

# 新ファイバラマン増幅媒体研究の現状

豊田工業大学大学院工学研究科 先端フォトンテクノロジー研究センター

大石 泰丈

## Status of Novel Fiber Raman Gain Media Study

Yasutake Ohishi

Research Center for Advanced Photon Technology

Graduate School of Engineering

Toyota Technological Institute

### 1. はじめに

ファイバラマン増幅器は、光ファイバの誘導ラマン散乱を利用した光増幅器であり、励起光の波長を選択することによって利得帯域を任意に変えることができるうえ、低雑音な分布型アンプとしても優れた特性を有する。そのため、ファイバラマン増幅は、信号帯域の拡大と伝送特性改善の両面において有効であり、近年の通信容量増大に応える技術として注目を集めている。

それは、EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifiers) よりも早くから研究されていたが、励起光の出力が100 mW以上必要であるため、実用化の点において問題があった。ところが、波長多重伝送技術の普及に伴い、EDFAの高性能・高出力化が進み、高出力のLD励起

光源が開発されたため、近年の需要とあいまって再び開発が急速に進められた。

ファイバラマン増幅技術は、大容量フォトネットワーク内の波長多重伝送システムにおいて、集中増幅型のファイバラマン増幅器(線形中継増幅器、後置増幅器および前置増幅器)および分布増幅型の分布ラマン増幅システムを供することができるものであり [1, 2], 石英ファイバを用いた分布ラマン増幅システムおよびファイバラマン増幅器の実用化もなされている [3-4]。また、増幅技術としてだけでなく、光信号処理への研究も進んでいる。たとえば、ラマンソリトン効果による信号分離や光パルスの遅延であり、その実験的な検証も行われている。今後さらにファイバラマン増幅技術のもたらすメリットが注目され、その応用分野は広がっていくと考えられる。

ラマン増幅は、光波と媒質の光学フォノンとの相互作用によりおこり、ラマン増幅スペクトルは媒質を構成する分子に依存する。したがって、媒質の構成分子を変えることにより、増幅

〒468-8511 名古屋市天白区久方 2-12-1

TEL 052-809-1860

FAX 052-809-1869

E-mail: ohishi@toyota-ti.ac.jp

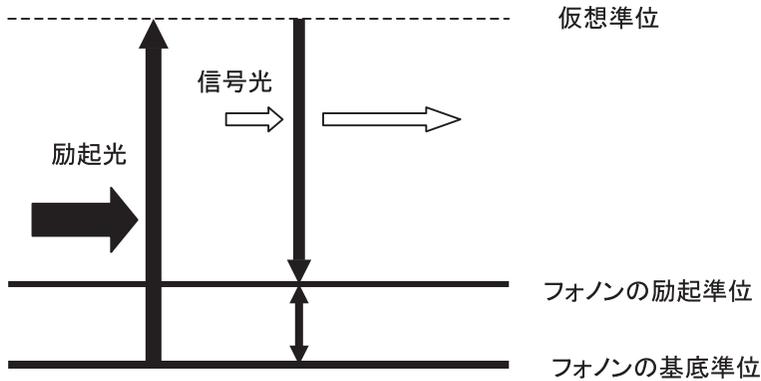


図1 ラマン増幅過程

特性を制御することができる。最近では、石英光ファイバ以外のテルライトファイバやシリコン導波路や半導体による新たな利得媒質を用いたラマン光増幅器の研究も行われるようになり、新たな可能性も研究されている。本稿では著者らがやっている新規ファイバラマン媒体研究の状況について述べる。

