光結晶化ファイバの創製と電気光学デバイス開発 ~パッシブからアクティブへ~

¹⁾旭硝子株式会社 中央研究所 ²⁾東北大学大学院工学研究科 応用物理学専攻

大原盛輝^{11,2},正井博和²,高橋儀宏²,藤原巧²,近藤裕己¹,杉本直樹¹¹

Development of space-selectively crystallized fiber and electro-optic device ~ Convert from passive to active ~

Seiki Ohara^{1),2)}, Hirokazu Masai²⁾, Yoshihiro Takahashi²⁾, Takumi Fujiwara²⁾, Yuki Kondo¹⁾, and Naoki Sugimoto¹⁾

> ¹⁾ASAHI GLASS CO., LTD. Research Center ²⁾Tohoku University, Department of Applied Physics

1.まえがき

ガラスは我々の生活に密着し,建材用,自動 車用,照明用,ディスプレイ用,テーブルウエ ア用と様々な分野で使われている。いずれもガ ラスの光透過性,易成形性という特徴をうまく 活かし製品化されている。

ガラスの持つ高透過性と易成形性を極めた物 の一つとして光ファイバが挙げられる。石英を ベースとした光ファイバは、伝搬損失が 0.2 dB /km 程度と非常に低い。100 km の伝送におい ても損失は 20 dB 程度であり、元の光の強度に 対して、1% 程度の光強度が得られる。光ファ イバのもつ高透過性の機能を活かし、光ファイ バは光信号の伝送に用いられている。我々が、 インターネットを通じて高速のデーターのやり 取りを行えるのは、光ファイバの存在なくして は成し得なかったといえる。

ここで、光ファイバを基にしたインターネッ

〒221-8755 横浜市神奈川区羽沢町 1150 TEL 045-374-7096 FAX 045-374-8866 E-mail:seiki-ohara@agc.co.jp トシステムでは、単に光を伝搬するだけでな く、信号光を発生させたり、目的の場所に光信 号を伝達するため伝送経路の変更といったスイ ッチング機能が必要になる。また、伝送経路毎 にばらついた光信号強度を均一化するためには 可変光減衰器が用いられる。

これらの光信号の処理には、アクティブな部 品が使われる。高機能でアクティブな光デバイ スとなると、ニオブ酸リチウム(LN)結晶な どをはじめとした、非線形光学結晶が主に使わ れている。アクティブな機能を発現するには、2 次の非線形光学効果が重要な役割を担っている ためである。

ところで, ガラスはランダムな構造で反転対 称性を有するため, 2次の非線形性を本質的に 示さない。そのため, ガラスは, 結晶のような アクティブな機能を必要としない, パッシブな 部品として用いられている。光ファイバも例外 でなく, 基本的にパッシブ部品として用いられ る。

しかし,光ファイバをベースとしたシステム において,結晶により光を制御する場合,一度, 光を空間に取り出しレンズ等により光を結合す る必要がある。ファイバとの接続を考えた場 合,信頼性や接続ロスの点から,ファイバ型の アクティブなデバイスが好ましいのは言うまで も無い。ファイバの材料として広く使われてい るガラスは,自由な形状に成形することが可能 であり,また,熱特性や光学特性を比較的に自 由に設計することが可能であるといった優れた 特性を有する。しかし,ランダム構造で反転対 称性を有するがために偶数次の非線形性を有さ ず,非線形性を利用したアクティブな材料とし て扱われることは稀であった。

そこで,筆者らはガラスの易成形性と結晶特 有の高機能性のメリットを活かしたアクティブ なガラスフォトニック材料の創製を目指した。 図1に我々が検討したファイバ構造を示す。一 般的なファイバは屈折率の高いコアガラスの回 りを,それより屈折率の低いクラッドガラスで 取り囲む構造をしている。それに対して,我々 の検討したファイバ構造は,屈折率の高いコア ガラスの回りのクラッド領域を空間選択的に結 晶化した構造である。

