

平成 21 年 5 月 31 日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19360167

研究課題名（和文） 超オクターブレーザ増幅媒体の研究

研究課題名（英文） Study on ultra-octave optical gain media

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：

Biのは近赤外発光の量子効率の向上を目指し、ホストの開発を行った。 $\text{GeO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-PbO}$ 系のゲルマネートガラスをホストとしたとき量子効率の格段の向上がみられた。量子効率はPbO濃度が4%のとき、60%にも達することを明らかにした。この量子効率は、報告者の知る限りこれまで報告された最大のものである。フェムト秒レーザー照射による加工で導波路構造形成が可能なることを明らかにした。超広帯域光増幅媒体候補になりえる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	10,600,000	3,180,000	13,780,000
2008年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
年度			
年度			
総計	13,200,000	3,960,000	17,160,000

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：先端的光通信、光信号処理、情報通信工、光物性、光増幅、ガラスレーザー材料、広帯域レーザー光源、Bi 添加光ファイバ

## 1. 研究開始当初の背景

時間軸上での超高速技術と周波数軸上での広帯域技術との融合によりこれまで情報通信技術は進歩してきた。アクセス網のブロードバンド化が進み、インターネット技術をベースとした情報化社会がますます進展すると将来はペタビット級の情報転送が必要になると考えられている。その超大容量な情報伝達はフォトニックネットワークにおける現在はまだ未使用の

波長帯域の開拓と光波制御技術の応用により実現可能と考えられる。その次世代の光情報通信ネットワークを構築のため、キーとなる技術は超高速かつ超広帯域な光波の生成と増幅をはじめとする光制御技術であり、その実現には超広帯域な光増幅媒体の実現が必須である。

このような状況下、2001年に Fujimoto 等により Bi 添加石英系ガラスが  $1.2\mu\text{m}$  帯に発光を持つことが報告され、その波長帯

が通信波長帯のひとつである  $1.3\mu\text{m}$  帯に近いことから、 $1.3\mu\text{m}$  帯用の光増幅媒体の可能性が研究されてきた<sup>(1)</sup>。また、Dianov 等は、Bi 添加石英系光ファイバを作製して  $1.15\mu\text{m}$  帯のレーザー発振を確認している<sup>(2)</sup>。しかし、これまで Bi のホストとして石英系ガラスが使われてきたが、 $\text{Bi}_2\text{O}_3$  の蒸気圧が石英ガラスに比べ非常に高く、石英系光ファイバへの添加量の制御が非常に難しいことが Dianov 等および住友電工(株)の研究グループによっても報告されている<sup>(3)</sup>。

- (1) Y. Fujimoto and M. Nakatsuka, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 40, P.L279, 2001.
- (2) E. M. Dianov, et al., Quantum Electron., vol. 35, P. 1083, 2005.
- (3) T. Haruna J. Iihara and M. Onishi, SPIE Optics East, vol. 6389. P. 638903-1, 2006.

## 2. 研究の目的

我々の開発した Bi 添加シリケートガラス増幅媒体の特性を実証解明して、得られた知見を基に更なる優れた特性を有するレーザー媒体の開発、および光増幅システム、超広帯域波長可変レーザーシステムや超端パルスレーザーシステムの開発につなげることを目的とする。

## 3. 研究の方法

- (1) 我々の開発した超オクターブ波長帯におよぶ増幅帯域をもつと期待される Bi 添加シリケートガラスの増幅帯域を解明する。
- (2) Bi 添加シリケートガラスのレーザー発振特性を検証を目指すことにより、波長可変レーザーや超短パルスレーザーとしてのフィジビリティを解明する。
- (3) これまでに開発した Bi 添加シリケートガラスの増幅媒体としての特性は、極限にまで到達したものとは考えられない。発光の量子効率がホスト組成依存性あることは、これまでの研究で把握できているがその定量性の解明はなされていない。それを解明して特性限界を見極める。

## 4. 研究成果

ガラスホストとして、先ず酸化ビスマスの添加の容易性を考慮し、熔融法で作製できる  $\text{SiO}_2\text{-Li}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3$  系シリケートガラス (LAS ガラス) を採用した。

