

平成 21 年 4 月 1 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19760240

研究課題名(和文) 赤外レーザ複合光用超高耐久性無機薄膜内装中空ファイバ

研究課題名(英文) Hollow optical fiber with a high-durability-inorganic film for simultaneous delivery of infrared laser light

研究代表者

岩井 克全 (Iwai Katsumasa)

仙台電波工業高等専門学校・情報通信工学科・助教

研究者番号：10361130

研究成果の概要：効率よい結石破碎のため、Er:YAG レーザ光と Ho:YAG レーザ光の同時伝送システムを考案したが、ハイパワーレーザ光の安定かつ低損失な伝送が困難であった。そこで本研究では、有機樹脂膜内装銀中空ファイバに代わる、超高耐久性を有する無機薄膜内装銀中空ファイバの製作を行う。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,700,000	0	1,700,000
2008 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	450,000	3,650,000

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・赤外伝送路

1. 研究開始当初の背景

近年、医療用レーザ光源としては、Ho:YAG レーザ(波長 2.1 μm)、Er:YAG レーザ(波長 2.94 μm)、CO レーザ(波長 5 μm)、CO₂ レーザ(波長 10.6 μm)等の高出力レーザ光源が挙げられ、これらの伝送システムに関する研究が盛んに行われている。泌尿器科領域において、低侵襲の尿管内視鏡下レーザ結石破碎術が行われており、申請者は中空ファイバを用いた Er:YAG レーザ光による結石破碎の基礎実験を行い、その特性を明らかにした。更に効率よい破碎のため、Er:YAG レーザ光と Ho:YAG レーザ光の同時伝送システムを考

案したが、ハイパワーレーザ光の安定かつ低損失な伝送路の実現が必要と分った。そのためには、有機樹脂膜内装銀中空ファイバに代わる、超高耐久性を有する無機薄膜内装銀中空ファイバの製作を行う必要があると本研究課題の着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では以下のことを明らかにする。

- (1) 赤外波長帯の任意のハイパワーレーザ光を安定に低損失伝送可能な、内径 0.7 mm、長さ 2 m 程度の長さの無機薄膜内装銀中空ファイバを実現する。
- (2) ハイパワー Er:YAG レーザ光と

Ho:YAG レーザ光を同時伝送可能な無機薄膜内装銀中空ファイバを設計・製作する。

- (3) 2 波長同時伝送用無機薄膜内装銀中空ファイバを用いたレーザ結石破碎特性およびファイバの耐久特性の測定・評価を行う。

3. 研究の方法

本研究の方法について、以下に示す。

- (1) 任意赤外波長用無機薄膜内装銀中空ファイバの製作
ガラスキャピラリー - チューブ(内径 0.7 mm、長さ 2 m 程度)内部に、全液相法を用い銀膜と無機薄膜を 0.1~0.9 μm の厚さにコートする。その厚さを数十 nm オーダーで精密に制御することによって、任意のハイパワー赤外レーザ光用中空ファイバの製作を行う。
- (2) 2 波長破碎中空ファイバの設計と製作
衝撃波破碎用 Er:YAG レーザ光と Ho:YAG レーザ光を低損失に同時伝送を行うために、最適膜厚 0.3 μm を成膜した無機薄膜内装銀中空ファイバの製作を行う。
- (3) 任意赤外波長帯伝送用無機薄膜形成材料の調査
現在、評価した中で最も適した無機薄膜形成材料を用いているが、更に適した材料について調査を行う。
- (4) 高耐久性無機薄膜内装銀中空ファイバ伝送装置の構築と評価
無機薄膜内装銀中空ファイバ伝送システムを構築し、ファイバの耐久性を明らかにし、伝送装置としての問題点を調査する。
- (5) 2 波長破碎用無機薄膜内装銀中空ファイバの結石破碎への応用
高耐久性無機薄膜内装銀中空ファイバを用いて、Ho:YAG レーザと Er:YAG レーザによる複合破碎効果による効率よい結石破碎の基礎実験を行う。

