

ビスマス系高非線形光ファイバー

長谷川 智 晴

Bismuth-Based High Nonlinear Optical Fiber

Tomoharu HASEGAWA

High nonlinear optical fibers have been investigated with the intention of the applying in ultra-fast optical signal processing in optical telecommunication systems. Recently, several optical materials with a high nonlinearity have been developed to be utilized for the fabrication of high nonlinear optical fibers. We have developed bismuth-based glasses which exhibits the high optical nonlinearity and good transparency, and we have successfully fabricated a bismuth-based high nonlinear fiber. The step-index type bismuth-based fiber shows an extremely high optical nonlinearity which enables us to construct optical signal processing systems with a significantly short length of the fiber. Photonic crystal fiber made of bismuth-based glasses have been also designed and fabricated to reduce the group-velocity-dispersion.

Key words: bismuth-based glasses, nonlinear optical fiber, photonic crystal fiber, fiber fabrication, group-velocity-dispersion, optical signal processing

光ファイバー伝送による情報通信は、1990年代に WDM (wavelength-division-multiplex) と、EDFA (erbium-doped-fiber-amplifier) 技術によって大いに発展を遂げた。光通信容量は経済の情勢にかかわらず増大し、さらにアクセス系のブロードバンド化に伴い、大都市間の幹線系や大都市内のメトロ系の光伝送システムにおいては、さらなる高速化と大容量化が求められている¹⁾。光通信網におけるノードでの信号処理は光電変換を通じて電気的に行われているが、今後さらに高速化する光通信には、超高速応答である非線形光学効果を応用することが期待される。一般にガラスの光非線形性は大きくないが、光ファイバーという形態をとることによって、長い相互作用長と高い光パワー密度を得ることができる。光ファイバーの非線形性を利用して、交差位相変調 (XPM)、自己位相変調 (SPM)、四光波混合 (FWM) による光信号処理や光 3R (regenerating, retiming, reshaping) が研究されている^{2,3)}。広く用いられている高非線形光ファイバーは石英をベースとしているが⁴⁾、本来的に光非線形性が小さく、所望の非線形効果を

得るためには一般的に数 m から数百 m の長さが必要である。一方、テルライトガラス⁵⁾ や重金属含有ガラス⁶⁾、As, Se, S などを用いたカルコゲンガラス⁷⁾ など、高光非線形性を有する材料をファイバーに应用する研究も行われ、成果を上げている。本稿では、非石英系高非線形材料のひとつである、酸化ビスマス系ガラス (以下、ビスマスガラス) を用いた高非線形光ファイバーの開発について述べる。

1. 非線形光ファイバー

1.1 ファイバーの光非線形性

ファイバー中の非線形光学効果には、非線形屈折率変化によるものと非線形光散乱によるものがある。本稿では前者について述べる。後者はファイバーラマン増幅器に应用されている。強度 I の光によって、線形屈折率 n_0 の物質の屈折率が $n = n_0 + n_2 I$ となる時、 n_2 が非線形屈折率である。 n_2 は三次の光学非線形性に由来しており、非線形感受率 $\chi^{(3)}$ と $n_2 = 12\pi^2 \chi^{(3)} / (n_0^2 c)$ の関係がある。光ファイバーそのものの非線形性は γ によって表されること

