

# 超高速光ファイバスイッチと光信号処理への応用

## Ultrahigh-Speed Optical Fiber Switch and Its Application to Optical Signal Processing

### あらまし

超高速光ファイバスイッチは、光ファイバ内の非線形光学効果である光パラメトリック増幅を用いた新しい動作原理により、波長変換なしに毎秒テラビット級の超高速光スイッチングと光増幅を同時に実現可能である。本稿では、まず、超高速光ファイバスイッチの構成と動作原理を解説する。つぎに、プロトタイプを用いた実験において、160 Gbps信号光を光通信の全帯域にわたり、10倍以上の増幅効率での光スイッチング動作について述べる。また、光サンプリングモニタおよび光信号再生など、次世代光ネットワーク要素技術への応用の可能性についても述べる。本光ファイバスイッチは、高い効率で超高速の光信号処理が可能であり、今後必要となる省エネ・高効率な光ネットワーク処理への応用が期待される。

### Abstract

This paper describes an optical parametrically amplified fiber switch and its application. The fiber switch enables the ultrahigh-speed switching of data signals at speeds exceeding terabits per second through optical parametric amplification. The principle and configuration of the switch are shown, and a prototype is used to demonstrate the optical switching of data signals at 160 Gbps. A switching bandwidth over the full transmission band and switching gain exceeding a factor of 10 are achieved. Possible applications of this fiber switch to an optical sampling oscilloscope and optical regeneration are also shown in a systematic demonstration. The fiber switch provides highly efficient and ultrahigh-speed optical signal processing performance, and offers the potential to realize flexible and power-effective performance in future photonic networks.



渡辺茂樹 (わたなべ しげき)

富士通研究所桑原フェロー室 所属  
現在、新領域光技術、次世代光処理技術などの研究に従事。



岡部 亮 (おかべ りょう)

富士通研究所桑原フェロー室 所属  
現在、次世代光処理技術などの研究に従事。



二見史生 (ふたみ ふみお)

富士通研究所桑原フェロー室 所属  
現在、次世代光処理技術などの研究に従事。

## まえがき

インターネットを中心とするネットワーク内でのデータトラフィックの急激な増大に対応するため、光ファイバ通信と光ネットワークには、高速・大容量化への更なる進展が必要とされている。一方、将来の光ネットワークには、柔軟で敏速な応答特性とともに、省エネ化・低コスト化を実現する技術が不可欠になる。最も効率的で限界のない光ネットワークの実現に向け、光2R/3R再生<sup>(注)</sup>、波長変換、高解像光モニタなどの光信号処理技術の開発が期待されている。とりわけ、光ネットワーク内を流れるデータ信号を超高速に処理する光スイッチは、重要な要素技術である<sup>(1)</sup>。

実用的な光スイッチには、高い効率に加えて、高いデータ転送速度、光変調方式などに依存しないトランスペアレント特性および広帯域特性が必要である。光ファイバの非線形光学効果を用いることで、100 nmを超える広い波長帯域で、かつ毎秒テラビット級の超高速光処理を実現可能であることが知られている<sup>(2),(3)</sup>。今回開発した光ファイバスイッチ<sup>(4)</sup>は、光ファイバ通信の全帯域において、光増幅を伴う世界最高速の光信号処理が可能である。

本稿では、富士通研究所で開発した超高速光ファイバスイッチの概要を述べ、つぎに光信号処理への応用の可能性を示す。

## 超高速光ファイバスイッチ

### ● 原理

非線形光学効果を用いた光ファイバスイッチの動作原理を図-1に示す。本光スイッチは、非線形効果が発生するための非線形光ファイバと偏光子により構成され、エネルギー源である制御光 $E_p$ と信号光 $E_s$ を合波して非線形光ファイバに入力する。非線形光ファイバの出力端に偏光子を置き、 $E_s$ の偏光状態を偏光子の主軸(図-1の垂直軸方向)に直交するように設定する。この場合、 $E_s$ は偏光子により遮断される。一方、 $E_p$ は、上記信号光に対して約45度傾斜した直線偏光に設定する。制御光の強度が高

