

平成21年5月31日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2007～2008

課題番号：19023011

研究課題名（和文） 高効率超広帯域パラメトリック増幅素子の研究

研究課題名（英文） Study on efficient ultra-broadband parametric amplification media

研究代表者

大石 泰文 (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：

テルライト光ファイバは石英ファイバの 42 倍もの利得係数を実現でき、また石英ファイバの 2 倍以上の帯域が実現できる。テルライト光ファイバが誘導ラマン散乱および誘導ブリルアン散乱による高効率な遅延特性を有することを示し、光バッファ・光メモリや高効率可変遅延線の実現に有望であることを明らかにした。また、中赤外域のスーパーコンティニューム光発生に有効であることを明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	4,200,000	0	4,200,000
2008 年度	4,300,000	0	4,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	8,500,000	0	8,500,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：先端的通信、光信号処理、情報通信工学、光物性、光増幅

1. 研究開始当初の背景

超高速広帯域光スイッチングやスペクトル制御を可能にする光素子の候補として、ファイバラマン増幅(FRA)やファイバ光パラメトリック増幅(FOPA)がある。しかし、現在のところ、利得効率が低く、多波長・高出力励起が必要な広帯域FRAおよびFOPAは実用には難点がある。今後、高効率広帯域波長変換、光スイッチ、再生中継、mux/demux等を実現して超高速・

全光パケット処理の構築、および未使用波長帯を利用したペタビット級の超広帯域光情報伝達技術の構築に必要な光信号処理素子を実現できる素子が望まれている。

重金属酸化物ガラスを非線形導波路素材に用いようとする研究は、Stanford 大、Southampton 大、Bath 大等の欧米の大学で行われているが、通信波長帯で波長分散値を零とし、また、平坦化する構造を解明してい

るところはない。このように、非線形導波路素材および高効率非線形現象を発現させる導波路構造ともこの研究分野は、未だ解決されるべき問題は多い。

テルライトガラスを用いた超広帯域ラマン増幅媒体の研究は、ここ数年、Florida中央大、Clemson大、Philips、Bordeaux大、Russian科学アカデミー等の米国、欧州の大学および研究機関で盛んに研究されている。

2. 研究の目的

超高速・全光パケット処理の構築、および未使用波長帯を利用したペタビット級の超広帯域光情報伝達技術の構築に必要な光信号処理素子を実現するため、高効率パラメトリックファイバ素子を創製し、帯域 500nm 以上の波長変換、光増幅を実現する。

3. 研究の方法

増幅効率を上げるためのテルライト微細構造ファイバ試料の試作を進める。パラメトリック増幅素子として応用する場合、素子の波長分散特性が重要なパラメータとなる。解明した材料分散特性をもとに、その特性に適した波長分散特性を微細構造ファイバの最適構造の設計を進める。この新規媒体の究極的な特性解明には、4 光波混合とラマン増幅との相乗効果の解析が不可欠である。また、利得係数の精密測定を行い、そのデータをもとに多波長励起したときの増幅特性のシミュレーションを行う。新規パラメトリック増幅媒体試料の試作および特性検討を進める。

具体的には、下記の項目を目標とする。

- ・開発した高非線形テルライトガラスをベースにコア部およびホールを有するクラッド部の組成の詳細選定および広帯域化実現のために必要な高次分散特性も考慮した解析による微細構造ファイバの最適構造の決定。
- ・4 光波混合とラマン増幅との相乗効果の解析によるこの新規媒体の究極的特性の解明。
- ・多波長励起したときのラマン増幅特性の検証。
- ・増幅帯域 500nm 以上の増幅帯域利を有する高効率テルライト微細構造ファイバ構造設計および試作検討。

