マルチポート光符号・復号器および SSFBG 光符号器・復号器を組み合わせたハイブリッド光符号・復号器構成の有効性が実

証された.

### 3. む す び

位相シフト SSFBG を光符号・復号器に用いた OCDMA 技術において, 1) 光符号のチップ数を増やす, 2) PCR を大きくする, という二つのアプローチで干渉雑音の低減を目指した. 1) の検討では, FBG チップ長 0.156 mm, FBG チップ数 511 の世界最多符号チップ数 SSFBG を作製した. 作製した SSFBG の反射スペクトルは, シミュレーション値とよく一致し, FBG チップ間の位相を高精度に制御できていることが確認でき, また, これを用いた 2 多重光符号・復号化実験では, 干渉雑音レベル を -27 dB まで低減することが出来た. 2) の検討では, OLT を想定した光符号・復号器として 16  $\times$  16 マルチポート光符号・復号器を用い, ONU を想定した光符号・復号器には, FBG チップ間の位相を 2 / 16 刻みで制御した 16 値位相シフト SSFBG を用いるハイブリッド光符号・復号器構成の OCDMA システムを構築し, 100 km フィールド伝送および 50 km 双方向

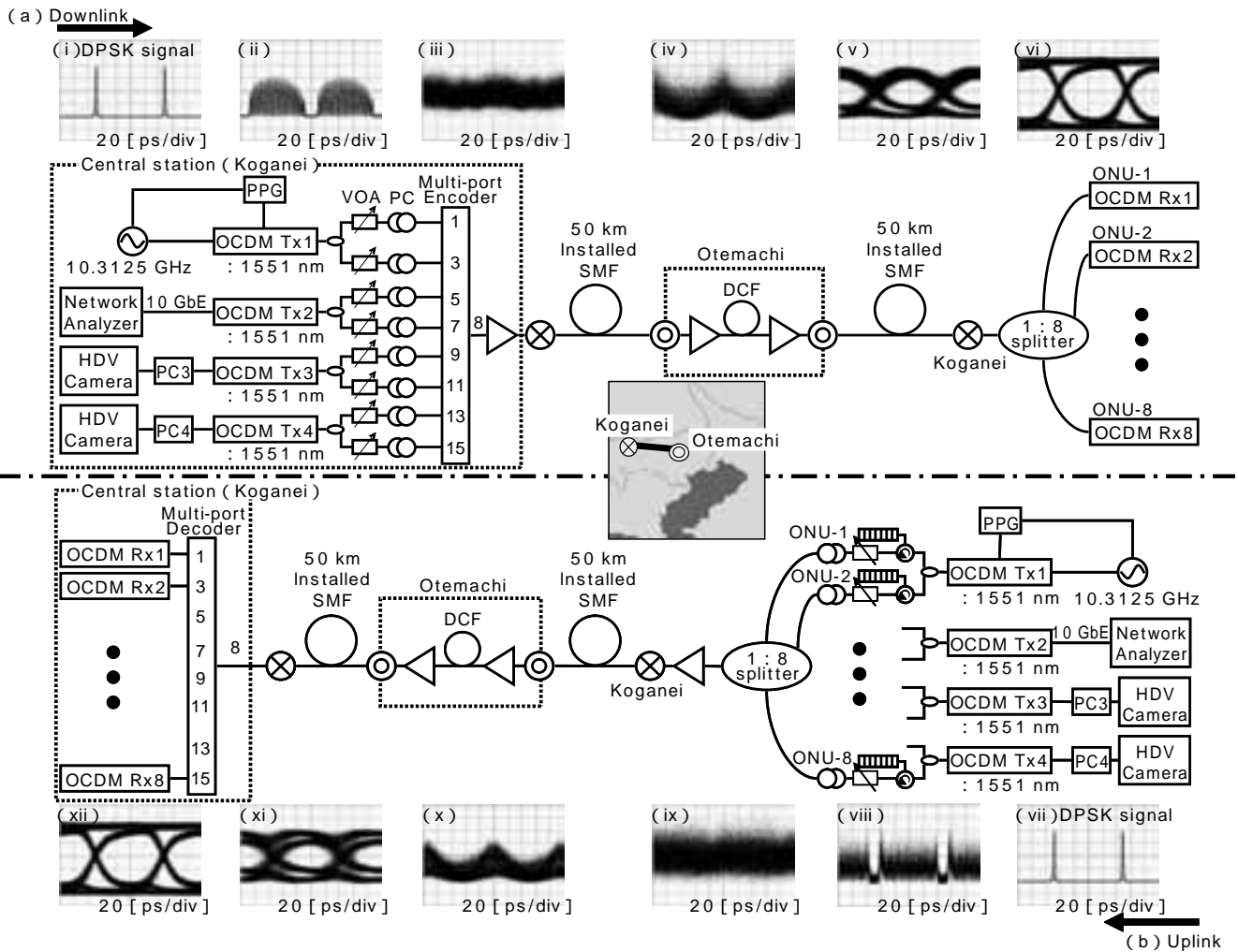


図 6 8 ユーザ OCDMA 信号 100 km フィールド伝送実験系  
Fig. 6. 100 km field setup of 8-user OCDMA system.

