

UDC : 535.32 : 666.225

5. 微細構造ガラスを用いた光制御

Control of Light Propagation in Fine Structured Glasses

長谷川 智晴*・大原 盛輝**
Tomoharu Hasegawa and Seiki Ohara

一般的なガラス中の光伝搬は、バルクの光学特性で記述され、線形光学応答だけが問題となる。一方、光ファイバーのような波長と同程度の微細構造中では、光パワー密度が高いため、容易に非線形光学現象が観測され、また光伝搬は構造の影響を大きく受ける。非線形効果や構造の最適化によって、光の位相や振幅、波長、偏光面などを制御することができる。本稿では非線形性を利用した光制御の例としてビスマス系高非線形ファイバーを、フォトニック構造による光伝搬制御の例としてビスマス系フォトニッククリスタルファイバーを、また、非線形性と構造の両者を活用した例としてBTGS結晶化ガラスファイバーによる可変光減衰器を紹介する。微細構造を付与したガラスでは、バルク物性とは大きく異なる機能を発現することができる。

The optical propagation in glasses is generally described by the optical properties of the bulk and linear optical responses. In the micro-structured optical devices, such as optical fibers, nonlinear optical effects are easily observed because of the high power density of light. The propagation of light is also influenced by the structure of the fiber. We can control the phase, amplitude, wavelength and polarization of light when the structure is correctly designed. In this article, we report on the examples of controls of light propagation in fibers: the nonlinear optical control in a bismuth-based high nonlinear optical fiber, the control of optical transmission in a bismuth-based photonic crystal fiber, and the variable optical attenuation in BTGS selectively crystallized glass which utilizes both of the nonlinearity and the fiber structure. It is shown that we can obtain the optical functions which are quite different from the bulk devices in micro-structured optical devices.

1. ガラスによる光伝搬の制御

光伝搬を特徴付けるパラメタは数多く、電場振幅、位相、伝搬モード、コヒーレント性といった伝搬光そのものの性質や、媒質の吸収、屈折率、波長分散、非線形性などの物質と光の相互作用の数々に関するものが挙げられる。電波工学ではこれら光（電磁波）の性質は広汎に活用されているが、板ガラスや光学ガラスのような一般的なガラスでは、バルクの屈折率と吸収係数のみで光学的特長が表現されることが

多い。一方、誘電体多層膜、フォトニッククリスタル、光ファイバーといった波長程度の大きさの構造素子においては、様々な光の性質を制御できるようになる。特に位相、強度、伝搬モードの変調は、アクティブなスイッチ動作、光増幅（減衰）に応用できる。我々はこれまで光伝搬を制御するための様々なファイバー型デバイスを開発している。本稿では、光の位相を光によって変調することのできる非線形光ファイバー、また、電気光学効果による偏光面や伝搬モードの変調によるファイバー型可変光減衰器

* 中央研究所 主席 (E-mail : tomoharu-hasegawa@agc.co.jp)
Senior Researcher of Research Center

**中央研究所 主席 (E-mail : seiki-ohara@agc.co.jp)
Senior Researcher of Research Center

について概説する。なお、光電場の強度を変調（増幅）できる光ファイバーアンプについては以前の本研究報告を参照されたい⁽¹⁾。

2. ビスマス系高非線形光ファイバー

我々が普段の暮らしで目にしている、反射や屈折といった現象はいずれも線形現象である。その限りにおいて勝手に光の波長や（屈折率起因を除いて）位相が変化することは無い。これら光学応答は、物質内に光電場 E で誘起される分極が $P=\chi E$ という線形現象で描かれるからである（ χ は感受率）。しかし厳密には高次の非線形分極まで含めた、

$$P=\chi^{(1)}E+\chi^{(2)}EE+\chi^{(3)}EEE+\cdots, \quad (1)$$

が光応答を決め、光強度が強い場合には2次以降の高次項を含め考える必要がある。ガラスは物質の構造上中心対称性があるため偶数次の項が無く、最低次の非線形分極は3次である。3次の非線形性は様々な効果があるが、特に光信号処理に用いられるのは、2個の入射光子で物質を変調し、波長 λ_s の入射光子を別の波長 λ_{FWM} の光子として出力する四光波混合（FWM）、同じく複屈折を誘起し偏光面を回転させて出力する交差位相変調（XPM）、自身の光強度で自身の位相を自ら変調させる自己位相変調（SPM）がある。これらは原因はすべて非線形感受率を介した位相と強度の変調に由来している。

