

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 4 月 19 日現在

機関番号：51303

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760255

研究課題名（和文） 複合赤外レーザ対応高強度・高信頼性伝送路の研究

研究課題名（英文） Study of a Rugged waveguide with reliability for simultaneous delivery of infrared laser light

研究代表者

岩井 克全（Iwai Katsumasa）

仙台高等専門学校・情報ネットワーク工学科・准教授

研究者番号：10361130

研究成果の概要（和文）：体内に挿入して使用する赤外レーザ複合光伝送システムには、半径 40 mm 以下の曲げに耐える中空ファイバが必要とされる。しかし従来の中空ファイバの製法では、十分な強度を有する中空ファイバの製造は難しい。本研究では、この強度劣化を防ぐための新しい手法を提案する。まず最初に、石英ガラスキャピラリーに保護膜として無機薄膜を成膜し、ついで従来採用されていた手法により、無機薄膜内装中空ファイバを製作する。

研究成果の概要（英文）：A new method is proposed to fabricate infrared polymer-coated silver hollow fibers with high mechanical strength. Two kinds of Inorganic polymer are used as a protective polymer to the inner wall of silica glass capillary and a dielectric layer to a silver layer, respectively. Mechanical and transmission properties of the hollow fibers have been discussed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

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：光デバイス・光回路・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)、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、ハ

イパワーレーザ光用伝送路として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図った。しかし曲げて使用すると折れ易く、特に高出力赤外レーザ伝送の際には、大きな曲げ機械強度特性を有する中空ファイバの実現が必要であると分った。そのためにはファイバの曲げ破損の原因となっている石英ガラスキャピラリーの微小欠陥成長の助長を抑える保護膜として、耐久性、付着力に優れた無機膜を用いた高強度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) 内径 0.7 mm、長さ 1 m 程度の長さで半径 40 mm の曲げに耐える大きな機械的強度をもちかつ、高出力赤外レーザー光伝送に耐える保護膜に無機膜を内装した高強度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高強度無機薄膜内装銀中空ファイバを設計・製作する。
- (3) 高強度無機薄膜内装銀中空ファイバの機械的特性ならびに赤外伝送特性について評価を行う。またレーザー結石破碎特性の測定・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) 保護膜に無機膜を用いた高強度中空ファイバの製作
従来、ポリマー内装銀中空ファイバの製作においては、一種類のポリマーが用いられ、赤外レーザー光に対して吸収が小さい材料が採用されていた。高強度ファイバを製作する上では、保護膜の作用をもつ無機膜を石英キャピラリーに内装し、その次に、従来から採用されていた手法により無機膜内装中空ファイバを製作する。この際、各種膜同士の接着性ならびに送液時の安定性が重要な課題になる。ガラスキャピラリー (内径 0.7 mm、長さ 1 m) 内部に、全液相法を用い、保護用無機膜、銀膜、低損失化用無機膜を 0.1 ~ 0.9 μm の厚さにコートする。保護膜と銀膜を成膜し、中空ファイバの強度と伝送特性について調べる。
- (2) 赤外レーザー複合光伝送用中空ファイバの設計と製作
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、無機膜の厚さを数十 nm オーダーで精密に制御することによって、最適膜厚 0.3 μm の成膜を行う。低損失化膜の成膜で、最も簡易な方法は、保護膜と同じ無機膜を用いることである。しかしながら、同じ無機膜を用いると、銀膜下にある保護膜が溶解することもある。よって成膜可能な無機膜の検討を行い、最適膜厚の成膜条件を明らかにする。
- (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、更に適した保護膜用無機膜、低損失化用無機膜の材料について調査を行う。

- (4) 高強度無機薄膜内装銀中空ファイバ伝送装置の構築と評価
高強度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
予備実験では、直線状態のファイバを用いて、Er:YAG レーザ光と Ho:YAG レーザ光の複合照射により、細かく破碎できることが分った。高強度無機薄膜内装銀中空ファイバを用いて、ファイバを曲げた状態 (曲げ半径 40 mm 程度、曲げ角 90 度) にして、結石破碎特性の測定を行う。