またさらに、開発したテルライト微細構造ファイバのスーパーコンティニウム (SC) 光源としての特性の検証も行い、高効率多波長光

源としての可能性の解明および slow light 発生のためのテルライトファイバ等重金属酸化物ガラスファイバのブリルアン増幅特性の解明も行う。

4. 研究成果

(1) 広帯域ファイバラマン増幅特性

TBiZnNa、TBSNW、TBSNWP 石英ガラスの利得係数スペクトル特性を比較した。TBSNW ガラスの増幅係数は、ピーク値で石英ガラスの 42 倍もの値を持つことがわかった。また、TBSNWP ガラスでは、増幅係数は TBSNW ガラスと比べ下がるものの、メインピークの利得帯域は、従来の TBiZnNa ガラスの 2 倍であり、石英ガラスの 1.7 倍に拡大していることがわかった。このようにラマン増幅スペクトルが添加成分によって大きく制御できることを明らかにした。

利得係数スペクトルの拡大された TBSNWP テルライトファイバ多波長励起したときの増幅特性をシミュレーションにより検証した。ここでは、200 波の信号を入力し、励起波長および数と光量を変えて利得スペクトルが平坦化される条件のもとで帯域

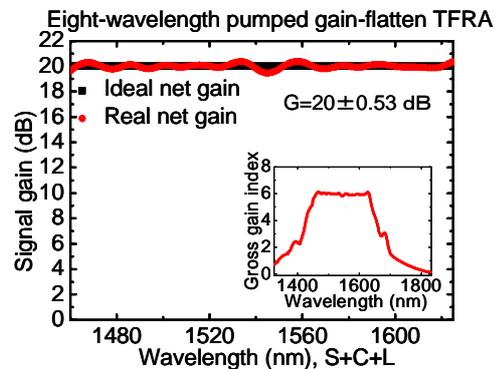


図1 信号波長は200波をとし、8波励起の場合のラマン増幅スペクトル

を求めた。ASE (Amplified Spontaneous Emission)、励起光と励起光の間、励起光と信号光の間、信号光と信号光の間の相互作用を考慮した。8波で励起したときのスペクトルを図1に示す。8波で励起したとき 200nm 以上の波長域をカバーできることがわかる。8波で励起したとき利得偏差が約 20 ± 0.5 dB で 1460 から 1650nm の S、C および L バンド全体をカバーできることを明らかにした。石英ファイバの場合、この波長帯では高々 100nm 程度であるので倍以上の帯域がカバー

できることになる。また、Oバンド(1260–1360 nm: ~17.5 THz)およびEバンド(1360–1460 nm: ~15.1 THz)においてもそれぞれ 20 ± 0.3 dB および 20 ± 0.2 dB の利得特性が実現できる。

このように、テルライトガラスの増幅帯域として、ラマン増幅で1460から1650nmのS、CおよびLバンド全体をカバーでき、石英ファイバの2倍以上の帯域が実現できることを明らかにした。テルライトガラスのラマン散乱特性の制御により、その増幅特性は大幅に向上することが可能になり、ラマン増幅器の大幅な性能向上をもたらすことが期待で

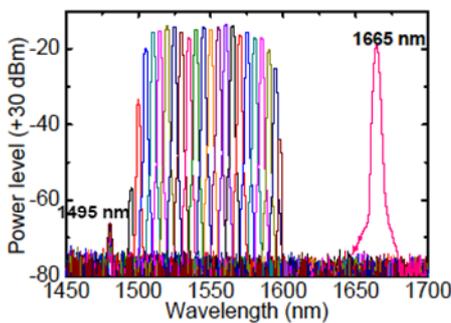


図2 テルライトファイバラマンレーザーの発振スペクトル

きる。

図2は、テルライト光ファイバを用いたファイバラマンレーザーの特性を示したものである。テルライトガラスのラマン利得広帯域性を利用した波長可変性を検証した。励起波長は1480nmであり、リング共振器を構成し波長可変バンドパスフィルターによって発振波長を選択している。1495から1600 nmの波長域で連続的に波長が変化してレーザー発振している。1665 nmでのレーザー発振は、波長可変バンドパスフィルターに動作限界があるため、それを取り除きフリーランニングさせた状態での発振である。このように1495 nmから1665 nmの170 nmの波長帯域でレーザー発振することを確認した。1699 nmでは、ラマン利得係数が波長1665 nmでの値と同一になるため、この波長近傍でもレーザー発振は十分可能と考えられる。したがって、テルライト光ファイバのファイバラマンレーザーの帯域は、200 nm以上取れると期待できる。