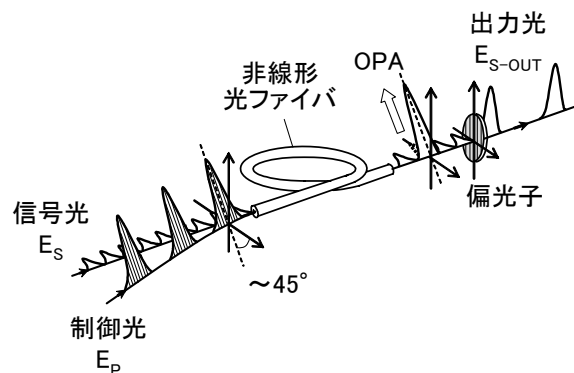


図-1 光ファイバスイッチの動作原理  
Fig.1-Schematic of optical fiber switch.

くなると、光パラメトリック増幅 (OPA : Optical parametric amplification) と呼ばれる非線形効果が発生し、 $E_s$ は $E_p$ の偏光方向 (45度の方向) に対して選択的に光増幅され、一部が偏光子を透過するようになる。この透過光は、制御光のパワーのほぼ二乗に比例して増大するので、光増幅を伴う高い効率での超高速光ON/OFFスイッチが得られる。

### ● 特徴

本光ファイバスイッチでは、出力光がOPA効果により増幅されて出力される一方、OFFレベルが十分低い値まで遮断される。したがって、高い光S/N比と十分な消光比での光スイッチが可能である。また、OPAはフェムト秒級の現象であり、テラビットを超える超高速の光信号処理が期待できる。

OPAの効率 ( $E_s$ のパワー増幅率) は、「光ファイバの非線形性」、「制御光のパワー」および「スイッチを構成している非線形光ファイバの長さ」、の三つの因子の積の二乗に比例して増加する。ファイバ長は短いほど実用的なので、高い効率を得るためには、非線形性と制御光パワーを大きくするのが効果的である。高非線形ファイバ (HNLF : Highly-nonlinear fiber) と呼ばれる非線形性を高めたファイバが開発されており、通常の光ファイバの20倍以上の大きな非線形特性と、伝送路ファイバ並みの低損失特性が実現されている<sup>(5)</sup>。大きな非線形性を有する光ファイバを用いれば、小型実装可能な短尺ファイバを用いても超高速・広帯域な光信号処理を実現することができる。

(注) 品質劣化した信号光をもとの品質に復元させる光技術のこと。振幅増幅 (Reamplification)、波形整形 (Reshaping)、タイミング再生 (Retiming) の三つの機能の光信号再生は、頭文字をとって光3R再生と呼ばれる。前者二つ機能の場合は、光2R再生と呼ばれている。

構成および動作特性

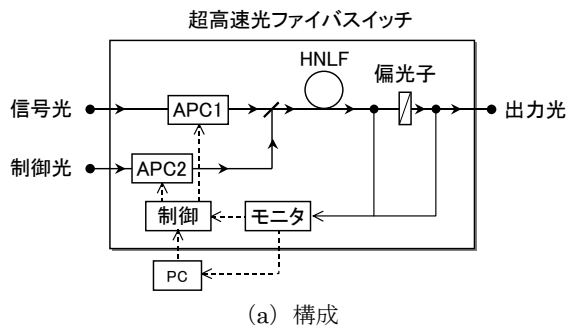
● 構成

超高速光ファイバスイッチの構成を図-2 (a) に示す。信号光 $E_s$ と制御光 $E_p$ の偏光状態を制御する自動偏光制御器 (APC1, 2), HNLFおよび偏光子より構成され, HNLF出力光の偏光状態と偏光子の透過光パワーをモニタし, このモニタ信号をもとに, APC1, 2にフィードバック (Windows-PCによる外部制御) することにより, 最適偏光状態に保持する。プロトタイプの外観写真を図-2 (b) に示す。

