

機関番号：5 1 3 0 3

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：2 0 3 6 0 1 6 4

研究課題名(和文) 医療用 Er:YAG レーザ対応型高耐力高機能中空ファイバ先端素子

研究課題名(英文) High-durability and performance distal hollow fiber tips for Er:YAG medical laser

研究代表者

宮城 光信(MIYAGI MITUNOBU)

仙台高等専門学校・名誉教授

研究者番号：9 0 0 0 6 2 6 3

研究成果の概要(和文): 波長が 2 μm 以上の赤外波は有効性が確認されつつも、光源から患部への導光手段として石英光ファイバが使えず、中空ファイバが使用されてきている。中空ファイバを用いた効率良いレーザ治療を行うには、先端素子に対してレーザ光を高効率に導光できる性能が要求されている。本研究では、治療を効果的に行うために、強固でしかも患部に Er:YAG レーザ光を効率的に照射できる種々の機能を有する先端素子の開発を行う。

研究成果の概要(英文): The application of the medical infrared laser with a wavelength of 2 μm and over is expanding in almost all the sub fields in medicine. In many medical applications, there is a critical requirement for high-durability and performance distal hollow fiber tips. We report on the fabrication of high-durability and performance distal hollow fiber tips for Er:YAG medical laser.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2009 年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2010 年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

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・赤外光伝送路

1. 研究開始当初の背景

ファイバで導光レーザ光をハンドピース部分の先端部に装荷された先端素子で制御する現存する素子は石英ガラスからなるバルキー素子であり、波長が 2 μm 以上の赤外波に適用できる効率的な素子は限られている。それ故、種々のレーザ治療に際し、その開発は緊急必須の課題になっている。申請者は、予備実験を行い、Er:YAG レーザ光伝送可能な、無機薄膜ガラスを内装した中空ファイバを送液法により製作が可能なることを見出した。これにより、高耐力高機能先端素子

が実現される見通しを得た。

国内外での関連する研究の中での当該研究の位置づけは、次の通りである。

中空ファイバを用いる Er:YAG レーザ治療器の先端素子で、先端微小部分でのレーザ光の拡散、収束、方向変換を可能とする素子は、世界最初である。このことは医療機器開発の上で、多効能・高性能医療機器の実現に対して、大きな貢献を果たしうる。

2. 研究の目的

治療用レーザの内、波長が 2 μm 以上の赤

外波はその有効性が確認されつつも、レーザ発振器から患部へのレーザ光の導光手段は従来の石英光ファイバが使えないため、中空ファイバが使用されている。しかし、患部に接触して使用する先端素子は高効率でレーザ光を導光できると滅菌工程に耐える性能が要求されている。現時点はこの要求性能を満たす中空ファイバが無いと、導光効率を犠牲にした短尺の中実のガラスファイバ素子が使用されている。医療現場での感染が社会問題になっている昨今、滅菌工程に耐える中空ファイバを実現できれば、その導光効率の高さ、経済性のメリットで、市場を席卷できる可能性を秘めている。医療用レーザ装置に要求される4要素は、レーザ本体、制御系、伝送ファイバ、先端素子である。本申請ではこの中で、治療を効果的に行うために、強固でしかも患部にEr:YAGレーザ光を効率的に照射できる、種々の機能を有するレーザ先端素子の開発を行う。従来の素子は伝送損失も大きく、機能も限られ、耐久性にも問題を有していた。本申請で開発する先端素子は、

- (1) 無機ガラス材料が内面にコートされた銀中空ファイバを用いること
- (2) そのファイバ先端部が種々の形状を有する無機ガラス材料を基本とすること
- (3) 先端素子での光伝送損失が小さく、レーザ本体の負荷を小さく出来ること
- (4) 外径 0.15 mm の細径な先端素子として機能すること
- (5) オートクレーブ消毒あるいはディスプレイ化が可能であること
- (6) 製作法が単純で、低コスト化が可能であること

等の特長を有し、現存する先端素子に対して、機能、価格の上で極めて優位に立つ素子である。

3. 研究の方法

(1) 無機ガラス薄膜内装中空ファイバの製作と評価

人体組織に強く吸収され、効率のよい蒸散・切開が可能なEr:YAGレーザ用の中空ファイバとして、従来より申請者が開発を進めてきている。細径石英キャピラリーチューブに銀薄膜と無機薄膜がコートされた中空ファイバの製作を行い、製作したファイバの評価を行う。