旭硝子(株)中央研究所 (〒221-8755 横浜市神奈川区羽沢町 1150) E-mail: tomoharu-hasegawa@agc.co.jp

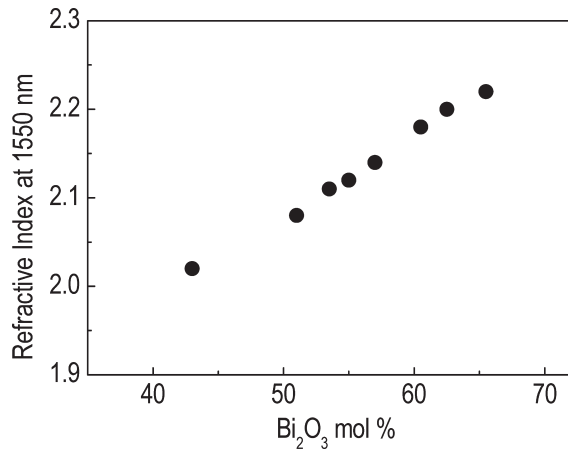


図1 ビスマスガラスにおける Bi_2O_3 濃度と 1550 nm における屈折率の関係。

が多い⁸⁾。

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}} \quad (1)$$

ここに、 λ は波長、 A_{eff} はファイバーの有効コア断面積である。 γ の単位は $[\text{W}^{-1} \text{km}^{-1}]$ であって、1 W の光が 1 km のファイバーを伝搬したときに受ける位相変調量を $[\text{rad.}]$ 単位で表したものである。式 (1) によれば、光ファイバーの非線形性を高めるには、コア径を小さくする、または、コア・クラッドの屈折率差を大きくとることによって A_{eff} を小さくするか、 n_2 の高い材料を選択する必要がある。光ファイバーはガラスのもつ透明性を利用したデバイスであるため、多くの場合、使用波長は吸収端から離れた非共鳴領域である。その場合、三次の光非線形性は線形屈折率によって経験的に決まり、

$$n_2 = \frac{12\pi^2}{n_0^2 c} \left(\frac{n_0^2 - 1}{4\pi} \right)^4 \times 10^{-10} \quad (2)$$

となるため^{9,10)}、ガラスにおいては屈折率が高いことが、高い n_2 を得るための指針となる。

1.2 ビスマスガラス

Bi_2O_3 は単独でガラスを形成しないが、他の酸化物と混在することによりガラスを形成することができる¹¹⁾。 Bi^{3+} には $6s^2$ の孤立電子対が存在するため大きな分極率を有し、これを含むガラスが高い屈折率を示すと考えられている。われわれは、非線形光学応用を目的として Bi_2O_3 を主成分とするビスマスガラスを開発してきた。図1に、 Bi_2O_3 濃度と通信波長帯である 1550 nm での屈折率の関係を示す。ビスマスガラスは多成分ガラスであるが、屈折率は強く Bi_2O_3 濃度に依存することがわかる。ファイバー形状に成型可能で、かつ化学安定なガラスとして、 Bi_2O_3

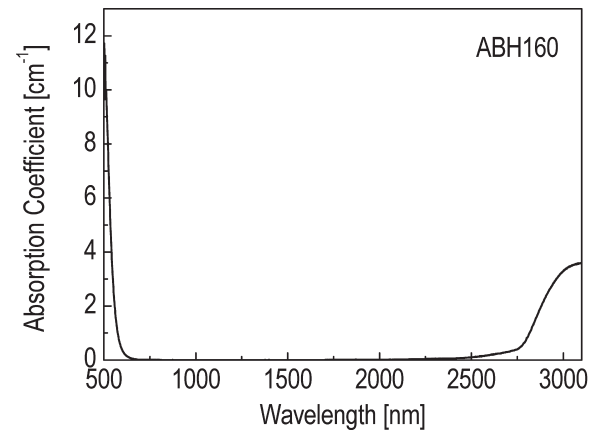


図2 ビスマスガラス (ABH160 $\text{Bi}_2\text{O}_3=65.5 \text{ mol}\%$) の吸収スペクトル。

濃度 64.5 mol% のガラス (ABH160) を開発した。このガラスの屈折率は 1550 nm において $n=2.22$ に達し酸化物ガラスとしては最も高いものである。図2に ABH 160 の吸収スペクトルを示す。青～紫外域と赤外に吸収が存在するが、通信波長帯の周辺は本質的に透明である。このビスマスガラスの光学非線形性を、フェムト秒レーザーを用いた Z-Scan 法により測定したところ、748 nm で $\chi^{(3)} = 4.9 \times 10^{-11} \text{ esu}$ ($n_2 = 3.8 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{W}$)、非線形吸収係数は 769 nm で $\beta = 0.8 \text{ cm/GW}$ であった¹²⁾。ビスマスガラスは、これまで報告のある重金属含有高非線形ガラスに比べ、高い非線形屈折率と低い非線形吸収を両立している¹³⁾。

