

平成 22 年 6 月 9 日現在

研究種目： 基盤研究(B)  
 研究期間： 2007～2009  
 課題番号： 19360159  
 研究課題名（和文）高非線形ガラスを用いた超高速・全光学的デバイスの実現とその高性能化  
 研究課題名（英文）Realization of ultrafast all-optical devices using highly nonlinear glasses  
 研究代表者  
 小楠 和彦 (OGUSU KAZUHIKO)  
 静岡大学・創造科学技術大学院・教授  
 研究者番号： 20022246

## 研究成果の概要（和文）：

次世代の光通信に用いる超高速で動作する全光学的デバイスを実現する為に、高非線形カルコゲナイドガラスを用いて、方向性結合器やマイクロリング共振器等の光デバイスが製作された。これらのデバイスは、断面積が  $1 \times 2 \mu\text{m}^2$  程度の単一モードの光導波路から構成されている。これらの試作デバイスの線形及び非線形特性が  $1.06 \mu\text{m}$  の波長において調べられた。共振器の場合、共振器内の光強度が増大するために、コンパクトなマイクロリング共振器でも光双安定性が観測された。これらの非線形デバイスの開発と関連して、本研究で用いたカルコゲナイドガラスの非線形光学特性が、Z-スキャン法と誘導ブリルアン散乱によるパルス圧縮技術を組み合わせた新しいアプローチにより調べられた。またフォトリック結晶リング共振器がコンパクトな非線形光デバイスに応用できるかどうかを調べるために理論的研究がなされた。

## 研究成果の概要（英文）：

In order to realize ultrafast all-optical devices for a next generation of optical communication, optical devices such as directional couplers and microring resonators have been fabricated using highly nonlinear chalcogenide glasses, which are made of single-mode strip-loaded waveguides with a typical cross section of  $1 \times 2 \mu\text{m}^2$ . The linear and nonlinear properties of these devices have been examined at a wavelength of  $1.06 \mu\text{m}$ . Optical bistability even in compact microring resonators has been observed because of the field enhancement in the microring. In relation to the development of these nonlinear devices, the nonlinear optical properties of chalcogenide glasses used in this study have been investigated using a novel technique, which is based on a combination of z-scan techniques and pulse compression due to the stimulated Brillouin scattering in liquids. The photonic crystal ring resonators have also been theoretically investigated to examine the potential applications to compact nonlinear optical devices.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	10,100,000	3,030,000	13,130,000
2008年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野： 工学

科研費の分科・細目： 電気電子工学 電子デバイス・電子機器

キーワード： 光デバイス・集積化

### 1. 研究開始当初の背景

インターネットの急激な普及に伴い、世界中を駆け巡る情報量は毎日に増大し、従来の電子技術による信号処理は限界に近づいている。それを打破するには、光信号を光で直接、超高速で制御できる全光学的非線形デバイスの実現が不可欠である。この光-光制御には、物質の屈折率が光強度によって変化する非線形屈折率効果(屈折率  $n = n_0 + n_2 I$ 、ここで  $I$  は光強度) が用いられる。非線形デバイスの原理は、屈折率変化  $\Delta n = n_2 I$  を位相変化  $\Delta\phi = \Delta n k_0 L$  (ここで  $L$  は光の伝搬距離) に変換し、更に光の干渉効果等を使って光の振幅を変化させる。しかし、非線形屈折率  $n_2$  が大きく且つ超高速 (1 ps 以下) で応答する優れた非線形光学材料が無い為に、全光学的非線形デバイスを実現することは甚だ困難である。また超高速で動作する非線形デバイスを実現するには、デバイスの寸法をできるだけ小さくする必要があり、必然的に光集積回路型のデバイスが必要となる。