((注) : T;TeO₂, N;Nb₂O₅, B;BaO, W;WO₃, P;P₂O₅, M;MoO₃)

(2) 誘導散乱による slow light 生成

①誘導ラマン散乱による slow light 生成

ラマン利得による媒質の屈折率変化はKramers-Kronigの関係を用いて求めることができる。この際、利得スペクトル全体を用いて屈折率を求めることも一つの方法であるが、利得スペクトルは各独立の振動モードによりなっているため、各モードの寄与を考慮することによりもとめることができると考えられる。また、各モードのラマンスペクトルは、Lorentzianによりよく近似することができる。Lorentzianを使えば、より解析的に屈折率変化を算出することができるため、材料特性を用いた遅延特性の解析もより見通しのよいものになる。

この手法により求められる各ラマンモードによる単位長さ当りの遅延は(1)式により与えられる。

$$\Delta t_d = \frac{L_{eff}}{c} (n_g - n_{bg}) / (I_p L_{eff}) = \frac{g_0}{\Gamma_R} \frac{1 - 4(\delta\omega\Gamma_R)^2}{(1 + 4(\delta\omega\Gamma_R)^2)^2} \quad (1)$$

ここで、 L_{eff} は有効ファイバ長、 c は光速、 $n_g - n_{bg}$ はラマン利得による屈折率の変化、 I_p は励起光強度、 $\delta\omega$ は光の角周波数、 g_0 は

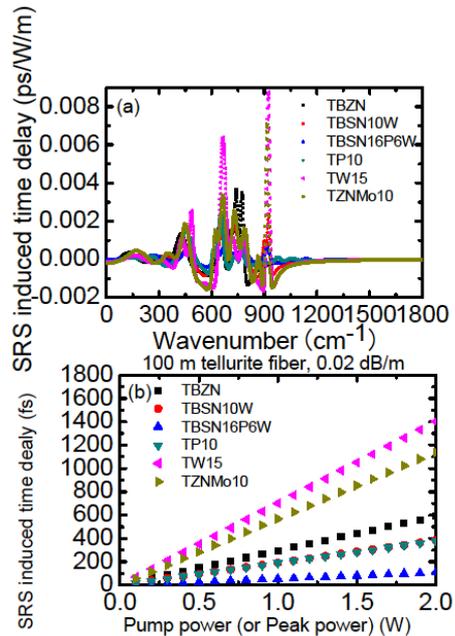


図3 (a) TBSN16P6W, TBSN10W, TP10, TW15, TBZN and TZNM010テルライトファイバの遅延スペクトル, (b) 誘導ラマン散乱による遅延の励起光強度依存性

利得の中心値、 Γ_R はラマンモードの半値幅である。

TW15 ($\text{TeO}_2\text{-WO}_3$ 系) ガラスでは、遅延係数は 0.0089ps/W/m であり、石英ファイバと比較して約 80 倍の値を持つことが分かった (図 3 (a))。この遅延係数をもちいて求めた各テルライトガラスによる遅延時間の励起光依存性を図 3 (b) に示す。TW15 ガラスの場合 2W 励起で 1.4ps の遅延が得られる (図 3 (b))。このように、テルライトガラスの誘導ラマン散乱を利用すると石英ファイバの誘導ラマン散乱を利用するより、高効率な遅延を生じさせることができることを明らかにした。