2. ビスマス系高非線形光ファイバー

2.1 光非線形性

1章2節の ABH160 をコア材料として Step-Index 型ビスマス系高非線形光ファイバー (bismuth-based high non-linear optical fiber: Bi-NLF) を作製した。クラッド材料は、低屈折率化のために Bi_2O_3 含有量を減らし、かつ、ガラス転移温度 T_g や粘性が ABH160 に近くなるよう組成調整を行ったビスマスガラス (AB027) を開発し利用した。光ファイバーの非線形性はコアの有効断面積 A_{eff} に反比例するため、コア径は光の広がりを表すモードフィールド径が最小になるように選んだ¹⁴⁾。表1に Bi-NLF の諸元を、図3に断面図の顕微鏡写真を示す。作製された Bi-NLF は石英ファイバーとの融着接続が可能である。融着接続損失は現状でおよそ 2 dB/point、またファイバーの光伝搬損失は、およそ 2~3 dB/m の程度である。Bi-NLF の非線形性を四光波混合 (FWM) の生成効率により見積もった。1550 nm のポンプ光 (光周波数 ω_p) の入射下

表1 Step-Index 型 Bi-NLF の特徴.

	Bi ₂ O ₃ mol%	<i>n</i> at 1550 nm	<i>T_g</i> [°C]
Core (ABH160)	65.5	2.22	369
Cladding (AB027)	55.0	2.13	367
Core diameter [μm]	1.61		
Mode field diameter [μm]	1.97		
Cladding diameter [μm]	125		

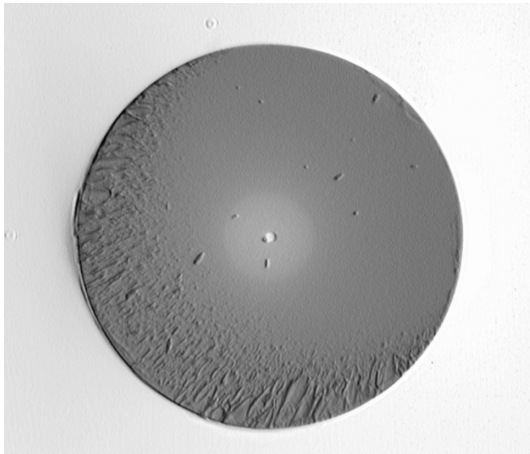


図3 Step-Index 型 Bi-NLF の断面図.

において、シグナル光 (ω_s) を入れた場合、 $\omega_{FWM} = 2\omega_p - \omega_s$ の位置に生じる FWM 光パワー P_{FWM} は、伝搬定数の差による位相不整合 ($\Delta\beta = \beta_{FWM} + \beta_s - \beta_p - \beta_p$) とファイバーの非線形性に依存する¹⁴⁾。図4に、70 cm の Bi-NLF を用いた FWM の実験結果を示す。1 m に満たない短尺ファイバーであるにもかかわらず、強い FWM が観測されている。特に、 $\omega_s \sim \omega_p \sim \omega_{FWM}$ である場合、FWM 光パワー P_{FWM} は、ポンプ光、シグナル光のパワーを P_p , P_s として、

$$(P_{FWM}/P_s)^{1/2} = \gamma P_p \{1 - \exp(-\alpha L)\} / \alpha \quad (3)$$

となる。ここで、 α はファイバーの伝搬損失、 L は長さである。この P_{FWM}/P_s 比は図中の (*) で示した箇所から算出する。見積もられた非線形定数は、 $\gamma = 1200 \pm 100 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ であった。一般的な石英系光非線形ファイバー ($\gamma \sim 20 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$) に比べ、極めて大きな非線形性を有することがわかる¹⁵⁾。この大きな非線形性により、短尺な Bi-NLF を用いて、全光スイッチ、OTDM 信号の MUX/DEMUX、光信号再生がデモンストレーションされている¹⁶⁻²¹⁾。

