

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 24 年 6 月 18 日現在

機関番号：33924

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21360172

研究課題名（和文） 超オクターブコヒーレント光源の研究開発

研究課題名（英文） Development of ultra-octave coherent light source

研究代表者

大石 泰丈（OHISHI YASUTAKE）

豊田工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80360238

研究成果の概要（和文）：

本研究では、これまで困難であった光導波路用ガラス素材のなかでもっとも非線形性の高いカルコゲナイドガラスや赤外透過性の良いフッ化物ガラスをコアとする新規構造の光導波路素子を開発し、可視域から中赤外域に亘るコヒーレント光源の実現を目指した。波長分散を制御できるコンポジット微細構造光ファイバを開発した。さらに微細構造光ファイバの開発、ラマン応答の解明やそれを用いた非線形シュレディンガー方程式によるスーパーコンティニューム光のスペクトル域の解析を行った。また、 $0.35\mu\text{m}$ から $6.2\mu\text{m}$ まで及ぶスーパーコンティニューム光を確認した。このスーパーコンティニューム光は、これまで発生されたものの中で最も広帯域なものである。これら結果により赤外透過性の良いカルコゲナイドガラスを用いたコンポジット微細構造光ファイバにより、さらなるスーパーコンティニューム光の中赤外域への拡張が可能になることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

We studied the supercontinuum light covering the visible to mid-infrared wavelength region using chalcogenide glasses with highest nonlinearity among the glasses and fluoride glasses with high transparency from the ultra-violet to mid-infrared region in this project. We clarified the composite microstructure which can control the chromatic dispersion of chalcogenide fibers. We have clarified the Raman response of these glasses and analyzed supercontinuum generation in the micro-structured fibers using non-linear Schrodinger equation. We obtained the widest supercontinuum light from $0.35\mu\text{m}$ to $6.2\mu\text{m}$. Based on these experimental and theoretical results, we clarified that chalcogenide composite microstructured fiber we developed can generate the supercontinuum light from the visible to mid-infrared region.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	8,700,000	2,610,000	11,310,000
2010年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2011年度	2,700,000	810,000	3,510,000
年度			
年度			
総計	14,100,000	4,230,000	18,330,000

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・電子デバイス

キーワード：広帯域光源、微細構造導波路、非線形光学、光信号処理、光物性

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

1. 研究開始当初の背景

光ファイバは長い距離微小な領域に光波を閉じ込めることができるため、非線形光デバイスの候補と考えられ、光信号処理などへの応用が研究されている。主に石英ファイバを用いて研究が進められてきた。しかし、その低損失性により、長尺なファイバを利用して低い非線形を補う試みがされてきたが、実験室レベルでの特性検証にとどまり、巾広い実用に供されてはいない。このような状況を鑑み、高い非線形性を持った素材を使い高非線形ファイバを開発して非線形光学効果を顕著にさせた光デバイスの実現が研究されている。波長変換、光スイッチなどの光信号処理だけでなく、光源としての応用が考えられている。そのひとつは、スーパーコンティニューム (SC: Supercontinuum) 光源であり、SC光は短パルス光による光ファイバの非線形光学効果によって発生する。これまでに、石英光ファイバを非線形媒体として用い可視域から $2\mu\text{m}$ におよぶ波長域のコヒーレントな光が得られている。中赤外域への波長域の拡大も研究されている。