②誘導ブリルアン散乱による slow light 生成

テルライトファイバのブリルアンシフト量は、 7.98GHz であり、バンド幅は 21.0MHz である。ブリルアン利得係数のピーク値は、 $1.70 \times 10^{-10}\text{mW}$ であり、石英ファイバの約 22 倍の値を持つ。この大きなブリルアン利得係数がテルライトファイバの特徴である。この利得係数をもとに求めた遅延係数はピーク値で 0.092ns/mW/m であり、遅延スロープ効率は 1.75ns/dB となる。これは石英ファイバ (1.01ns/dB)、酸化ビスマス系ファイバ (1.15ns/dB) や As_2Se_3 ファイバ (0.82ns/dB) と比較して大きく、テルライトファイバによる遅延効率が良いことを示す。

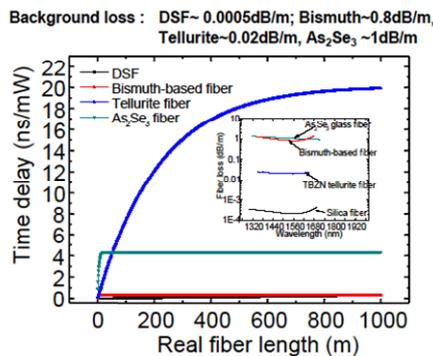


図 4 誘導ブリルアン散乱による遅延係数のファイバ長依存性

図 4 は、各ファイバの実際の損失を考慮したときの、ファイバ長に対する遅延効率を求めたものである。石英ファイバや酸化ビスマスファイバはファイバを長くしても効率は上がらず、 As_2Se_3 ファイバは短尺では、顕著な効率増が見られるが急激に飽和することが分かる。しかし、一方、テルライトファイバ

では、遅延量はファイバ長とともに増加していくことが分かる。これは、テルライトファイバのブリルアン利得係数そのものは、カルコゲナイドガラスに劣るものの損失特性が優れるためであり、カルコゲナイドファイバに比べ遅延特性はよいものになる。

一方、石英ファイバと比べると損失特性は劣るもののブリルアン利得係数が格段に大きいため、遅延特性が優ることになる。たとえば、遅延効率は 200 m 長るとき、テルライトファイバは石英ファイバの 180 倍以上の値を持つ。このように、テルライトファイバは優れた遅延特性を持つことが期待されるため、実際にテルライトファイバを用いたパルス遅延実験を行った。励起光が 19.7 mW の時、40 ns の幅のパルスが 74 ns の遅延を受けることを確認できた。このときの遅延の効率は 3.76ns/mW であり、これまで報告されているものと比較して最も高い値であることが分かった。また、単位利得当たりの遅延量は 1.77ns/dB であり、ブリルアン増幅特性から求めた値 (1.75ns/dB) に近く、利得特性からの遅延特性の見積もりが、有効であることが判る。このようにテルライトファイバの高効率な遅延特性を持つ。

この優れた特性により遅延時間が可変な光バッファ・光メモリの実現に寄与できると考えられる。また、光の伝搬速度を自由に制御できるので、光信号の到達を遅くする可変遅延線の実現にも応用可能であり、光センシングなどへの応用や光信号の空間的な圧縮やこれまで得られなかった強い光と物質の相互作用を起こすことも期待できる。このように、誘導ラマン散乱および誘導ブリルアン散乱ともテルライトファイバは石英ファイバや他の高非線形ファイバより高効率な遅延を実現でき、群速度を制御する光信号処理媒体として最も有望と考えられる。

(3) スーパーコンティニューム光の発生

導波路材料として利用できるさらに非線形性の大きいテルライトガラスの探索を進め、 $\text{TeO}_2\text{-BaO-SrO-Nb}_2\text{O}_5$ 系新規テルライトガラスを見出している。その値は、光ファイバ素材としてこれまで用いられてきたテルライトガラスの 1.6 倍大きく、石英ガラスと比較すると約 65 倍もの大きい値となった。これまでに報告されている光ファイバ導波路に応用できるテルライトガラスの中では