2.2 群速度分散

図4には、シグナル光とポンプ光の波長差を変化させた場合の FWM 生成効率の変化も示している。 ω_s と ω_p が離れると、群速度分散 (group velocity dispersion: GVD) に

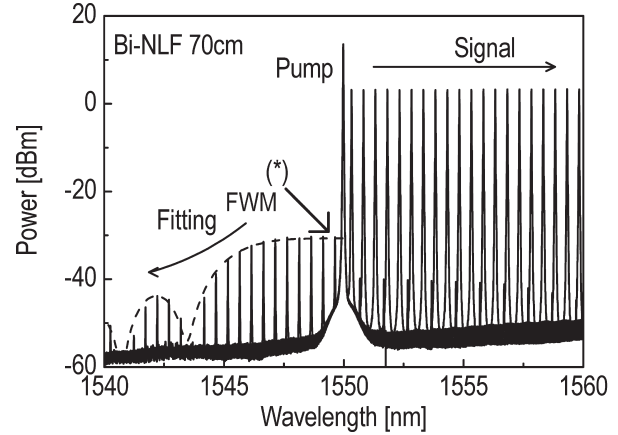


図4 70 cm の Bi-NLF における FWM. (*) 位置での変換効率から非線形定数 γ を算出する。シグナル光の波長変化による FWM の生成効率変化を $D = -270 \text{ ps/nm/km}$ でフィッティングした結果も点線で示す。

よる位相不整合により、FWM の生成効率が下がることがわかる。計算によるフィッティングから、Bi-NLF の GVD は 1550 nm において $D \sim -270 \text{ ps/nm/km}$ であった¹⁵⁾。この値は 1 nm の波長間隔の光信号が、1 km 伝搬するとき 270 ps の時間差がつくことを示している。Bi-NLF の GVD は石英系ファイバーに比べかなり大きく、FWM 変換効率の帯域が狭まるため、光信号処理において問題になることが指摘されている²²⁾。

3. GF 型ビスマス系フォトニッククリスタルファイバー

フォトニック構造を導入することによって、光ファイバーの GVD を低減させることができる²³⁾。GVD は群速度の波長に対する分散を意味するので、光ファイバーの色分散 D と関係づけられる。色分散 D はガラス材料固有の材料分散 D_M と、おもに屈折率分布に依存する構造分散 D_W の和で表される。高屈折率ガラスは吸収端の位置が使用波長に近く、 D_M が大きくなる傾向にある。ABH160 の場合、1550 nm で $D_M \sim -200 \text{ ps/nm/km}$ である²⁴⁾。 D_W は空孔によるフォトニック構造の導入で制御することができる。われわれは、比較的簡便に空孔を導入することのできるグレープフルーツ (GF) 型構造を考案した²⁵⁾。図5にビスマス系フォトニッククリスタルファイバー (Bi-PCF) の概念図と、実際に作製した GF 型 Bi-PCF の断面 SEM 写真を示す。コアの周囲はほぼ空気層であり、強い光閉じ込めによる高非線形性も期待できる。このような構造で、テルライトガラスや鉛ガラスでの PCF (またはホーリーファイバーともいう) が作製されている^{26,27)}。この GF 型 Bi-PCF は、機械加工によりあらかじめ空孔を形成したガラスロッドを線引きすることによって得ることができる。