4. 研究成果

赤外レーザ光を低損失に伝送可能な中空ファイバを製作するには、無機薄膜を形成する常温湿気硬化シリコン樹脂の吸収特性、屈折率、造膜性、厚膜性、接着性が重要となる。適切な無機薄膜溶液の探索を行った。数種類の無機塗料を用い、ガラス基板上ならびに銀中空ファイバに成膜して、無機膜の評価を行った。無機塗料の OC クリヤー No. 300 で成膜した無機薄膜は、ガラス基板上で付着力が強く、Er:YAG レーザ光の発振波長で吸収特性が比較的小さく、また光学膜として必要な膜厚を、1 回のコーティング工程により、成膜できた。耐久性試験として、ガラス基板上に成

膜した無機薄膜を、オートクレーブ(高圧加熱滅菌処理器)処理を行った結果、膜は剥離、損傷を生じないことが分った。よって、本研究では OC クリヤー No. 300 を用いる。

光学膜内装中空ファイバは、内装する光学膜の膜厚を変えることで目的のレーザ光の発振波長で低損失にすることができる。そこで、Er:YAG レーザ光と Ho:YAG レーザ光の伝送損失を、幾何光学的手法を用いて理論的に算出することにより、2 波長赤外レーザ光用の最適膜厚の設計を行った。無機薄膜の膜厚に対する各種レーザ光の伝送損失の理論計算結果を図 1 に示す。

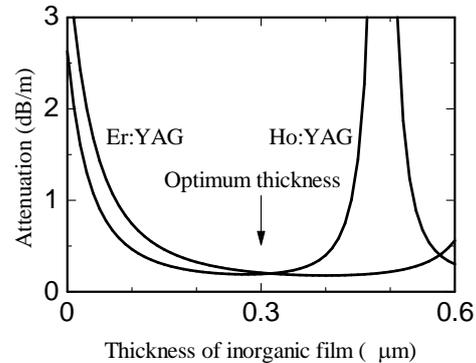


図 1 無機薄膜の膜厚に対する中空ファイバの伝送損失
但し、ファイバ内径 0.7 mm

2 波長赤外レーザ光伝送用無機薄膜の最適膜厚は 3 μm 程度と分った。

次に、2 波長赤外レーザ光用無機薄膜内装銀中空ファイバの製作を行った。無機薄膜を形成するために、OC クリヤー No. 300 を内径 0.7 mm、長さ 1~2 m の銀中空ファイバへ送液し、窒素雰囲気中で室温乾燥を行った。図 2 に製作した無機薄膜内装銀中空ファイバの波長損失特性を示す。

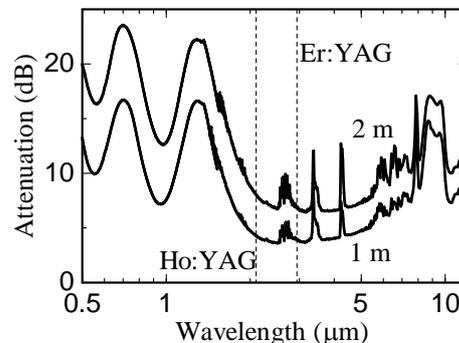


図 2 無機薄膜内装銀中空ファイバの波長損失スペクトル
但し、ファイバ内径 0.7 mm

2 波長赤外レーザ用として膜厚 0.3 μm 程度を成膜した結果、明確な干渉ピークが現れ、

均一な成膜ができ、Er:YAG レーザ光と Ho:YAG レーザ光の発振波長で、低損失になっている。

次に製作した無機薄膜内装銀中空ファイバの Er:YAG レーザ光伝送特性を評価した。測定系は、ファイバの一部(50 cm)を一定の曲率で曲げ、損失評価を行った。測定結果を図 3 に示す。