## 2. ファイバラマン増幅の原理

ラマン散乱は、物質の光学フォノンと光の相互作用によって生じる。図1に示すように、入射光により物質が仮想状態に励起され脱励起する際物質の光学フォノンが励起されそのエネルギーに対応したストークスシフト分だけ周波数の低い光(ストークス光)が生成される。ストークス光の波長と同じ波長を有する光が同時に入射すると誘導ラマン散乱によって利得を得る。ファイバラマン増幅器はこの誘導過程を利用した光増幅器である。すなわち、ファイバラマン増幅器を実現するには、増幅したい信号光からストークスシフト分短い波長を持つ励起光を用意し、利得媒質である光ファイバ中で誘導ラマン散乱が起きるように、EDFAのように励起光と信号光を光力プラによって合波しこれらの光が同時に光ファイバを伝搬するように構成する。誘導ラマン散乱は光学フォノンの等方性によってその散乱断面積が励起光と信号光の伝搬方向にあまりよらないという特徴がある。した

がって、ファイバラマン増幅器では励起光が信号光に対して同方向に伝殺しても反対方向でもほぼ同じ利得を生じる。

## 3. テルライトガラスのラマンスペクトル

図2にテルライトファイバと石英ファイバのラマン利得係数スペクトルを示す[5]。石英ファイバの場合、メインピークのストークスシフト量は、約13 THzであるが、テルライトファイバの場合約22 THzであり1.7倍ある。また、石英ファイバでは、約13 THzに単一ピークの利得スペクトルは、約13 THzと約22 THzに2つピークを有するスペクトル形状を有している。石英ファイバおよびテルライトファイバのラマン利得係数はピーク値でそれぞれ $3.5 \text{ km}^{-1}\text{W}^{-1}$ および $77 \text{ km}^{-1}\text{W}^{-1}$ であり、テルライトファイバは22倍の強度を持つ[6]。短いファイバ長および低い励起光量で利得が得られることになる。ストークスシフト量が大きいため、より多くの波長で励起できることになり、増幅帯域を拡張できることになるが、2つの利得係数ピークを持つため多波長励起で得られる利得スペクトルは平坦性に欠けてしまうという課題がある。

石英ファイバにおいてもこれまで、ラマン増幅特性を制御するための研究は行われてきたが、添加成分が限られていることから、大幅な特性制御にはいたっていないのが現状である。

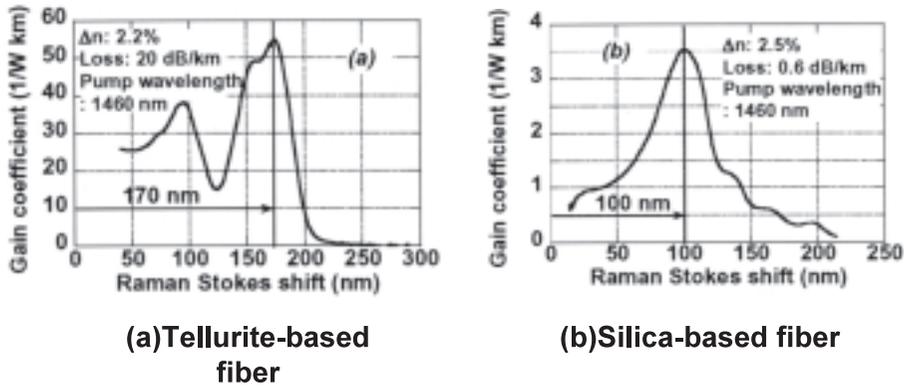


図2 テルライトファイバと石英ファイバのラマン利得係数スペクトルの比較 [5]

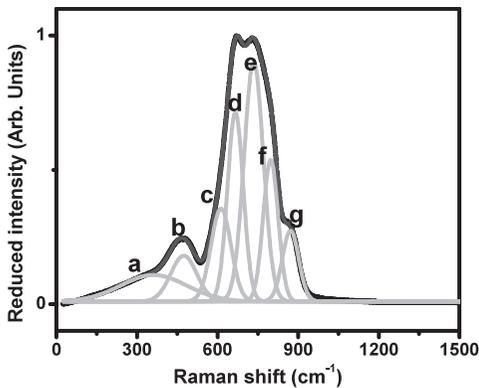


図3 TBSN ガラスのラマンスペクトル

テルライトガラスのような多成分系の素材は、種々の成分を添加することができるためラマンモードを容易に制御できる可能性がある。したがって、もしメインピークの利得帯域を拡張できれば、高効率で広帯域なラマン増幅媒体が実現できることも期待できる。我々は、テルライトファイバのラマン増幅媒体としての性能を拡大し、新たな可能性を開拓するためテルライトガラスのラマン利得特性の研究を進めている。