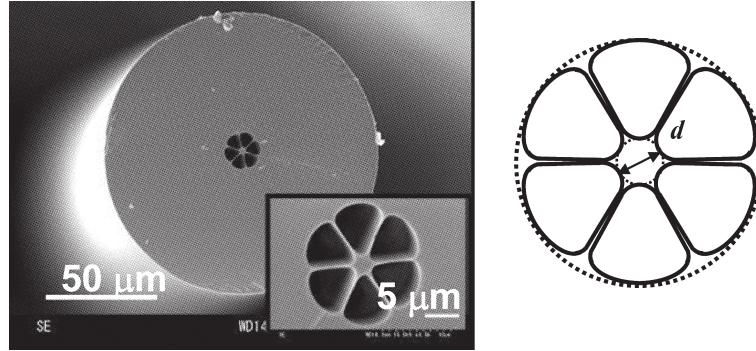


図5 GF型 Bi-PCF の構造概念図と断面 SEM 写真。

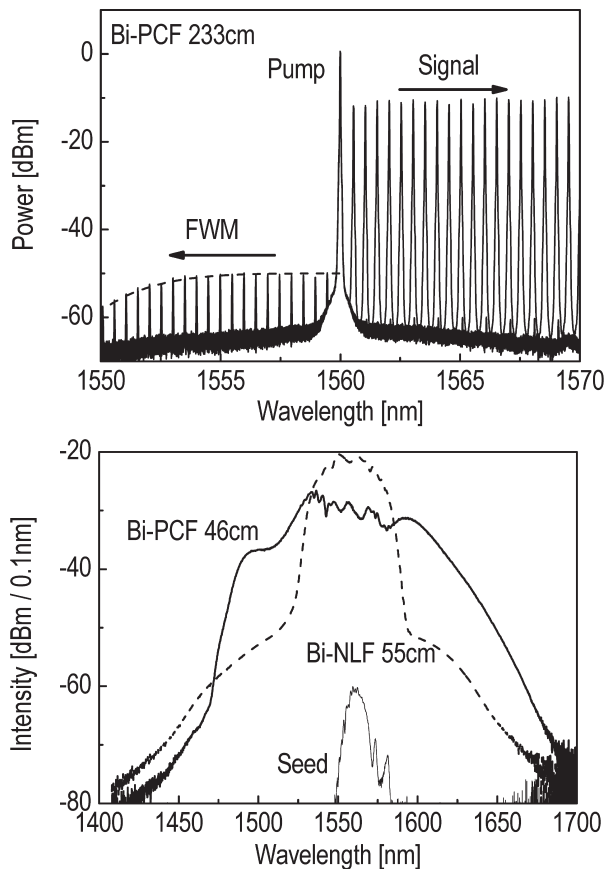


図6 (上図) GF型 Bi-PCF における FWM, GVD 計算に用いたフィッティング曲線を点線で示す。(下図) GF型 Bi-PCF と Bi-NLF における, SPM によるスペクトル拡大, Seed は入射パルススペクトルを示す。

GF 型 Bi-PCF には, より安定で微細構造成型に適したガラス (加熱延伸工程での結晶析出や金属還元) に強い) である必要があるため, 低 Bi_2O_3 ガラス ($\text{Bi}_2\text{O}_3=57 \text{ mol}\%$, $n=2.14$) を用いている。計算により GVD を見積もり, 構造設計を行った。作製された GF 型 Bi-PCF はコア径 $d=2.7 \mu\text{m}$ であった。図 6 (上図) に, GF 型 Bi-PCF で観測された FWM を示す。図 4 に示した Bi-NLF の FWM