図 1 は、Bi 添加シリケートガラスの吸収スペクトルを示す。480 nm や 700 nm に盛ら

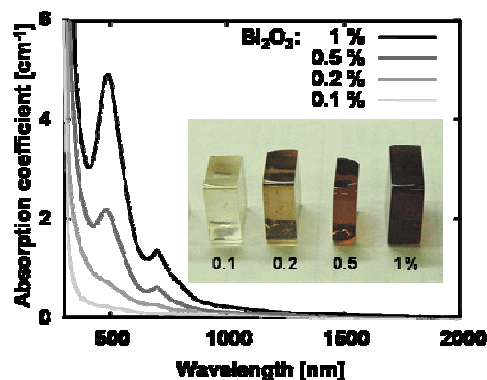


図 1 Bi 添加 LAS ガラスの吸収スペクトル。

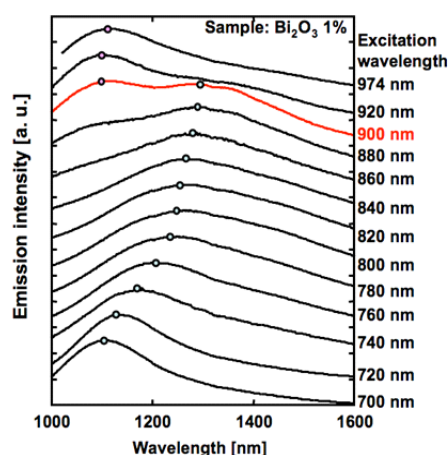


図 2 Bi 添加 LAS ガラスの発光スペクトルの励起波長依存性。

れる構造の明瞭な吸収帯のほかに、700 nm より長波長域に見られる吸収端の裾のような吸収帯を持っていることが分かる。480 nm や 700 nm 帯の吸収帯を励起してもこれまで報告されている近赤外発光が観測されるだけである。Bi 添加濃度とともに吸収強度が大きくなり、ガラスが強く着色されることが分かる。

図 2 は、700 nm 以上の波長域において、励起波長を変えて発光スペクトルを測定した結果を示している。700 nm 励起では 1100 nm にピークを持つ発光が観測される。励起波長を長波長に変えていくに従い、発光波長も長波長にシフトし、1300 nm にピークを持つ発光になる。しかし、900 nm 励起では再度 1100 nm にピークを持つ発光とともに 1300 nm にもピークを持つ発光が現れ、全体として 1000 nm 以上の非常に広帯域な発光

を示す。そして、さらに励起波長を長波長に

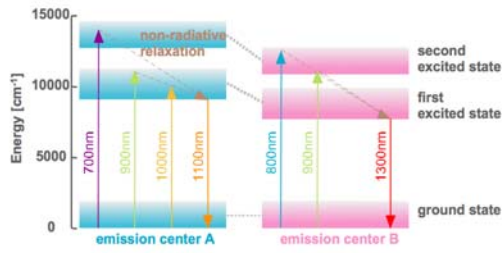


図3 発光センターのエネルギー準位の模式図.

すると再度 1100 nm にピークを持つ発光のみとなる。この現象を、単純化したモデルで考えるとガラス中に少なくとも2種類の発光中心は生成されていると考えられる。その様子を模式的に示したのが図3である。それぞれ2つの励起状態を持ち、それらが個別に励起されることにより、1100 nm や 1300 nm の発光が観測されることになると考えられる。

表1 図3における発光センターA および B による発光の特性.

	A	B
$\lambda_0$ [nm]	1092	1347
$\Delta\nu$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]	1404	1617
$\tau_{\text{rad}}$ [ $\mu\text{sec}$ ]	549	270
n	1.521	1.519
$\sigma_{\text{em}}$ [ $\text{cm}^2$ ]	$7.3 \times 10^{-21}$	$2.3 \times 10^{-20}$
$\sigma_{\text{em}}\tau_{\text{rad}}$ [ $\text{cm}^2\text{sec}$ ]	$4.0 \times 10^{-24}$	$6.1 \times 10^{-24}$

900 nm 付近で励起するとそれぞれの第一励起状態および第二励起状態が励起されて 1100 nm および 1300 nm の両発光が生じ、広帯域な発光になると考えられる。その二つの発光体の特性は表1にまとめた。