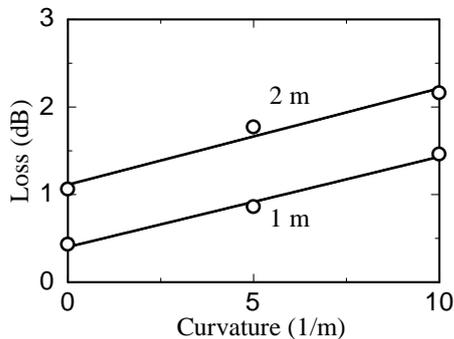


図 3 無機薄膜内装銀中空ファイバの Er:YAG レーザ光伝送特性
但し、ファイバ内径 0.7 mm

直線状態で長さ 1 m の場合、0.4 dB 程度、長さ 2 m で 1.1 dB 程度、曲げ状態(曲げ半径 10 cm、曲げ角 280°)で長さ 2 m の場合、2.2 dB となり、低損失なファイバの製作に成功した。曲率 10/m(曲げ半径 10 cm)で、きつく曲げた際の損失の増加は、ファイバ長 1 m および 2 m のどちらも 1 dB 程度と低損失であり、実際に要求される曲げ状態で十分使用可能と思われる。

2 波長赤外レーザ光伝送システムの構築を行った。図 4 にその伝送システムを示す。

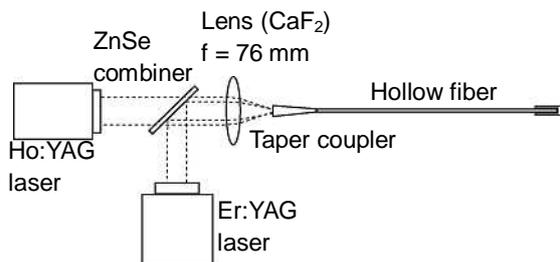


図 4 中空ファイバを用いた 2 波長赤外レーザ光同時伝送システム

伝送システムでは、ZnSe 多層膜ウィンドウを用い、Er:YAG と Ho:YAG レーザ光を同じ光軸方向に結合する。焦点距離 76 mm の CaF₂ レンズによって集光された Er:YAG と Ho:YAG レーザ光を、1 本の中空ファイバ(内径 0.7 mm)へ簡易に入射できるように、中空テーパ型入射結合器(入射端内径 1.1 mm、出射端内径 0.7 mm、長さ 8 cm)を用いた。

図 5 の測定系を用いて、2 波長赤外レーザ光の結石破碎の基礎実験を行った。レーザ光を照射した際の結石の移動について検討す

るため、軟組織として牛肉を用い、その上に結石を固定せずに配置し、結石破碎実験を行った。

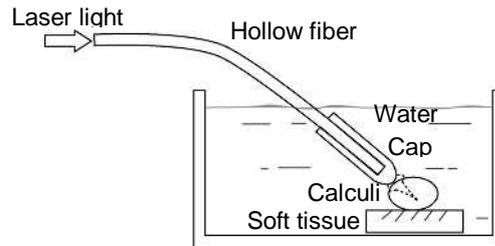


図 5 2 波長赤外レーザ光を用いた結石破碎

まず Ho:YAG と Er:YAG レーザ光の同時照射による結石破碎特性について、モデル結石を用いて検討する。モデル結石として、直径 6 mm の活性化アルミナボール(1 個の重さは 115 mg 程度)を用いた。この活性アルミナボールは、結石のように多数の小さな穴が開いた構造をしており、吸水性を有することから、モデル結石として用いた。