テルライトガラスのラマン増幅特性を制御するために  $\text{WO}_3$  や  $\text{P}_2\text{O}_5$  に注目した。これらの酸化物はテルライトガラスのガラス形成酸化物となり、高エネルギー領域にラマンモードを持つ。図3は、 $\text{TeO}_2\text{-BaO-SrO-Nb}_2\text{O}_5$  (TBSN) ガラスのラマンスペクトルを示す [7]。この

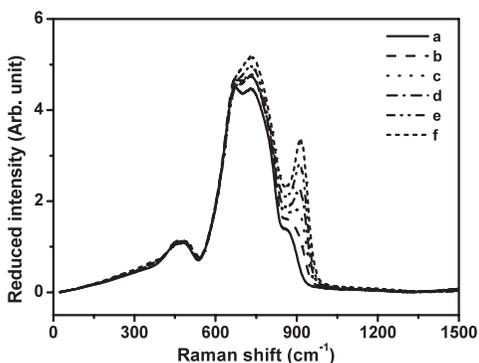
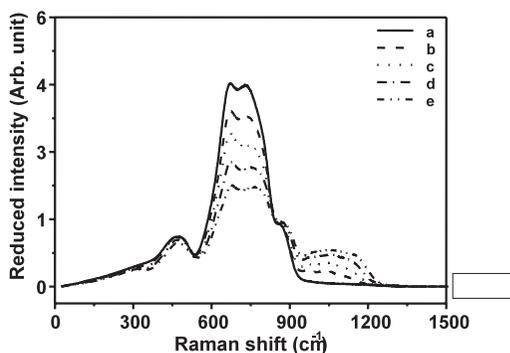
ガラス系は、希土類イオンのファイバホスト素材として使われている  $\text{TeO}_2\text{-ZnO-Bi}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$  (TZBN) 系ガラス [8] より非線形性が大きい導波路素材として開発したものである。この素材のラマンスペクトルは a から g の 7 つのモードに帰属できるラマン振動モード [7, 9, 10] よりなっていると考えられる (表1)。このラマンスペクトル特性を基に、ラマンスペクトルの特性制御を行った。

図4は、TBSN ガラスに  $\text{WO}_3$  を添加したときのラマンスペクトルを示す [11]。 $\text{TeO}_2$  のネットワークのラマンモードによる  $900\text{ cm}^{-1}$  以下の波数領域のラマンピークに加え [7, 9],  $\text{WO}_4$  tetrahedra の  $\text{W-O}^-$  および  $\text{W=O}$  振動によるラマンピークが  $920\text{ cm}^{-1}$  に現われる [10]。 $\text{TeO}_2$  成分量が減少してこの波数領域のラマン散乱強度上昇するという特異なスペクトル変化が観測された。この原因の可能性として、 $\text{WO}_3$  添加により  $\text{TeO}_4$  の構造が  $\text{TeO}_3\text{tp}$  (trigonal pyramid) 構造および  $\text{TeO}_{3+1}$  構造へ変化しこの波数領域の強度が起ったとも考えられるが、このスペクトル変化のメカニズムについては更なる検討が必要である。

図5は、TBSN ベースガラスに  $\text{P}_2\text{O}_5$  を添加したときのラマンスペクトルの変化を示す [11]。 $\text{P}_2\text{O}_5$  は  $\text{TeO}_2$  を置換して添加されている。 $\text{P}_2\text{O}_5$  添加により、 $1020$  および  $1100\text{ cm}^{-1}$  の波数位置に新たにピークが現れる。これは、複