では最も大きいものと考えられる。

テルライトガラスを含め重金属酸化物やカルコゲナイドガラスを非線形導波路素材として使用する場合、その材料分散値が通信波長帯域で非常に大きい値を持つことが問題となる。高効率非線形現象を発現させるには、光波間の位相整合を満足させなければならない。そのためには、通信波長帯域で波長分散値を零に設定する必要がある。しかし、テルライトガラスを含めた重金属酸化物ガラスやさらにはカルコゲナイドガラスを非線形導波路素材として使用する場合、その材料分散値が通信波長帯域で非常に大きい値を持つため、通常のコア・クラッド構造を持った導波路構造では、通信波長帯域で波長分散値を零に設定することが難しい。それが高非線形ガラスを非線形導波路素材として用いる場合の最大の課題となっている。PCF (Photonic Crystal Fiber) 構造やテーパー構造を用いた高効率非線形光ファイバの分散制御の研究が行われている。我々は、特に高効率非線形効果発現に有利な零分散平坦化を目指した分散制御を進めた。その結果、テルライトガラスを導波路素材として用いても通信波長帯域で波長分散の零化または零分散平坦化を実現できることを明らかにしている。

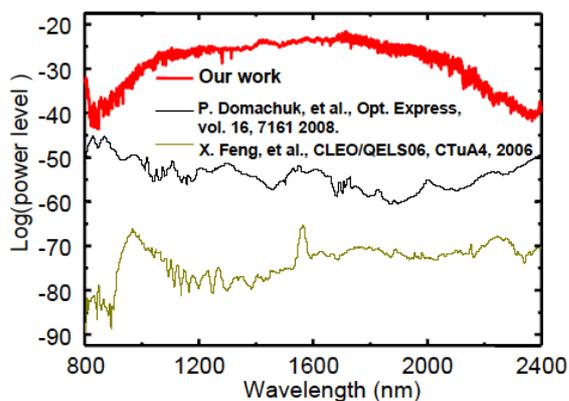


図5 分散制御されたテルライト微構造光ファイバによるスーパーコンティニューム光スペクトル。(励起波長：1450 nm, 励起パルス幅：400fsec, 平均励起光量：3.5mW)

分散制御されたテルライト微構造光ファイバの応用としてスーパーコンティニューム (SC) 光の発生を試みた。SC 光は光ファイバ中で起こる SPM、FWM、誘導ラマン散乱などの非線形効果の結果生じるものであり、広

帯域なコヒーレント光として注目されている。テルライトガラスは中赤外域まで透過域を有するため中赤外域の SC 光の発生には適した素材である。1.3 μm 帯に零分散波長を設定した微細構造ファイバを作製し、波長 1.45 μm の 400fsec のパルスで励起した。そのときの SC スペクトルを図5に示す。900 nm から 2400 nm におよぶ SC 光の発生を確認した。20dB 帯域は約 1500nm であった。図5には、これまでに報告されているテルライト微細構造光ファイバによる SC 光スペクトルを併せて示した。従来報告されているものは、不規則なスペクトル変化をしているが、今回得られたものは Gaussian に近いスペクトル形状をしており、テルライト微細構造光ファイバを用いてもスペクトル形状の良いものが得られることを実証した。

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5件)

- ① R. Jose, Y. Arai, Y. Ohishi, “Optical properties of MoO_3 containing tellurite glasses”, Appl. Phys. Lett. 93 巻, 161901-1-3, 2008 年, 査読有.
- ② Y. Ohishi, “Novel photonic glasses for future amplifiers”, Glass Technology : The European Journal of Glass Science & Technology Part A, 49 巻, 317-328, 2008 年, 査読有.
- ③ R. Jose, G. Qin, Y. Arai, T. Suzuki, Y. Ohishi, “Tailoring of Raman gain bandwidth of tellurite glasses for designing gain flattened fiber Raman amplifiers”, J. Opt. Soc. Am. B, 25 巻, 373-382, 2008 年, 査読有.
- ④ G. Qin, H. Sotobayashi, M. Tsuchiya, A. Mori, T. Suzuki, Y. Ohishi, “Stimulated Brillouin scattering in a single-mode tellurite fiber for amplification, lasing, and slow light generation”, IEEE/OSA J. Lightwave Technol., 26 巻, 492-498, 2008 年, 査読有.
- ⑤ G. Qin, T. Suzuki, Y. Ohishi, “Numerical modeling of zero-gain Brillouin slow light in a tellurite fiber”, Jpn. J. Appl. Phys., 47 巻, 4589-4591, 2008 年, 査読有.

