

氏 名	宮 哲 雄
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 58 年 7 月 13 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 50 年 3 月 東北大学大学院理学研究科物理学専攻 修士課程終了
学位論文題目	長波長帯用単一モード光ファイバの低損失化および 低分散化に関する研究
論文審査委員	東北大学教授 川上彰二郎 東北大学教授 虫明 康人 東北大学教授 西田 茂穂 東北大学教授 重井 芳治 東北大学助教授 宮城 光信

第 1 章 序 論

最初に、実用化されつつある光ファイバ通信を歴史的に概観するとともに、単一モード光ファイバの位置づけを明らかにした。次いで、単一モード光ファイバの低損失化および低分散化に関する従来の研究経緯を述べ、その中で、極低損失化技術がまだ確立されていなかったこと、および確立することの意義を明らかにした。また、分散制御技術についても、導波構造を変えることによる損失特性への影響等、いくつかのものが未知数の状況にあったことを述べた。

本研究の目的である単一モード光ファイバの極低損失化達成には、構造不完全性損失の低減化が重要であることを指摘した。

最後に本論文の構成を示した。

第 2 章 単一モード光ファイバの低損失化および低分散化における問題点

統章で議論するための準備として、低損失化および低分散化における問題点を明らかにした。

低損失化については、数多く存在する光ファイバの損失要因のうち、長波長帯に低損失な窓を開けるという意味で OH 基低減化技術が前提とはなるが、さらに極低損失化を図るには導波路の不完全さに起因する構造不完全性損失の発生機構を明らかにし、その低減化を図ることが不可欠である

ことを明らかにした。

低分散化に関しては、分散制御性を作製技術の観点から明らかにする必要があること、W形ファイバ特有の負の構造分散を積極的に利用し、新しい分散特性を有する単一モード光ファイバの実現も期待できることを述べた。

第3章 極低損失単一モード光ファイバの作製

本章では、単一モード光ファイバの極低損失化技術の確立を目的に、構造不完全性損失の低減化についての検討を行った。

初めに、構造不完全性損失が単一モード光ファイバの極低損失化における、ただ一つ残された損失要因であること、そしてその低減化が正に克服すべき課題であることを明らかにした。次いで、構造不完全性損失はガラスの不均一性に起因するが、石英管の気泡除去、堆積温度の適正化、堆積膜厚の適正化、母材の真円化によって低減化が可能であることを示した。特に堆積温度は重要な意味を持ち、十分な高温にすることが有用であることを明らかにした。図1は堆積温度と構造不完全性損失の関係を示したものである。図2は堆積温度が低い場合の堆積ガラス膜表面のSEM写真であるが、不均一さが顕著である。

作製装置については、単一モード光ファイバの高温作製を可能とする管径制御装置の改良を行い、極低損失化技術の確立を図った。

また、コア中心の dip, 肩のダレを考慮した光ファイバの構造設計について述べた。さらに、実際の使用に際して重要となる曲げ損失特性について検討し、曲げ半径、コア径、比屈折率、規格化周波数に対する指数関数的な振舞いを実験的に確認した。