2000 年頃から、世界中で大きな非線形性を示すカルコゲナイドガラス (S, Se, Te を含む非晶質半導体) に関心が集まった。2004 年頃に、本研究代表者は  $As_2Se_3$  に Ag をドーピングすることにより、ガラスの中で一番大きな非線形性を有する Ag-As-Se 系ガラスを開発した。またカルコゲナイドガラスは非常に大きな利得係数を有し優れた誘導ブリルアン散乱(SBS)媒質であることを見いだした。尚、同時期にラマン利得係数が非常に大きくなることも別の研究者によって見いだされている。本研究を開始する少し前には、デバイスの作製に必要な Ag の光ドーピング技術と低損失な (波長 1.05  $\mu\text{m}$  において、0.5 dB/cm) 単一モード 3 次元光導波路の作製技術を確立しており、本格的に非線形光デバイスの試作に取り組み始める段階に達した。

### 2. 研究の目的

本研究代表者らが開発した Ag-As-Se や

As-Se 系カルコゲナイドガラスの高い非線形性とガラス固有の優れた加工性を利用して、次世代以降の光通信において必要とされる超高速で動作する全光学的超高速光スイッチと光双安定デバイスを実現する。尚、光双安定デバイスは入出力光強度の間にヒステリシス特性を示すものであり、このデバイス一つで光情報処理に必要な殆ど全ての処理 (AND、OR の光論理演算、波形整形、微分増幅等) が可能である。本研究では、非線形光デバイスの中で最も基本的な方向性結合器とリング共振器を使ったデバイスの実現を試みる。デバイスを構成する光導波路には、ストリップ装荷光導波路を用いるが、デバイスの小型化のために光導波路の細線化とフォトニック結晶化の検討も行う。

デバイスの構成材料であるカルコゲナイドガラスは、大きな非線形性だけでなく特有な色々な光誘起現象を呈し、実に変化に富んだ不思議な物質である。この材料の優れた特性と可能性を引き出すには、その材料の物性を良く把握することが必要である。サブテーマとして、As-Se や Ag(Cu)-As-Se 系ガラスの非線形性と光誘起現象の詳細について調べる。これらのガラスが優れた誘導ブリルアン散乱(SBS)媒質であることを見出しているため、この SBS の過渡特性を明らかにし、新しい応用を探る。

### 3. 研究の方法

#### (1) 非線形光デバイスの作製と評価

高非線形 Ag-As-Se 系ガラスを用いて方向性結合器とリング共振器を試作し、超高速で動作できる非線形光スイッチと光双安定デバイスの実現を目指した。このような非線形光デバイスの最も重要な構成要素は、3次元光導波路である。図 1 (a) に本研究で使用したストリップ装荷導波路の構造と寸法を示す。この導波路は、ストリップの下の導波層に光を閉じ込めて伝搬させるので伝搬損失が低くなり、また導波路のサイズを大きく取れるので、作製と導波光の励振が比較的容易になる。方向性結合器は 2 本の導波路を 1-2  $\mu\text{m}$

の間隔で接近させ、入射光強度の強弱によって2つの出力ポートからの光出力を空間的に切り替えるものである。リング共振器は真っ直ぐな1本或いは2本の導波路と円形なリング共振器(導波路)から構成されるものであり、非線形領域では光双安定デバイスとして動作する。