[学会発表] (計 13 件)

- ① C. Chaudhari, T. Suzuki, Y. Ohishi, “Chalcogenide core photonic crystal fibers for zero chromatic dispersion in the C-band”, OFC/NFOEC2009, 2009年3月24日, San Diego, USA.
- ② Y. Ohishi, “Novel Photonics Glasses for Future Optical Signal Processing”, Third International Conference on Optical, Optoelectronic and Photonic Materials and Applications”, 2008年7月23日, Edmonton, Canada.
- ③ R. Jose, G. Qin, Y. Arai, T. Suzuki, Y. Ohishi, “Gain Flattened Fiber Raman Amplifiers by Tailoring Raman Amplification Bandwidth of Tellurite Glasses”, SPIE Photonics Europe 2008, 2008年4月9日, Strasbourg, France.
- ④ Y. Ohishi, “Novel Photonics Materials for Lightwave Processing”, The 2nd International Conference on Science and Technology for Advanced Ceramics, 2008年5月31日, 幕張、日本
- ⑤ G. Qin, T. Suzuki, Y. Ohishi, “Power dependence of Brillouin in a silica fiber”, CLEO/QELS 2008, 2008年, San Jose, USA.
- ⑥ G. Qin, H. Sotobayashi, M Tsuchiya, A. Mori, T. Suzuki, Y. Ohishi, “Highly efficient Brillouin slow light generation using a single mode tellurite fiber”, CLEO/QELS 2008, 2008年5月6日, San Jose, USA.
- ⑦ G. Qin, T. Suzuki, Y. Ohishi, “Pulse broadening of zero-gain Brillouin slow light in an optical fiber”, ECOC2008, 2008年9月24日, Brussels, Belgium.
- ⑧ C. Chaudhari, T. Suzuki, Y. Ohishi, “Chromatic Dispersions in Highly Nonlinear Glass Nanofibers”, SPIE Photonic Devices + Applications Symposium, 2008年8月12日, San Diego, USA.
- ⑨ C. Chaudhari, T. Suzuki, Y. Ohishi, “Zero and Flattened Chromatic Dispersion Chalcogenide Glass Nanofibers”, 3rd EPS-QEOD Europhoton Conference, 2008年9月2日, Paris, France.
- ⑩ Y. Ohishi, “New glass material technology for broadband optical amplification media”, The 13th European Conference on Networks and Optical Communications, 2008年7月2日, Crems, Austria.
- ⑪ G. Qin, M. Liao, C. Chaudhari, Y. Arai, T. Suzuki, Y. Ohishi, “Flat super-

continuum generation in a microstructure tellurite fiber”, IEEE/LEOS Annual Meeting 2008, 2008年11月11日, Newport Beach, USA.

- ⑫ G. Qin, M. Liao, T. Suzuki, A. Mori, Y. Ohishi, “Tellurite fiber Raman laser with a turnable range over 170nm”, IEEE/LEOS Annual Meeting 2008, 2008年11月11日, Newport Beach, USA.

- ⑬ C. Chaudhari, T. Suzuki, Y. Ohishi, “Group velocity dispersion in chalcogenide As₂S₃ glass nanofibers”, CLEO/QELS2008, 2008年5月6日, San Jose, USA.

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
クアンチュ チン (GUANSHI QIN)
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: 50449485
チトラレクハ チャウダハリ (CHITRAREKHA
CHAUDHARI)
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: 00465585
メイソン リャオ (MEISONG 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
荒井 雄介 (ARAI YUSUKE)
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: 00435934

(3) 連携研究者

なし