● 動作特性

上記光スイッチに, 光ファイバ通信の伝送帯域であるC-band (1530–1565 nm) の波長を有する160 Gbpsの信号光 $E_s$ を, 10 GHzの制御光パルス $E_p$ と合波し, 長さ46 mのHNLFに入力した。 $E_s$ と $E_p$ の偏光状態は, それぞれAPC1, 2を用いて調整している。 $E_p$ の波長は1579 nmに設定した。

$E_p$ の平均パワーを約160 mWに設定し,  $E_s$ の波長をC-band帯で変化させた際の, 光スイッチング効率 ( $E_s$ の出力パワーと入力パワーの比) の変化



幅164×奥行316×高さ138 mm

(b) 外観

図-2 光ファイバスイッチの構成と外観

Fig.2-Optical fiber switch.

(a) Configuration, (b) Prototype (W164×D316×H138 mm).

と, 160 Gbps信号光 $E_s$ から10 Gbps成分を読み出す実験より得られた, 感度劣化を併せて図-3に示す。

●印で示したように, C-band全域にわたり10 dB以上の平坦な増幅特性が得られている。読み出した信号成分に対する受信感度を測定し, 光スイッチ前後の変化を各波長に対して劣化分を評価した結果 (■印) から, 帯域内の各波長において, ほとんど感度劣化のない光スイッチング効果が得られていることが分かる。図-3の結果より, C-band全域をカバーする超高速光ON/OFFスイッチの動作が可能であることが確認できた。また, 信号光の入力パワーを変えて測定した結果, 25 dB以上のダイナミックレンジを有することも確認した。

超高速光ファイバスイッチの応用

● 光サンプリング

光サンプリング・オシロスコープ (以下, 光サンプロ) は, 信号光に対して, 繰返し周波数をわずかに離調させた短パルスを用いて信号光を光スイッチして時間分解し (光サンプリング), スイッチされた光を電的に信号処理することにより, ピコ秒以下の分解能での波形観測が可能なる光モニタである。<sup>6)</sup> 500 GHzを超える観測帯域を実現可能であり, 現状の電気サンプロに比べて格段に高い時間分解能が期待できる。光サンプロ用の光スイッチには, 高いスイッチング効率と超高速特性が必須であり, 光ファイバスイッチを有効に利用することができる。

光サンプロの構成と光ファイバスイッチを用いて観測した160 Gbps信号光の光サンプリング波形を図-4に示す。本光サンプロでは, 高いコントラスト

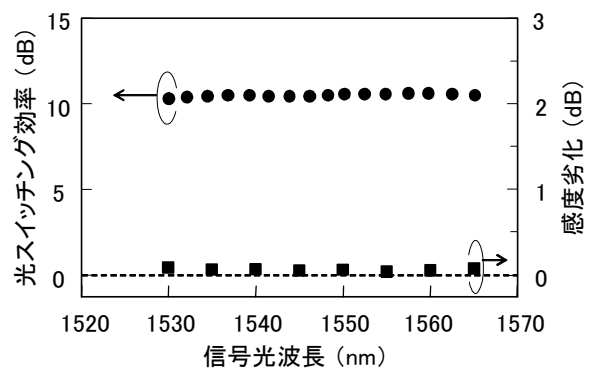


図-3 光ファイバスイッチの動作帯域

Fig.3-Wavelength dependence of switching gain and sensitivity degradation.

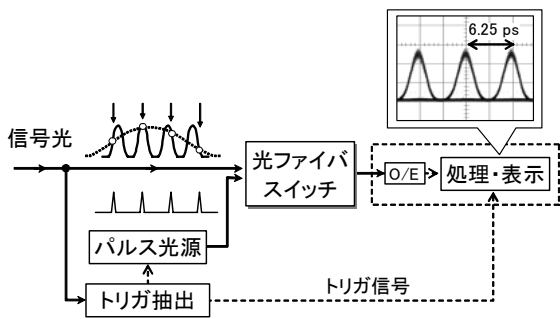


図-4 光サンプロ構成と160 Gbps観測波形  
Fig.4-Optical sampling oscilloscope (Inset: 160 Gbps waveform).

