

# カルコゲナイドガラスファイバの非線形光学素子への応用

NTT光ネットワークシステム研究所

遊部 雅生

NTT光エレクトロニクス研究所

横浜 至、金森 照寿

## Application of chalcogenide glass fibers to nonlinear optical devices

Masaki Asobe

*NTT Optical Network Systems Laboratories*

Itaru Yokohama, and Terutoshi Kanamori

*NTT Opt-electronics Laboratories*

### Abstract

Chalcogenide glass fiber is one of the most promising nonlinear optical media because of its high optical nonlinearity and long interaction length. This paper reports application of chalcogenide glass fibers to ultrafast all-optical switching. Specific linear and nonlinear optical characteristics of chalcogenide glass fiber are reviewed. Recent studies of nonlinear all-optical switching experiments and fiber grating fabrication for dispersion compensation are also discussed.

### 1. はじめに

電気回路では実現が困難と予想される、数十GHz以上の光信号の制御を実現する方法として、非線形光学材料中の非線形屈折率変化あるいは吸収変化を利用して光で光を制御する、全光学的光スイッチングの研究が近年活発に行われている。このような光と光の相互作用を効率良く行うためには、用いる光学媒質が大きな非線形光学定数を有するとともに、高い光パワー密度を長い相互作用長に渡って保持できることが望ましい。カルコゲナイドガラスファイバは上記の条件を満たしうる光学媒質として非常に魅力的な特性を有していることが近年の研究により

明らかになってきた。ここでは、我々が検討してきた全光学的光スイッチングへの適用を中心に、最近の研究状況を紹介する。

### 2. 非線形光学材料としてのカルコゲナイドガラスの特徴

全光学的光スイッチングに用いられる3次の非線形光学材料は大別して共鳴型と非共鳴型に分類することができる。一般に共鳴型は非常に大きな非線形光学定数が得られるため、低パワーでのスイッチング動作が可能であるが、光の吸収を伴うために、吸収によって生成されるキャリアの緩和時間によって応答速度が制限される。また、熱の蓄積によって温度が変化し、緩和時間の遅い吸収・屈折率変化を伴うなどの問

題がある。一方、非共鳴型は光の吸収がほぼ無視できる波長領域で用いるために、3次の非線形電子分極による高速応答が保証される。しかし、一般に非線形光学定数が小さいために、低パワーでのスイッチング動作を実現するためには、光導波路構造を形成し、高い光パワー密度と長い相互作用長を確保する必要がある。

ガラスは他の材料に比べてファイバ型の導波路形成が比較的容易であり、主に非共鳴型として用いられる。その典型的な例は通常の石英系の光ファイバであり、その低損失性を活かして各種の全光学的光スイッチングのシステム実験などに利用されている<sup>1</sup>。しかしながら非線形定数が小さいために数kmものファイバが必要となり実用性、安定性に問題がある。このような石英系ファイバの問題点を解決するために各種ガラスの非線形光学定数が調べられた。図1は各種の高屈折率ガラスの $\chi^{(1)}$ 、すなわち $n_0^2 - 1$ と、第三高調波発生 (THG)、縮退四光波混合 (DFWM) 法等により測定された非共鳴領域の3次非線形感受率 $\chi^{(3)}$ の関係を示したものである<sup>2</sup>。一般にカルコゲナイドガラスのような大きな屈折率 ( $n_0$ )を持つ材料は同時に大きな $\chi^{(3)}$ を持つことが知られている。図1からも分かるようにカルコゲナイド系のガラスは、通常の光ファイバに用いられる $\text{SiO}_2$ などに比較し