発生光の波長依存性と比較して, GF 型 Bi-PCF の波長依存性は群速度分散特性の改善により, フラットな特性を示していることがわかる。GVD は $D=-25 \text{ ps/nm/km}$, 非線形定数はおよそ $\gamma\sim 780 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ と見積もられた。 γ の大きさに比べて FWM 変換効率が低いのは, 大きな接続損失 ($\sim 6 \text{ dB}$) によるものである。高非線形低分散ファイバーで顕著な非線形現象に, SPM によるスペクトル拡大がある。図 6 (下図) に, 同程度の長さの GF 型 Bi-PCF と Bi-NLF における SPM によるスペクトル拡大の比較を示す。GF 型 Bi-PCF がより SPM が顕著である。このように, GVD 低減には大きな効果のある GF 型構造であるが, 大きな空孔を有する構造のため, 低損失での融着接続は困難である。また, わずかなコア径のずれが GVD の大きな変動の原因となるため, GVD のファイバー長手方向の安定性が確保できないという問題がある。

4. 通常型ビスマス系フォトニッククリスタルファイバー

一般的な石英系 PCF は最密充填的 (レンコン状) に多数の空孔を有し光学特性を精密に制御できる。非石英系材料ではカルコゲン系ガラスで同様のものが作られている²⁸⁾ (以下, このレンコン状の通常型 PCF を単に PCF と称する)。石英系 PCF は一般的には外形加工した石英ガラス管を多数束ね加熱延伸することにより得られる (Stack and Draw 法)。われわれも Stack and Draw 法による Bi-PCF の作製を試みている。Bi-PCF では, ファイバーの線引き技術を応用して, 多数のガラスキャピラリー (細管) を作製し, それを束ねることによってファイバープリフォームとする方法を考案した²⁹⁾。PCF の構造パラメーターは空孔径 d , 空孔間隔 Λ (またはコア径 R) および空孔数である。作製可能なディメンジョンでの GVD を計算し, 構造を $d/\Lambda=0.6$, $\Lambda=4 \mu\text{m}$, $\text{GVD}=-50 \text{ ps/nm/km}$ として設計した。直径 $500 \mu\text{m}$, 長さ約 10 m のガラスキャピラ

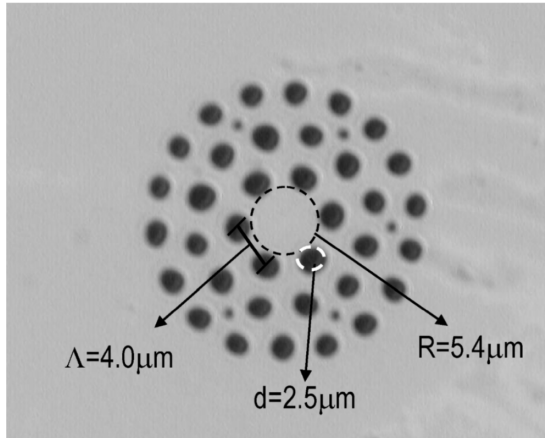


図7 キャピラリーをコアの周囲に36本束ね、加熱延伸して作製された通常型Bi-PCFの断面顕微鏡写真。

リーを作製し、そこから36本のキャピラリーを採取、コアロッドの周囲に束ね、加熱線引きすることによって図7に示されるBi-PCFを得ることができた。線引き時に空孔内を適宜加圧することにより、設計値に近い $d/\Delta=0.63$ を実現している。本ファイバーのGVDをAgilent 21910Aにより測定したところ、1550 nmでおおよそ -50 ps/nm/kmであった。伝搬損失は3.4 dB/mであった。また、本ファイバーは市販の融着器によって、おおよそ3 dB/pointの損失での融着が可能である。コア径が大きいことと、非線形性の低い材料を用いたため、本PCFの非線形性は $\gamma \sim 75$ W⁻¹ km⁻¹である。現在のところはプロセス開発の段階であって、ABH160のような高非線形ガラスでの作製は今後の課題である。

本稿では、非石英系光学材料を用いた高非線形光ファイバーについて、われわれがこれまで開発してきたビスマス系高非線形ファイバーを中心に述べた。ステップインデックス型Bi-NLFについては、すでに多くの非線形信号処理の原理確認が行われている。その一方、GVDと光損失の低減が課題である。GVD低減を目的としたBi-PCFは検討段階であり、製法プロセスのブラッシュアップが必要である。