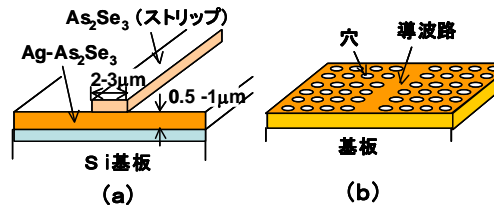


図1 本研究で用いる3次元光導波路。(a)ストリップ装荷導波路、(b)フォトニック結晶導波路。

このような光デバイスは、次の手順でホトリソグラフィにより作製した。基板に酸化膜付 Si ウエハを用い、その上に  $As_2Se_3$  ガラスを蒸着により堆積させる。そして、その薄膜に Ag を必要な量だけ蒸着し、光ドーピング法により  $Ag-As_2Se_3$  薄膜を作製する。次に、この薄膜にポジ形レジストを塗布し、デバイスパターンが形成されたマスクを通して紫外線を露光する。そして現像すると、導波路に対応した部分のレジストが除去される。最後に、部分的に除去されたレジストに、ストリップとなる  $As_2Se_3$  ガラスを蒸着し、不要なレジストと  $As_2Se_3$  薄膜を除去すれば、デバイスが得られる。作製したデバイスの導波路に対して、レーザ光を導波させ線形及び非線形な特性を測定できるように、劈開を利用して端面を出す。尚、フォトマスクは電子線描画装置を用いて自作した。

まず試作デバイスの線形な特性を測定した。例えば、リング共振器の場合、デバイスがうまくできていればフィルタ特性を示すので、CW 可変波長レーザと光パワーメータを用いて透過スペクトルを測定して確認を行った。次に、高ピークパワーのレーザ光を用いて試作デバイスの非線形動作の検証を行った。本研究では、ピコ秒 Y L F レーザ(波長  $1.05 \mu m$ 、パルス幅 60-800 ps)と縦単一モード YAG レーザからの光パルス(波長  $1.06 \mu m$ 、パルス幅 12 ns)をフロリナートの誘導ブリルアン散乱(SBS)により 1.5 ns までパルス圧縮して光源に用いた。このような短パルスレーザ、高速フォトデ

テクター、広帯域オシロスコープ(サンプリングオシロスコープ)を用いて、試作した非線形リング共振器の動作確認と入出力特性の評価を行った。尚、入出力特性は入射パルスと出射パルスの波形測定より求めた。

試作デバイスの設計並びに得られた実験結果に検討を加えるために、線形な場合に加えて、強い有限な幅の光パルスがデバイスに入射した時のシミュレーションを行った。即ち、非線形波導方程式をビーム伝搬法、スプリット・ステップ・フーリエ法、反復法等を用いて数値的に解き、デバイスの非線形応答を数値的に明らかにした。尚、その際以下で述べる実験により得られた各種の物理定数を用い、より現実的なモデルで計算を行った。

## (2)カルコゲナイドガラスの非線形光学特性と誘導ブリルアン散乱の測定

非線形デバイスの研究と並行して、カルコゲナイドガラスの非線形光学特性の発現機構の解明のために、新しい3次非線形性(非線形屈折率と非線形吸収係数)の評価法を提案した。非線形性の評価には、通常Zースキャン法が使われるが、その方法に入射パルス幅を変えることで、得られた実験データからより多くの情報を得ようとするものである。一般に、3次非線形性には超高速で応答する光カー効果(非線形屈折率)や2光子吸収(非線形吸収係数)の他に、応答速度が遅く屈折率や吸収係数の変化を引き起こす別の機構(例えば、熱効果、キャリア効果等)が加わる。本手法は、この速い非線形性と遅い非線形性を分離して測定できるという特徴がある。本研究では、縦単一モード YAG レーザからの光パルスを液体の SBS を利用してパルス幅 12 ns から 1.5 ns まで変化させた。更に、遅い非線形性の応答速度を求めるために、過渡吸収の実験を行った。それは、強い短パルスで非線形吸収を発生させ、それを波長が少しずれた弱い CW レーザ光で検出するものである。

光ファイバの SBS は、入射パルスの幅がフォノン寿命に近づくにつれて、実効的に利得係数が小さくなり発生しなくなる。この過渡的な SBS は、SBS の応用並びにロングパルスに対する非線形屈折率効果の応用限界を決めるものである。そこで、そこで、前述のパルス圧縮技術を用いて  $As_2S_3$  ファイバの入射パルス幅の依存性を測定した。