この2つの発光帯の寿命の温度依存性を図4に示す。低温ではそれぞれ 549  $\mu\text{sec}$ 、270  $\mu\text{sec}$  という長い寿命を持っている。温度を上昇させても 350 K 付近まではほぼ一定な値を取っている。広帯域な発光は一般にフォノンとの結合強く、室温以下で失活する場合が多く見られる。しかし、Bi の場合は、室温以上でも失活しにくいという特徴を有していることを明らかにした。

量子効率、約 11% であり、レーザー活性イオンとして十分値を持っているといえる、また、 $\sigma\tau$  積は、 $\text{Er}^{3+}$  には及ばないものの、 $\text{Tm}^{3+}$  や  $\text{Pr}^{3+}$  のレーザー発振遷移とほぼ同程度の値を持っている。発光の起源の解明は今後の課題であるが、試料作製条件と光学特性との相関等を考慮すると一種の還元種が考えられる。

さらに、量子効率をあげるためホストガラスの検討を進めた。その結果、 $\text{GeO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-PbO}$  (GAP) 系ガラスをホストとしたとき量子効率の格段の向上がみられた。量子効率は

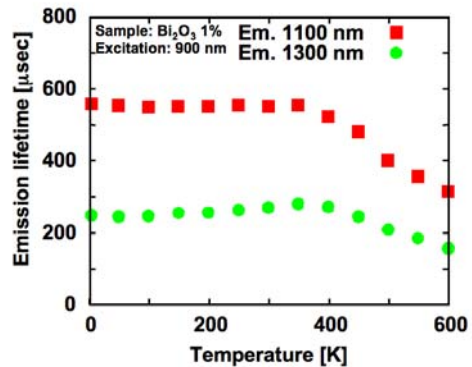


図4 Bi 添加 LAS ガラスの発光寿命の温度依存性

$\text{PbO}$  濃度に大きく依存し、 $\text{PbO}$  濃度が 4% のとき、60% にも達することを明らかにした (図5)。この量子効率は、報告者の知る限りこれまで報告された最大の値である。レーザー加工による導波路化を進めた。その結果、波長 800nm のフェムト秒レーザー照射による加工で導波路構造形成が可能であることを明らかにした。

また、Te 添加スピネル含有ガラス

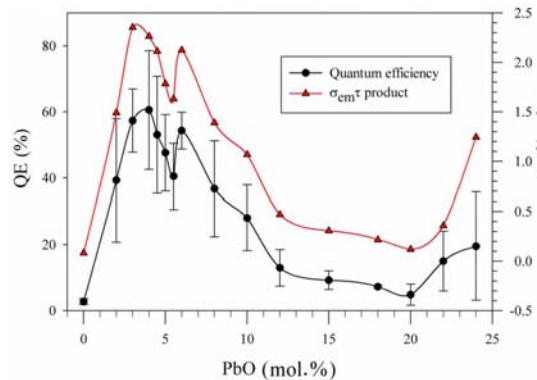


図5 Bi 添加 GAP の発光の量子効率の  $\text{PbO}$  濃度依存性.

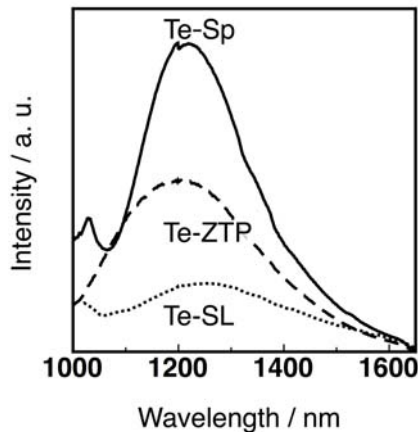


図6 Te 添 Sp、SL および ZTP の発  
光スペクトル。

( $26.54\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}10.59\text{ZnO}\text{-}5.25\text{MgO}\text{-}8.93\text{ZrO}_2\text{-}1.79\text{TiO}_2\text{-}46.9\text{SiO}_2\text{-}0.2\text{TeO}_2\text{:Te-Sp}$ )、Te 添加シリケートガラス ( $13\text{Na}_2\text{O}\text{-}8\text{CaO}\text{-}4\text{MgO}\text{-}2\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}K_2\text{O}\text{-}72\text{SiO}_2\text{-}1.6\text{TeO}_2\text{:Te-SL}$ )、リン酸塩ガラス ( $35.87\text{ZnO}\text{-}14.07\text{TeO}_2\text{-}50.06\text{P}_2\text{O}_5\text{:Te-ZTP}$ ) を作製し、その光学特性を検討した。その結果室温において Te 添加ガラスおよび透明結晶化ガラスから近赤外域での広帯域発光を確認した (図6)。図7に Te-Sp における波長 1200 nm での蛍光寿命の温度依存性を示す。300 K では 550  $\mu\text{s}$  である蛍光寿命が 200 K 以下に冷却することで 1.2 ms まで長寿命化することがわかった。これまで、このような発光は報告されてなくこの Te 添加ガラスからの近赤外発光は我々が初めて見出したものである。