ここ数年の光通信の先端研究は、より伝送容量を上げるための多値変調方式とデジタルコヒーレント検波に重心が移り、これまでの非線形光ファイバーに対する強いデマンドはやや落ち着いたように感じられる。しかし将来的に非線形光信号処理の導入への期待は大きく、その実用化のためには、外部擾乱に対する安定性、消費電力の低減、システム全体としてのコンパクト化など、多くの課題が残っている。これら課題の解決のために、ガラスをはじめ、よ

り多くの光機能性材料のさらなる開発を期待したい。

文 献

- 1) 総務省：我が国のインターネットにおけるトラフィックの集計・試算. http://www.soumu.go.jp/s-news/2008/080221_3.html 2008年2月27日.
- 2) S. Watanabe and F. Futami: "Optical signal processing with nonlinear fibers," *OFC2003*, TuQ1 (Atlanta, 2003).
- 3) K. Inoue and H. Toba: "Wavelength conversion experiment using fiber four-wave mixing," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **4** (1992) 69-72.
- 4) T. Okuno, M. Hirano, T. Nakanishi and M. Onishi: "Highly-nonlinear optical fibers and their applications," *SEI Tech. Rev.*, No. 62 (2006) 34-40.
- 5) A. Mori, M. Shimizu and H. Masuda: "Ultra-wideband tellurite-based fiber Raman amplifiers," *OFC2003*, ThB2 (Atlanta, 2003).
- 6) V. V. Ravi, K. Kumar, A. K. George, W. H. Reeves, J. C. Knight, P. St. J. Russell, F. G. Omenetto and A. J. Taylor: "Extruded soft glass photonic crystal fiber for ultrabroad supercontinuum generation," *Opt. Express*, **10** (2002) 1520-1525.
- 7) L. B. Fu, M. Rochette, V. G. Ta'eed, D. J. Moss and B. J. Eggleton: "Investigation of self-phase modulation based optical regeneration in single mode As₂Se₃ chalcogenide glass fiber," *Opt. Express*, **13** (2005) 7637-7644.
- 8) G. P. アグラワール：非線形ファイバー光学 (吉岡書店, 1997) pp. 41-49.
- 9) R. W. Boyd: *Nonlinear Optics* (Academic Press, 1992) pp. 189-193.
- 10) C. C. Wang: "Empirical relation between the linear and the third-order nonlinear optical susceptibilities," *Phys. Rev. B*, **2** (1970) 2045-2048.
- 11) W. H. Dumbaugh and J. C. Lapp: "Heavy-metal oxide glasses," *J. Am. Ceram. Soc.*, **75** (1992) 2315-2326.
- 12) T. Hasegawa, T. Nagashima and N. Sugimoto: "Z-scan study of third-order optical nonlinearities in bismuth-based glasses," *Opt. Commun*, **250** (2005) 411-415.
- 13) I. Kang, T. D. Krauss, F. W. Wise, B. G. Aitken and N. F. Borrelli: "Femtosecond measurement of enhanced optical nonlinearities of sulfide glasses and heavy-metal-doped oxide glasses," *J. Opt. Soc. Am. B*, **12** (1995) 2053-2059.
- 14) N. Shibata, R. P. Braun and R. G. Waarts: "Phase-mismatch dependence of efficiency of wave generation through four-wave mixing in a single-mode optical fiber," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-23** (1987) 1205-1210.
- 15) T. Hasegawa, T. Nagashima and N. Sugimoto: "Determination of nonlinear coefficient and group-velocity-dispersion of bismuth-based high nonlinear optical fiber by four-wave-mixing," *Opt. Commun*, **281** (2008) 782-787.
- 16) P. Bakopoulos, O. Zouraraki, K. Vysokinos and H. Avramopoulos: "2x2 exchange/bypass switch using 0.8 m of highly nonlinear bismuth oxide fiber," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **19** (2007) 723-725.
- 17) J. H. Lee, T. Nagashima, T. Hasegawa, S. Ohara, N. Sugimoto, T. Tanemura and K. Kikuchi: "Wavelength conversion of 40-Gbit/s NRZ signal using four-wave mixing in 40-cm-long bismuth oxide based highly-nonlinear optical fiber," *OFC2005*, PDP23 (Anaheim, 2005).
- 18) J. H. Lee, K. Kikuchi, T. Nagashima, T. Hasegawa, S. Ohara and N. Sugimoto: "All fiber-based 160-Gbit/s add/drop multiplexer incorporating a 1-m-long bismuth oxide-