4. 研究成果

銀鏡反応の際に生じるガラスキャピラリーチューブ内面の微小欠陥を防ぐために、銀鏡反応溶液とガラスキャピラリーチューブ内面が触れないように保護コーティングを行う。まず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 (OC300) を用いる。

濃度 16 wt% の OC300 溶液を、ガラスキャピラリーチューブ (内径 0.7 mm、長さ 1 m) にマイクロチューブポンプを用いて、送液速度 4 cm/min で送液し、送液後、空気を流しながら室温乾燥 12 時間を行い、保護層としての無機膜を形成した。その上に銀鏡反応によって銀を成膜し、銀内装中空ファイバの製作を行った。保護無機膜の厚さは、約 0.2 μm である。同様の製法で、濃度 9 wt% の OC300 溶液を用いた場合、溶液の硬化時間は 1 週間程度かかり、保護無機膜の厚さは約 0.1 μm であったが、銀鏡反応後にファイバを曲げると折れてしまった。濃度 48 wt%、濃度 32 wt% の OC300 溶液を用いた場合、保護無機膜の厚さは、それぞれ約 0.8 μm と、約 0.4 μm であり、曲げ半径 15 mm で曲げても折れな

かったが、成膜工程において、およそ3時間程度で溶液の硬化が観察された。溶液を調合後、すぐにコーティング作業に取り掛かる必要がある。濃度 16 wt%を用いると、保護無機薄膜の膜厚は約 0.2 μm で、溶液はおよそ1日で硬化する。溶液の色は、濃度 48 wt%、濃度 32 wt%の OC300 溶液の透明な黄色よりも、更に黄色が薄く透明であり、硬化時間も適度に長く、複数の高強度中空ファイバを1つの OC300 溶液で製作するのに適していると思われるため、濃度 16 wt%の OC300 溶液を選択した。

図1に、無機薄膜内装高強度銀中空ファイバ(内径 0.7 mm、長さ 1 m)の損失波長特性を示す。図中の時間は銀鏡反応時間を示す。銀鏡反応時間 6 min で製作した高強度中空ファイバは、無機保護膜の粗さによる損失上昇はなく、損失値は従来の銀中空ファイバ(図1破線参照)と同程度であることを確認した。保護膜なしの場合、曲げ半径 30 mm で破損したが、高強度中空ファイバは、曲げ角 360 度、曲げ半径 15 mm に耐えた。

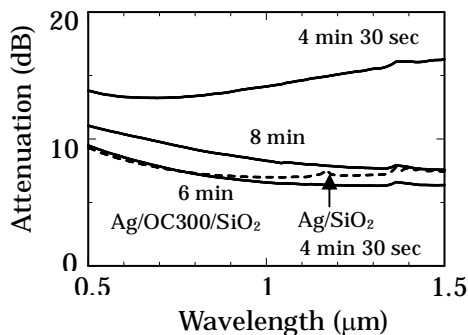


図1 無機薄膜内装高強度銀中空ファイバの損失波長特性
グラフ上に銀鏡反応時間を示す。

光学膜として、保護膜と同じ OC300 を用いたところ、送液の際に、保護膜に影響して均一な膜の成膜が困難であることが分った。そこで、無機材料で、銀膜との付着力が強く、耐熱性と耐久性に優れ、また毒性がないといわれるヨウ化銀(AgI)膜に注目し、光学膜として成膜したところ、保護膜に影響することなく、均一な光学膜の成膜に成功した。本研究では、光学膜として AgI 膜を選択することとする。

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ー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 波長赤外レーザー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2に示す。

