

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月4日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360141

研究課題名（和文）カルコゲナイド細線導波路を用いた非線形光デバイスの開発とその応用

研究課題名（英文）Realization of nonlinear optical devices using chalcogenide wire-waveguides

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）：

コンパクトな全光学的非線形デバイスを実現する為に、高非線形カルコゲナイド導波路の微細化が実験的に行われた。電子ビームリソグラフィを用いて、方形誘電体導波路型の細線導波路を実現できた。しかし、導波路コアと基板の接触面積が小さい為に、誘電体コアが所々で剥離し、歩留まりは大変低いものとなった。そこで、多モード干渉（MMI）カプラを持ったマイクロリング共振器が、付着力が強いストリップ装荷導波路を用いて試作された。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。残念ながら、光双安定性は未だ観測されていない。また、速い非線形性と遅い（蓄積される）非線形性を持ったリング共振器の動特性が新しく開発した反復法により調べられた。更に、非線形MMIカプラの連続（cw）光及びパルス光に対する応答が、それぞれビーム伝搬法とモード結合理論を使って数値的に調べられ、多くの知見が得られた。

研究成果の概要（英文）：

In order to realize compact all-optical devices, thinning of chalcogenide optical waveguides with a high nonlinearity was experimentally demonstrated. We were able to fabricate wire-waveguides with a rectangular core using electron beam lithography. However its yield rate was very low because some parts of a dielectric core came off owing to small contact area between the core and the substrate. Therefore microring resonators with multimode interference (MMI) couplers were fabricated using strip-loaded waveguides, where its adhesion is increased. The linear and nonlinear properties of fabricated devices were examined at a wavelength of $1.06 \mu\text{m}$. Unfortunately, optical bistability in the microring has not yet been observed. In relation to the development of these nonlinear devices, the dynamic behavior of ring resonator with fast and slow (cumulative) optical nonlinearities was theoretically investigated using a novel iterative method. Moreover the cw response and pulse response of a nonlinear MMI coupler were investigated using the beam propagation method and coupled-mode theory, respectively and many useful insights were obtained.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	10,000,000	3,000,000	13,000,000
2011年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2012年度	1,900,000	570,000	2,470,000
年度			
年度			
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

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

ブロードバンド通信の爆発的な普及に伴い処理すべき情報量は益々増大し、光通信における信号処理速度の向上が重要な課題になっている。現在は電氣的に信号処理を行っているが、超高速で応答する非線形光学効果を利用して、光信号を光で直接制御・処理することができる全光学的非線形デバイスの実現が強く望まれている。しかし、超高速で応答する優れた非線形光学材料が無い為に、その実現は困難を極めていた。

現在、高非線形材料として注目を集めているものは、カルコゲナイドガラス (S、Se、Te を含んだアモルファス半導体の総称)、特に As-Se をベースにしたガラスである。研究代表者は、As₂Se₃ ガラスに Ag をドープすることにより、ガラスの中で一番大きな非カー係数(石英の数千倍)を有する Ag-As-Se 系ガラスを開発している。カルコゲナイドガラスは、誘導ラマン散乱(SRS)と誘導ブリルアン散乱(SBS)の利得係数も物質の中で最大になる。尚、後者の利得係数が非常に大きくなることは、本代表者によって見出されている。数年前から、低損失の As-Se や As-S 光ファイバが開発され、市販されるようになった。相互作用長が長く取れ、動作光パワーを低くできるこの非線形ファイバを用いて、新しい応用の研究が活発化した。これまでに、光 2R 再生、パルス圧縮、波長変換、スローライト、レージング等の機能が実証されている。しかし、集積回路型の非線形光デバイスの開発は世界的に見ても緒に就いた状態である。

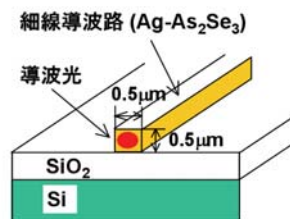
現在、シリコンフォトニクスが注目されているが、そこではコアとクラッドの屈折率差を大きくしたシリコン細線導波路が使われている。細線導波路は強い光の閉じ込め効果により数 μm の曲率半径で曲げることができ、光回路の小型化、高性能化を可能にするものである。シリコンフォトニクスに匹敵するようなカルコゲナイドフォトニクスの進展が望まれている。