図 6 に、2 波長赤外レーザ光を 10 分間照射した後のモデル結石の破碎量を示す。

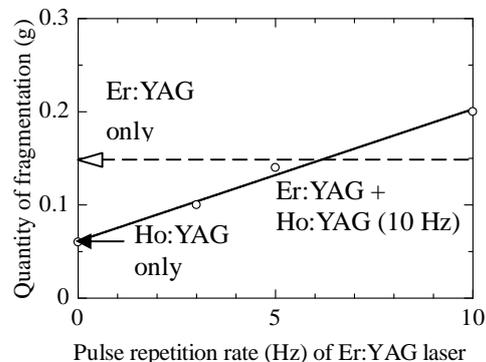
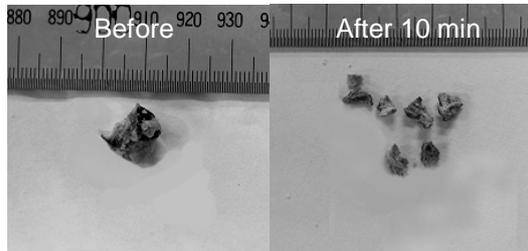


図 6 Er:YAG と Ho:YAG レーザ光照射後の活性アルミナ破碎量
但し、照射時間 10 分、
Ho:YAG の繰り返し周波数 10 Hz、
Er:YAG のみの繰り返し周波数 10 Hz、
Er:YAG と Ho:YAG レーザのパルスエネルギーは 100 mJ/pulse

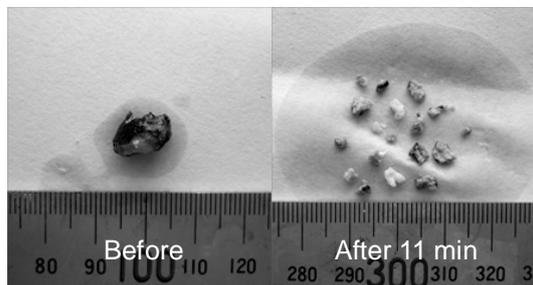
両方のレーザ光のパルスエネルギーを 100 mJ/pulse とし、Ho:YAG レーザ光の繰り返し周波数を 10Hz、Er:YAG レーザ光の繰り返し周波数を変化させた。Ho:YAG レーザ光のみの破碎量は 0.06 g 程度と少ない。Er:YAG レーザ光と同時伝送することで破碎量は増加した。繰り返し周波数 10 Hz の Er:YAG レーザ光の破碎量(0.15 g 程度)と、繰り返し周波数 10 Hz の Ho:YAG レーザ光と繰り返し周波数 5 Hz の Er:YAG レーザ光を同時照射した際の破碎量

がほぼ同程度であることが分かった。

次に、実際の結石を用いて破碎実験を行った。74%のリン酸カルシウムと26%の炭酸カルシウムを成分とする長さ10 mm、厚さ5 mmの腎結石を用いた。Er:YAG レーザ光のパルスエネルギーを200 mJ/pulse、繰り返し周波数を10 Hz、照射時間10分で結石破碎を行った結果を図7(a)に示す。大きい結石は、容易に砕くことができたが、更に細かく碎石するのは困難であった。これは、Er:YAG レーザ光の照射により、光軸方向に強い衝撃波が生じ、小さい結石は大きく動いたためと思われる。



(a) Er:YAG 200mJ, 10Hz



(b) Er:YAG 100mJ, 5Hz +
Ho:YAG 100mJ, 10Hz

図7 腎結石破碎前と破碎後

(a) Er:YAG のみ

(b) Er:YAG と Ho:YAG 照射

レーザー照射による結石の移動を抑制するために、Er:YAG レーザ光による光軸方向の衝撃波を抑える必要がある。そこで Er:YAG レーザ光の繰り返し周波数を10 Hz から5 Hz に下げた。その分、結石破碎量は減少するが、同時に Ho:YAG レーザ光を照射することで、結石破碎量を増加することができる。Er:YAG レーザ光のパルスエネルギー100 mJ/pulse、繰り返し周波数5 Hz、Ho:YAG レーザ光のパルスエネルギー100 mJ/pulse、繰り返し周波数10 Hz にして、2波長赤外レーザー光を同時照射した。図7(b)に示されるように、11分間照射後、結石を4 mm程度と細かく破碎することができた。細かく結石破碎を行うには、Er:YAG と Ho:YAG レーザ光の同時照射は有効であると思われる。