中赤外域の SC 光源実現の試みは、フッ化物ファイバやカルコゲナイドガラス材料を用いてもなされてきたが、 $1\mu\text{m}$ から $4.5\mu\text{m}$ 程度の波長までしか実現されていない。フッ化物ガラスは $8\mu\text{m}$ 程度まで赤外透過域を有するが、非線形性は石英ガラス以下であり、また、伝送損失も石英ファイバの 100 倍以上あり、非線形媒体としては優れたものではない。一方、カルコゲナイドガラスは光導波路素材の中では、最も高い非線形性を持っており石英ガラスの約 300 倍にも及ぶ高い非線形性を持つものもある。しかし、これまで積極的に非線形導波路素材としては用いられてはいない。その最大の利用は、材料分散値が、通信波長帯で非常に大きく、導波路分散により補償して波長分散値を零にできないためであった。実際、カルコゲナイドガラスの材料分散値が零をとるのは、 $3\mu\text{m}$ 以上の波長域になる。最近、ファイバ径がサブミクロンのいわゆるナノファイバを使った分散制御を試みられているが、ファイバ径がサブミクロンでは取り扱いに難点があり実用的とはいえない。また、波長分散の設計に自由度がなく、限定された特性しか実現できないという問題もあり、カルコゲナイドガラスは非線形光導波路素材としてここ 30 年以上研究されてきたが、実用的な素子としては使われる目途はたっていないといつてよい。

このようにフッ化物およびカルコゲナイドガラスとも広帯域 SC 光発生媒体として可能性は、未知といえる状況であった。

2. 研究の目的

本研究では、これまで困難であった光導波路用ガラス素材のなかでもっとも非線形性の高いカルコゲナイドガラスや赤外透過性の優れたフッ化物ガラスをコアとする新規構造の光導波路素子を開発し、可視域から中赤外域に亘るコヒーレント光源の実現を目指す。また非線形ガラス素材を用いた非線形光学特性を利用した広帯域コヒーレント光発生の限界を見極める。本研究を通して、高非線形導波路素材による高効率光機能素子設計論を構築し、広い分野への応用研究が展開できるよう礎を築く。

3. 研究の方法

カルコゲナイドガラスの光透過域は、短波長域は $0.4\mu\text{m}$ から長波長域は $15\mu\text{m}$ から $20\mu\text{m}$ まで広がる。また、フッ化物ガラスの透過域は、 $0.2\mu\text{m}$ から $8\mu\text{m}$ の紫外から中赤外域にまで広がる。この透過特性とその高い非線形を利用すると SC による紫外から中赤外域に亘る広帯域コヒーレント光の発生が期待できる。本研究では、たとえば擬位相整合ニオブ酸リチウム導波路によっても実現困難な可視から中赤外域に亘る SC 光の発生の実現を目指す。

具体的には、下記の手法で研究を進める。

- (1) 広帯域 SC 光発生のために必要な波長分散特性を持ったコア素材に最適なクラッド素材を用いた微細構造光ファイバ (MOF: micro-structured fiber) 構造を解明する。シミュレーション手法を駆使して、実現できる SC 光スペクトル特性を解明する。
- (2) 広帯域 SC 実現のために構造最適化された MOF を実現し、可視から中赤外域に亘る SC 光の発生を検証する。実験結果とシミュレーション解析を駆使して、試作したカルコゲナイドガラスコア MOF の SC 光発生のメカニズムを解析し、カルコゲナイドガラスを用いた MOF の SC 発生媒体としての特性限界を解明する。

4. 研究成果

- ・カルコゲナイドガラスとして GeGaSbS 系、GeAsSeTe 系等のカルコゲナイドガラスについてクラッドとするテルライトガラスに熱特性の合う組成の探索を行った。その結果、 $\text{Ge}_{25}\text{Ga}_5\text{Se}_{70}$ のガラス転移温度がテルライトガラスと一致し、コア素材として好適であることを明らかにした。
- ・ $0.2\mu\text{m}$ から $8\mu\text{m}$ まで透過域を持つフッ化物ファイバの SC 光発生特性の検証し、

0.35 μm から6.2 μm まで及ぶSC光を確認した。これは、これまで発生されたSC光の中で最も広帯域なものであり、赤外透過性の良いカルコゲナイドガラスをMOFの素材とすれば、さらなるSC光の赤外域での拡張が可能になるとことを明らかにした。