(3) フォトニック結晶非線形デバイス  
 フォトニック結晶 (PC) は、図 1 (b) に示すように誘電体を光の波長オーダーで周期的に配列した人工の物質であり、コンパクトな光デバイスが実現できる可能性がある。そこで、その可能性を探るために、Ag-As-Se や As-Se 系カルコゲナトドガラスを想定して、2次元モデルで非線形 PC リング共振器のモデリングを行った。2次元 PC には、誘電体ロッド型とエアホール型があるが、本研究ではロッドに平行に光の閉じ込めを有するエアホール型を採用し、正方及び三角格子配列を対象とした。平面波展開法や FDTD 法を用いて、PC 導波路及びそれを利用した方向性結合器やリング共振器のバンド構造、透過・反射スペクトル、光双安定性等の計算を行った。

#### 4. 研究成果

大きな非線形性を有する Ag-As-Se 系ガラスを用い、ストリップ装荷導波路をベースにした各種光デバイスの作製技術が確立できた。本研究で作製したデバイスは、方向性結合器、1カプラから成るリング共振器、2カプラから成るリング共振器の3種類である。一例として、図 2 に1カプラ・リング共振器の写真とカプラ（真っ直ぐな導波路とリング導波路の結合部）の拡大写真を示す。導波路ストリップの幅は  $2\ \mu\text{m}$  で、リング半径は  $100\ \mu\text{m}$  である。写真から明らかなように、キズ等の欠陥は見られず、デバイスの形状は大変良好である。このリングは進行波型の共振器になるが、線形な透過スペクトルは予想通りの結果を示した。

試作デバイスの非線形動作であるが、リング共振器に関しては光双安定性が得られている。図 3 に、YLF レーザからの強い光パルスを入力させたときに得られる入出力特性の一例を示す。この場合の入射パルスの幅は  $800\ \text{ps}$  であり、図 (a) は入射パルスと出射パルスの観測波形であり、図 (b) はそれを入射光強度と出射光強度の関係に直したもので、時計回りのヒステリシスループが得られているのが分かる。観測されたデータには、遅い非線形性の影響が含まれており、また使用したオシロスコープとフォトディテクターの

応答速度（立ち上がり時間）は、それぞれ  $70\ \text{ps}$ 、 $35\ \text{ps}$  であることを考えると、数値シミュレーションの結果と良く一致する。

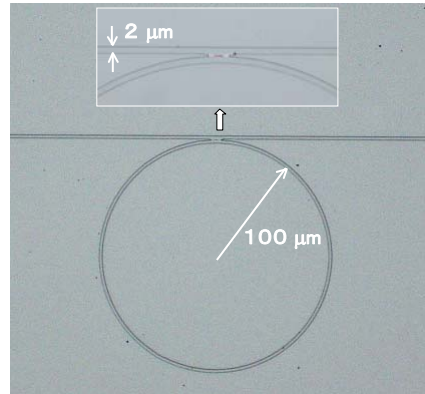


図 2 試作したリング共振器の写真

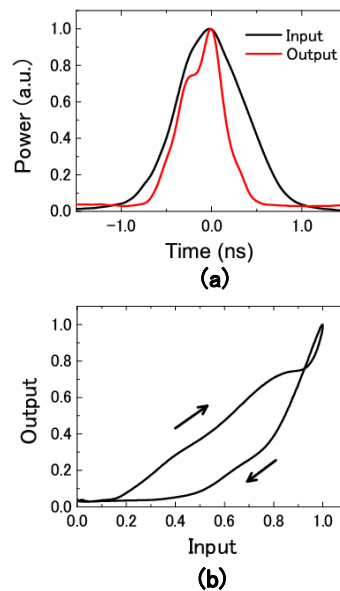


図 3 非線形リング共振器の光双安定性。(a) 入出力パルスの波形、(b) 入出力特性。

一方、方向性結合器の非線形スイッチング動作は確認されていない。光導波路への励振効率が低く、またこのデバイスは共振器ではないのでリング共振器に比べてスイッチングパワーが大きくなっているのが原因と考えられる。励振効率を改善し、結合領域を長く取るなどの工夫が必要である。

