

学 位 論 文 題 名

不均質光導波路の有限要素法解析に関する研究

学位論文内容の要旨

光ファイバによる光通信は、長距離、大容量の通信回線において既に実用化されている。また、近年では、LAN やコンピュータの周辺装置間の相互接続にも光ファイバが用いられるなど、光ファイバの応用分野は急激に拡大しており、さらに、光信号の処理を行うための光回路素子や光集積回路の研究、開発も精力的に行われるようになってきている。

こうした光通信システムの利用範囲の拡大とともに、その高性能化がなお一層要求されており、これにともない、光通信システムの基本となる光ファイバや光導波路の構造も次第に複雑となり、また、異方性媒質、金属、半導体など、様々な機能性媒質が用いられるようになってきた。このため、複雑な構造をもつ光ファイバや任意の機能性媒質を含む光導波路の解析、設計を支援するコンピュータシミュレーション技法に対する期待が高まってきている。

さて、高性能、高機能な光導波路や光ファイバを設計するためには、その導波モード特性を十分に把握する必要がある。しかし、拡散形光導波路や不均一コア光ファイバは屈折率が連続的に変化しているため、特別な屈折率分布をもつ場合を除いて、このような不均質導波路の厳密な導波モード解析は困難である。このため、これまでにプレーナ形不均質光導波路や軸対称不均一コア光ファイバの導波モード解析法として各種の解析法が開発されている。なかでも有限要素法は、任意の屈折率分布をもつ光導波路や光ファイバへの適用が容易であることから、有力な解析法の一つと考えられている。しかし、これまでに開発されたプレーナ形異方性不均質光導波路に対する有限要素法では、単軸性媒質を仮定し、その光学軸が基板の板面内にある場合を対象として、変分法に基づいた定式化が行われている。

このため、そのままでは任意の異方性媒質、損失媒質を含む導波路、あるいはリーキーモードが存在するような導波路に適用することはできない。また、軸対称不均一コア光ファイバに対する有限要素法では、伝搬軸方向の電磁界成分（電磁界縦成分）による変分表現式が用いられているため、いわゆるスプリアス解が発生してしまい、このようなスプリアス解を除去するために、節点の配置に特別な配慮が必要となる。また、電磁界縦成分による変分表現式には周波数依存性

を有する特異点が含まれており、この特異点に対する対策も必要となる。ところで、軸対称の問題は非軸対称の問題に包含されるため、当然のことながら、非軸対称形導波路解析用の2次元有限要素法を用いて軸対称形導波路の解析を行うことができる。しかしながら、この場合、導波路の断面を2次元要素である三角形要素を用いて分割することになるため、軸対称性を考慮した1次元有限要素法に比べて大容量、長時間の計算を必要とし、無限に広がる均一クラッド部を厳密に評価することも一般に困難である。

本論文は、このような状況のもとで、不均質光導波路の有限要素法に基づく解析法に関する研究結果をまとめたものである。まず、任意の異方性媒質、損失媒質で構成され、また、任意の屈折率分布をもつプレーナ形不均質光導波路を解析することが可能な手法として、線要素を用いた有限要素法、ならびに軸対称構造を有する不均一コア光ファイバの解析法として、軸対称性を考慮した有限要素法を新たに開発するとともに、各種光機能素子や光ファイバの設計に際しての指針となる有用なデータを得ている。以下に、本論文の概略を説明する。

第1章では、本論文の背景、目的、および構成について述べている。

第2章では、任意の異方性媒質、損失媒質で構成され、また、任意の屈折率分布をもつプレーナ形不均質光導波路を解析することが可能な手法として、重み付き残差法の一つであるガラーキン法に基づいた有限要素法を提案し、その定式化を行っている。まず、プレーナ形等方性不均質光導波路の導波モードの伝搬特性、プレーナ形異方性不均質光導波路の導波モード、リーキーモードの伝搬特性を解析し、他の解析法による結果との比較を行い、本手法の有効性について検討している。加えて、誘電体薄膜や金属薄膜が装荷された場合を考え、誘電体薄膜や金属薄膜が導波モード、リーキーモードに与える影響について検討している。

第3章では、シリコン薄膜が装荷されたプレーナ形不均質光導波路の伝搬特性を精度良く解析することが可能な手法として、仮想境界壁を用いた有限要素法に基づく解析法を提案し、その定式化を行っている。まず、シリコン薄膜クラッド・プレーナ形均質光導波路におけるTEモードを解析し、厳密解との比較を行い、本手法の有効性について検討している。また、これまで十分に調べられていないTMモードの伝搬特性を調べ、TEモードとは異なる伝搬特性を示すことを見いだしている。さらに、拡散形基板を用いたシリコン薄膜クラッド・プレーナ形不均質光導波路の伝搬特性を詳細に調べ、光機能素子への応用の可能性について検討している。

第4章では、光導波路内の電磁界とその1次微係数の連続性を考慮することが可能な解析法として、エルミート線要素を用いた有限要素法を提案し、その定式化を行っている。具体的に、指数関数形の屈折率分布を有するプレーナ形不均質導波路を解析し、厳密解やラグランジュ線要素