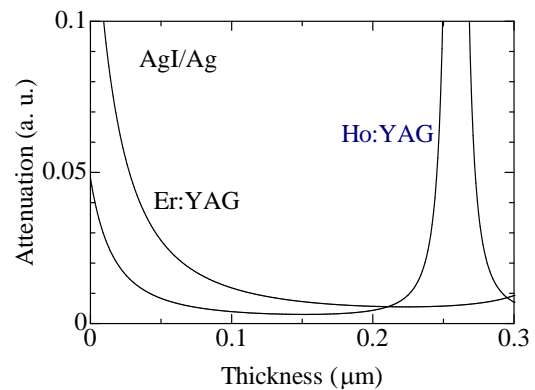


図2 2波長破砕用無機薄膜内装銀中空ファイバ用無機薄膜の膜厚特性

AgI 膜厚を 0.1 ~ 0.2 μm の範囲で、成膜することで、Er:YAG レーザ光と Ho:YAG レーザ光を低損失に伝送できることが分った。

図3に、無機保護膜つき AgI 膜内装銀中空ファイバの構造を示す。AgI 膜の成膜は、ヨウ素液と銀膜との反応によって行う。送液の際に、銀膜との反応によってヨウ素液の濃度が変化すると、AgI の膜厚が変化するため、長さ 1 m の中空ファイバに均一な AgI 膜を成膜するために、送液速度を速くし、また、溶液の濃度変化による膜厚の変動を抑えるために、数回に分けて、ヨウ素液を送液することで必要な膜厚を成膜した。具体的には、濃度 0.6wt%のヨウ素液を、内径 0.7 mm ガラスキャピラリーチューブに 15 cm 吸引し、無機保護膜つき銀中空ファイバ(内径 0.7 mm、長さ 1.1 m)にシリンジポンプを用いて、送液速度 84 mm/sec で送液し、送液後、空気を流しながら室温乾燥 30 分を行い、この成膜工程を4回行って、AgI 膜を形成した。

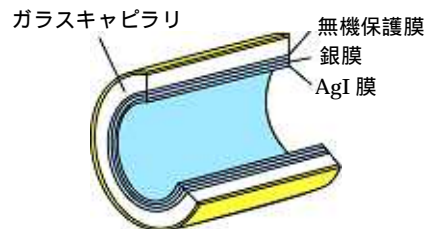


図3 高強度中空ファイバの構造

図4に AgI 膜内装高強度中空ファイバ (AgI/Ag/OC300、長さ 1 m) の損失波長特性を示す。測定には光スペクトラムアナライザを用い、光源はハロゲンランプで

FWHM10.6°のガウスビームで励振している。比較として、高強度銀中空ファイバ(Ag/OC300)の伝送特性も示す。明確な干渉ピークが見られ、均一なAgI膜が成膜できていると思われる。膜厚を推定した結果、成膜したAgI膜厚は0.12 μmと分った。2波長レーザー光を伝送するのに適した膜厚を成膜できていると思われる。

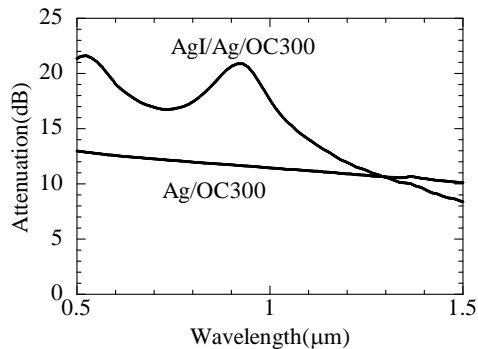


図4 AgI内装高強度中空ファイバ(内径0.7 mm、長さ1 m)の損失波長特性(FWHM10.6°のガウスビームにより励振)

図5に示す測定系で先端曲げ状態でのEr:YAGレーザー光伝送損失特性の評価を行った。Er:YAGレーザー光を焦点距離71 mmのCaF₂レンズで集光し、結合ファイバ(内径0.7 mm、長さ15 cm)を通して、無機保護膜つきAgI内装銀中空ファイバ(AgI/Ag/OC300、内径0.7 mm、長さ1 m)に入射する。中空ファイバの射出端を一定の曲げ半径で曲げ、Er:YAGレーザー光(パルス幅300 μs、繰り返し周波数5 Hz、エネルギー50 mJ)に対する伝送特性を評価した。

