

氏名	あべ ゆ き お 阿 部 由 起 雄		
授与学位	博士(工学)		
学位授与年月日	平成13年3月26日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)電気・通信工学専攻		
学位論文題目	赤外レーザー光伝送用有機樹脂内装細径中空ファイバに関する研究		
指導教官	東北大学教授 宮城 光信		
論文審査委員	主査 東北大学教授 宮城 光信	東北大学教授 水野 皓司	
	東北大学教授 澤谷 邦男	東北大学助教授 松浦祐司	

論文内容要旨

本論文は、赤外レーザー光伝送用の有機樹脂内装細径中空ファイバの低損失化について製作法を中心に研究した結果をまとめたものである。

第1章は本論文の背景と目的について述べる。各種レーザー光の産業分野及び医療分野での応用はめざましく、その範囲は多岐にわたるものとなっているが、医療分野においては、レーザー光の生体組織に対する熱作用を利用した外科手術用レーザーメスや光化学反応を利用した初期のガンなどの治療、また歯科における無痛治療など、さまざまな応用に用いられており、医学の中で主たる機器として活躍している。炭酸ガス(CO₂, λ = 10.6μm)レーザーやエルビウムヤグ(Er:YAG, λ = 2.94μm)レーザーは、医療用レーザーとして期待されているが、赤外域に発振波長を持つレーザーであるため、従来の通信分野で使用されてきた石英系の充実型光ファイバでは、石英ガラスの赤外吸収により伝送することができない。一方、有機樹脂内装中空ファイバは、コアが空気であるためコアでの吸収が無く、端面反射が無い、冷却が容易であるという利点を有しており、これら高出力赤外レーザー光伝送用に適した伝送路である。これまでに内径540μmまでの中空ファイバは実現してきたが、最小侵襲治療や血管形成術、歯根治療などには、より細径である伝送路が必要となる。そこで本論文では、これまでに実現していない内径320μm、長さ2mの中空ファイバを実現し、細径中空ファイバを伝送路として使用する伝送システムについて検討を行っている。

第2章では、低損失な細径中空ファイバを実現するために、製作法に関して検討した結果について述べる。有機樹脂内装中空ファイバは、ガラスキャピラリチューブの内側に銀層と有機樹脂層を内装した構造をしている。銀鏡反応によりキャピラリチューブ内に銀層を形成し、その後、送液コーティ

ング法により有機樹脂層を成膜する。有機樹脂としては、赤外波長域において材料吸収が小さく、成膜しやすい、環状オレフィンポリマー(Cyclic Olefin Polymer : COP)を選択した。中空ファイバの特性を決めるのは、金属層の内面粗さの大きさと有機樹脂層の均一性である。低損失な細径中空ファイバを実現するためには、細径ファイバ内に内面粗さの小さな銀層を形成する技術、有機樹脂層を均一に成膜する技術が新たに必要となる。本章では、細径中空ファイバを多数束ねて銀鏡反応を行うことにより、特性の良い銀層を形成することに成功し、また、COP 溶液を作製する際に使用する溶媒を乾燥しやすいシクロヘキサンに変更し、乾燥工程を簡略化することにより、均一な COP 膜の形成に成功した。この2つの技術を導入することにより、内径 320 μ m や 250 μ m、長さ 1m の Er:YAG レーザ光伝送用の細径中空ファイバを製作した。直線状態で損失がそれぞれ 0.7dB、0.8dB であり、中空ファイバを 180° 曲げた場合の損失増加がともに 0.3dB 程度と小さく、それぞれ 240mJ、100mJ 程度の高エネルギー伝送が可能であることを確認した。

第3章では、Er:YAG レーザ光伝送用の内径 320 μ m、長さ 2m の中空ファイバの製法に関して検討した結果について述べる。長さ 1m の細径ファイバ内に銀層を形成する際には、ガラスキャピラリチューブを多数束ねることにより特性のよいものを実現することができたが、長さ 2m の場合には、新たな問題が生じてしまった。2m のファイバを製作する場合には、ファイバ内での銀溶液の速度が遅いため、2m のファイバ内を銀溶液が流れている間にも銀粒子が成長してしまい、この成長差により長さ 2m の銀中空ファイバでは長手方向に大きな特性差が生じてしまい、損失が高くなってしまいうという問題である。特に溶液の排出側においては、直径 400nm 程度の大きな銀の塊を確認しており、それにより損失が高くなっていることが想定された。この問題に対し、溶液の速度を速める加圧式銀鏡法、空気導入型銀鏡法などいろいろな手法を提案し、検討した結果、ファイバ周りの温度を下げることでファイバ内での銀粒子の成長を抑えるというファイバ外部冷却法がもっとも特性を大きく改善できることがわかり、低損失な長さ 2m の中空ファイバを実現することができた。

第4章では、細径中空ファイバを用いた Er:YAG レーザ光伝送システムについて検討した結果について述べる。中空ファイバを医療応用する場合、高エネルギーレーザー光を安定に中空ファイバに励振できなければならない。また、中空ファイバの先端を守るための出射デバイスが必要になる。そこで、本章では細径中空ファイバを伝送路として使用する Er:YAG レーザ伝送システムについて提案し、検討を行った。入射デバイスとしては、安定に高エネルギーレーザー光を入射できるようにレンズ付テーパ導波路を使用した。テーパ導波路を用いることにより、システムの損失は大きくなってしまったが、