て2桁ほど大きな $\chi^{(3)}$ を有している。このような大きな非線形性が非共鳴領域で得られることがこの材料の特徴である。

### 3. カルコゲナイドガラスファイバの作製法、損失・分散特性

カルコゲナイドガラスのファイバ化についてはこの材料が0.7~10 $\mu\text{m}$ 帯で良好な透過性を持つことから、長波長通信用の極低損失ファイバ<sup>3</sup>、あるいはCOレーザーのパワー伝送用ファイバ<sup>4</sup>を目的として古くから研究が行われてきた。ファイバの作製法としては、石英ファイバと同様なロッドインチューブ法<sup>5</sup>や二重つぼ法<sup>6</sup>などの方法が報告されている。パワー伝送用のファイバ等ではパワー密度の増大はダメージ閾値の減少をもたらすため、もっぱらコア径の大きなマルチモードファイバが研究の対象であった。図2に二重つぼ法により作成された $\text{As}_{40}\text{S}_{60}$ アークラッドファイバ及び $\text{As}_{35}\text{S}_{65}$ コア- $\text{As}_{35}\text{S}_{65}$ クラッドファイバの損失スペクトルを示す。図に示されるように $\text{As}_2\text{S}_3$ 系マルチモードファイバでは波長1.55 $\mu\text{m}$ 帯において0.1~0.3dB/m程度の損失値が得られており、数十m程度のファイバ長が利用できる可能性がある。

一方、非線形光学素子への応用においては、

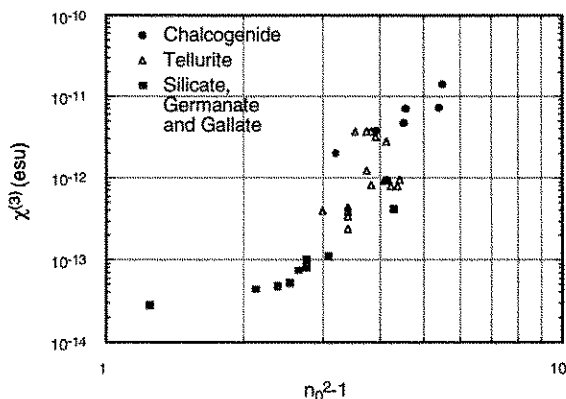


Figure 1 Relationship between linear refractive index and third order optical susceptibilities.

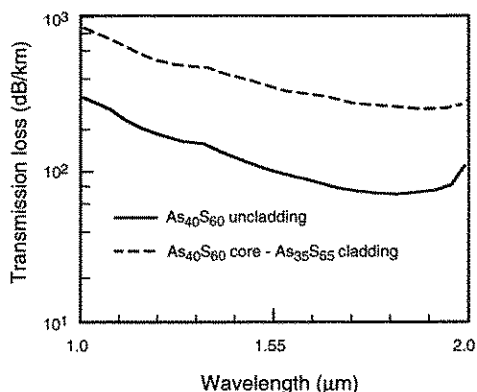


Figure 2 Transmission spectrum of  $\text{As}_2\text{S}_3$  based fiber.

光の干渉を利用したスイッチが構成されるため、ファイバのシングルモード化が必要となる。表1に光スイッチ用に作製された $As_2S_3$ をベースにしたシングルモードファイバの特性と同ファイバを用いた光スイッチの特性を示す。カルコゲナイドガラスを用いた始めてのシングルモードファイバは二重つぼ法を用いて作製された<sup>6</sup>。光スイッチの動作パワーの低減を図るためには、コアの小径化によりパワー密度を増大させることが有効であるが、表1に示すように二重つぼ法によって作製されたファイバではコア径を小さくすることにより、ファイバの構造不整による散乱損が増加し、使用可能なファイバ長が1 m程度に制限される<sup>7</sup>。最近、ロッドインチューブ法によってもシングルモードファイバが試作され、小コア径のファイバにおいても0.6dB/m程度の損失値が実現された。これにより同ファイバを用いた光スイッチの動作パワーも従来に比較して大幅に低減された<sup>8</sup>。今後、ファイバ作製技術の改良によりさらなる低損失化が期待される。

Table I Transmission characteristics of  $As_2S_3$ -based fibers and all-optical switching performance.

configuration	fiber fabrication method	core size ( $\mu\text{m}$ )	loss (dB/m)	fiber length (m)	switching power (W)
Kerr	double crucible	6	0.9	2	11
Kerr	double crucible	3	3.0	1.2	3
NOLM	rod in tube	2.5	0.6	4	0.4