(2) 高耐久性出射マイクロ素子の製作と評価

内径 320 μm の先端素子一体型中空ファイバ製作法を基に内径 100 μm の超細径先端素子一体型中空ファイバの製作を図る。

(3) 高耐久性シールド膜付先端素子の製作

医療用レーザの先端素子は、販売価格で1本当たり数万円である。これは、充実型ファイバの性能を確保するための加工工程の複雑さが要因である。一方中空ファイバは簡単な

構造で安価に製造できる。その点、医療費抑制のためにも、消耗品であるレーザ照射先端素子を普及させることはきわめて大きな経済効果がある。歯などの硬組織に先端素子を用いた場合、Er:YAGレーザ光により切除された飛散物が先端部につき、磨耗を引き起こす。簡易な先端溶融法を用いて、先端素子保護膜の形成技術の開発を図る。

(4) Er:YAGレーザ先端装置の構築と評価

Er:YAGレーザ装置を用いて高耐久性高機能先端素子を組み込み、伝送損失特性の評価を行う。

4. 研究成果

(1) 無機ガラス薄膜内装中空ファイバの製作と評価

無機ガラス薄膜内装中空ファイバの製作を行う。無機薄膜の形成は送液法により行う。無機溶液に、室温硬化型特殊無機塗料 OC No. 300 クリヤー (OC300) を選択した。OC300 溶液は、室温で硬化ガラス膜を形成でき、1回の成膜で目的の膜厚を成膜できる。またEr:YAGレーザ光の波長における材料吸収も大きくなく実用的である。図1に、OC300溶液の濃度に対する無機薄膜の膜厚特性を示す。内径 0.32 ~ 1 mm の銀膜内装中空ファイバを用いた。図1中に各種内径と送液速度の値を示す。Er:YAGレーザ光伝送用の無機薄膜内装中空ファイバを製作するために濃度 30 ~ 40 wt% 程度を用いるとよいと思われる。

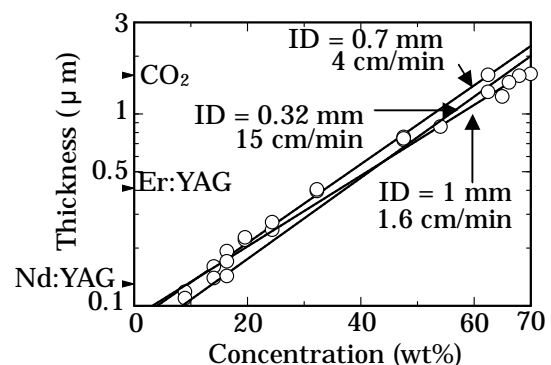


図1 無機溶液(OC300)の濃度に対する膜厚特性

内径 100 μm 、長さ 30 cm の銀中空ファイバに OC300 溶液を送液速度 10 cm/min で送液し、その後、窒素ガスを流量 100 ml/min で流しながら、室温乾燥を 1 時間行った。

図2に製作した内径 100 μm 無機薄膜内装銀中空ファイバ(長さ 10 cm)の可視~近赤外波長帯における損失波長スペクトル(FWHM10.6度のガウスビームで励振)を示す。OC300溶液は、溶液濃度 38 wt%を用いて、Er:YAGレーザ光伝送に適した膜厚を成膜することに成功した。膜厚は 0.28 μm であ

る。明確な干渉ピークが見られ、ファイバ内に均一な光学膜を形成できていると思われる。濃度 32 wt%を用いて製作した無機薄膜内装中空ファイバは、Nd:YAG レーザ(波長 1.064 μm)伝送用に適していると思われる。

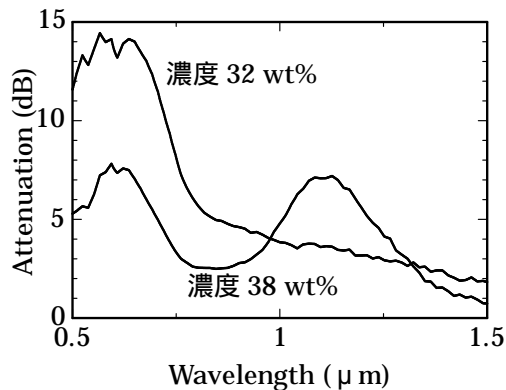


図 2 内径 100 μm 無機薄膜内装中空ファイバの可視～近赤外波長損失特性

手術用器具による感染症の危険性を防ぐために、滅菌処理のオートクレーブに対する耐久性の評価を行った。無機薄膜の耐久性を評価するために、内径 0.7 mm、長さ 10 cm の Er:YAG レーザ光伝送用 OC300 内装銀中空ファイバと銀中空ファイバを用いた。