- ・ 非線形シュレディンガー方程式によるSC光のスペクトルの高精度シミュレーションを実行するため、これまで石英ガラスでは知られていたが、他のガラス素材では詳細評価がされていないラマンレスポンス関数の解析を進め、ラマンスペクトルの構造を考慮したラマンレスポンス関数の導出法を確立した。
- ・ 新設の中赤外分光光度計を用いたSC光測定系を整備した。
- ・ As_2S_3 ガラスを使った微細構造ファイバの作製に成功した。さらに、ファイバのテーパー化にも成功した。1.55 μm のフェムト秒レーザー励起により1 μm から2.6 μm にわたる平坦化されたSC光の発生に成功した。
- ・ また、1.55 μm のフェムト秒レーザー励起により As_2S_3 ガラス微細構造ファイバが可視光を発生することを見出した。この可視光はモード間位相整合により発生するTHG (Third Harmonics Generation) に起因することがわかった。この可視光により、 As_2S_3 ガラス微細構造ファイバに光ダメージが起り、光の透過特性が急激に劣化して、SC光の成長が抑制されることを初めて明らかにした。SC光の更なる広帯域化には、この可視光発生抑制が不可欠であることを明らかにした。その抑制法の一つとして微細構造ファイバの単一モード化が考えられる。単一モード化によりモード間位相整合が抑制され、THGの発生が抑制されると考えられる。
- ・ As_2S_3 ガラスを使った微細構造ファイバのテーパー化にも成功した。2 μm のフェムト秒レーザー励起により1 μm から3 μm をこえるSC光の発生に成功した。
- ・ 可視および中赤外領域の光透過特性優れたカルコゲナイドガラスの候補としてGe-Ga-Sb-S系ガラスの素材研究を進めた。屈折率特性、非線形性の解明およびラマン応答関数の解明を行った。またSbの添加量により屈折率制御ができることを明らかにした。したがって、Ge-Ga-Sb-S系ガラスを用いることにより、カルコゲナイドコンポジット微細構造ファイバの作製が可能であることを明らかにした。さらに、物性特性値をもとに波長分散特性およびSC光発生シミュレーションを進め、ファイバ構造とその特性の相関を明らかにした。

- ・ 中赤外領域の光透過特性優れたカルコゲナイドガラスの候補としてGe-Ga-Sb-S系およびGe-Ga-Sb-Te系ガラスの素材研究を進めた。コアガラスとしてのGe-Ga-Sb-Te系ガラス、およびクラッドガラスとしてのGe-Ga-Sb-S系ガラスの組成を確定し、それらを用いてコンポジットMOFの作製に初めて成功した。さらに、物性特性値をもとに波長分散特性およびSC光発生シミュレーションを進め、10 μm 以上の波長のSC光の発生が可能であることを明らかにした。
- ・ テルライトガラス、フォスフェイトガラスをクラッドとした高NA微細構造ファイバによりカルコゲナイドファイバの通信波長帯での零分散平坦化が図れることを明らかにし、ファイバ化も成功した。さらにSC発生も検証した。

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 53 件)

1. M. Liao, W. Gao, Z. Duan, X. Yan, T. Suzuki, and Y. Ohishi, “Directly draw highly nonlinear tellurite microstructured fiber with diameter varying sharply in a short fiber length”, *Optics Express*, 査読有, Vol. 20, No. 2, pp. 1141-1150, 2012.
2. X. Yan, C. Kito, S. Miyoshi, M. Liao, T. Suzuki, and Y. Ohishi, “Raman transient response and enhanced soliton self-frequency shift in ZBLAN fiber”, *J. Opt. Soc. Am. B*, 査読有, Vol. 29, No. 2, pp. 238-242, 2012.
3. Y. Ohishi, “Broadband Supercontinuum Generation Using High Nonlinear Tellurite Fibers”, *Polymer Photonics, and Novel Technologies*, 査読有, pp. 64-71, 2011.
4. T. Kohoutek, X. Yan, T. Shiosaka, S. Yannopoulos, A. Chrissanthopoulos, T. Suzuki, and Y. Ohishi, “Enhanced Raman gain of Ge-Ga-Sb-S chalcogenide glass for highly nonlinear microstructured optical fibers”, *J. Opt. Soc. Am. B*, 査読有, Vol. 28, No. 9, pp. 2284-2290, 2011.