光ファイバの群速度分散は、高速の光パルスを用いて光スイッチングを行う場合、重要なパラメータである。図3に $As_2S_3$ ガラスの群遅延スペクトルを示す。

通常の石英系光ファイバでは材料の零分散波長が $1.3\mu\text{m}$ 付近にあり、導波構造を変化させることにより分散値を制御することができる。しかしながら $As_2S_3$ 系カルコゲナイドガラスの零分散波長は $5\mu\text{m}$ 付近であり、図3に示され

るように通信波長帯( $1.3\sim 1.55\mu\text{m}$ )では大きな正分散を有している。従って石英ファイバのように導波路分散のみで分散を制御することはむずかしく、 $As_2S_3$ 系カルコゲナイドガラスファイバの分散値は材料分散によって支配される。

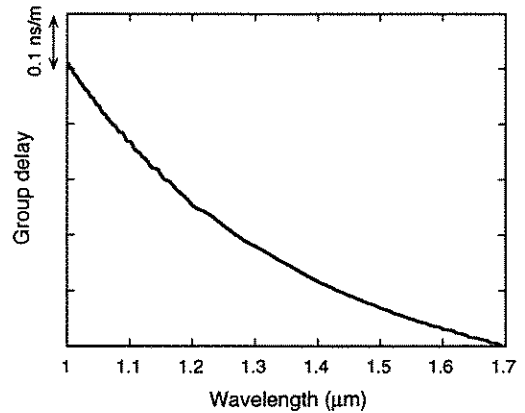


Figure 3 Group delay spectrum of  $As_2S_3$  glass.

#### 4. カルコゲナイドガラスファイバを用いた全光スイッチング

光ファイバを用いた全光スイッチとしては光Kerrシャッタ<sup>9</sup>、非線形ループミラ(NOLM)<sup>10</sup>などの構成が知られている。光Kerrシャッタは偏波回転を利用した進行波型であり、構成が容易である。このため、カルコゲナイドファイバを用いた全光スイッチ動作は光Kerrシャッタ構成により始めて実証された<sup>6</sup>。光Kerrシャッタでは図4に示すように波長の異なる信号光と制御

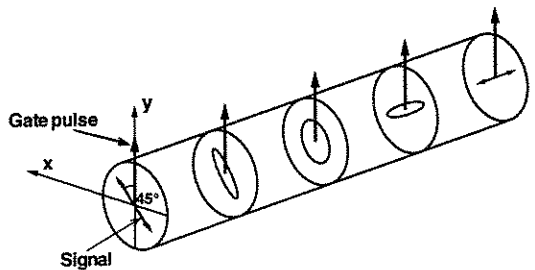


Figure 4 Principle of optical Kerr shutter.

光を両者の偏波が45度の角度をなすように光ファイバに入射する。制御光の引き起こす非線形屈折率効果により信号光の2つの偏波成分のうち制御光と同方向と直交方向の成分の間に位相差が生じる。この位相差が $\pi$ に達すると光ファイバを出射する信号光の偏波は元の偏波と直交した直線偏波となり、スイッチング動作が行われる。表1に示されるように波長1.55 $\mu\text{m}$ 帯で行われた光Kerrシャッタ構成による実験ではファイバ長1m程度で3Wの制御光パワーでの動作が実現された<sup>7</sup>。この動作パワーは数100mの石英ファイバを用いた報告例とほぼ同程度の値である<sup>9</sup>。これらの結果から $n_2$ 値を求めたところ $n_2 = 2.0 \times 10^{-18} (\text{m}^2/\text{W})$ という値が得られ、石英ガラスの $n_2 = 3.2 \times 10^{-20} (\text{m}^2/\text{W})$ に比較して2桁ほど大きな値であることが確認された。

光Kerrシャッタでは図4中の制御光と直交する方向の信号光成分も、制御光と同方向成分の1/3の位相変化を生じるため、非線形効果による位相変化を必ずしも効率的に利用できない。一方NOLMではこのような問題がないため、より低パワーでの動作が可能である。また、偏光子などのバルク型の光学部品を必ずしも必要としないため、取り扱いが容易であり、石英ファイバを用いたシステム実験などに良く用いられている<sup>1</sup>。最近筆者らはカルコゲナイドファイバを用いてもNOLM構成でのスイッチ動作が可能であることを示した<sup>6</sup>。図5に実験系の概略を示

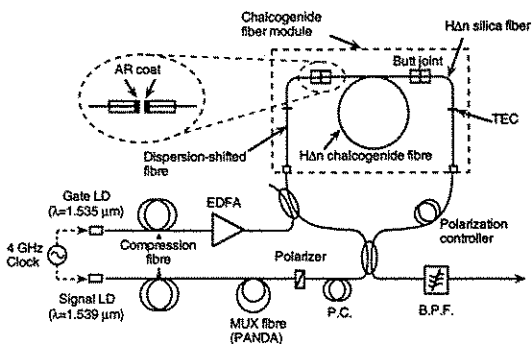


Figure 5 Setup for all-optical switching experiment.