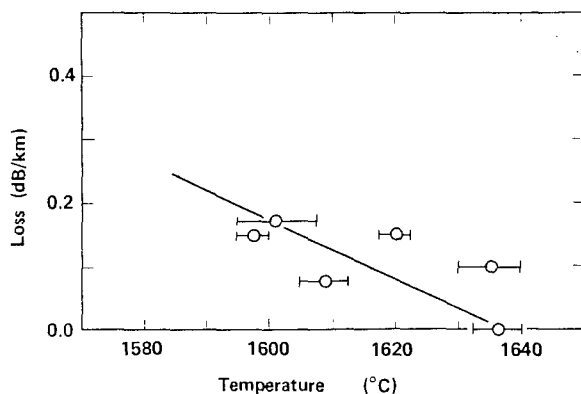


図1 堆積温度と構造不完全性損失

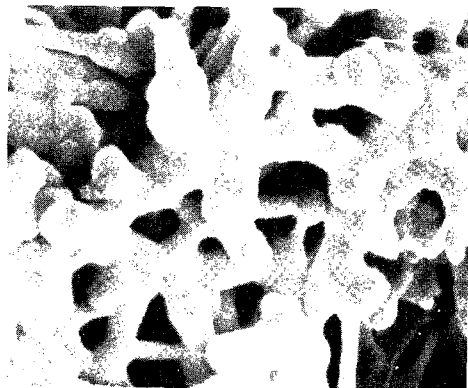


図2 SiO₂, T = T_b, 20,000 ×

第4章 極低損失単一モード光ファイバの特性

前章で確立した作製技術によって実現した極低損失単一モード光ファイバ(図3)の特性について述べた。図4に損失特性を示すように作製技術の改善により、1.5 μmで0.2 dB/kmである。また、

GeO₂・SiO₂系光ファイバの損失要因を解析し、最低損失波長の比屈折率差依存性を明らかにした。さらに、上記ファイバの損失の実測値と計算による値を比較し、本研究で得た極低損失単一モード光ファイバの最低損失値が、ガラス材料に固有な極限値にせまる値であることを明らかにした。



図3 単一モード光ファイバのSEM写真

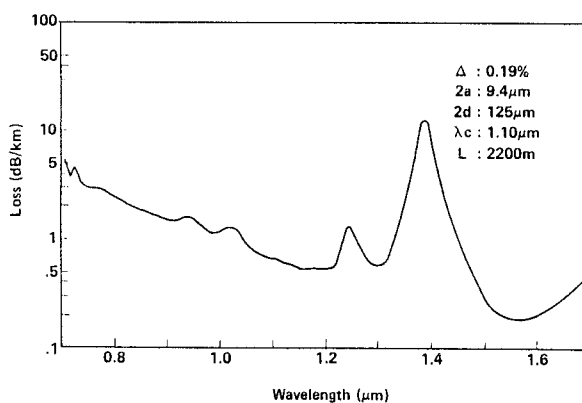


図4 極低損失単一モード光ファイバの損失特性

第5章 長波長帯極低分散単一モード光ファイバの設計および作製

前章で明らかにした石英系光ファイバの1.5 μm 帯における極低損失性、および、分散制御可能な単一モード光ファイバの特徴を最大限にいかすための理論的および実験的検討を行った。

理論面では、W形ファイバの構造を最適に設計することによって、「広波長域低分散単一モード

光ファイバ」が実現できることを新たに示した。図5にはその分散特性（計算値）の一例を示す。1.35～1.67 μm の広い波長域で分散が $\pm 1 \text{ ps/km}/\mu\text{m}$ 以下となっている。

作製に関しては、比屈折率差を大きくした場合に増大の傾向を示す散乱損失の低減化をMCVD, VAD 両法について図った。特にVAD法では屈折率分布不整がその主要因であることを明らかにした。また、屈折率分布自動測定装置の開発も行った。

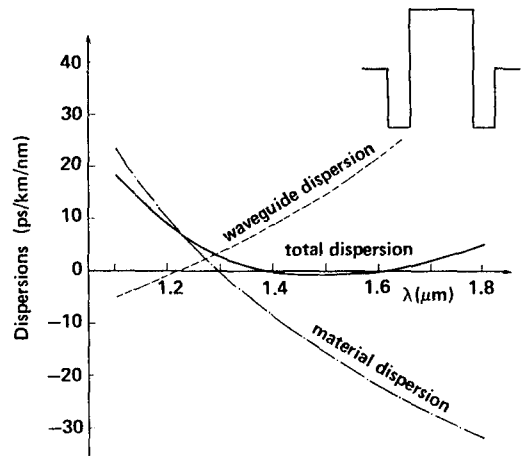


図5 構造最適化されたW形単一モード光ファイバの分散特性

第6章 長波長帯極低分散単一モード光ファイバの特性

本章では、石英系光ファイバの極低損失波長域で、損失と分散を同時に最小とする単一モード光ファイバを実際に作製し、その特性について論じた。

1.5 μm 帯零分散単一モード光ファイバの作製技術確立により、MCVD法では、1.56 μm で0.46 dB/km、分散零、VAD法では、1.55 μm で0.35 dB/km、分散零の光ファイバを得た。また、上記構造のファイバ5.15 kmにパルスを伝搬させ、伝搬の前後で分散の影響を受けていないことを明らかにした。