光ファイバにおける光の伝搬状態はコアとク ラッドの屈折率が関係する。ガラス状態である コアと結晶化させたクラッドからなるファイバ に、外部から電界を印加することでクラッドの 屈折率のみが変化し、その屈折率変化に応じて 光の伝搬状態を変化させることが可能となる。



図1 結晶化ファイバの概略図。外部電場により,結 晶層のクラッド領域の屈折率が変化する。

この機能の付与により,ファイバ型アクティブ 材料として用いることが可能となる。

この様な構造のファイバの作製を可能とする には、透明な結晶化ガラス材料が必要となる。 近年、BaO-TiO₂-SiO₂(BTS)系のガラス や、BaO-TiO₂-GeO₂(BTG)系のガラス から、大きな2次非線形性を有する透明結晶化 ガラスが長岡技術科学大学の小松グループらに より報告されている¹⁻³⁾。筆者らは、これらのガ ラス系をベースとして、BaO-TiO₂-GeO₂-SiO₂(BTGS)系のガラスにおいて結晶化ガ ラスファイバに向けた組成検討を行い⁴、ダブ ルクラッド構造の結晶化ファイバの作製に成功 した⁵⁾。

本稿では,光ファイバにアクティブ機能を付 与するために検討したBTGS系のガラスの熱 的特性,BTGS系の結晶化ファイバの作製方 法,および結晶化ファイバを用いたアクティブ なデバイスの一例として,電気光学効果により 光強度を調整する光ファイバ型素子の動作実証 について報告する。電気光学効果は,実質的に 電子の移動を伴わないため,低消費電力なデバ イスが可能である。

2. 選択的結晶化ファイバの作製

ファイバ中を伝搬する光の状態は、コアとク ラッドの屈折率に依存するため、図1に示した コアの外側のクラッドに2次の非線形性を有す る結晶が析出した結晶化ファイバでは、ファイ バ全体に電界を印加することにより、電界に応 じてクラッドのみが屈折率変化する。つまり、 電界が印加されていない場合と、電界が印加さ れた場合では、クラッドの屈折率が異なり、あ たかも別のファイバに変換された様に振舞う。 筆者らは、ダブルクラッド構造のファイバにお いて、第1クラッド領域のみに2次の非線形性 を有する結晶が析出した結晶化ファイバの作製 を試みた。

ガラス組成は、ファイバ化に必要な熱的安定 性と、アクティブな機能を発現するのに重要な 2次非線形性を備えている必要がある。そこ で、大きな非線形性を示す BTG 系と、ガラス 成形温度領域に熱的安定性の優れる BTS 系 の、混晶系である BTG S系で組成検討を行っ た⁴。

図2に、コアガラスと第1クラッドガラスの DTA曲線を示す。昇温速度10℃/分で測定 した結果である。コアガラスの結晶化開始温度 は830℃であるのに対して、第1クラドガラス の結晶化開始温度は789℃である。また第1ク ラッドガラスの結晶化による発熱量はコアガラ スの2.6倍であり、加熱した場合には第1クラ ッドガラスが容易に結晶化する組成となるよう に調整されている。

表1に、図2で示したDTAの結果に加え て、ダブルクラッド構造のファイバに用いたガ ラスのガラス転移温度、結晶化開始温度、屈折 率を示す。ここで第1クラッドとなるガラス組 成 は30 BaO-15 TiO₂-30 GeO₂-25 SiO₂-1 CuOである。結晶化開始温度に着目すると、 第1クラッド組成の結晶化開始温度がコアおよ び第2クラッドガラスに比べて低温であり、第



表 1	ガラ	スの物	加性一	覧表。
-----	----	-----	-----	-----

	ガラス転移 温度(℃)	結晶化 温度(℃)	屈折率 (1550nm)	吸収材
コア	706	830	1.788	なし
第1クラッド	694	789	1.749	あり (CuO)
第2クラッド	707	807	1.746	なし

1クラッドのみが結晶化する温度条件があるこ とが分かる。また,第1クラッドをレーザー照 射により選択的に加熱されるよう,吸収材 (CuO)を添加させている。この材料の組み合 わせにより,結晶化領域を制御することが可能 となっている。