5. M. Liao, X. Yan, Z. Duan, T. Suzuki, and Y. Ohishi, “Tellurite Photonic Nanostructured Fiber”, *J. Lightwave Technol.*, 査読有, Vol.29, No. 7, pp. 1018–1025, 2011.
6. M. Liao, X. Yan, W. Gao, Z. Duan, G. Qin, T. Suzuki, and Y. Ohishi, “Five-order SRSs and supercontinuum generation from a tapered tellurite microstructured fiber with longitudinally varying dispersion”, *Opt. Express*, 査読有, Vol. 19, No. 16, pp. 15389–15396, 2011.
7. X. Yan, G. Qin, M. Liao, T. Suzuki, and Y. Ohishi, “Transient Raman response effects on the soliton self-frequency shift in tellurite microstructured optical fiber”, *J. Opt. Soc. Am. B*, 査読有, Vol. 28, No. 8, pp.1831–1836, 2011.
8. G. Qin, X. Yan, M. Liao, A. Mori, T. Suzuki, and Y. Ohishi, “Wideband Supercontinuum Generation in Tapered Tellurite Microstructured Fibers”, *Laser Phys.*, 査読有, Vol. 21, No. 6, pp. 1115–1121, 2011.
9. Z. Duan, M. Liao, X. Yan, C. Kito, T. Suzuki, and Y. Ohishi, “Tellurite Composite Microstructured Optical Fibers with Tailored Chromatic Dispersion for Nonlinear Applications”, *Appl. Phys. Express*, 査読有, Vol. 4, No.7, pp.072502–1–3, 2011.
10. W. Gao, M. Liao, X. Yan, C. Kito, T. Kohoutek, T. Suzuki, M. El-Amraoui, J. Jules, G. Gadret, F. Desevedavy, F. Smektala, and Y. Ohishi, “Visible Light Generation and Its Influence on Supercontinuum in Chalcogenide As_2S_3 Microstructured Optical Fiber”, *Appl. Phys. Express*, 査読有, Vol. 4, No.7, pp. 102601–1–3, 2011.
11. M. Liao, Z. Duan, W. Gao, X. Yan, T. Suzuki, and Y. Ohishi, “Dispersion engineering of tellurite holey fiber with holes formed by two glasses for highly nonlinear applications”, *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 査読有, Vol.15, No. 4, pp. 681–684, 2011.
12. M. Liao, X. Yan, G. Qin, C. Chaudhari, T. Suzuki, and Y. Ohishi, “Controlling the chromatic dispersion of soft glass highly nonlinear fiber through complex microstructure”, *J. Non-Cryst. Solids*, 査読有, Vol. 356, pp. 2613–2617, 2010.
13. M. Liao, C. Chaudhari, X. Yan, G. Qin, C. Kito, T. Suzuki, and Y. Ohishi, “A suspended core nanofiber with unprecedented large diameter ration of holey region to core”, *Opt. Express*, 査読有, Vol. 18, No.8, pp. 9088–9097, 2010.
14. G. Qin, X. Yan, C. Kito, M. Liao, T. Suzuki, A. Mori, and Y. Ohishi, “Highly nonlinear tellurite microstructured fibers for broadband wavelength conversion and flattened supercontinuum generation”, *J. Appl. phys.*, 査読有, Vol. 107, pp. 043108–1–4, 2010.
15. X. Yan, G. Qin, M. Liao, T. Suzuki, and Y. Ohishi, “Transient Raman response effects on the soliton self-frequency shift in tellurite microstructured fiber”, *J. Appl. Phys.*, 査読有, Vol. 108, pp. 123110–1–5, 2010.
16. M. El-Amraoui, G. Gadret, J. C. Jules, J. Fatome, C. Fortier, F. Desevedavy, I. Skripatchev, Y. Messaddeq, J. Troles, L. Brilland, W. Gao, T. Suzuki, Y. Ohishi, and F. Smektala, “Microstructured chalcogenide optical fibers from As_2S_3 glass: towards new IR broadband sources”, *Opt. Express*, 査読有, Vol. 18, No. 25, pp. 26655–26665, 2010.
17. G. Qin, X. Yan, C. Kito, M. Liao, C. Chaudhari, T. Suzuki and Y. Ohishi, “Ultrabroadband supercontinuum generation from ultraviolet to $6.28 \mu m$