本研究で新たに提案した広波長域低分散単一モード光ファイバをMCVD法で作製し、基本的な特性を確認した。その構造を図6に、分散特性を図7に示す。1.32～1.43 μm の範囲で分散が $1 \text{ ps/km}/\mu\text{m}$ 以下であった。

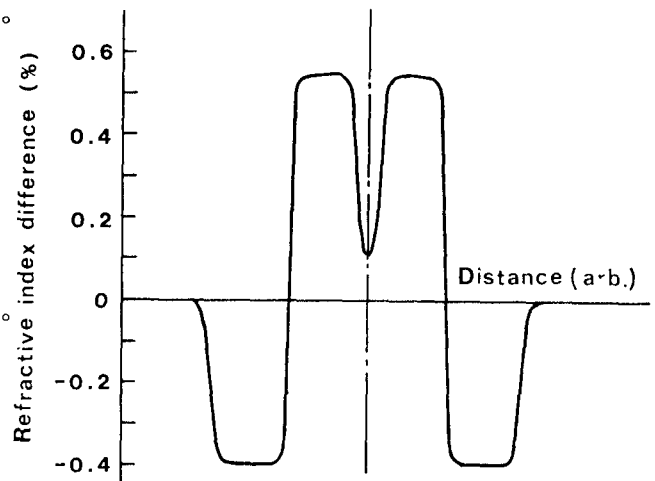


図6 広波長域低分散単一モード光ファイバの屈折率分布

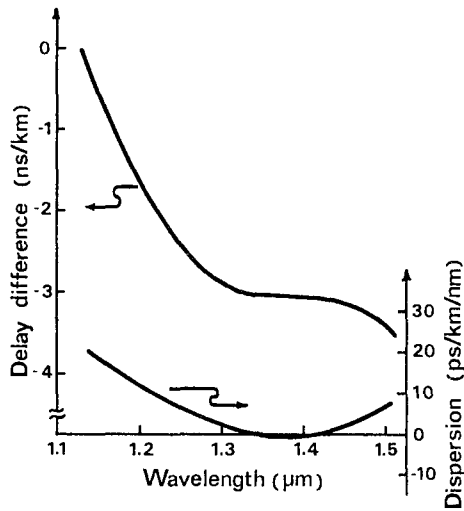


図7 遅延時間および分散特性

第7章 結 論

本研究は長波長帯用単一モード光ファイバの低損失化および低分散化を目的とし、極低損失化における問題点の明確化、およびそれに基づく作製技術の確立を図った。また、本来的に低分散特性を有する単一モード光ファイバの分散を制御し、さらに低減化する試みも行った。

以下に本研究で得られた結果を要約する。

- (1) 構造不完全損失の主要因は堆積されたガラスの中の気泡に代表されるガラスの不均一性であることを明らかにした。
- (2) 構造不完全性損失の除去にはガラス堆積条件、特に堆積温度を適正することが重要であることを明らかにした。
- (3) 電磁弁を用いた管径制御法により、非軸対称な外力を排除し、高温でのガラス堆積を可能にした。
- (4) 要因把握、作製法の改良により、極低損失値 0.20 dB/km ($1.55 \mu\text{m}$) を達成した。
- (5) 石英ガラス系における損失要因を理論的に評価し、本研究で極低損失値が測定精度内で材料固有の値に一致することを明らかにした。また、 $1.5 \mu\text{m}$ 帯の有用性を損失面から実証した。
- (6) 曲げ損失特性を検討し、曲げ損失が曲げ半径、比屈折率差、コア径および規格化周波数の指数関数として表わせることを実験的に確認した。
- (7) $1.5 \mu\text{m}$ 帯の極低損失性を最大限に利用するため、零分散波長の制御を試み、損失・分散ともに同一波長で最小化された $1.5 \mu\text{m}$ 帯零分散単一モード光ファイバを作製し、特性の確認を行った。
- (8) 光ファイバ構造の精密設計、特性評価を目的に、干渉顕微鏡を用いた屈折率分布自動測定装置を開発した。