オートクレーブの条件は、滅菌温度 135 $^{\circ}\text{C}$ 、滅菌時間 3 分、最高圧力 0.26 MPa を用いた。オートクレーブのサイクル回数に対する Er:YAG レーザ光の伝送特性を図 3 に示す。Er:YAG レーザ光の条件は、パルス幅 300 μsec 、繰り返し周波数 10 Hz、入射エネルギー 60 mJ/pulse である。

オートクレーブ処理後、すぐに次のオートクレーブ処理をした場合は、無機薄膜内装銀中空ファイバは、2 回で損失は増加したが、オートクレーブ後に、室温で、30 分間、窒素ガスを 100 ml/min で流しながら乾燥した場合、4 回のオートクレーブ処理をしても、大きく損失増加しないことが分かった。

次に Er:YAG レーザ用の内径 100 μm 無機薄膜内装銀中空ファイバを製作してオートクレーブ耐久試験を行った。結果は、1 回のオートクレーブ処理で、内部の銀膜が動いてしまい、銀膜厚の変動により、伝送特性が大きく増加することが分かった。しかしながら、内径 100 μm 無機薄膜内装銀中空ファイバは、無機薄膜の成膜条件が明らかになったことで、比較的容易に製作でき、また細径銀中空ファイバは、1 回の銀鏡反応で数百本のファイバを製作できることからディスプレイな使用が可能であると思われる。

(2) 高耐久性出射マイクロ素子の製作と評価

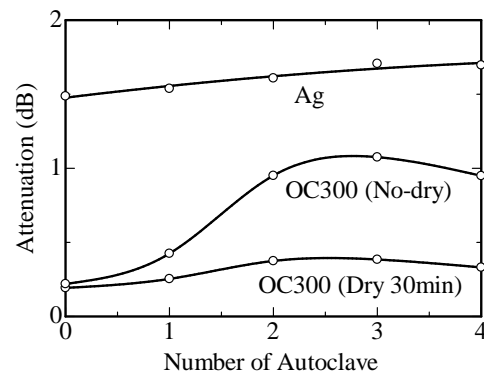


図 3 オートクレーブの使用回数に対する OC300 内装銀中空ファイバの Er:YAG レーザ光伝送損失特性 但し、内径 0.7 mm、長さ 10 cm

光学ポリマー内装銀細径中空ファイバ(内径 320 μm 、外径 450 μm)の先端部をガスバーナーで加熱し、母材の石英ガラスを溶融して先端封止を行った。石英ガラスは人体に対して無害で、しかも 1 mm 程度の厚さであれば、比較的高い透過率を持っているため、先端封止の材質として優れている。内径 320 μm の先端素子一体型中空ファイバ製作法を基に内径 100 μm の超細径先端素子一体型中空ファイバの製作を図った。内径 100 μm 中空ファイバの先端をガスバーナーで溶融すると、中空ファイバ内面の銀膜、無機膜が除去される部分(エッチング部)が 1 cm と大きく、伝送損失は大幅に増加することが分かった。これは、ガスバーナーの炎の幅が大きいためで、今回用いたガスバーナーの先端ノズル径は、孔径 0.5 mm を用いたが、それでも炎の幅は、数 mm あり、エッチング部分の距離を縮めるのは困難であった。そこで、光ファイバ融着接続器を用いることで、内径 100 μm 中空ファイバのエッチング部を短くして、伝送損失増加の抑制を試みた。光ファイバ融着接続器は、通常は、通信用の石英ガラスファイバ同士を接続するための装置であるが、通信用の光ファイバの外径は 125 μm であり、また材質も同じ石英ガラスであることから、内径 100 μm 中空ファイバの先端封止装置として使えると思われる。また光ファイバ融着接続器のアーカ放電の幅は、1 mm 以下であり、十分にエッチング部分の距離を短く出来ると思われる。図 4 に光ファイバ融着接続器を用いて製作した先端封止細径中空ファイバを示す。内径 100 μm 中空ファイバは、外径 170 μm ガラスキャピラリーを母材としており、その外装保護膜として、厚さ 12 μm のポリイミド膜がコーティングされている。ファイバ先端の加熱により、ポリイミド膜が除かれ、外径は 146 μm となり、目標値の外径 0.15 mm 以下となっ