Bi_2O_3 を主成分とするビスマスガラスは他の酸化物ガラスに比べ大きな $\chi^{(3)}$ を有し、強い光学非線形性を示す。ビスマス系高非線形ファイバー（Bi-NLF）のコアに用いられるABH160（ $\text{Bi}_2\text{O}_3=65.5\text{mol}\%$ ）は770 nmにおいて $\chi^{(3)}=1.9\times 10^{-11}\text{esu}$ であり、これは報告のある他の重金属含有高非線形ガラスにくらべ桁程度大きな値である⁽²⁾。このビスマスガラスを用いて高非線形性を有するファイバーの作製を行っている。Bi-NLFでは、ガラスそのものの高非線形性に加え、コア径を $1.9\mu\text{m}$ とすることにより光閉じ込め強度を限界まで強くし、光密度を高めている。Fig. 1は70cmのBi-NLFにおいて観測されたFWMである。一般的に用いられる石英系ファイバーでは100m～

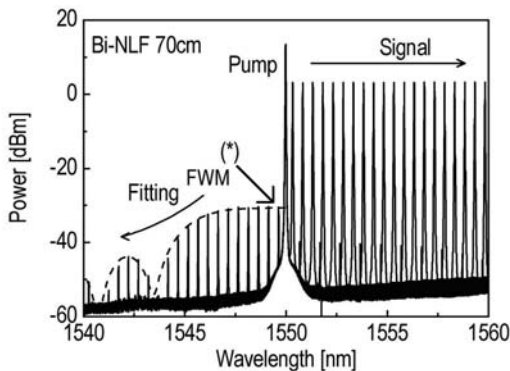


Fig. 1 FWM observed in a 70 cm-long Bi-NLF

1 km程度のファイバーが用いられるが、ビスマスガラスの高非線形性により、超短尺での動作が可能である。ポンプ光より長波長側のSignal光が短波長側に波長を変えてFWM光として出力されている。ファイバーの持つ非線形性は単位 $\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ で表され、1W、1kmあたりの位相変調量がrad.で示されたものである。 γ は図の外挿点（*）でのSignal光FWM光変換効率から計算される。Bi-NLFは $\gamma\sim 1100\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ である⁽³⁾。一般的な石英系非線形ファイバーの場合 γ は $2\sim 20\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ の程度であり、Bi-NLFの高非線形性が際立っている。

一方、Fig. 1にはFWMの変換効率に強い波長依存性が見られている。これは、各々の波長での位相の関係が、ファイバー中の伝搬によってずれていくことを示している。これは、群速度分散（GVD）、すなわち屈折率に波長依存性があることに由来する（正確には波長の二階微分に関係する）。高非線形ガラスは高分散な媒質が多く、一般的なステップインデックス型のファイバーでは分散を低減させることは難しい。Bi-NLFの場合、GVDはおよそ $300\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ である。広く通信に用いられているSMF-28が約 $20\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ であるのに比べて大きな値となっている。

GVDの低減にはフォトニック構造の導入が効果的である。ファイバーコアの周囲に周期的に空孔を配列することにより、ファイバー中の光伝搬を制御できる。我々は、材料の設計、光伝搬シミュレーションを活用し、フォトニッククリスタルファイバーの設計を可能にした。Fig. 2に、我々が設計、製造した2種類のビスマス系フォトニッククリスタルファイバー（Bi-PCF）を示す。a)が高非線形に特化し

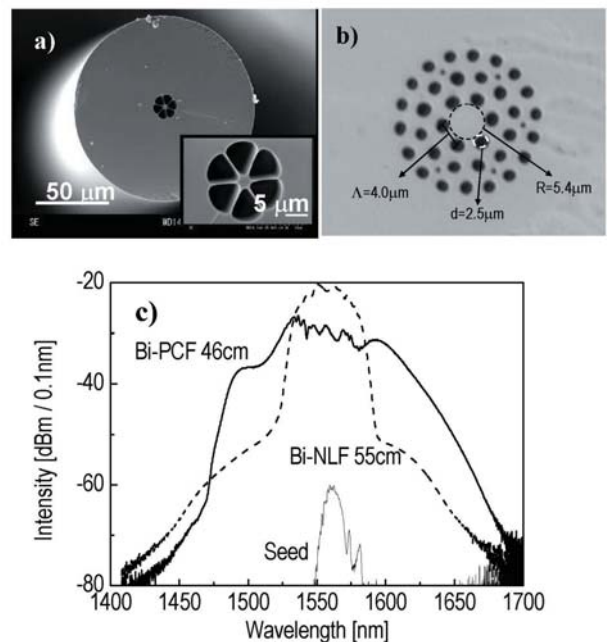


Fig. 2 a) GF-type Bi-PCF, b) Standard Bi-PCF, and c) SPM induced spectral broadening in Bi-NLF and Bi-PCF (GF-type).