表1 TBSN ガラスのラマンモード [7, 9, 10]

Bands	Vibrations
a	Vibrations of $\text{TeO}_3$ tp with NBO and $\text{TeO}_4$ tbp.
b	Symmetrical stretching and bending vibrations of Te-O-Te linkages formed by sharing vertices of $\text{TeO}_4$ tbp.
c	Vibrations of continuous network composed of $\text{TeO}_4$ tbp.
d	Antisymmetric vibrations of Te-O-Te linkages in $\text{TeO}_4$ tbp
e	Stretching vibrations of Te-O- and Te=O bonds in $\text{TeO}_3$ tp and $\text{TeO}_{3+1}$ polyhedra (Minor contributions from vibrations of continuous network composed of $\text{TeO}_4$ tbp)
f	Antisymmetric vibrations of Te-O- and Te=O bonds in $\text{TeO}_3$ tp and $\text{TeO}_{3+1}$ polyhedra (Minor contributions from vibrations of continuous network composed of $\text{TeO}_4$ tbp)
g	Vibrations of Nb atoms and its neighboring NBO atoms in $\text{NbO}_6$ octahedra.

図4  $(78-x)\text{TeO}_2-3.5\text{BaO}-10.5\text{SrO}-8\text{Nb}_2\text{O}_5-x\text{WO}_3$  (mol%) ( $x=0$ (a), 2(b), 4(c), 6(d), 8(e), 10(f)) ガラスのラマンスペクトル図5  $(78-x)\text{TeO}_2-3.5\text{BaO}-10.5\text{SrO}-8\text{Nb}_2\text{O}_5-x\text{P}_2\text{O}_5$  (mol%) ( $x=0$ (a), 4(b), 8(c), 12 (d), 16 (e)) ガラスのラマンスペクトル

数の NBO (non-bridging oxygen) を持った  $\text{PO}_4$  tetrahedra の振動によると考えられる [12]。また  $1200\text{ cm}^{-1}$  を超えた波数領域にまでスペクトルが広がっている。このとき、TBSN のラマンモードと  $\text{P}_2\text{O}_5$  によるモードとの間の  $900\text{ cm}^{-1}$  付近の波数領域のラマン強度が低くなっている。また、 $\text{TeO}_2$  を  $\text{P}_2\text{O}_5$  に置換することにより、メインのラマンピーク強度は徐々に低下しており、これは、総じて Te-O 結合ユニット数の低下によるものと考えられる。

スペクトル形状をみると  $900\text{ cm}^{-1}$  付近の強度が下がっていく波数領域は  $\text{WO}_3$  構造に起因する振動モード位置に対応する。したがって、 $\text{WO}_3$  および  $\text{P}_2\text{O}_5$  を共添加すると、この波数領域のラマン強度が増強されラマン増幅係数スペクトルの広帯域・平坦化が実現できると考えられる。

図6は、 $\text{P}_2\text{O}_5$  を含有した TBSN ガラスに  $\text{WO}_3$  を添加したときのスペクトル変化を示したものである [11]。 $\text{WO}_3$  を添加することによ

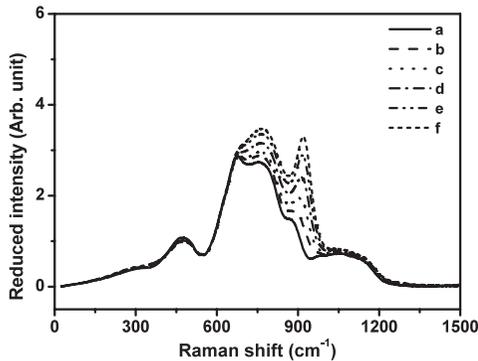


図6 (66-x) TeO<sub>2</sub>-3.5 BaO-10.5 SrO-8 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-x WO<sub>3</sub>-12 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (mol%) (x=0(a), 2(b), 4(c), 6(d), 8(e), 10(f)) ガラスのラマンスペクトル