コア,クラッド,それぞれのガラスを,図3 (a) に示す延伸,ロッドインチューブ,線引き というプロセスによりファイバの作製を行っ た。ガラスの写真を図3(b) に示す。第1ク ラッド用のガラスは吸収材を含んでいるために 着色している。また,光が伝搬するコアガラス は、クラッド材よりも屈折率が高いことが必要 であり,屈折率調整のためにビスマスを添加し ている。そのため,ビスマスガラス特有の薄い オレンジ色となっている。しかし,通信などの 光信号処理には1.3µmや1.5µmの近赤外光 が使われるために,この着色は無視できる。な お,第1クラッドガラスの結晶化後の屈折率を 1.784 と見積もっている。

延伸して細くしたコアガラスロッドを,チ ューブ状のクラッドガラスに挿入し,ロッドイ ンチューブ法により,減圧加熱しながら延伸す ることにより,コアガラスとクラッドガラスが 一体化したファイバプリフォームを作製した。 プリフォームを線引きすることにより直径 125 μmのファイバを得た。ファイバの断面図を図 3 (c) に示す。コア径は 6.5μm である。

BTGS系ガラスファイバにおいて,結晶化 したファイバは放射方向に c 軸配光することが 確認されている^{4,0}。この特異な分極構造は BT G系のガラスから作製した単一組成のファイバ と同様である⁷⁾。同心円状に同じ構造であるこ とから,BTGS結晶化ファイバを用いた場 合,ファイバの固定向きに無依存で,デバイス を作製できることを示している。単結晶などの 場合には,カット面を考慮しなければいけない のに比べて大きなメリットになると期待され る。

ファイバ型デバイスを考えた場合、一般的に



図3 (a) ファイバ化プロセスの概略図。(b) コアとクラッドの母ガラス。(c) ファ イバの断面図。

石英系の光ファイバが使われているため,石英 以外の材料からなるファイバにおいては,石英 ファイバと容易に接続できるかどうかが問題と なる。特に,信頼性,コストの面から融着接続 できることが求められる。非石英ファイバにお いて,石英ファイバと接続に成功した例として は,軟化点温度が約560℃と低粘性なビスマス ガラスファイバと石英ファイバの融着接続が報 告されている⁸。

筆者らの開発したBTGS系のガラスも軟化 点温度が約780℃と非常に低く、1600℃以上 の軟化点温度を示す石英とは、熱特性が大きく 異なる。また、選択的に結晶化し機能を付与さ せることを目的として作製されたファイバであ るため、融着接続における加熱により、微結晶 が発生しやすいことが考えられた。

そこで、筆者らはアーク放電方式による加熱 において、加熱中心を石英側に大きくオフセッ トさせると共に、パルス放電間隔、放電強度を 精密に制御することにより、融着接続に成功し た。図4に(a)オフセット無しで融着接続を 行った場合、(b)オフセット融着に加え放電 パルスを精密に制御した場合、の融着部領域の 画像を示す。オフセット無しの場合は、軟化点 温度の低いBTGSガラスが大きく変形した (a)。また、オフセット融着を行う事により変 形は抑制されるが、不均一に微結晶が発生する ことにより融着強度が不十分で剥がれてしまっ た。そこで、オフセットに加えて、精密にパル ス放電を制御することにより、石英ファイバと



図4 BTGSファイバと石英ファイバの融着部の画 像。(a)ファイバ間の中心位置で放電した時の画 像。(b)放電位置,パルス放電時間,強度を精 密に制御して融着した時の画像。

融着接続に成功した(b)⁵。接続損失は 1.5 dB であった。BTGSガラスファイバは石英ファ イバと融着接続でき,石英ファイバをベースと したシステムに適用することが可能である。

3.アクティブデバイス

BTGSガラスファイバに、レーザー照射を 施すことにより、第1クラッドのみを選択的に 結晶化させた結晶化ファイバを作製した。第1 クラッドの銅イオンがレーザー光のエネルギー を吸収し、選択的に加熱されることにより、効 率的に第1クラッドのみが結晶化される。石英 ファイバと融着し、素子化された結晶化ファイ バを用いて、電気光学効果により動作するデバ イスを作製した。