2. 研究の目的

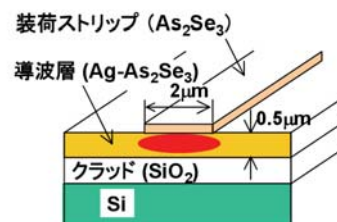
本研究では、研究代表者が開発した高非線形 Ag-As-Se ガラスを用いた細線導波路を開発

し、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の超高速光スイッチと光双安定デバイスの実現を目指す。導波路の細線化に伴って、デバイスの作製と導波路内への光の励振が難しくなる。サブ μm の精度で導波路やデバイスを加工するには、フォトリソグラフィでは無理で、電子ビームかレーザービームによる直接描画に頼らざるを得ない。本研究では、デバイスは電子ビームリソグラフィとドライエッチングを用いて作製する。

先ず、50nm の作製精度で、図 1 (a) に示した細線導波路 (断面寸法：サブ μm ×サブ μm) を作製できる微細加工技術と細線導波路の有効な励振法を確立する。次に、その細線導波路を用いて、方向性結合器と進行波型マイクロリング共振器(リング半径：<10-20 μm) を作製し、その非線形スイッチングと光双安定性の非線形動作を実証し、デバイスの有効性を明らかにする。リング共振器の結合部は、通常直線導波路と曲がったリング導波路からなる方向性結合器でできているが、その結合係数はギャップ(両導波路間隔)に強く依存するので、多モード干渉(MMI)カップラで置き換えたものも検討する。尚、カルコゲナイドガラスの場合、超高速で応答する非線



(a) 細線導波路



(b) ストリップ装荷導波路

図1 光導波路の構造と代表的な寸法

形性に時間に対して積分される遅い非線形性が常に付随することを見出し、この遅い非線形性も取り入れたモデリング手法を開発し、デバイス設計と評価に役立てる。更に、新しいマイクロ共振器を提案・試作し、線形及び非線形特性を明らかにする。また小型化及び高速化の観点から、フォトニック結晶化の検討も行う。

3. 研究の方法

(1) カルコゲナイド光導波路の細線化

細線導波路及び細線導波路を使った光デバイスの作製は、描くパターンが異なるだけで内容は全く同じであるので、ここで纏めて作製法について説明する。図2に作製プロセスを示す。先ずシリコン酸化膜 (SiO_2) 上に As_2Se_3 ガラスを蒸着し、更にその上に Ag を蒸着して、フォトリソングにより $\text{Ag}-\text{As}_2\text{Se}_3$ 膜を堆積する。更にその上にレジストをスピコートし、必要なパターンに応じて電子ビームで描画する。尚、膜の密着性向上のために、HMDS 処理を行った。露光後、現像により電子ビームを照射した部分が取り除かれ、レジスト膜にパターンが転写される。次に、レジスト開口部を反応性イオンエッチング (RIE)により基板面に垂直方向に溝を掘りクラッド部を形成する。最後に、レジストを除去すれば、細線導波路が完成する。尚、RIE は反応性ガスにプラズマ放電を行なわせ、発生したイオンで基板に垂直方向にエッチングを行うものである。本研究では、反応性ガスとしては、 CF_4 、 O_2 を用いた。エッチングの出来具合は、ガスの種類だけでなく、投入電力、ガス流量、エッチング圧力、基板

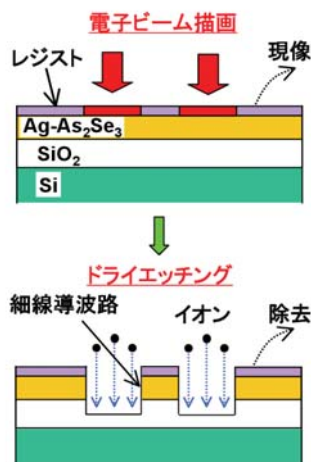


図2 微細加工プロセス

温度に依存するので、太目のマルチモード導波路を試作して、これらの最適なパラメータを見出す。最後に、細線導波路を試作し、導波路表面の荒れ具合をAFMで観察し、更に導波路に光を導波して導波実験を行った。その際、導波路断面積が非常に小さくなるので、できるだけビームスポット径が小さいレンズドファイバを用いて励振効率を改善した。細線導波路の有効性を示すために、その細線導波路の異常分散と非線形性を利用したスーパーコンティニューム (超広帯域なスペクトル広がり) の発生を試みた。