得られた成果の国内外における位置づけとインパクト、今後の展開について、以下に

示す。

(1) 送液法を用いた無機薄膜の成膜

光学薄膜の素材として、室温湿気硬化型の無機薄膜を内装した中空ファイバの製作例は他にない。簡便な送液法により、ガラス無機薄膜をコートする技術の開発により、内径1~0.1 mm程度の中空ファイバの耐久性・耐熱性を飛躍的に向上することが可能であると思われる。

(2) 衝撃波と熱蒸散による結石破碎用高耐久性中空ファイバの製作

結石破碎治療を主眼とし、1本の中空ファイバで

衝撃波・熱蒸散機能を有する赤外光の同時伝送による高効率破碎
全結石に対しての有効な破碎
ハイパワーレーザー光を安定かつ柔軟に伝送

という特長を持つ多機能性のある破碎器具は今まで全く提案されたこともなく、学術的にも先進的な研究を行うことができた。素材を無機薄膜内装銀中空ファイバにすることにより、高出力レーザー光を安全に柔軟に扱うことが可能になる。また、今回選択した無機薄膜は、各種赤外レーザー光の波長における材料吸収が小さく、レーザー医療の多くの診療科目への応用が可能であると思われる。

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14件)

K. Iwai, Y. W. Shi, M. Miyagi and Y. Matsuura, "Improved coating method for uniform polymer layer in infrared hollow fiber," *Opt. & Laser Technol.* Vol. 39, pp. 1528-1531 (2007), 査読有。

K. Iwai, M. Miyagi, Y. W. Shi, X. S. Zhu, and Y. Matsuura, "Infrared hollow fiber with a vitreous film as the dielectric inner coating layer," *Opt. Lett.* Vol. 32, pp. 3420-3422 (2007), 査読有。

H. Jelinkova, T. Dostalova, M. Nemeč, P. Koranda, M. Miyagi, K. Iwai, Y. W. Shi, and Y. Matsuura, "Free-running and Q-switched Er:YAG laser dental cavity and composite resin restoration," *Laser phys. Lett.* Vol. 4, pp. 835-839 (2007), 査読有。

M. Nakazawa, Y. W. Shi, K. Iwai, Y. Matsuura, X. S. Zhu, and M. Miyagi, "Flexible hollow polycarbonate fiber for endoscopic infrared laser

treatment," Proc. SPIE Vol. 6631, pp. 1-8 (2007), 査読有.

T. Watanabe, K. Iwai, and Y. Matsuura, "Dual-wavelength laser irradiation through hollow optical fiber for hard tissue ablation," Proc. SPIE Vol. 6852, pp. 68520E-1-68520E-6 (2008), 査読有.

M. Nemec, H. Jelinkova, M. Miyagi, K. Iwai, Y. W. Shi, Y. Matsuura, "Thin hollow glass waveguide for near IR radiation delivery," Proc. SPIE Vol. 6852, pp. 68520W-1-68520W-6 (2008), 査読有.

K. Iwai, Y. W. Shi, M. Miyagi, X. S. Zhu, Y. Matsuura, "Fabrication of 100- μ m-bore hollow fiber for infrared transmission," Proc. SPIE Vol. 6852, pp. 68520S-1-68520S-8 (2008), 査読有.

K. R. Sui, Y. W. Shi, X. L. Tang, X. S. Zhu, K. Iwai, and M. Miyagi, "Optical properties of AgI/Ag infrared hollow fiber in the visible wavelength region," Optics Lett. Vol. 33, pp. 318-320 (2008), 査読有.

K. R. Sui, X. S. Zhu, X. L. Tang, K. Iwai, M. Miyagi, and Y. W. Shi, "Method for evaluating material dispersion of dielectric film in the hollow fiber," Appl. Opt. Vol. 47, pp.6340-6344 (2008), 査読有.