発光スペクトル解析および蛍光寿命の測定結果から、室温における 1200 nm 中心の発光ピークの誘導放出断面積を計算したと

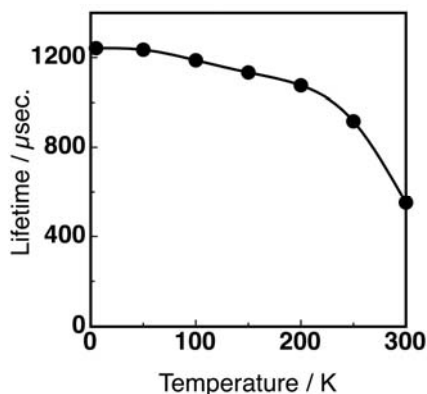


図7 Te-Sp の波長 1200 nm での蛍光  
寿命の温度依存性

ころ、 $\sigma_{em}=9.4\times 10^{-21}\text{cm}^2$ であった。これらの結果から、近赤外域での発光が初めて確認されたこれらの Te 添加ガラスおよび透明結晶化ガラスも、超広帯域光増幅媒体候補になれるであることを明らかにした。

#### 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 M. Hughes, T. Suzuki, Y. Ohishi, “Advanced bismuth-doped lead-germanate glass for broadband optical gain devices”, J. Opt. Soc. Am. B, 25 巻, 1380-1386, 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 大石泰丈, 鈴木健伸 “広帯域光増幅用結晶化ガラス”, セラミックス, 43 巻, 1031-1035, 2008 年, 査読有
- ④ S. Khonthon, P. Punpai, S. Morimoto, Y. Arai, T. Suzuki, Y. Ohishi, “On the near-infrared luminescence from  $\text{TeO}_2$  containing borate glasses”, J. Ceram. Soc. Japan, 116 巻, 829-831, 2008 年, 査読有
- ⑤ S. Morimoto, S. Khonthon, Y. Ohishi, “Optical properties of  $\text{Cr}^{3+}$  ion in lithium metasilicate  $\text{Li}_2\text{O-SiO}_2$  transparent glass-ceramics”, J. Non-Crystalline Solids, 354 巻, 1883-1890, 2008 年, 査読有。

[学会発表] (計 4 件)

- ① M. Hughes, T. Suzuki, Y. Ohishi, “Development of bismuth doped lead-aluminum-zinc-germanate glass as a broadband optical gain medium”, SPIE Photonics West 2009, 2009 年 1 月 26 日, San Jose, USA.
- ② M. Hughes, T. Suzuki, Y. Ohishi, “Improved bismuth doped aluminogermanate glass for broadband optical amplification”, 3<sup>rd</sup> EPS-QEOD Europhoton Conference, 2008 年 9 月 4 日, Paris, France.
- ③ T. Suzuki, M. Hughes, Y. Arai, Y. Ohishi, “Optical properties of Ni-doped  $\text{MgGa}_2\text{O}_4$  single crystal as potential candidate for new tunable

near-infrared laser”, 3<sup>rd</sup> EPS-QEOD Europhoton Conference, 2008年9月2日, Paris, France.

- ④ T. Suzuki, Y. Arai, Y. Ohishi, “Floating zone growth of Ni-doped MgCa<sub>2</sub>O<sub>4</sub> single crystal for near-infrared tunable laser”, SPIE Photonic Devices + Applications Symposium, 2008年8月12日, San Diego, 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

マーク ヒューズ (MARK HUGHES)  
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：90465584

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

情報通信研究機構 外林 秀之主任研究員  
(現 青山学院大学教授)  
スラナリ工科大学 森本 茂樹氏  
MIT E. P. Ippen 教授