りメインピークの幅も徐々に拡大し、1200 cm<sup>-1</sup>を超える波数領域にまで及ぶスペクトルが実現できることがわかる。すなわち、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>およびWO<sub>3</sub>の添加がTBSN系ガラスの帯域制御に有効であることが理解できる。

#### 4. ラマン増幅スペクトル

図7は、測定したラマン散乱スペクトルより求めたラマン増幅係数スペクトルを示したものである [11]。TBiZnNa, TBSNW, TBSNWP 石英ガラスの増幅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倍の値を持つことがわかる。また、TBSNWP ガラスでは、増幅係数はTBSNW ガラスと比べて下がるものの、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り、ラマン増幅スペクトルが大きく制御できることを示している。

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検証するため、増幅スペクトルのシミュレーションを行った。多波長励起のときの励起光および信号光のファイバ中での変化は、下記の方程式(1)により記述される [13]。ここでは、200波の信号を入射し、励起波長および数

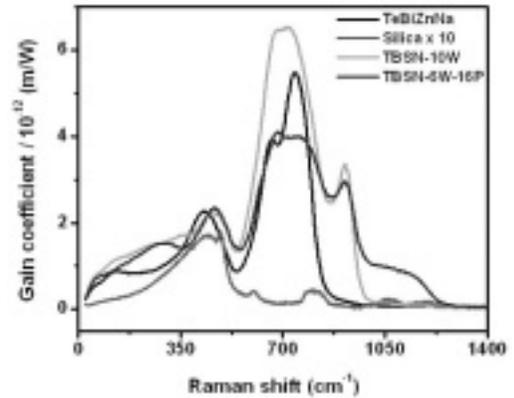


図7 テルライトガラスのラマン増幅係数スペクトル

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を求めた。

$$\begin{aligned} \pm \frac{dP_k}{dz} = & -\alpha_k P_k + \gamma_k P_k + \sum_{j=1}^{k-1} \frac{g v_k (v_j - v_k)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} P_j P_k + 2 h v_k \\ & \sum_{j=1}^{k-1} \frac{g v_k (v_j - v_k)}{K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} P_k \left[ 1 + \frac{1}{e^{h(v_j - v_k)/kT} - 1} \right] - \\ & \sum_{j=k+1}^{m+n} \frac{v_k g v_k (v_k - v_j)}{v_j K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} P_j P_k - 2 h v_k \sum_{j=k+1}^{m+n} \frac{v_k g v_k (v_k - v_j)}{v_j K_{\text{eff}} A_{\text{eff}}} P_k \\ & \left[ 1 + \frac{1}{e^{h(v_k - v_j)/kT} - 1} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

ここで  $P_i$ ,  $v_i$  および  $\alpha_i$  は、入射した光のパワー、周波数、減衰係数であり、 $g$  は利得係数、 $h$  はプランク定数、 $k$  はボルツマン定数、 $T$  は温度、 $K_{\text{eff}}$  は偏光因子、 $A_{\text{eff}}$  はコアの有効断面積である。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。励起波長数を変えたときの増幅帯域を図8に8波で励起したときのスペクトルを図9に示す。8波で励起したとき200 nm以上の波長域をカバーできることがわかる (図8)。8波で励起したとき利得偏差が約±0.5 dBで1460から1650 nmのS, CおよびLバンド全体をカバーできることがわかる (図9)。石英ファイバの場合、100 nm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。