入射エネルギー400mJ程度で 10^4 パルス以上の連続入射が安定して行えるシステムになっている。出射デバイスとしては、新たにシーリングファイバキャップというデバイスを提案している。これは、細径中空ファイバの先端にキャップとして取り付け、中空ファイバ先端を守るデバイスであり、透明なキャピラリーチューブの先端にポリマー膜を形成したものやガラス製の膜を形成したものである。取替える際には厳密なアライメントが必要ないという利点がある。これらのデバイスを製作し、システムの評価を行ったところ、150mJ程度のエネルギーを安定に伝送することができ、細径中空ファイバの特徴であるファイバを曲げた際の損失増加が小さく、ガイド光伝送も可能であることを確認し、歯科治療だけでなくさまざまな医療分野で使用可能なシステムであると思われる。

第5章では、CO₂レーザ光伝送用の中空ファイバの製作に関して検討した結果について述べる。これまで、有機樹脂を内装したタイプの中空ファイバでは、1 μ m程度の厚い膜を形成することが難しかったため、CO₂レーザ用の低損失な伝送路は実現していない。また、第2章の検討により、COPを用いて初めて1 μ m程度の均一な膜を形成することに成功したが、COPの材料吸収が無視できない大きさであったために、内径700 μ mのファイバで0.35dB/mが限界であった。そこで、材料吸収の小さなポリマーの探索を行った。耐熱性の高い3種類のエンジニアリングプラスチックとCOPの一種であるCOP-E48Rというものについて検討を行った。その結果、COP-E48Rが材料吸収の小さいポリマーであることを発見し、COP-E48Rを用いて内径700 μ mのファイバで0.18dB/mと低損失な伝送路を実現した。また、内径320 μ mの細径である伝送路についても検討を行った。細径であるファイバ内に厚く一様な有機樹脂層を形成することは難しいため、長尺なものは実現できなかったが、長さ30cmの中空ファイバを製作したところ、直線状態で0.3dB、90°曲げた状態で0.45dBという低損失なファイバを実現した。

第6章は、結言である。本論文では、細径中空ファイバの製法について主に検討を行い、各種赤外レーザ光伝送用の細径中空ファイバを実現した。Er:YAGレーザ光伝送用のファイバでは、内径320 μ m、長さ2mの低損失な伝送路を実現した。また、その細径中空ファイバを伝送路として用いるEr:YAGレーザ光伝送システムを構築した。このシステムは、高エネルギーレーザ光を安定に入出射でき、曲げに強く、ガイド光伝送も可能であることから、さまざまな医療分野で使用できる伝送システムであると考えられる。また、CO₂レーザ光伝送用としては、内径700 μ mのファイバで0.18dB/m、内径320 μ m、長さ30cmのファイバで0.3dBと低損失な伝送路を実現した。

論文審査結果の要旨

赤外レーザーは、レーザー治療用として医療のさまざまな分野において利用が期待されているが、伝送特性、機械的特性の両方において、曲げによる影響が小さく、かつフレキシブルな伝送路を実現した例は少ない。本論文は医療用に適した細径中空ファイバの製法、およびその伝送特性をとりまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は緒言であり、研究の背景と目的について述べている。

第2章では、細径の中空ファイバ型先端チップの実現を目指し、誘電体層として環状オレフィンポリマー (COP) を持つ銀 (COP/Ag) 中空ファイバの製法について述べている。そのために、細径中空ファイバ内への銀層の成膜法、ならびに COP 膜の均一生成法の検討を行っている。その後、長さ1m、内径が320 μm 及び250 μm という極めて細い COP/Ag 中空ファイバを初めて製作し、各種伝送特性の評価を行なっている。

第3章では、実用的な長尺伝送路として、長さ2mの細径 COP/Ag 中空ファイバの製作について述べている。本中空ファイバ製作の上で最も重要な点である、銀鏡反応による銀成膜に関しては、外部水冷法、溶液の加圧法などを新たに導入し、長さ方向に均質な銀薄膜の形成に成功した。これにより、320 μm の内径を有する COP/Ag 中空ファイバが得られた。これは優れた成果と言える。

第4章では、Er:YAG レーザを用いる医療用装置を実現するため、レーザーから中空ファイバへの安定な入射系である、テーパ結合器、照射ターゲットへのインターフェースとなる中空ファイバシーリングキャップを含めた伝送システムについて述べ、各種伝送特性の評価を行なっている。これは、すべての伝送システムを中空ファイバ型オプティクスで構成した最初の例と言える。

第5章では、CO₂ レーザ光伝送用の中空ファイバの製作について検討を行なっている。種々の有機樹脂の中から CO₂ レーザ光の発振波長 10.6 μm における吸収の小さな材料の検討を行ない、COP-E48R というポリマーが適していることを発見した。これにより、700 μm の内径を有する低損失な中空ファイバが得られた。また、長さ1m、内径が320 μm という細い中空ファイバの製作にも成功している。

第6章は結言である。

以上要するに本論文は、赤外レーザー用の細径で、長尺な中空ファイバの製作を行ない、医療応用のための伝送システムの構築を行なったもので、光伝送工学ならびにレーザー応用工学の発展に寄与するところが少なくない。