を用いた従来の有限要素法による結果との比較を行い、本手法の有用性について検討している。

第5章では、軸対称不均一コア光ファイバの伝搬特性を解析する手法として、磁界全成分による変分表現式を用いた有限要素法を提案し、その定式化を行っている。有限要素法によるベクトル波解析において問題となるスプリース解に対しては、非軸対称形導波路の有限要素法解析において開発された各種のスプリース解対策法を軸対称形導波路解析に応用し、使用する要素の次数、要素内での屈折率分布の取扱い方などの観点から、有限要素解の誤差評価を詳細に行っている。また、光ファイバの群遅延時間、全分散を評価する方法として、有限要素法と数値微分を用いる方法について検討している。具体的に各種の光ファイバを解析し、実験値や他の解析法による結果との比較を行い、実効屈折率、群遅延時間、および全分散を含めた光ファイバの総合的な伝搬特性の評価法としての有効性について検討している。

第6章では、本研究において得られた結論を述べている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 小 柴 正 則

副 査 教 授 伊 藤 精 彦

副 査 教 授 三 島 瑛 人

副 査 教 授 大 塚 喜 弘

光ファイバによる光通信が既に実用化されているが、その高性能化がなお一層要求されている。これにともない、光通信システムの基本となる光ファイバや光導波路の構造も次第に複雑となり、また、異方性媒質、金属、半導体など、様々な機能性媒質が用いられるようになってきた。このため、複雑な構造をもつ光ファイバや任意の機能性媒質を含む光導波路の解析、設計を支援するコンピュータシミュレーション技法に対する期待が高まってきている。

さて、高性能、高機能な光導波路や光ファイバを設計するためには、その導波モード特性を十分に把握する必要がある。しかし、拡散形光導波路や不均一コア光ファイバのような不均質導波路の厳密な導波モード解析は困難である。さらに、金属などの損失媒質、あるいは任意の異方性媒質を含む不均質光導波路に適用できる解析法は少なく、従って、このような媒質を含む不均質光導波路の伝搬特性を調べることは困難な状況にある。

本論文は、このような状況のもとで、不均質光導波路の有限要素法に基づく解析法に関する研究結果をまとめたものである。

第1章では、本論文の背景、目的、および構成について述べている。

第2章では、任意の異方性媒質、損失媒質で構成され、また、任意の屈折率分布をもつプレーナ形不均質光導波路を解析することが可能な手法として、重み付き残差法的一种であるガラキン法に基づいた有限要素法を提案し、その定式化を行っている。まず、プレーナ形等方性不均質光導波路の導波モードの伝搬特性、プレーナ形異方性不均質光導波路の導波モード、リーキーモードの伝搬特性を解析し、他の解析法による結果との比較を行い、本手法の有効性について検討している。加えて、誘電体薄膜や金属薄膜が装荷された場合を考え、誘電体薄膜や金属薄膜が導波モード、リーキーモードに与える影響について検討している。

第3章では、シリコン薄膜が装荷されたプレーナ形不均質光導波路の伝搬特性を精度良く解析することが可能な手法として、仮想境界壁を用いた有限要素法に基づく解析法を提案し、その定式化を行っている。まず、シリコン薄膜クラッド・プレーナ形均質光導波路におけるTEモードを解析し、厳密解との比較を行い、本手法の有効性について検討している。また、これまで十分に調べられていないTMモードの伝搬特性を調べ、TEモードとは異なる伝搬特性を示すことを見いだしている。さらに、拡散形基板を含むシリコン薄膜クラッド・プレーナ形不均質光導波路の伝搬特性について詳細に調べ、光機能素子への応用の可能性について検討している。

第4章では、光導波路内の電磁界とその1次微係数の連続性を考慮することが可能な解析法として、エルミート線要素を用いた有限要素法を提案し、その定式化を行っている。具体的に、指数関数形の屈折率分布を有するプレーナ形不均質導波路を解析し、厳密解やラグランジュ線要素を用いた従来の有限要素法による結果との比較を行い、本手法の有効性について検討している。

第5章では、軸対称不均一コア光ファイバの伝搬特性を解析する手法として、磁界全成分による変分表現式を用いた有限要素法を提案し、その定式化を行っている。有限要素法によるベクトル波解析において問題となるスプリアス解に対しては、非軸対称形導波路の有限要素法解析において開発された各種のスプリアス解対策法を軸対称形導波路解析に応用し、有限要素解の誤差評価を詳細に行っている。また、光ファイバの群遅延時間、全分散を評価する方法として、有限要素法と数値微分を用いて算出する方法について検討している。具体的に各種の光ファイバを解析し、実験値や他の解析法による結果との比較を行い、実効屈折率、群遅延時間、および全分散を含めた光ファイバの総合的な伝搬特性の評価法としての有効性について検討している。

第6章では、本研究において得られた結論を述べている。

以上のように本論文は、種々の機能性媒質を含み、任意の屈折率分布を有する不均質光導波路を高精度に解析する手法を確立し、光機能素子や光ファイバなどの各種光デバイスの設計に役立つ多くの知見を提供したもので、光エレクトロニクスの進歩に寄与するところが大きい。よって、著者は、博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。