す。NOLMは3dB ファイバカップラとループ状に接続されたファイバ、及び制御光・信号光の合波器によって構成される。3dB カップラで2方向に分けられた信号光はファイバループ中をそれぞれ時計方向、反時計方向に伝搬し3dB カップラに戻ってくる。制御光を入射しない場合、両者の通る光学長は完全に一致するため3dB カップラにおける干渉効果によって、信号光は元の入射されたポートに反射される。一方、制御光を入射した場合、制御光は図面上反時計方向のみに伝搬するため、2つに分かれた信号光のうち反時計方向に伝搬する成分のみが制御光による位相変化を生じる。この結果信号光の干渉条件が変化し、3dB カップラのもう一方のポートに信号光が出力される。NOLMでは制御光と逆方向に伝搬する信号光の位相変化はほぼ無視出来るので光Kerrシャッタに比べて位相変化を効率良く利用できる。石英ファイバ部品との接続を可能にするため、図に示すように小コア径 $\text{As}_2\text{S}_3$ ファイバ、小コア径石英ファイバ、及び市販の分散シフトファイバを接続したファイバモジュールを作製した。カルコゲナイドガラスは屈折率が大きいフレネル反射率が大きい、NOLMにおいてはファイバループ内で信号光の反射を生じると、本来信号光パルスが出射されないはずのタイミングで反射光が3dB カップラから出射されてしまい、消光比の低下を招くとともに、高速のパルス列を低速のパルス列に間引くデマルチプレキシングなどの応用においては符号誤りを引き起こす原因となりかねない<sup>11</sup>。このため $\text{As}_2\text{S}_3$ ファイバと小コア径石英ファイバにそれぞれ無反射コートをし接続を行った。表1に示したようにファイバ長4mを用いたNOLM構成において動作ピークパワーは0.4Wまで低減された。図6にスイッチング実験における信号光の時間波形を示す。このようにスイッチングパワーの低減により半導体レーザとファイバアンプから発生した光パルスでの駆動が可能になり、40GHz から4GHzへの光デマルチプレキシング動作が確認された。

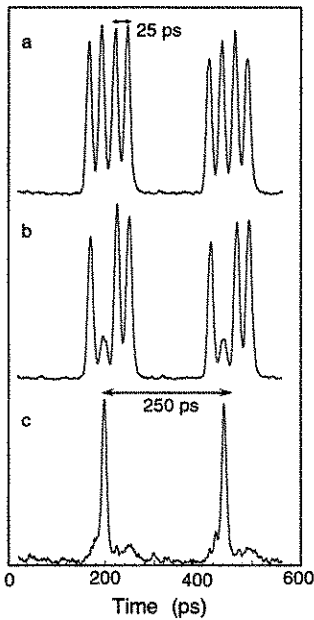


Figure 6 Temporal waveforms of (a) input signal, and (b), (c) switched signals.

## 5. ファイバグレーティングによる分散補正

将来的に0.1dB/m程度の損失がシングルモードファイバで実現されれば数10mのファイバ長が利用可能になり、スイッチングパワーの一層の低減が可能になると考えられる。しかしながら、カルコゲナイドガラスは一般に通信波長帯においては大きな群速度分散を有しており、ファイバを長くしても使用する光パルス幅が狭い場合、パルス広がりや信号光・制御光間のウォークオフによって有効に作用するファイバ長が制限されてしまう。例えば、波長1.55 $\mu$ m帯において信号光と制御光の波長差を4nmとした場合、ファイバ長1mあたりの両者の群遅延差は1.6ps/mとなり、ファイバ長10mでは16psもの群遅延時間差を生じる。実効的な相互作用長は群遅延時間差がパルス幅と同程度になる長さに制限されるため、この場合16ps以下のパルス幅を用いると、スイッチングパワーを長さに関係なく低減することは出来なくなる。このよう