K. Iwai, M. Miyagi, Y. W. Shi, X. S. Zhu, and Y. Matsuura, "Fabrication of hollow optical fiber with a vitreous film for CO₂ laser light delivery," Proc. SPIE Vol. 7173, (2009, in press), 査読有.

T. Watanabe, K. Iwai, and Y. Matsuura, "Simultaneous radiation of Er:YAG and Ho:YAG lasers for efficient ablation of hard tissues," Proc. SPIE Vol. 7173, (2009, in press), 査読有.

K. R. Sui, X. Lin, X. S. Zhu, Y. W. Shi, K. Iwai, and M. Miyagi, "Fabrication of SiO₂/AgI/SiO₂/Ag hollow glass fiber for infrared transmission," Proc. SPIE Vol. 7173, (2009, in press), 査読有.

M. Nemec, H. Jelinkova, M. Miyagi, K. Iwai, and Y. Matsuura, "250 μ m inner diameter hollow waveguide for Er:YAG laser radiation," Proc. SPIE Vol. 7173, (2009, in press), 査読有.

T. Dostalova, H. Jelinkova, P. Koranda, J. Sulc, M. Nemec, M. Miyagi, and K. Iwai, "Laser brackets depending:

Tm:YAP, Nd:YAG, and two diode lasers evaluation," Proc. SPIE Vol. 7162, (2009, in press), 査読有.

[学会発表](計 22 件)

M. Nakazawa, Y. W. Shi, K. Iwai, Y. Matsuura, X. S. Zhu, and M. Miyagi, "Flexible hollow polycarbonate fiber for endoscopic infrared laser treatment," European Conferences on Biomedical Optics2007, 6631-48 (2007. 6. 18, International Conference Centre, Munich, Germany).

岩井 克全, 渡邊 智紀, 松浦 祐司, "2波長赤外レーザー同時照射による生体組織の凝固・蒸散効果," 第502回東北大学伝送工学研究会, (2007. 7. 24, 東北大学).

岩井 克全, 宮城 光信, 松浦 祐司, "2波長同時伝送用中空ファイバを用いた結石破碎," 電気関係学会東北支部連合大会, 1H11, (2007. 8. 23, 弘前大学).

岩井 克全, 渡邊 智紀, 宮城 光信, 松浦 祐司, "2波長赤外レーザー光同時照射による生体組織の凝固・蒸散効果," レーザー学会第 364 回研究会 No. RTM-07-25, (2007. 8. 31, 熊本市口マネスクリゾート菊南).

岩井 克全, 志賀 香菜子, 宮城 光信, 石 芸尉, 松浦 祐司, "超細径銀中空ファイバの製作," 電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, C-3-32, (2007. 9. 13, 鳥取大学).

渡邊 智紀, 岩井 克全, 松浦 祐司, "多波長レーザー同時照射による硬組織蒸散," 日本光学会年次学術講演会, 26aM6, (2007. 11. 26, 大阪大学コンベンションセンター).

渡邊 智紀, 岩井 克全, 松浦 祐司, "中空ファイバを用いた二波長レーザー同時照射による硬組織蒸散," 第506回伝送工学研究会, (2007. 12. 15, 東北大学).

T. Watanabe, K. Iwai, and Y. Matsuura, "Dual-wavelength laser irradiation through hollow optical fiber for hard tissue ablation," SPIE Conference on Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics and Treatment Applications VIII (2008. 1. 19, San Jose Convention Center, San Jose, California USA).

K. Iwai, Y. W. Shi, M. Miyagi, X. S. Zhu, Y. Matsuura, "Fabrication of 100- μ m-bore hollow fiber for infrared transmission," SPIE Conference on

Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics and Treatment Applications VIII (2008. 1. 20, San Jose Convention Center, San Jose, California USA).