たグレープフルーツ (GF) 型、b) が通常構造型である。GVDはa) が -25ps/nm/km 、b) が -50ps/nm/km を示し、Bi-NLFに比べ大きく改善されている。c) に、SPMによるスペクトル拡大の実験結果を示す⁽⁴⁾。SPMでは、伝搬光による非線形分極の影響で過渡的に媒質の屈折率が変化し、結果として伝搬光自身に位相変調がかかり、それによりスペクトルも変化する現象である。図中のseed光が入射光のスペクトルで、SPMにより拡大したスペクトルをBi-NLFとGF型Bi-PCFで比較したものである。Bi-PCFの拡大幅が大きいのは、GVD低減により、伝搬に従って生じる様々な波長間の位相のずれが小さくなっていることによる。

これら非線形光学効果を用いたファイバー形デバイスは様々な形態が提案されており、Bi-NLF、Bi-PCFを用いたスイッチングや信号復調などがデモンストレーションされている。ビスマス系高非線形ファイバーは石英系ファイバーに比べ極めて短尺で動作可能なため、デバイスの小型化、温調の容易化による安定動作、またビスマスガラス自身の高パワー耐性 (高ブリルアン閾値) などの特徴から、将来のキーデバイスになることが期待される。

3. 電気光学効果による可変光減衰器

ファイバー中の光伝搬の様態は、光電場の分布を示すモードと偏光で表される。基本モードでは伝搬光の強度分布はGaussianに近い形状をしており、その e^{-2} 幅をモードフィールド径 (MFD) という。MFDはコアとクラッドの屈折率差に依存するため、屈折率差を制御することができれば、伝搬光の形状を変化させることができる。また、屈折率に異方性があれば、それによる偏光面の回転も生起せしめることができる。電気光学 (EO) 効果は外部電場の印加で物質が複屈折を示す現象で、2次の非線形光学効果に相当する。一般にガラスには偶数次の非線形感受率は存在しないが、非線形結晶を析出させた結晶化ガラスにおいてEO効果が確認されている。我々はEO効果を有する材料を開発し、電場の有無によりアクティブに光伝搬を制御するための光ファイバーの開発を行っている。

2次の光学非線形性を有する結晶を析出させる母

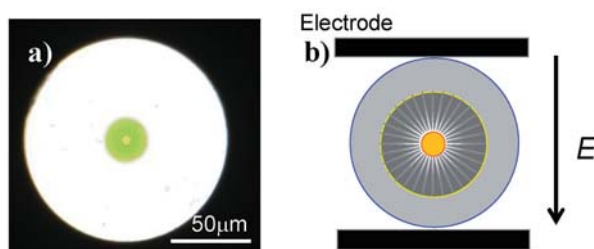


Fig. 3 a) Microscope image of BTGS fiber. b) Schematic picture of crystallized BTGS fiber.

ガラスとして、 $\text{BaO-TiO}_2\text{-GeO}_2\text{-SiO}_2$ (BTGS) ガラスを開発した。結晶の析出はレーザー照射による加熱によって行う。そのためコアの周囲に相当する部分にはCuOを少量ドーピング着色させ、光吸収を効果的に行うようになっている。線引されたファイバーをホットプレート上で加熱しつつ1090nmのレーザー照射を行うことにより、コアの周囲に結晶を析出させることが可能である。Fig. 3 a) に結晶析出前のファイバー断面を示す。レーザー照射により動径方向にc軸配向した結晶が析出する。この結晶が2次の光学非線形性を有することが二倍高調波発生により確認されている。Fig. 3 b) に結晶析出の概念図を示す。これにDC電場Eを印加するとEO効果により、屈折率が変化し、光伝搬に変調を加えることができる。これを利用して、電場印加により制御可能な可変光減衰器 (VOA) を構成した。

まず、Fig. 4 a) に示すような、曲線配置の場合を考える⁽⁵⁾。電場印加に伴い屈折率差が変化し (この場合は減少)、そのためMFDが広がる、すなわちファイバーコアへの光閉じ込め効果が弱くなる。曲線部分では光閉じ込めの弱い伝搬光は、外に漏れ出してしまうため、結果として伝搬光が減衰することになる。Fig. 4 b) に電場印加による透過率減少を示す。曲げ半径は2.5cmである。結晶化の有無によって透過率減少が変化することが分かる。この動作に必要な電力は 2.5kV/mm 時でわずか 0.25nW であった。Fig. 5には、EO効果により誘起される偏光回転を利用したVOAの評価結果を示す⁽⁶⁾。クロスニコル