と0.5ピコ秒以下の時間分解能を有する波形モニタが可能であることを実証している。

なお、タイミング制御のため、光位相同期回路を用いてトリガ信号を抽出している。光ファイバスイッチにより、C-band全域での超高速波形モニタが可能であることを確認した。

### ● 光信号再生

光ファイバ伝送では、光ファイバの波長分散、非線形効果、光増幅器の雑音などにより信号光の波形や位相が乱され、信号光の品質が劣化する。信号光の品質劣化がない光ネットワークを実現するためには、信号光の品質を改善する光2R/3R再生技術が必要である。

光ファイバスイッチの増幅率を制御することにより、信号光の波形を整形することができる。著者らのグループでは、Heinrich-Hertz研究所 (HHI) との共同研究において、この方法を用いた160 Gbpsの強度変調信号光および差動位相変調 (DPSK) 信号光の波形整形に成功している<sup>7)</sup> 光2R再生の実現につながる結果であり、今後の展開が期待される。

## む す び

超高速光ファイバスイッチは、波長変換なしに毎秒テラビット級の超高速光ON/OFFスイッチを光増幅を伴って実現可能である。HNLFを用いたプロトタイプによる動作実験結果から、160 Gbps信号光を、光通信の全帯域にわたり、10倍以上のパワー増幅率で光スイッチすることに成功した。また、本光スイッチの光サンプロおよび光信号再生への応用の可能性を示し、動作確認に成功した。

なお、本光スイッチを用いた光サンプロについては、測定器メーカーと協調した動きを進めている。

超高速光ファイバスイッチは、高い効率で超高速の光信号処理が可能であり、今後必要となる省エネ・高効率な光ネットワーク処理への応用が期待される。今後のナノ光技術などの先端光技術の進歩により、非線形光学効果の更なる向上が期待できる。ナノテクノロジーなどの先端技術との融合を図りつつ、光信号処理領域におけるブレークスルー技術の実現に向け、研究開発を進めていく予定である。

### 参考文献

- (1) K. E. Stubkjaer : Semiconductor optical amplifier-based all-optical gates for high-speed optical processing. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, vol.6, p.1428-1435 (2000).
- (2) H. G. Weber et al. : Single channel 1.2 Tbit/s and 2.4 Tbit/s DQPSK transmission. Proc. ECOC2005, Post-deadline paper Th4.1.2, p.3-4, Glasgow, Scotland, September 2005.
- (3) S. Watanabe : Optical signal processing using nonlinear fibers. *J. Optical Fiber Commun. Reports*, Springer NY, vol.3, p.1-24 (2006).
- (4) S. Watanabe et al. : Novel fiber Kerr-switch with parametric gain: Demonstration of optical demultiplexing and sampling up to 640 Gb/s. Proc. ECOC2004, Post-deadline paper Th4.1.6, p.12-13, Stockholm, Sweden, September 2004.
- (5) M. Onishi et al. : Highly nonlinear dispersion shifted fiber and its application to broadband wavelength converter. Proc. IOOC/ECOC '97, Paper TU2C, p.115-118, Edinburgh, Scotland, September 1997.
- (6) C. Schmidt et al. : Optical Q-factor monitoring at 160 Gb/s using an optical sampling system in an 80 km transmission experiment. Proc. CLEO 2002, Paper CThU3, Long Beach, USA, May 2002.
- (7) F. Futami et al. : All-optical amplitude noise suppression of 160-Gb/s OOK and DPSK signals using a parametric fiber switch. OFC2007, Paper OThB3, Anaheim, USA, March 2007