- based ultra-high nonlinearity fiber," *Opt. Express*, **13** (2005) 6864-6869.
- 19) M. P. Fok and C. Shu: "Wavelength multicasting of ASK-DPSK signal using four-wave mixing in a 32-cm highly nonlinear bismuth oxide fiber," *OFC2008*, OMV2 (San Diego, 2008).
 - 20) G. W. Lu, K. S. Abedin and T. Miyazaki: "Wavelength multicasting of DPSK signals using dual-pump FWM in a bismuth-oxide highly-nonlinear fiber," *OFC2008*, OMP4 (San Diego, 2008).
 - 21) M. Yagi, S. Satomi and S. Ryu: "All-optical 2R-regenerative interconnection node for DPSK polarization-division multiplexed systems," *OFC2007*, OThR3 (2007).
 - 22) M. Hirano, T. Nakanishi, T. Okuno and M. Onishi: "Recent progress on silica-based highly nonlinear fiber," *OECC/IOOC2007*, 10C1-1 (Yokohama, 2007).
 - 23) W. H. Reeves, D. V. Skryabin, F. Biancalana, J. C. Knight, P. St. J. Russell, F. G. Omenetto, A. Efimov and A. J. Taylor: "Transformation and control of ultra-short pulses in dispersion-engineered photonic crystal fibers," *Nature*, **424** (2003) 511-515.
 - 24) T. Hasegawa, T. Nagashima and N. Sugimoto: "Dispersion properties of Bi₂O₃-based high nonlinear Optical fiber," *J. Ceram. Soc. Jpn.*, **114** (2006) 224-226.
 - 25) T. Hasegawa, T. Nagashima, S. Ohara and N. Sugimoto: "Novel high nonlinear bismuth-based photonic crystal fiber," *Proc. SPIE*, **6775** (2007) 677509-1.
 - 26) A. Mori, K. Shikano, K. Enbutsu, K. Oikawa, K. Naganuma, M. Kato and S. Aozasa: "1.5 μ m band zero-dispersion shifted tellurite photonic crystal fibre with a nonlinear coefficient γ of 675 W⁻¹km⁻¹," *ECOC2004*, Th336 (Stockholm, 2004).
 - 27) P. Petropoulos, H. Ebendorff-Heidepriem, V. Finazzi, R. C. Moore, K. Frampton, D. J. Richardson and T.M. Monro: "Highly nonlinear and anomalously dispersive lead silicate glass holey fibers," *Opt. Express*, **11** (2003) 3568-3573.
 - 28) J. S. Sanghera, I. D. Aggarwal, L. B. Shaw, C. M. Florea, P. Pureza, V. Q. Nguyen, F. Kung and I. D. Aggawal: "Non-linear properties of chalcogenide glass fibers," *J. Optoelectron. Adv. Mat.*, **8** (2006) 2148-2155.
 - 29) T. Hasegawa and S. Ohara: "Fabrication of bismuth-based photonic crystal fiber by stack and draw method," *OFC/NFOEC 2009*, OThK2 (San Diego, 2009).

(2009年3月10日受理)