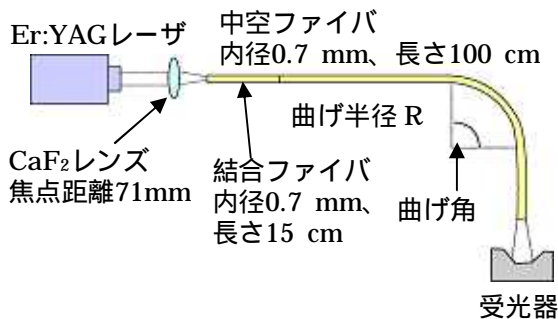


図5 先端曲げ状態でのEr:YAGレーザー光伝送損失測定系

結果を図6に示す。曲げ半径15 mmでも折れず、270°に曲げた際にも曲げ付加損失は約2 dB程度であった。直線状態の伝送損失は約2 dBである。

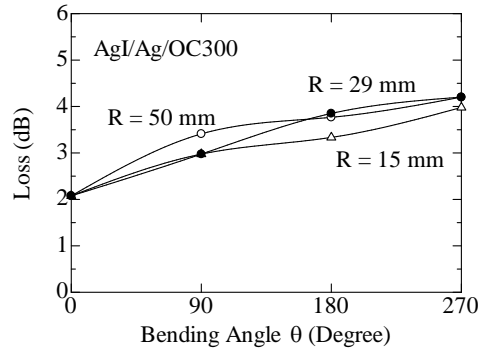


図6 曲げ状態時の伝送損失特性
曲げ半径

: 15 mm : 29 mm ○: 50 mm

次に、曲げ状態(曲げ半径15 mm、曲げ角270°)における無機保護膜つきAgI内装銀中空ファイバ(内径0.7 mm、長さ1 m)の高出力伝送特性の測定を行った。Er:YAGレーザー光(パルス幅300 μs、繰り返し周波数10 Hz)を入射し、最大出射エネルギー約129 mJで、高強度中空ファイバは、破損することなく伝送可能であった。

赤色パイロット光(発振波長650 nm)の伝送特性の測定を行った。直線状態において入力パワー5.1 μWで、出射パワー0.3 μWとなり、十分に視認可能であった。

結石破碎への応用として、Er:YAGレーザー光とHo:YAGレーザー光を同時に伝送可能な無機薄膜内装銀中空ファイバを用い、曲げ角270°、曲げ半径15 mmの状態モデル結石(アルミナボール)に照射した後の破碎量を測定した。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。Er:YAGレーザー光の照射エネルギーは約50 mJ、繰り返し周波数10 Hzである。照射時間は、30分とした。Er:YAGレーザー光による破碎量は0.07 gであり、曲げ状態で破碎することに成功した。Ho:YAGレーザー光(パルスエネルギー約100 mJ、繰り返し周波数10 Hz、照射時間10分)の破碎量は0.06 g程度である。Er:YAGレーザー光と同時伝送することで破碎量は増加する。Er:YAGレーザー光の照射により、光軸方向に強い衝撃波が生じ、Er:YAGレーザー光の出射エネルギーを増加すると小さい結石は大きく動く。本実験では、結石をピンセットで固定して連続的にレーザー光を照射したが、効率よく結石破碎を行うために結石を固定するための先端器具が必要と思

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) 可視～赤外波長帯レーザ用で、フレキシブルに扱うことができ、機械的に安定なファイバは高強度中空ファイバのみである。
- (2) 石英ガラスキャピラリーの保護膜に無機膜を用いた、曲げ負荷に対して強く、高い信頼性で高出力Er:YAGレーザ光を伝送可能な中空ファイバは本課題で製作した中空ファイバが最初である。

結石破碎治療を主眼とし、1本の中空ファイバで

- (1) 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
- (2) 全結石に対しての有効な破碎
- (3) ハイパワーレーザ光を安全かつ柔軟に伝送