な群速度分散によるスイッチング速度・効率の制限を乗り越えるためには、何らかの方法で分散補正を行う必要がある。

近年紫外光露光により石英ファイバ中にグレーティングを作製することが可能になり<sup>12</sup>、チャープトグレーティングによる分散補正が盛んに研究されている<sup>13</sup>。一方、カルコゲナイドガラスも可視光照射により光誘起屈折率変化を示すことが知られている<sup>14</sup>。そこで、最近我々のグループではカルコゲナイドファイバ中にグレーティングを作製することを検討している<sup>15</sup>。図7に作製に用いられた実験系の概略を示す。

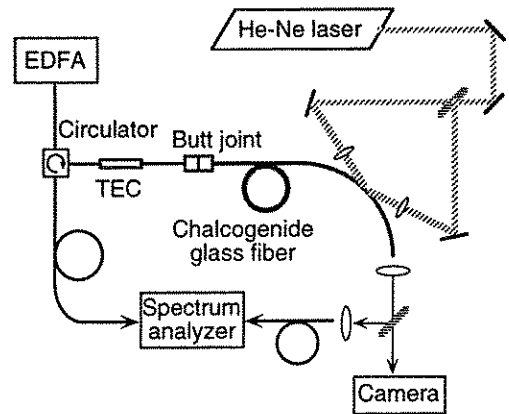


Figure 7 Experimental setup for grating fabrication.

出力50mW、波長633nmのHe-Neレーザをファイバの側面から干渉露光し、反射、及び透過スペクトルをファイバアンプの自然放光を参照光に用いて観測する。図8に作製されたグレーティングの透過・反射スペクトルを示す。露光時間20分、グレーティング長約10mmにおいて90%以上の反射率が容易に得られた。グレーティングの不均一性を考慮すると得られた屈折率変化は $10^{-4}$ 程度と推定される。カルコゲナイドガラスにおいては $10^{-2}$ もの高い屈折率変化が報告されており<sup>14</sup>、書き込み効率の向上により、短いグレーティング長でさらに高い反射効率が見られると予想される。このようなファイバグレー

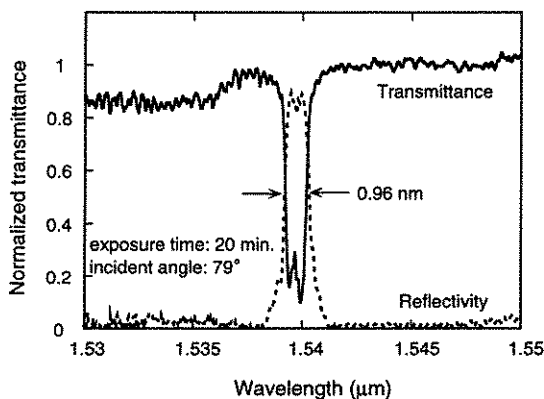


Figure 8 Transmission and reflection spectra of  $As_2S_3$  based fiber grating.

ティング技術を用いて群速度分散を補正することが出来れば、ファイバ長を往復で利用することにより、動作速度を低下させることなく光スイッチのさらなる低パワー化も可能になると期待される。

## 6. その他の非線形光学特性

3 次の光非線形性の大きな材料においては非線形屈折率効果だけではなく、その他の 3 次非線形光学効果も増強される可能性がある。特に二光子吸収は非線形媒質を透過できる制御光パワーを飽和させ、非線形屈折率効果によって達成可能な位相シフト量に制限を与えることが知られている<sup>16</sup>。最近、 $As_2S_3$  ファイバの波長  $1.55 \mu m$  帯における二光子吸収係数は  $\alpha_2 = 6.2 \times 10^{-15}$  (m/W) と非常に小さい値であることが確認され、光スイッチへの応用に際しては位相シフト量の制限の問題はないことが明らかとなった<sup>17</sup>。しかしながら、吸収端波長の 2 倍程度に相当する波長  $1.3 \mu m$  帯における実験では、二光子吸収に起因すると考えられる複屈折の増加やファイバのダメージが観測されており、より短波長の領域で使用する場合は注意が必要である<sup>18</sup>。誘導ラマン散乱についてもその特性が