サブテマである非線形性そのものの解明に関しては、Z-スキャン法と液体の SBS を利用したパルス圧縮技術を組み合わせた非線形光学特性の新しい評価法を提案し、その為

の基礎理論を構築した。この評価法の特色は、速い非線形性と遅い非線形性を分離できることである。Si 単結晶及びカルコゲナイドガラス ( $\text{As}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{Ag-As}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{Cu-As}_2\text{Se}_3$ ) の非線形性の評価に利用し、多くの新しい知見を得た。特に、カルコゲナイドガラスでは、光誘起現象に関係していると思われる遅い非線形性が存在していることが分かった。その応答速度は過渡吸収の実験より 15-20 ms であることを明らかにした。非線形デバイスのモデリングにおいては、本実験で得られた色々なパラメータの値が用いられ、より現実的なモデルで行われた。また  $\text{As}_2\text{S}_3$  マルチモードファイバの SBS に関しては、ns オーダの過渡特性を明らかにした。

PC リング共振器に関して、誘電体ロッド型のもは理想的な特性が得られるが、実現可能なエアホール型の場合には、必ずしもリングが進行波型の共振器としてうまく動作しないことが分かった。リング共振器に限定すれば、全反射を利用した光導波路を細線化してデバイスの小型化を目指した方が賢明と思われる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 12 件)

- (1) Z. Ma and K. Ogusu, "Linear transmission characteristics and bistable behavior of photonic crystal ring resonators with a triangular lattice of air holes," Jpn. J. Appl. Phys., Vol.49, No.5, 052001, 2010. (査読有)
- (2) K. Ogusu and Y. Oda, "Transient absorption in  $\text{As}_2\text{Se}_3$  and Ag (Cu)-doped  $\text{As}_2\text{Se}_3$  glasses photoinduced at 1.06  $\mu\text{m}$ ," Jpn. J. Appl. Phys., Vol.48, No.11, 110204, 2009. (査読有)
- (3) Z. Ma and K. Ogusu, "Power splitter based on cascaded multimode photonic crystal waveguides with triangular lattice of air holes," Opt. Commun., Vol.282, No. 17, pp. 3473-3476, 2009. (査読有)
- (4) K. Shinkawa, Y. Oda, Z. Ma, and K. Ogusu, "Transient stimulated Brillouin scattering in a multimode  $\text{As}_2\text{S}_3$  glass fiber," Jpn. J. Appl. Phys., Vol.48, No.7, 070215, 2009. (査読有)
- (5) K. Ogusu and K. Shinkawa, "Optical nonlinearities in  $\text{As}_2\text{Se}_3$  chalcogenide glasses doped with Cu and Ag for pulse durations on the order of nanoseconds," Opt. Express, Vol. 17, No.10, pp.8165-8172, 2009. (査読有)
- (6) Z. Ma and K. Ogusu, "FDTD analysis of 2D triangular-lattice photonic crystals with arbitrary-shape inclusions based on unit cell transformation," Opt. Commun., Vol.282, No. 7, pp.1322-1325, 2009. (査読有)
- (7) K. Shinkawa and K. Ogusu, "Pulse-width dependence of optical nonlinearities in  $\text{As}_2\text{Se}_3$  chalcogenide glass in the picosecond-to-nanosecond region," Opt. Express, Vol.16, No.22, pp.18230-18240, 2008. (査読有)
- (8) M. Li, T. Takahagi, K. Ogusu, H. Li, and Y. Painchaud "A comprehensive study of the chromatic dispersion measurement of the multi-channel fiber Bragg grating based on an asymmetrical Sagnac loop interferometer," Opt. Commun., Vol.281, No.20, pp.5165-5172, 2008. (査読有)
- (9) K. Ogusu and K. Shinkawa, "Optical nonlinearities in silicon for pulse durations of the order of nanoseconds at 1.06  $\mu\text{m}$ ," Opt. Express, Vol.16, No.19, pp.14780-14791, 2008. (査読有)
- (10) K. Ogusu and K. Takayama, "Optical bistability in photonic crystal microrings with nonlinear dielectric materials," Opt. Express, Vol.16, No.10, pp.7525-7539, 2008. (査読有)
- (11) K. Ogusu and K. Takayama, "Transmission characteristics of photonic crystal waveguides with stubs and their application to optical filters," Opt. Lett., Vol.32, No.15, pp.2185-2187, 2007. (査読有)
- (12) K. Ogusu, T. Hagihara, Y. Hosokawa and M. Minakata, "Dependence of photo-oxidation on Ag(Cu)-content in Ag(Cu)- $\text{As}_2\text{Se}_3$  films," J. Non-Cryst. Solids, Vol.353, No.11-12, pp.1216-1220, 2007. (査読有)