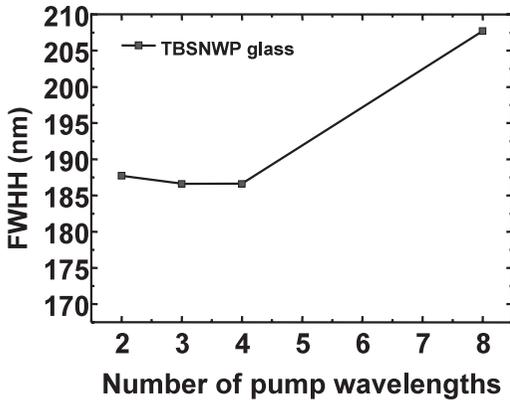


図8 テルライトファイバの励起波長数によるラマン増幅帯域の変化のシミュレーション結果

このように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きる。

### 5. まとめ

ラマン光増幅技術は波長多重システムにおいて、分布ラマン増幅を適用した場合の光 SNR 向上および希土類添加光ファイバ増幅器では得られない広帯域性および新規波長帯での動作の実現というメリットを持つため、キーデバイスとして注目され、すでに商用システムにおいても使われている。今後さらに本技術の高度化が予想され、新たな利得媒質や新たな応用研究も行われており、今後ますます進展が期待される分野である。

本稿では、利得帯域制御の観点からテルライトガラスのラマンスペクトルの制御に取り組み、従来ない広帯域化が図れることを明らかにした。今後は、その特性の検証およびラマン利得を利用した光波制御への展開が期待される。またテルライトガラスの構造とラマン散乱特性に関する研究もこれまでになされてきているが、更なる理解にはこの分野の研究進展も課題である。

謝辞

本研究は、本学鈴木健伸准教授、R. Jose 博士

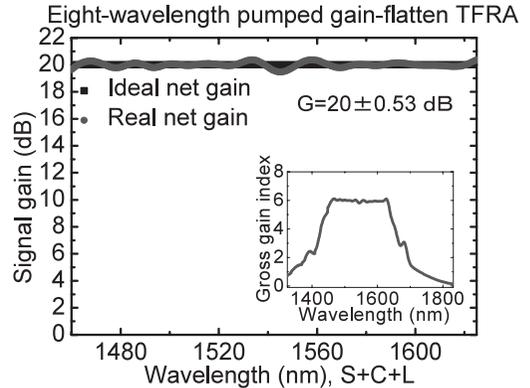


図9 8波長励起によるラマン増幅スペクトルのシミュレーション結果

研究員、S. M. Ganapathy 前博士研究員、G. Qin 博士研究員および荒井雄介博士研究員の協力によりなされたものであり、その貢献に深謝する。

また、本研究は文部科学省ハイテク・リサーチ・センター整備事業（2006年～2010年）および科研費特定領域研究の助成を受けている。

### 参考文献

- 1) M. N. Islam ed., Raman Amplifiers for Telecommunications, vol. 1 and 2, Springer, (2004)
- 2) 増田 浩次, 光学, vol. 29, 136-142, (2000)
- 3) P. A. Perrier, et al., SPIE OpticsEast, 6012-02, (2005)
- 4) H. Masuda, et al., PFC 2005, OThF 5, (2005)
- 5) A. Mori, et al., IEEE J. Lightwave Technol., vol. 37, 1300-1306 (2003)
- 6) 増田 浩次, レーザー学会学術講演会第 26 回年次大会講演予稿集, 205-206, (2006)
- 7) G. Senthil Murugan, et al., J. Appl. Phys., vol. 96, 2437-2442, (2004)
- 8) Y. Ohishi, et al., Opt. Lett., vol. 23, 383-385, (1995)
- 9) T. Seki, et al., J. Non-Cryst. Solids, vol 168, 106-114, (1994)
- 10) B. V. R. Chowdari, et al., Mater. Research Bull., vol. 34, 327-342, (1999)
- 11) R. Jose, et al, J. Opt. Soc. Am. B, vol. 24, 1517-1526, (2007)
- 12) T. Suzuki, et al., CLEO-PR 2005, CFI 2-5, (2005)
- 13) G. Qin, et al, IEEE J. Lightwave. Technol., vol. 25, in press.