ている。内径 100 μm 、ファイバ長は 10 cm であり、エッチング部の長さはおよそ 1 mm に縮めることに成功した。先端封止部の厚さは、約 0.3 mm である。完全に封止出来ているため、水中での使用に耐えうると思われる。

光ファイバ融着接続器は、顕微鏡を用いてファイバ先端を見ながら、加工できるため、ファイバの固定位置を決め易く、安定して先端封止素子を製作できると思われる。

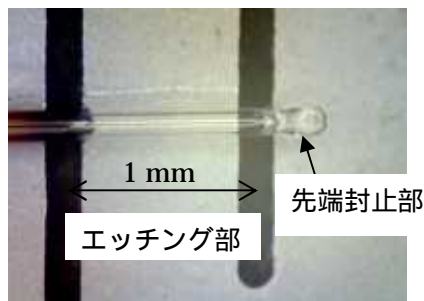


図 4 高耐久性出射マイクロ素子

(3) 高耐久性シールド膜付加先端素子の製作
歯などの硬組織に先端素子を用いた場合、Er:YAG レーザ光により切除された飛散物が先端部につき、磨耗を引き起こす。簡易なディッピング法または先端溶融法を用いて、先端封止部の修復技術の開発を図った。

先端素子に保護膜を形成する手法として、まず、ポリシロキサンをディッピングして、乾燥し、硬化ガラス膜を先端素子に付けるという簡易な方法について試みた。無機溶液として、市販されているナノコート・トップコート、OC クリヤー No. 300 などを評価した。ナノコート・トップコートのガラス膜の波長損失特性を図 5 に示す。ナノコート・トップコートは、波長 2.94 μm で比較的吸収が少なく、有効な材料と思われたが、ガラス板にコーティングして、オートクレーブ処理を行ったところ、1 回の処理でナノコート・トップコート膜は剥がれてしまうことが分かった。OC クリヤー No. 300 (OC300) のガラス膜の波長損失特性を図 6 に示す。比較として石英ガラスの波長損失特性も示す。OC300 も比較的 Er:YAG レーザ光の波長で大きな吸収ピークのない材料であり、有効と思われる。ガラス板にコーティングをしてオートクレーブ処理を行ったが、OC300 膜は剥がれなかった。OC300 は、厚膜化も可能なことから、ディッピング材料として OC300 を選択した。

OC300 溶液を用いて形成した硬化ガラス保護膜を図 7 に示す。ガラス瓶にコーティングして、硬化ガラス膜を形成し、それを取り除いたものである。見た目は透明なガラス膜である。

光スペクトラムアナライザを用いて、OC300 膜の波長損失特性を測定した結果を

図 8 に示す。

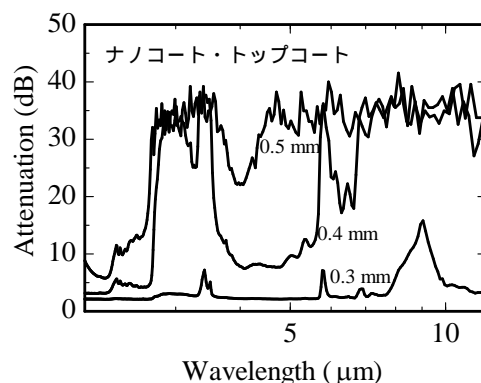


図 5 ナノコート・トップコートのガラス膜の波長損失特性
但し、図中の数値はガラス膜の厚さを示す。

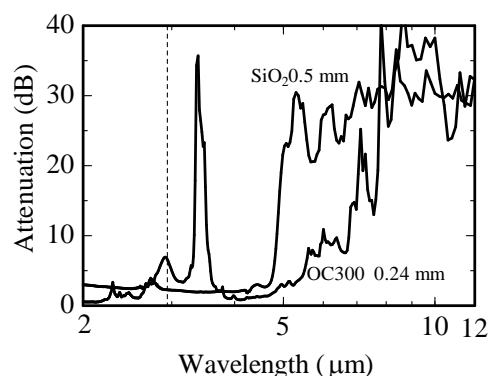


図 6 OC クリヤー No. 300 (OC300) のガラス膜の波長損失特性
但し、図中の数値はガラス膜の厚さを示す。比較として石英ガラス (SiO₂) も示す。



図 7 OC300 ガラス膜(厚さ 0.2 mm)