[学会発表] (計 10 件)

- (1) Linear transmission spectra and bistable behaviors of channel drop filters based on photonic crystal ring-like resonators (馬沢涛、小楠和彦)、電子情報通信学会、光エレクトロニクス研究会、OPE-2009-176, pp.19-24, 2010.1.28, 京都。

- (2)  $\text{As}_2\text{Se}_3$  ガラスを用いた非線形マイクロリング共振器の作製と評価 (山崎研太郎、小田洋祐、小楠和彦)、2009 春季第 56 回応用物理学関係連合講演会、1a-B-1, 2009.4.1, 東京.
- (3) Design of a power splitter based on cascaded multimode photonic crystal waveguides with hole-type square lattice (馬沢涛、小楠和彦)、2009 年電子情報通信学会総合大会、C-3-7, 2009.3.17, 松山.
- (4)  $\text{As}_2\text{Se}_3$  カルコゲナイドガラスの非線形光学特性のパルス幅依存性とその発現機構 (新川健太、小楠和彦)、電子情報通信学会、光エレクトロニクス研究会、OPE-2008-27, pp. 59-64, 2008.11.14, 東京.
- (5) SBS パルス圧縮技術を用いた Z スキャンによる光学材料の非線形性のパルス幅依存性の測定 (新川健太、小田洋祐、小楠和彦)、平成 20 年度電気関係学会東海支部連合大会、0-344, 2008.9.19, 春日井.
- (6) SBS パルス圧縮技術を利用した光学材料の非線形特性のパルス幅依存性の測定 (新川健太、小田洋祐、小楠和彦)、2008 年電子情報通信学会ソサイエティ大会、C-4-17, 2008.9.17, 川崎.
- (7) Si の非線形光学特性の入射パルス幅依存性 (新川健太、小楠和彦)、2008 年秋第 69 回応用物理学学会学術講演会、2a-ZB-9, 2008.9.2, 東京.
- (8) Simple finite-difference time-domain method for modeling the bandgap of two-dimensional photonic crystals with triangular lattice (馬沢涛、小楠和彦)、2008 年電子情報通信学会総合大会、C-3-102、2008.3.21, 北九州.
- (9) エアホール型フォトニック結晶リング共振器の透過特性と光双安定性 (高山功介、小楠和彦)、電子情報通信学会、光エレクトロニクス研究会、OPE-2008-27, pp.59-64, 2008.3.7, 東京.
- (10) スタブ付きフォトニック結晶導波路の伝搬特性とフィルタへの応用 (高山功介、小楠和彦)、電子情報通信学会、光エレクトロニクス研究会、OPE-2007-27, pp.59-64, 2007.6.29, 東京.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小楠 和彦 (OGUSU KAZUHIKO)  
静岡大学・創造科学技術大学院・教授

研究者番号：20022246

### (2) 研究分担者 (H19 年度のみ)

李 洪譜 (LI HONGPU)  
静岡大学・工学部・准教授  
研究者番号：90362186

### (3) 連携研究者

なし