調べられ、ラマン利得係数が  $4.4 \times 10^{-12}$  (m/W) と石英ファイバに比較して 2 桁ほど大きな値であることが確認された。最近石英ファイバ中の誘導ラマン散乱を利用した増幅器なども報告されており<sup>19</sup>、この分野の進展が期待される。また本論文ではふれなかったがカルコゲナイドファイバ中に希土類を添加したファイバ増幅器などの研究も近年活発化してきており、それらについては文献を参照されたい<sup>20, 21</sup>。

## 7. まとめ

カルコゲナイドガラスファイバの非線形光学への応用について全光スイッチングへの適用を中心に概説した。今後ファイバの低損失化などにより、スイッチングの高効率化が進むとともに各種の応用が広がることを期待したい。

## 参考文献

- 1) S. Kawanishi, H. Takara, K. Uchiyama, M. Saruwatari, and T. Kitoh, *Electron. Lett.*, 29(1993) 2211-2212.
- 2) H. Nasu, T. Uchigaki, K. Kamiya, H. Kanbara, and K. Kubodera, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 31 (1992) 3899-3900.
- 3) T. Kanamori, Y. Terunuma, S. Takahashi, and T. Miyashita, *J. Lightwave Technol.*, 2 (1984) 607-613.
- 4) T. Arai, M. Kukuchi, M. Saito, and M. Takizawa, *J. Appl. Phys.*, 63 (1988) 4359-4361.
- 5) Y. Yoneda, T. Takase, S. Morimoto, and T. Yamashita, *Proc. 5th International Symposium on New Glass*, (1995) 131-132
- 6) M. Asobe, T. Kanamori, and K. Kubodera, *IEEE Photo. Tech. Lett.*, 4 (1992) 362-365.
- 7) M. Asobe, H. Itoh, T. Miyazawa, and T. Kanamori, *Electron. Lett.*, 29 (1993) 1966-1967.
- 8) M. Asobe, T. Ohara, I. Yokohama, and T. Kaino, to be published in *Electron. Lett.*, 32 (1996).
- 9) T. Morioka and M. Saruwatari, *IEEE J. Select. Area. Commun.*, 6 (1988) 1186-1198

- 10) J. Blow, N. J. Doran, B. K. Nayar, and B. P. Nelson, *Opt. Lett.*, 15 (1990)248-250.
- 11) K. Uchiyama, T. Morioka, M. Saruwatari, M. Asobe, and T. Ohara, to be published in *Electron. Lett.*, 32 (1996).
- 12) G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn, *Opt. Lett.*, 14 (1989) 823-825.
- 13) F. Ouellette, *Opt. Lett.*, 16 (1989)303-305.
- 14) K. Tanaka, *Solid State Commun.*, 34(1980) 201-204.
- 15) M. Asobe, T. Ohara, I. Yokohama, and T. Kaino, to be published in *Electron. Lett.*, 32 (1996).
- 16) V. Mizarahi, K. W. DeLong, G. I. Stegman, M. A. Saifi, and M.J. Andrejco, *pt Lett.*, 14 (1989) 1140- 1142.
- 17) M. Asobe, T. Kanamori, K. Naganuma, H. Itoh, and T. Kaino, *J. Appl. Phys.*, 77(1995) 5518-5523
- 18) M. Asobe, T. Kanamori, and K. Kubodera, *IEEE J. Quantum Electron.*, 29 (1993) 2325-2333.
- 19) A. J. Stentz, S. G. Grubb, and T. Nielsen, *Optical Amplifier and their applications*, (1996) Paper SaC1.
- 20) Y. Ohishi, A. Mori, T. Kanamori, K. Fujiura, and S. Sudo, *Appl. Phys. Lett.* 65 (1994) 13-15.
- 21) K. Wei, D. P. Machewirth, J. Wenzel, E. Snitzer, and G. H. Sigel, *J. Non-Cryst. Solids*, 182 (1995) 257- 261.