- in a fluoride fiber”, Appl. Phys. Lett., 査読有, Vol. 95, pp.161103-1 - 3, 2009.
18. X. Yan, G. Qin, M. Liao, T. Suzuki, A. Mori and Y. Ohishi, “Soliton source generation in - few-mode tellurite microstructure fiber”, Appl. Phys. Lett., 査読有, Vol. 95, pp.171107-1-3, 2009.
 19. M. Liao, X. Yan, G. Qin, C. Chaudhari, T. Suzuki, and Y. Ohishi, “ A highly non-linear tellurite microstructure fiber with multi-ring holes for supercontinuum generation”, Opt. Express, 査読有, Vol. 17, No.18, pp.15481-15490, 2009.
 20. M. Liao, C. Chaudhari, G. Qin, X. Yan, C. Kito, T. Suzuki, Y. Ohishi, M. Matsumoto, and T. Misumi, “Fabrication and characterization of a chalcogenide-tellurite composite microstructure fiber with high nonlinearity”, Opt. Express, 査読有, Vol. 17, No. 24, pp.21608-21614, 2009.
 21. C. Chaudhari, T. Suzuki and Y. Ohishi, “Design of Zero Chromatic Dispersion Chalcogenide As_2S_3 Glass Nanofibers”, J. Lightwave Technol., 査読有, Vol.27, No. 12, pp.2095-2099, 2009.
 22. G. Qin, X. Yan, C. Kito, M. Liao, C. Chaudhari, T. Suzuki, and Y. Ohishi, “Supercontinuum generation spanning over three octaves from UV to $3.85\mu m$ in a fluoride fiber”, Opt. Lett., 査読有, Vol. 34, No.13, pp.2015-2017, 2009.
 23. 大石泰丈, “テルライト光ファイバーによる光波制御”, 応用物理, 査読有, Vol. 78, No. 7, pp.637-641, 2009.
(他 30 件)
- [学会発表] (計 122 件)
1. (招待講演) 大石 泰丈, “高非線形微細構造光ファイバとその応用”, 電子情報通信学会 2012 年総合大会, BI-4-3, 岡山大学, 3 月 21 日, 2012.
 2. (Invited) Y. Ohishi, “Tellurite Microstructured Fibers and Their Applications”, Frontiers in Optics 2011, FTuI4, San Jose, USA, Oct. 2011.
 3. (Invited) M. Liao, W. Gao, X. Yan, Z. Duan, T. Suzuki, and Y. Ohishi, “Recent Progress on Tellurite Suspended nanowires”, 1st International Applied Photonics Technology Conference (IAPTC) 2011, Session A, pp. 31-34, Miaoli, Taiwan, July 2011.
 4. (Invited) Y. Ohishi, M. Liao, X. Yan, Z. Duan, and T. Suzuki, “Tellurite Microstructured Fibers and Their Applications”, The 16th Opto-Electronics and Communications Conference, OECC2011, 5C4_1, pp. 51-52, Kaohsiung, Taiwan, July 2011.
 5. (Invited) Y. Ohishi, “New Prospect of Highly Nonlinear Glass Microstructured Optical Fibers”, The 9th International Meeting of Pacific Rim Ceramic Societies, S5.1, Cairns, Australia, July 2011.
 6. (Invited) Y. Ohishi, “Tellurite Microstructured Fibers for Broadband Supercontinuum Generation”, IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series 2011, TuB1.2, Montreal, Canada, July 2011.
 7. (Invited) F. Smektala, M. El-Amraoui, J. Fatome, B. Kibler, J. C. Jules, G. Gadret, F. Desevedavy, G. Renversez, J. Troles, L. Brilland, Y. Messaddeq, M. Duhant, G. Canat, and Y. Ohishi, “Recent developments in chalcogenide photonic crystal fibres”, Photonics Society Summer Topical Meeting Series, 2011 IEEE, TuB2.3, Montreal, Canada, July 2011.
 8. (Invited) Y. Ohishi, “New Prospect of