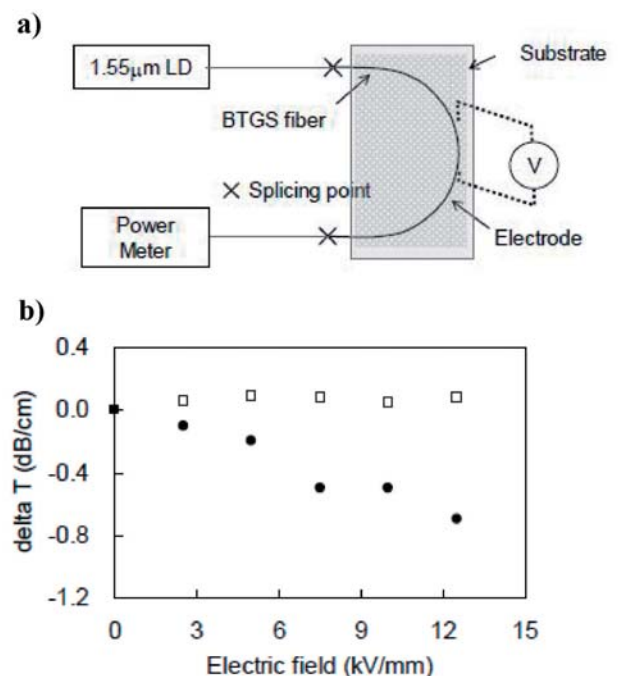


Fig. 4 a) Schematic picture of VOA with bending fiber configuration. b) Transmittance change as a function of electric field, using BTGS fiber (open square), BTGS selectively crystallized fiber (close circle).

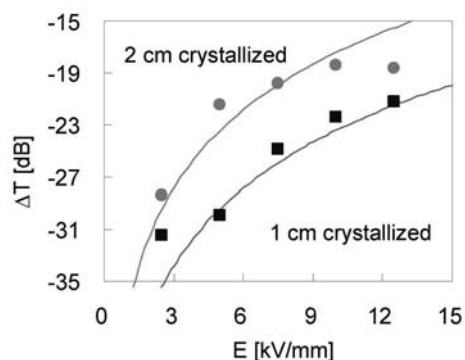


Fig. 5 Transmittance change in VOA with crossed nicols configuration.

配置で偏光面回転によって透過する強度を変化させている。結晶化領域の長いファイバーのほうがより偏光回転が大きく透過光強度が強い。この実験結果から、本材料でのEO効果による複屈折はおよそ $\Delta n = 2 \sim 4 \times 10^{-7}$ の程度であると推測される。

2 次の非線形光学効果を利用した光通信向けのアクティブ機能素子は LiNbO_3 などの非線形単結晶を用いたものが主であり、ファイバーベースのものは希である。既存のファイバーとの接続容易性や、信頼性、保守性を考えた場合、できる限りのファイバー化が望ましい。本稿で紹介したファイバーベースの

VOAのように、2 次光学非線形性を付与した機能性ファイバーの開発が期待される。

以上、ファイバーを用いた光機能素子の例として、非線形ファイバー、VOAを紹介した。これらは、非線形効果、EO効果を用いて、光の位相、周波数（波長）、偏光、MFDなど、光伝搬を記述する多くのパラメータに変調をかけ、光伝搬を制御することにより機能を発現させている。ここで示した例に明らかのように、ガラスへの微細構造の付与と、それによる光伝搬の制御が、より高性能な光学素子の開発に強力なツールとなりうる。

—参考文献—

- (1) N. Sugimoto, K. Ochiai, T. Hirose, S. Ohara, Y. Fukasawa, H. Hayashi, K. Furuki, M. Tojo and Y. Tanaka: Report Res. Lab. Asahi Glass Co., Ltd., **54** (2004) 1-3.
- (2) T. Hasegawa, T. Nagashima, N. Sugimoto :Opt. Comm. **250** (2005) 411-415.
- (3) T. Hasegawa, T. Nagashima, N. Sugimoto :Opt. Comm. **281** (2008) 782-787
- (4) T. Hasegawa, T. Nagashima, S. Ohara, N. Sugimoto :Proc. of SPIE **6775** (2007) 677509-1.
- (5) S. Ohara, H. Masai, Y. Takahashi, T. Fujiwara, Y. Kondo, and N. Sugimoto : in Proc. of European Conference on Optical Communication (ECOC2008, Belgium), Post-Deadline Paper Th.3.C.5, (2008).
- (6) S. Ohara, H. Masai, Y. Takahashi, T. Fujiwara, Y. Kondo, and N. Sugimoto :Opt. Lett. **34**, 1027 (2009).