今回,開発した結晶化ファイバによる動作原 理は,ファイバの曲げロスがコアとクラッドの 屈折率差により変化することを応用し,光信号 がコアから放射されることにより透過光強度を 調整する方式⁹⁰と,異方性により偏光状態が変 化することを利用した方式を実施した¹⁰⁰。ここ では,偏光状態を制御する方式について紹介す る。

図1に示すように、ファイバを挟み込むよう に電極を配置し電圧を印加した場合、電気光学 効果の異方性により,信号光は偏光状態によっ て異なった位相変化を受ける。BTGS結晶化 ファイバにおける結晶は放射状に c 軸配光した フレスノイト型の結晶であり。,ファイバの外 側から電圧印加した場合,EOテンソル量とし てゼロでない係数が作用することになる¹¹¹。こ こでは,外部電界が c 軸と一致する成分 r₁₃ と r₃₃ が作用することになる。ここで,r₄ は j 方向 の外部電界により i 方向の光の電界が作用を受 ける成分を表す。

図4に示す実験配置により,アクティブな動 作の実証を行った。偏光子により直線偏光にし た信号光を,偏波コントローラーで調整するこ とにより,外部電界方向から45°の角度になる ように結晶化ファイバに入射する。外部電界が ゼロの場合,結晶化したクラッドの屈折率変化 は生じないため,直線偏光のままファイバ中を 伝搬する。この時,ファイバの出口に設置され た検光子は透過光を遮断する向きに配置されて おり,検出される光の強度はゼロとなる。一 方,外部電界が印加された場合,光の電界方向 が,外部電界と平行成分と垂直成分により,異 なった位相変化が生じる。位相変化量により, 直線偏光の光は,楕円偏光,円偏光,楕円偏光, 直線偏光と偏光状態を変化する。

結晶化領域が1cmの場合と2cmの場合の 透過光強度と印加電界との関係を図5に示す。 横軸は電界であり単位はkV/mmである。な お,この実験における電極間距離は0.4mmで 行った。また,電極間には放電を防ぐために, 絶縁シートが配置されている。電界がゼロの場



合,透過光強度はゼロである。電界が強くなる に従い,位相の変化量が増大し,検光子から抜 けてくる光の強度が強くなっていることが分か る。また,結晶化領域が長いほど,より検光子 から抜けてくる光の強度が大きくなることが分 かる。特筆すべき特徴として,この結晶化ファ イバによる光デバイスは,電気光学効果により 動作するため,実質的に電子の流れを伴わない 電圧駆動であることから動作電力が n W 程度 と極めて小さい,超低消費電力型の光デバイス である。

光のコヒーレント特性に関わるこのような偏 光制御デバイスは,従前の強度変調方式から位 相や偏光・周波数などのコヒーレント制御へと 向かう次世代光情報通信システムにおいて,省 エネルギー特性を有する新規アクティブデバイ スとして大いに期待される。

4.むすび

ランダムな原子配置で凍結されたガラス構造 では、2次の非線形性を有しないために、専ら パッシブな機能性材料として用いられてきた。 今回紹介した、空間選択的に2次非線形性を有 する結晶を析出した結晶化ファイバは、ガラス の持つ易成形性と透過性を保ちつつ、結晶特有 の高機能性を取り入れたアクティブな光ファイ バである。この様な、ガラスと結晶のメリット を融合したファイバ型の素子により、電気光学 効果で動作するファイバ型デバイスとしての可 能性を示した。

安定に作製するのは難しく,材料,作製プロ セスの改善といった多くの課題が残されている が,低消費電力なデバイスとして,電気光学効 果により屈折率が変化することを応用した,ス イッチング,センシングなど,様々な分野での 応用デバイス開発に繋がることを期待する。