(2) 非線形デバイスの試作と評価

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波長可変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YAGレーザ (波長: $1.06 \mu\text{m}$ 、パルス幅: 400 ps 、繰り返し周波数: $10\text{--}1000 \text{ Hz}$)、高速フォトディテクター (立ち上がり時間: 30 ps)、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。

(3) 各種非線形デバイスの理論的検討

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。

カルコゲナイドガラスでできた非線形MMIカプラにcw光とパルス光が入射した場合の入出力特性を、それぞれビーム伝搬法とモード結合理論を用いて解析した。多モード領域のモード結合方程式の導出に当っては、自己及び相互位相変調項に新しく4光波混合項を加えた。

(4) フォトニック結晶非線形デバイス

フォトニック結晶は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

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 系カルコゲナトイドガラ
スを想定し、FDTD法を用いて、非線形P
Cリング共振器の透過・反射スペクトルと光
双安定性の計算を行った。

4. 研究成果

方形誘電体導波路である細線導波路の微細
加工に必要なRIE装置の導入が1年遅れ、
急いでAg-As-Se導波路作製に最も適した条
件(ガスの種類、ガス流量、エッチング圧力、
エッチング速度)を実験的に明らかにした。
光学顕微鏡やAFMによる観察から、導波路
は綺麗にできるものの、レジストを除去する
際、長い導波路の所々で剥離が生じることが
分かった。これは、図1(a)に示すように、方
形誘電体導波路では導波路コアと下部クラ
ッド(基板)の接触面積が狭く、付着力が弱
くなるためである。HMD S処理を行ってい
るにも拘わらず、この剥離を完全に防ぐこと
はできなかった。スーパーコンティニューム
の発生では、少なくとも5、6cmの長い導
波路(実際は、真直ぐな導波路を何回か折り
返して用いた)が必要になるが、実験に使い
えるような導波路は高々1cm程度のものであ
った。そのような短い導波路を用いて、レー
ザ光を入射して導波実験を行った。試料の長
さ不足と入射光強度不足のために、スーパー
コンティニュームの発生には至らなかった。
電子ビームリソグラフィの場合、フォトマス
クがあれば幾らでもデバイスを作ることが
できるフォトリソグラフィと違って1回の
描画でデバイスは1個しか作れず、しかも歩
留まりが大変悪いので、方形誘電体導波路型
の細線化は無理であると判断した。尚、シリ
コンフォトニクスにおいて、細線導波路が盛
んに用いられているが、これは良質な
SOI(Silicon on Insulator)基板が入手できる
ようになった為である。

そこで、方形誘電体導波路から接触面積が
広く、フォトリソグラフィで製作できるスト
リップ装荷導波路(図1(b))に切り替えて非
線形デバイスを実現させることとした。その
際、導波路の寸法はできるだけ小さくして、
光の閉じ込めを強くした。更に、通常のリン
グ共振器の結合部は方向性結合器を利用し
ているが、製作精度が厳しく要求されるので、
その方向性結合器をギャップの無い多モー

ド干渉(MMI)カプラに置き換えた。カプ
ラの長さを変えるとリングへの結合係数が
変化するので、色々なカプラ長のリング共振
器を試作した。図3に試作したMMIカプラ
を用いたリング共振器の写真を示す。波長可
変レーザを用いて、波長1.06 μm 付近で透過
スペクトルを測定したところ、従来の方向性
結合器を使ったものに比べて、コンスタント
に良好な共振特性が得られた。しかし、非線
形動作であるが、時間不足もあり、光双安定
性は得られていない。