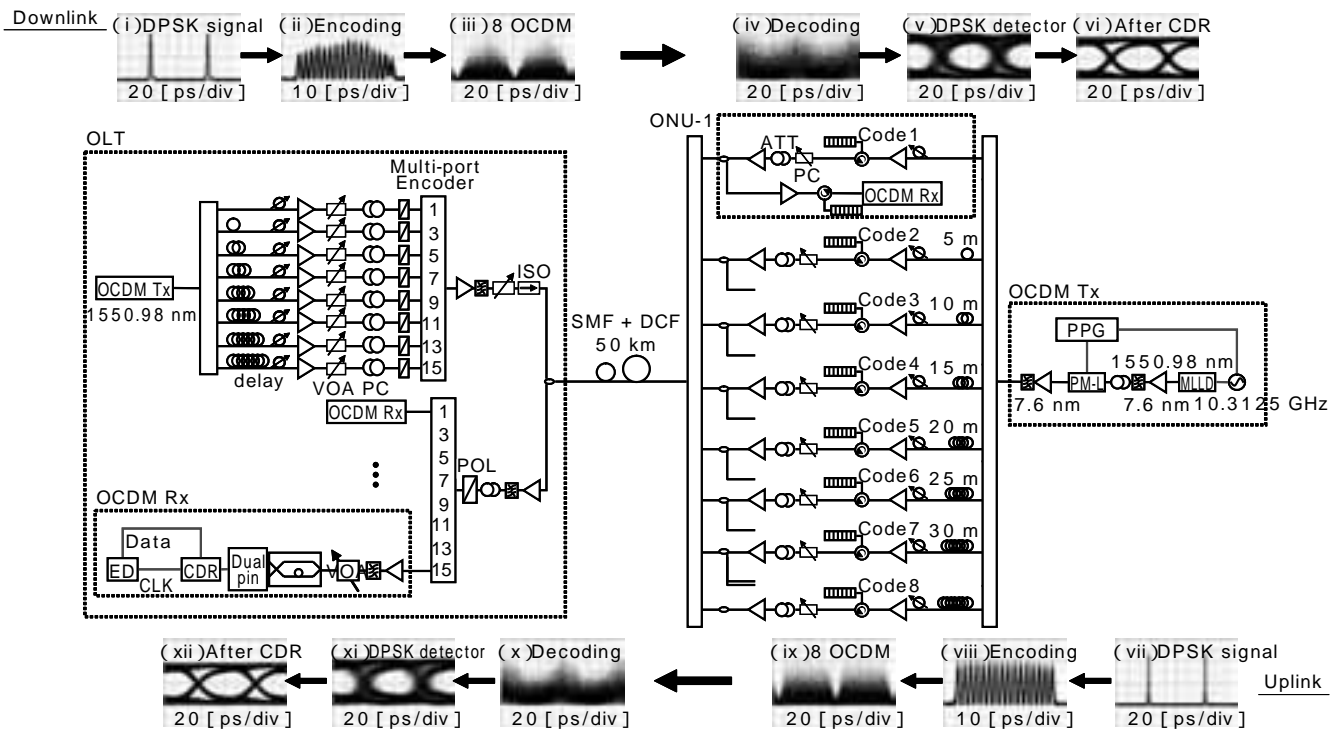


図7 8 ユーザ OCDMA 信号 50km 双方向同時伝送実験系  
 Fig. 7. Full-duplex setup of 8-user OCDMA system on a single wavelength.

同時伝送実証実験を行った。評価の結果、8 ユーザ (8 符号多重) × 10 Gbps の OCDMA 信号のエラーフリー (BER < 10<sup>-9</sup>) 伝送を達成し、ハイブリッド光符号・復号器構成の有効性が実証された。

今後ますます増大する光アクセスネットワークにおいて、位相シフト SSFBG を用いた OCDMA システムは有望な手段であると考えられる。今後もさらなる高機能化を目指し、開発を継続していく。

参 考 文 献

- 1) K. Kitayama, X. Wang, N. Wada :“ OCDMA Over WDM PON-Solution Path to Gigabit-Symmetric FTTH ”, IEEE/OSA J. Lightwave Technol., Vol. 24, No. 5, pp. 1654-1662, Apr. 2006
- 2) X. Wang, et al. :“ Dispersion-flattened-fiber based optical thresholder for multiple-access-interference suppression in OCDMA system ”, Opt. Express, Vol. 13, No. 14, pp. 5499-5505, July 2005
- 3) H. J. Lee, et al. :“ A Grating-Based OCDMA Coding-Decoding System Incorporating a Nonlinear Optical

- Loop Mirror for Improved Code Recognition and Noise Reduction ”, IEEE/OSA J. Lightwave Technol., Vol. 20, No. 1, pp. 36-46, Jan. 2002
- 4) X. Wang, K. Kitayama :“ Analysis of Beat Noise in Coherent and Incoherent Time-Spreading OCDMA ”, IEEE/OSA J. Lightwave Technol., Vol. 22, No. 10, pp. 2226-2235, Oct. 2004
- 5) G. Cincotti, N. Wada, K. Kitayama :“ Characterization of a Full Encoder/Decoder in the AWG Configuration for Code-Based Photonic Router - Part I : Modeling and Design ”, IEEE/OSA J. Lightwave Technol., Vol. 24, No. 1, pp. 103-112, Jan. 2006
- 6) X. Wang, et al. :“ High-performance optical code generation and recognition by use of a 511-chip, 640-Gchip/s phase-shifted superstructured fiber Bragg grating ”, OSA Optical Lett., Vol. 30, No. 4, pp. 355-357, Feb. 2005
- 7) X. Wang, et al. :“ Flexible 10 Gbps, 8-User DPSK-OCDMA System with 16\*16 Ports Encoder and 16-Level Phase-Shifted SSFBG Decoders ”, OFC/NFOEC 2008, OMR2, San Diego, U.S.A., 24-28, Feb. 2008