M. Nemeč, H. Jelinkova, M. Miyagi, K. Iwai, Y. W. Shi, Y. Matsuura, "Thin hollow glass waveguide for near IR radiation delivery," SPIE Conference on Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics and Treatment Applications VIII (2008. 1. 21, San Jose Convention Center, San Jose, California USA).

岩井 克全, 石 芸尉, 宮城 光信, 朱 曉松, 松浦 祐司, "無機薄膜内装中空ファイバの長尺化," レーザー学会学術講演会第28回年次大会, 16-31pV17, (2008. 1. 31 名古屋国際会議場).

岩井 克全, 宮城 光信, 石山 純一, "ポリエチレン内装銀中空ファイバの試作," 平成20年度電気関係学会東北支部連合大会, 2E09, (2008. 8. 22 日本大学 郡山市).

岩井 克全, 渡邊智紀, 松浦 祐司, "赤外レーザー光同時照射による軟組織の蒸散・凝固効果," 平成20年度電気関係学会東北支部連合大会, 2E08, (2008. 8. 22 日本大学 郡山市).

岩井 克全, 宮城 光信, 石 芸尉, 松浦 祐司, "赤外レーザー用内径 100 μm 中空ファイバの製作," 電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, B-13-24, (2008. 9. 17 明治大学 生田キャンパス).

渡邊 智紀, 岩井 克全, 松浦 祐司, "Er:YAG, Ho:YAG レーザの同時照射による硬組織の高効率蒸散," 電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, B-13-26, (2008. 9. 17 明治大学 生田キャンパス).

岩井 克全, 宮城 光信, 石 芸尉, 朱 曉松, 松浦 祐司, "CO₂ レーザー光伝送用無機薄膜内装中空ファイバの製作," 第29回レーザー学会学術講演会, 1312a11106, (2009. 1. 12 徳島大学).

M. Nemeč, H. Jelinkova, M. Miyagi, K. Iwai, and Y. Matsuura, "250 μm inner diameter hollow waveguide for Er:YAG laser radiation," SPIE Conference on Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics and Treatment Applications IX (2009. 1. 24, San Jose Convention Center, San Jose, California USA).

T. Dostalova, H. Jelinkova, P. Koranda, J. Sulc, M. Nemeč, M. Miyagi, and K. Iwai, "Laser brackets depending:

Tm:YAP, Nd:YAG, and two diode lasers evaluation," SPIE Conference on Lasers in Dentistry XV, (2009. 1. 24, San Jose Convention Center, San Jose, California USA).

K. Iwai, M. Miyagi, Y. W. Shi, X. S. Zhu, and Y. Matsuura, "Fabrication of hollow optical fiber with a vitreous film for CO₂ laser light delivery," SPIE Conference on Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics and Treatment Applications IX, (2009. 1. 25, San Jose Convention Center, San Jose, California USA).

T. Watanabe, K. Iwai, and Y. Matsuura, "Simultaneous radiation of Er:YAG and Ho:YAG lasers for efficient ablation of hard tissues," SPIE Conference on Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics and Treatment Applications IX, (2009. 1. 25, San Jose Convention Center, San Jose, California USA).

② K. R. Sui, X. Lin, X. S. Zhu, Y. W. Shi, K. Iwai, and M. Miyagi, "Fabrication of SiO₂/AgI/SiO₂/Ag hollow glass fiber for infrared transmission," SPIE Conference on Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics and Treatment Applications IX, (2009. 1. 26, San Jose Convention Center, San Jose, California USA).

② 岩井 克全, 板垣 静香, 安藤 美帆, 宮城 光信, 石 芸尉, 松浦 祐司, "赤外伝送用超細径銀中空ファイバの製作," 2009年電子情報通信学会総合大会 B-13-2, (2009. 3.17, 愛媛大学)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕
特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩井 克全 (Iwai Katsumasa)

仙台電波工業高等専門学校・

情報通信工学科・助教

研究者番号: 10361130