- Tellurite Microstructured Fibers” , OSA Specialty Optical Fibers Topical Meeting 2011, OSA Technical Digest, SOMD1, Toronto, Canada, June 2011.
9. (招待講演) 大石泰丈, 「低融点ガラス微細構造光ファイバとその応用」, 2011年電子情報通信学会総合大会, 東京都市大学, 東京, March 2011.
 10. (招待講演) 大石泰丈, 「フォトニッククリスタルファイバによる波長変換とスーパー近ティニウム光源」, 第58回応用物理学関係連合講演会, 26p-BL-7, 神奈川工科大学, 厚木市, March 2011.
 11. (Invited) F. Smektala, M. El-Amraoui, J.C. Jules, G. Gadret, J. Fatome, B. Kibler, F. Desevedavy, G. Qin, T. Suzuki, Y. Ohishi, C. Polacchini, I. Skrypatchev, Y. Messaddeq, G. Renversez, and M. Szpulak, “Demonstration of Experimental Infrared Spectral Broadening in Chalcogenide As_2S_3 Suspended Core Microstructured Optical Fibers” , 3rd International Congress on Ceramics, S7-011, Osaka, Japan, Nov. 2010.
 12. (Invited) Y. Ohishi, “Broadband Supercontinuum Generation Using High Nonlinear Tellurite Fibers” , 11th Chitose International Forum on Photonics Science & Technology, 0-14, Chitose, Japan, Oct. 2010.
 13. (Invited) Y. Ohishi, “Tellurite fibers for lightwave signal processing and supercontinuum source” , The 9th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON 2010), pp. 303-305, Nanjing, China, Oct. 2010.
 14. (Invited) Y. Ohishi, “New photonics glasses and waveguides for lightwave processing” , XXII International Congress on Glass 2010, 0204, Bahia, Brazil, Sep. 2010.
 15. (Invited) Y. Ohishi, G. Qin, M. Liao, X. Yan, and T. Suzuki, “Recent Progress in Tellurite Fibers” , OSA / OFC/NFOEC 2010, OMG1, San Diego, USA, March 2010.
 16. (Invited) Y. Ohishi, G. Qin, M. Liao, X. Yan, and T. Suzuki, “Recent Progress in Tellurite Fibers” , OSA / OFC/NFOEC 2010, OMG1, San Diego, USA, March, 2010.
 17. (Invited) Y. Ohishi, G. Qin, M. Liao, C. Chaudhari, and T. Suzuki, “Lightwave Signal Processing Using Tellurite Fibers” , OECC 2009, TuD1, Hong Kong, China, July 2009.
- (他 105 件)
- [図書] (計 3 件)
1. 大石泰丈 (分担執筆), エヌ・ディー・エス, 「セラミックス機能化ハンドブック」, 第一章, 第 4 節「光増幅機能と材料開発」, pp.69-80, 平成 23 年
 2. 大石泰丈, 鈴木健伸 (分担執筆), シーエムシー出版, 「先端ガラスの産業応用と新しい加工」, 平成 21 年.
 3. T. Suzuki, G. S. Murugan, and Y. Ohishi, Research Signpost, “Photonic Glasses and Glass-Ceramics” , June 2011.
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
大石 泰丈 (OHISHI YASUTAKE)
豊田工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号 : 80360238
- (2) 研究分担者
鈴木 健伸 (SUZUKI TAKENOBU)
豊田工業大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号 : 60367828
メイソン リャオ (Meison Liao)
豊田工業大学・大学院工学研究科・ポストドクトラル研究員
研究者番号 : 80465583
シン ヤン (Xin Yan)
豊田工業大学・大学院工学研究科・ポストドクトラル研究員
研究者番号 : 80545351