膜厚が 0.6 mm 程度になると、損失が大きかったことが分かった。製作したガラス膜を用いて Er:YAG レーザ光に対する伝送特性を評価した。Er:YAG レーザ光源は、繰り返し周波数 10 Hz、パルス幅 300 μsec 、パルスエネルギー 30 mJ である。

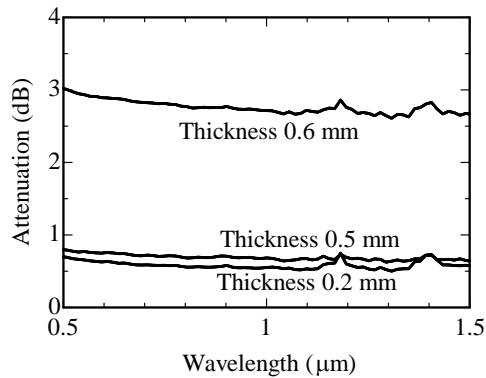


図8 OC300 ガラス膜の波長損失特性

Er:YAG レーザ光を照射した際、激しく発光し破損することがあった。ガラス化されていない OC300 溶液があったためと思われる。厚さ 0.2 mm で 0.8 dB 程度(波長 2.94 μm)であることが分った。先端素子に OC300 をコーティングして Er:YAG レーザ光を照射したところ、30 秒程度で、OC300 ガラス膜が取れてしまった。先端素子材料の石英ガラスと、OC300 のガラス膜は、材質が異なるため、パルスレーザ照射により、接着性が弱まり、取れてしまったと思われる。

次に、先端部分の破損または磨耗した部分を容易に修復する手法として、光ファイバ融着接続器を用いた先端磨耗部分の熔融を試みた。光ファイバ融着接続器の V 溝に内径 100 μm 中空ファイバを固定し、顕微鏡でファイバ先端を目視しながら、アーク放電(5 秒)により、容易に先端封止部分を再形成することが出来た。内径 250 μm の中空ファイバにも応用できないか試みたが、先端封止は困難であり、この手法は内径 100 μm 中空ファイバの先端封止部の修復・形成に適していることが分った。

(4) Er:YAG レーザ先端装置の構築と評価

内径 0.7 mm の COP 内装銀中空ファイバから照射される Er:YAG レーザ光を、焦点距離 71 mm の CaF_2 レンズで集光し、穴径 100 μm 、厚さ 13 μm のピンホールを通して、内径 100 μm 、長さ 10 cm 細径中空ファイバに入射して、Er:YAG レーザ光に対する伝送特性を評価した。Er:YAG レーザ光源は、繰り返し周波数 5 Hz、パルス幅 300 μsec である。ファイバの直線状態における伝送損失は、無機薄膜内装銀中空ファイバで、1.4 dB と低損失であった。曲げ半径 13.5 mm で、曲げ角 90 度に曲げても、3 dB の伝送損失で Er:YAG レーザ光を伝送できることが分った。Er:YAG レーザ光は目に見えないため、照射位置を把握するために、パイロット光を同時に伝送する必要がある。Er:YAG レーザ光と

赤色 LD 伝送に適した内径 100 μm 無機薄膜内装銀中空ファイバを用いて、パイロット光(波長 633 nm の赤色 LD)の伝送実験を行った。無機薄膜内装銀中空ファイバ(内径 100 μm 、長さ 10 cm)は、直線状態で伝送損失 2 dB、曲げた状態(曲げ半径 13.5 mm、曲げ角 90 度)の伝送損失は 3.5 dB であり、十分に視認できた。

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 20 件)

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., 査読有, Vol. 49, No. 13, 2010, pp. 2504-2509

H. Jelinková, M. Nemeč, P. Koranda, J. Pokorný, O. Kohler, M. Miyagi, K. Iwai, Y. Matsuura, Hollow waveguide for urology treatment, Proc. SPIE, 査読有, Vol. 7559, 2010, pp. 755907-1-755907-7

K. Iwai, A. Hongo, H. Takaku, M. Miyagi, J. Ishiyama, Y. W. Shi, and Y. Matsuura, Transmission properties of dielectric-coated hollow optical fibers based on silver-cladding-stainless pipe, Proc. SPIE, 査読有, Vol. 7559, 2010, pp. 755904-1-755904-12

X. Lin, Y. W. Shi, K. R. Sui, X. S. Zhu, K. Iwai, and M. Miyagi, Fabrication and characterization of infrared hollow fiber with multi- SiO_2 and AgI inner-coating layers, Appl. Opt., 査読有, Vol. 48, No. 35, 2009, pp. 6765-6769