(9) 1.5 μm 帯零分散単一モード光ファイバを用いて 51.5 km のパルス伝搬実験を行い、測定精度内で分散が零に制御されていることを確認し、1.5 μm 帯の基本的な有用性を実証した。

(10) 広波長域低分散単一モード光ファイバを提案、作製し、その基本特性を確認した。

本研究で報告した長波長帯用単一モード光ファイバの作製技術およびその結果は各方面に影響を及ぼした。1.5 μm 帯に発振波長を有する GaInAsP/InP 半導体レーザーの開発もその一つである。また、1.3 μm 帯における低損失化技術にも大きく寄与し、現状ではほぼ確立された段階にある。構造不完全性除去による低損失化の考え方は VAD 法にも取り入れられ、極低損失化が達成されている。こうした最近の光ファイバ作製技術の進展は目覚ましく、電電公社武蔵野電気通信研究所と厚木電気通信研究所の間では既に単一モード光ファイバを用いた 1.3 μm 帯での大容量伝送方式現場試験が実施されるに至っている。さらに 1.5 μm 帯の有効利用を目指した海底光ケーブル伝送方式も検討されている。

今後は単一モード光ファイバの分散制御に関する研究を中心に、理想的な伝送媒体を求めていく必要があると思われる。また、コヒーレント光伝送を可能とする単一偏波単一モード光ファイバの開発も望まれる。

審査結果の要旨

光ファイバ通信方式は、近年急速に研究・開発・実用化が行なわれ、社会に大きい影響を与えている。単一モード光ファイバは、多モード光ファイバより遅れて開発・実用化されたが、広帯域性に加えて低損失性をもつ事が明らかになるに及んで基幹回線用伝送路として最適と認められるにいたっている。

本論文は、単一モード光ファイバの低損失化および低分散化に関する若者の研究結果をまとめたもので、全編7章よりなる。

第1章は序論であって、光ファイバ通信方式の研究開発の経緯を展望している。

第2章では、単一モード光ファイバの低損失化および低分散化における問題点を論じている。本研究の開始時点には、石英系光ファイバにおいて、不純物吸収損失、曲げ損失は十分低減される見通しがついていて、究極の低損失性を実現する為には構造不完全性損失を小さくする事が最大の課題となっていた事を述べ、また、光ファイバを伝搬する信号の群速度の波長依存性（分散）を零に近づける事に関する当時の知見をまとめている。

第3章では、極低損失光ファイバの作製法を論じている。MCVD法による単一モード光ファイバ母材の作製においては、作業温度を高くする事が石英管の欠陥除去、堆積層の緻密化に有効であるが、石英管の軟化や変形により温度の上限が制限されていた。著者は、石英管内の気体圧力を制御する事により変形のおそれのない作業温度の上限を引き上げた。これによって構造不完全性損失をほとんど零にする事ができ、その結果最小損失値 0.20 dB/kmを得た。

第4章では極低損失光ファイバの特性を論じている。光ファイバ材料ではレーリー散乱損失と SiO_2 四面体の格子振動による赤外域吸収とが本質的な損失要因である。前章の方法により外因的損失要因を除去した光ファイバについて特性を測定し、それぞれの要因の波長依存性を明らかにし、光ファイバの損失が最小になるのは $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 付近である事を明らかにした。これは光ファイバ通信の開発動向に大きい影響を与えた。

第5章および第6章では、 $1.5 \mu\text{m}$ 単一波長あるいは $1.3 \mu\text{m} \sim 1.5 \mu\text{m}$ の広い波長帯において分散を小さくする光ファイバの設計、製作、測定について述べている。単一波長用にはSI型、広い波長域用にはW型の屈折率分布を採用し、低い分散値を実現している。

第7章は結論である。

以上要するに、本論文は単一モード光ファイバの低損失化および低分散化を論じてその実現方法を明らかにしたもので、光通信工学に寄与する所が大きい。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。