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であり、素材を無機薄膜内装銀中空ファイバにすることにより、高出力レーザ光を安全に柔軟に扱うことが可能となった。また、用いる無機薄膜は、各種赤外レーザ光の波長における材料吸収が小さく、レーザ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11件)

K. Iwai, M. Suzuki, M. Miyagi, Y. W. Shi, and Y. Matsuura, "Uniform polymer-film formation in 100- μ m-bore hollow fiber for Er:YAG laser transmission," Proc. SPIE Vol. 8218, (2012, in press), 査読有.

H. Jelinkova, M. Nemeč, M. Miyagi, K. Iwai, H. Takaku, M. Doroshenko, T. Basiev, A. M. Prokhorov, V. Badikov, and D. Badikov, "Dy:PbGa₂S₄ laser radiation and its delivery by hollow waveguide," Proc. SPIE Vol. 8218, (2012, in press), 査読有.

B. S. Sun, X. L. Tang, Y. W. Shi, K. Iwai, and M. Miyagi, "Optimal design for hollow fiber inner-coated by dielectric layers with surface roughness," Proc. SPIE Vol. 8218, (2012, in press), 査読有.

A. Hongo, S. Sato, A. Hattori, K. Iwai, H. Takaku, and M. Miyagi, "AgI-coated

silver-clad stainless steel hollow waveguides for infrared lightwave transmission and their applications," Appl. Opt. 51, 1, pp. 1-7 (2012), 査読有.

B. S. Sun, X. L. Tang, Y. W. Shi, K. Iwai, and M. Miyagi, "Optimal design for hollow fiber inner-coated by dielectric layers with surface roughness," Optics Letters, Vol. 36, No. 17, pp. 3461-3463 (2011), 査読有.

H. Jelinkova, M. Nemeč, J. Sulc, M. Miyagi, K. Iwai, H. Takaku, M. Doroshenko, T. T. Basiev, V. K. Komar, and A. S. Gerasimenko, "Transfer of Fe:ZnSe laser radiation by hollow waveguide," Laser Phys. Lett. Vol. 8, No. 8, pp. 613-616 (2011), 査読有.

M. Nemeč, H. Jelinková, J. Šulc, M. Miyagi, K. Iwai, H. Takaku, M. Doroshenko, T. Basiev, and V. Komar, "Fe:ZnSe laser radiation transmission by hollow waveguide," Proc. SPIE Vol. 7894, pp. 789405-1-789405-7 (2011), 査読有.

K. Iwai, M. Miyagi, Y. W. Shi, and Y. Matsuura, "Fabrication of silver-coated hollow fiber with an inner diameter of 100 μ m or less," Proc. SPIE Vol. 7894, 78940B-1-78940B-8 (2011), 査読有.

B. S. Sun, X. Zeng, K. Iwai, M. Miyagi, N. Chi, and Y. W. Shi, "Experimental investigation on liquid-phase fabrication techniques for multilayer infrared hollow fiber," Optical fiber technology, Vol. 17, pp. 281-285 (2011), 査読有.

T. Watanabe, K. Iwai, T. Katagiri, and Y. Matsuura, "Synchronous radiation with Er:YAG and Ho:YAG lasers for efficient ablation of hard tissues," Biomedical Optics Express, Vol. 1, pp. 337-346 (2010), 査読有.

C. Yang, H. Hua, W. Tan, K. Iwai, M. Miyagi, N. Chi, and Y. Shi, "Loss spectrum measurement for infrared hollow fiber based on the Fourier transform infrared spectrometer," Appl. Opt. Vol. 49, pp. 2504-2509 (2010), 査読有.

[学会発表](計12件)

岩井 克全, 高久 裕之, 宮城 光信, 石 芸尉, "内視鏡用高強度ポリマー内装中空ファイバによるEr:YAGレーザー伝送," 第32回レーザー学会学術講演会,

1701pV103, (2012. 2. 1 TKP 仙台カンファレンスセンター 仙台市).