文献

- Y. Takahashi, Y. Benino, T. Fujiwara, and T. Komatsu: "Formation mechanism of ferroelastic Ba₂ TiGe₂O₈ and second order optical non-linearity in transparent crystallized glasses," J. Non-Cryst. Solids 316, 320–330 (2003).
- 2) Y. Takahashi, Y. Benino, T. Fujiwara, and T. Komatsu: "Large second-order optical nonlinearities of fresnoite-type crystals in transparent surface -crystallized glasses," J. Appl. Phys. 95, 3503–350 (2004).
- 3) H. Masai, T. Fujiwara, Y. Benino, and T. Komatsu: "Large second-order optical nonlinearity in 30 BaO -15 TiO₂-55 GeO₂ surface crystallized glass with strong orientation," J. Appl. Phys., 100, 023526 (2006)
- 4) H. Masai, N. Iwafuchi, Y. Takahashi, T. Fujiwara, S. Ohara, Y. Kondo, and N. Sugimoto: "Preparation of crystallized glass for application in fiber-type devices," J. Materials Res. 24, 288–294 (2009).
- 5) S. Ohara, H. Masai, Y. Takahashi, T. Fujiwara, Y. Kondo, and N. Sugimoto: "Fabrication of BaO–TiO₂ –GeO₂–SiO₂ based glass fiber," J. Ceram. Soc. Jpn. 116, 1083–1086 (2008).
- 6) N. Iwafuchi, H. Masai, Y. Takahashi, T. Fujiwara, S. Ohara, Y. Kondo, and N. Sugimoto: "Crystallization behavior of optical fibers with multi layered structure for nonlinear optical devices," J. Ceram. Soc. Jpn. 116, 1115–1120 (2008).
- 7) Y. Hane, T. Komatsu, Y. Benino, T. Fujiwara : "Transparent nonlinear optical crystallized glass fibers with highly oriented Ba 2 TiGe 2 O 8 crystals," J. Appl. Phys., 103, 063512 (2008)
- 8) S. Ohara, N. sugimoto, K. Ochiai, H. Hayashi, Y. Fukasawa, T. Hirose, T. Nagashima, and M. Reyes:

"Ultra-wideband amplifiers based on Bi₂O₃-ED-FAs," Opt. Fiber Technol. 10, 283-295 (2004).

- 9) S. Ohara, H. Masai, Y. Takahashi, T. Fujiwara, Y. Kondo, and N. Sugimoto: "Variable Optical Attenuation using space-selectively crystallized fiber with second-order optical nonlinearity," in Proceedings of European Conference on Optical Communication (ECOC 2008, Belgium):, Post-DeadlinePaper Th. 3. C. 5, (2008).
- 10) S. Ohara, H. Masai, Y. Takahashi, T. Fujiwara, Y. Kondo, and N. Sugimoto: "Space-selectively crystallized fiber with second-order optical nonlinearity for variable optical attenuation," to be published in Optics Letters.
- 11)応用物理学会光学懇話会編「結晶光学」森北出版 (1975)

ガラスの切断面から凶悪犯逮捕

日本板硝子のガラス分析技術が凶悪犯の逮捕に一役買った。窃盗団が住居に侵入した際に切断した窓 ガラスの端面を調べ、切断に使った工具を特定。逮捕のときに押収した工具と一致した。調査に協力し た BP 研究開発部の機能硝子領域評価グループに、警視庁の組織犯罪対策部から感謝状が送られた。

同グループが協力した事件は、03年1月に東京・世田谷署管内で発生した強盗殺人事件。犯人はダ

イヤモンドカッターを使ってガラスを切断し住居に 侵入して犯行に及んだ。窓ガラスから侵入する場合 は鍵の部分だけを切断するのが一般的だが、犯人は センサーが感知することを見越して人が通れる大き さに開けたという。

同グループは実際に切断されたガラスを分析。切 断面に生じた垂直クラック(ひび)の形状や深さな どを調べて工具を割り出した。クラックの向きを観 察して利き手も割り出した。

窃盗団は08年5月に逮捕。調査に協力した事件 も含めて16件もの犯行を重ねていた。



(2009年3月24日付け化学工業日報記事から転載してNGFが作成)