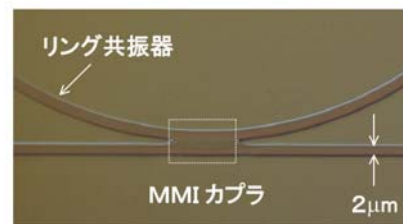


図3 MMIカプラを用いたリング共振器

一方、理論面の研究は順調に行われた。先
ず、応答速度が瞬間的な速い非線形性と遅い
非線形性の両方を持った非線形リング共振
器に光パルスが入射した時の振舞いを計算で
きる新しい手法(反復法)を開発し、遅い非
線形性が光双安定性に与える影響を明らか
にした。遅い非線形性は、入射パルスに渡っ
て非線形な位相変化と吸収変化を時間積分
させ、スイッチングの後のオーバーシュート
やリングングを抑制し、ヒステリシスループ
の幅を減少させ、動作点をシフトさせること
が分かった。尚、このような解析は他に類を
見ず、他の非線形デバイスにも応用できる。

また、非線形MMIカプラに連続(cw)
光及びパルス光が入射した場合の応答が、そ
れぞれビーム伝搬法とモード結合理論を使
って数値的に調べられた。cw光解析から、
入射パワーに応じて、多重スイッチングがお
こることが明らかになった。パルス解析では、
入射パルスの幅が非常に短い場合は、モード
分散と非線形性の相互作用により透過パル
スが不安定になることを見出している。取り
扱われたのは入出力ポートが2x2の場合
であるか、その非線形特性は、方向性結合器
の特性に非常に良く似ていることを明らか
にした。これらの成果は現在投稿中である。

フォトニック結晶に関しては、2つのファ
ブリ・ペロ共振器から成るチャンネル・ドロ
ップ・フィルタと双安定光デバイスが提案さ
れ、線形な場合と非線形な場合の反射、透過

特性がFDTD法により明らかにされた。尚、取り扱われたフォトニック結晶はエアホールの三角格子からなるものである。

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9件)

- (1) L. Xian, P. Wang, K. Ogusu, and H. Li, “Cladding mode coupling in a wide-band fiber Bragg grating and its application to a power-interrogated temperature sensor,” IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 25, No. 3, pp. 231-233, 2013. (査読有)
- (2) K. Ogusu, “All-optical switching in nonlinear multimode interference couplers,” Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 51, No. 8, pp. 082503-1-1082503-5, 2012. (査読有)
- (3) X. Chen, L. Xian, K. Ogusu, and H. Li “Single-longitudinal-mode Brillouin fiber laser incorporating an unpumped erbium-doped fiber loop,” Appl. Phys. B, Vol. 107, No. 3, pp. 791-794, 2012. (査読有)
- (4) S. M. Sharif and K. Ogusu, “Enhanced and constant-value transient diffraction efficiency from a recorded grating in a BaTiO₃ crystal,” J. Sci. Res., Vol. 3, No. 2, pp. 217-224, 2011. (査読有)
- (5) X. Chen, L. Xian, K. Ogusu, and H. Li, “Phase-shift induced in a high-channel-count fiber Bragg grating and its application to multiwavelength fiber ring laser,” IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 23, No. 8, pp. 498-500, 2011. (査読有)
- (6) Z. Ma and K. Ogusu, “Channel drop filters using photonic crystal Fabry-Perot resonators,” Opt. Commun., Vol. 284, No. 5, pp. 1192-1196, 2011. (査読有)
- (7) K. Ogusu and Y. Oda, “Modeling of the dynamic transmission properties of chalcogenide ring resonators in the presence of fast and slow nonlinearities,” Opt. Express, Vol. 19, No. 2, pp. 649-659, 2011. (査読有)
- (8) X. Chen, Y. Painchaud, K. Ogusu, and H. Li, “Phase shifts induced by the piezoelectric transducers attached to a linearly chirped fiber Bragg grating,” IEEE J. of Lightwave Technol., Vol. 28, No. 14, pp. 2017-2022, 2010. (査読有)

- (9) Z. Ma and K. Ogusu, “Linear transmission characteristics and bistable behaviors of photonic crystal ring resonators with a triangular lattice of air holes,” Jpn. J. Appl. Phys., Vol.49, No.5, pp. 052001-1-052001-6, 2010. (査読有)

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

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