B. S. Sun, X. L. Tang, Y. W. Shi, K. Iwai, and M. Miyagi, "Optimal design for hollow fiber inner-coated by dielectric layers with surface roughness," Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics and Treatment Applications XII, (2012. 1. 22, The Moscone Center San Francisco, California, USA).

H. Jelinkova, M. Nemeč, M. Miyagi, K. Iwai, H. Takaku, M. Doroshenko, T. Basiev, A. M. Prokhorov, V. Badikov, and D. Badikov, "Dy:PbGa2S4 laser radiation and its delivery by hollow waveguide," Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics and Treatment Applications XII, (2012. 1.22, The Moscone Center San Francisco, California, USA).

K. Iwai, M. Suzuki, M. Miyagi, Y. W. Shi, and Y. Matsuura, "Uniform polymer-film formation in 100- μ m-bore hollow fiber for Er:YAG laser transmission," Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics and Treatment Applications XII, (2012. 1.21, The Moscone Center San Francisco, California, USA).

岩井 克全, 鈴木 雅尚, 宮城 光信, 石 芸尉, "均一無機薄膜内装内径 100 μ m 中空ファイバの伝送特性," 電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, B-13-9, (2011. 9.14 北海道大学 札幌市).

岩井 克全, 高久 裕之, 宮城 光信, 石 芸尉, "シリコン熱収縮ゴムチューブ外装高強度中空ファイバの製作," 平成 23 年度電気関係学会東北支部連合大会, 2H15, (2011. 8. 26 東北学院大学 多賀城市).

岩井 克全, 鈴木 雅尚, 宮城 光信, 石 芸尉, "均一無機薄膜内装内径 100 μ m 中空ファイバの製作," 電子情報通信学会総合大会, p. 520. B-13-44, (2011. 3.17 東京都大学 東京).

M. Nemeč, H. Jelinková, J. Šulc, M. Miyagi, K. Iwai, H. Takaku, M. Doroshenko, T. Basiev, and V. Komar, "Fe:ZnSe laser radiation transmission by hollow waveguide," Optical Fibers, Sensors, and Devices for Biomedical Diagnostics and Treatment XI, (2011. 1. 22, The Moscone Center San Francisco, California, USA).

K. Iwai, M. Miyagi, Y. W. Shi, and Y. Matsuura, "Fabrication of silver-coated hollow fiber with an inner diameter of 100 μ m or less," (Optical Fibers, Sensors, and Devices for Biomedical Diagnostics and Treatment XI, (2011. 1. 22, The Moscone Center San Francisco, California, USA).

岩井 克全, 高久 裕之, 宮城 光信, 石 芸尉, "無機薄膜内装高強度銀中空ファイバの製作," 第 31 回レーザー学会学術講演会, 1410p 05, (2011. 1. 10 電気通信大学 調布市).

岩井 克全, 元木 沙綾, 宮城 光信, 石 芸尉, "内径 50 μ m 銀中空ファイバの伝送特性の改善," 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-3-38, (2010. 9.16 大阪府立大学 堺市).

岩井 克全, 高久 裕之, 宮城 光信, 石 芸尉, "中空ファイバにおける環状オレフィンポリマー成膜法の改善 - COP 溶液の濃度に対する粘度特性 -, " 平成 22 年度電気関係学会東北支部連合大会, 2B11, (2010. 8. 27 八戸工業大学 八戸市).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 1 件)

名称: 中空導波路、及びレーザー治療器具
発明者: 岩井 克全, 宮城 光信, 岡上 吉秀, 村上晴彦
権利者: モリタ製作所
種類: 特願
番号: 2010-277099
出願年月日: 平成 22 年 12 月 13 日
国内外の別: 国内

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等
特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩井 克全 (Iwai Katsumasa)
仙台高等専門学校・
情報ネットワーク工学科・准教授
研究者番号: 10361130