K. Iwai, A. Hongo, H. Takaku, M. Miyagi, J. Ishiyama, X. X. Wu, Y. W. Shi, and Y. Matsuura, Fabrication and transmission characteristics of infrared hollow fiber based on silver-clad stainless steel pipes, Appl. Opt., 査読有, Vol. 48, No. 32, 2009, pp. 6207-6212

X. L. Tang, Y. W. Shi, Y. Matsuura, K. Iwai, and M. Miyagi, Transmission characteristics of terahertz hollow fibers with an absorptive dielectric inner-coating film, Opt. Lett., 査読有, Vol. 34, No. 14, 2009, pp. 2231-2233

T. Dostalova, H. Jelonkova, P. Koranda,

J. Sulc, M. Nemeč, M. Miyagi, and K. Iwai, Laser brackets depending: Tm:YAP, Nd:YAG, and two diode lasers evaluation, Proc. SPIE, 査読有, Vol. 7162, 2009, pp. 71620C-1-71620C-6

X. L. Tang, Y. W. Shi, Y. Matsuura, K. Iwai, and M. Miyagi, The effect of dielectric absorption on the transmission characteristics of terahertz hollow fibers, Proc. SPIE, 査読有, Vol. 7173, 2009, pp. 71730N-1-71730N-9

T. Watanabe, K. Iwai, and Y. Matsuura, Simultaneous radiation of Er:YAG and Ho:YAG lasers for efficient ablation of hard tissues, Proc. SPIE, 査読有, Vol. 7173, 2009, pp. 71730R-1-71730R-6

M. Nemeč, H. Jelinkova, M. Miyagi, K. Iwai, and Y. Matsuura, 250 μm inner diameter hollow waveguide for Er:YAG laser radiation, Proc. SPIE, 査読有, Vol. 7173, 2009, pp. 71730H-1-71730H-8

K. R. Sui, X. Lin, X. S. Zhu, Y. W. Shi, K. Iwai, and M. Miyagi, Fabrication of $\text{SiO}_2/\text{AgI}/\text{SiO}_2/\text{Ag}$ hollow glass fiber for infrared transmission, Proc. SPIE, 査読有, Vol. 7173, 2009, pp. 71730G-1-71730G-10

K. Iwai, M. Miyagi, Y. W. Shi, X. S. Zhu, and Y. Matsuura, Fabrication of hollow optical fiber with a vitreous film for CO_2 laser light delivery, Proc. SPIE, 査読有, Vol. 7173, 2009, pp. 71730Q-1-71730Q-7

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., 査読有, Vol. 33, No. 4, 2008, pp. 318-320

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

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

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., 査読有, Vol. 33, No. 4, 2008, pp. 318-320

〔学会発表〕(計 25 件)

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 μm 中空ファイバの製作、電子情報通信学会総合大会、2011 年 3 月 17 日、東京都市大学

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、2011 年 1 月 10 日、電気通信大学

岩井克全、本郷晃史、高久裕之、宮城光信、石山純一、石芸尉、各種金属管を用いた COP 内装金属中空ファイバの伝送特性、第 30 回レーザー学会学術講演会、2010 年 2 月 4 日、千里ライフサイエンス

岩井克全、本郷晃史、高久裕之、宮城光信、石山純一、石芸尉、 CO_2 レーザ光伝送用極細金属プローブ、第 30 回レーザー学会学術講演会、2010 年 2 月 4 日、千里ライフサイエンス

岩井克全、宮城光信、石芸尉、朱暁松、松浦祐司、 CO_2 レーザ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、2009 年 1 月 12 日、徳島大学

岩井克全、宮城光信、石芸尉、松浦祐司、赤外レーザ用内径 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、2008 年 9 月 17 日、明治大学

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称：中空導波路、及びレーザ治療器具
発明者：岩井克全、宮城光信、岡上吉秀、村上晴彦
権利者：株式会社モリタ製作所
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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮城 光信 (MIYAGI MITUNOBU)
仙台高等専門学校・名誉教授
研究者番号：9 0 0 0 6 2 6 3

(2) 研究分担者

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：1 0 3 6 1 1 3 0

(3) 連携研究者

松浦 祐司 (MATSUURA YUJI)
東北大学・大学院医工学研究科・教授
研究者番号：1 0 2 4 1 5 3 0