

パワー保存型高効率ビーム伝搬法による光回路素子の小型化に関する研究

NITO, Yuta / 仁藤, 雄大

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

111

(発行年 / Year)

2016-03-24

(学位授与番号 / Degree Number)

32675乙第221号

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2016-03-24

(学位名 / Degree Name)

博士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00013015>

博士学位論文
論文内容の要旨および審査結果の要旨

論文題目	パワー保存型高効率ビーム伝搬法による光回路素子の小型化に関する研究
氏 名	仁藤 雄大
学位の種類	博士（工学）
学位授与年月日	2016 年 3 月 24 日
学位授与の条件	法政大学学位規則第 5 条第 1 項第 2 号該当者（乙）
論文審査委員	主 査 山内 潤治 教授 副 査 中野 久松 教授 副 査 堀端 康善 教授

2016 年 2 月 10 日

学位論文審査委員会

委員長 佐藤 勉 殿

学位論文審査小委員会

主査 教授 山内 潤 治 

副査 教授 中野 久 松 

副査 教授 塚端 康 善 

試問による学識確認の報告

法政大学学位規則第20条により、 仁藤 雄大 氏について、その論文を中心
に関連する学問領域の試問を行った結果、合格と判定した。

以 上

(報告様式Ⅰ)

2016 年 2 月 10 日

学位論文審査委員会

委員長 佐藤 勉 殿

学位論文審査小委員会

主査 教授 山内 潤治 

副査 教授 中野 久 

副査 教授 堀端 康善 

仁藤 雄大氏 提出学位請求論文

「パワー保存型高効率ビーム伝搬法による光回路素子の小型化に関する研究」

論文内容の要旨と審査結果の要旨（報告）

（報告様式Ⅱ）

1. 論文内容の要旨

波長分割多重通信に代表される光通信システムの発展は、大容量かつ高速な情報通信を可能にしてきた。近年では、通信トラフィックの増加に伴い、光通信システムを構成する光回路の小型化が強く要求されている。実用的な小型回路の実現には、光波の伝搬特性を解明するとともに、製造許容誤差や波長特性等の工学的特性を評価することが重要となる。諸特性の評価には、数値解析手法の利用が不可欠である。光回路における代表的な手法に、ビーム伝搬法(BPM: Beam Propagation Method)がある。BPMは、進行波のみを仮定し、緩慢変化包絡線近似を導入した近似解法である。交互方向陰解(ADI: Alternative Direction Implicit)法に基づく差分法の併用は、高速解法であるトーマスアルゴリズムの利用によって、計算効率の劇的な向上をもたらした。そのため、反射波の無視できる3次元光回路デバイスを解析する手法として、差分BPMが広く用いられている。

このように、BPMは光回路の諸特性を効率良く評価できる手法であるが、設計期間の短縮とコスト削減のためには、更なる計算効率の改善が求められている。他方、BPMは近似解法であるので、その適用範囲に注意を払う必要がある。特に、小型化を目指して光回路デバイスの高屈折率化が進み、強導波構造がBPM解析されるようになると、光波の伝搬する過程でパワーが保存されない問題に直面するようになった。これまでに、屈折率境界を任意に選べる改良差分式や、磁界成分を解析する際に従来無視されていた伝搬方向の屈折率微分項を考慮する改善手法が提案されている。それでもなお、3次元問題を取り扱くと、信頼性に欠ける計算結果を得ることがある。パワー保存アルゴリズムが確立されれば、BPMの適用範囲が広がり、強導波構造を有する小型光回路の設計においても強力な手法となり得る。

光回路を小型化するには、屈折率の大きな誘電体を使用する方法以外に、導波路を曲げる方法も重要な技術となっている。ところが、導波路を曲げると、屈曲部で生じる損失が問題となる。屈曲損を低減する方法としては、低屈折率のトレンチを設置する方法や、反共振反射性光導波路(ARROW: Anti-Resonant Reflecting Optical Waveguide)を付加する方法が知られている。しかしながら、光回路中で水平方向に電界の主成分をもつ準TEモードと、垂直方向に電界の主成分をもつ準TMモードとの間の屈曲損失差が長波長帯で無視できない点については十分に検討がされていない。偏波間の損失差は一般に偏波依存損(PDL: Polarization Dependent Loss)と呼ばれ、光回路の特性を悪化させる一因となり得る。また、トレンチやARROWの設置は、追加の製造工程を必要とし、製作の困難さやコストの増加を伴う。そのため、製造容易な構造を保ちつつ、低損失、広帯域に動作する屈曲導波路構造の提案が強く望まれている。

本論文では、こうした背景のもとに、まず、従来の差分BPMの定式化を整理し、より計算効率の高い差分BPMを開発する。具体的には、Fundamental法と呼ばれる手法を計算式に導入する。続いて、強導波構造の解析においてパワーの保存性を改善するために、電

界、磁界の両界分布からポインティングベクトルに基づいて厳密にパワーを評価する方法を考案する。そして、確立したパワー保存型高効率 BPM を用いて、スポットサイズ変換器、偏波変換器、屈曲導波路といった光回路デバイスを伝搬する光波の振る舞いを明らかにし、デバイスを小型化し得る設計法を提示する。以下に本論文の構成を述べる。

第 1 章では、数値解析における高速解法の開発および信頼性のある解を提供することの重要性を述べ、代表的な数値解析手法である BPM の課題について言及する。また、光回路の小型化に欠かせない屈曲導波路の課題を説明し、本研究の位置付けと目的を明示する。

第 2 章では、差分 BPM の基本式を整理する。フレネル方程式を導出した後、横方向の計算刻み幅に対して 2 次精度を保証することのできる改良差分式を導入する。更に、固有モードソルバの一つである虚軸 BPM について概説する。本研究で取り扱う漏れモードを能率良く抽出することのできる、増幅係数を用いたアルゴリズムの説明に重きをおく。

第 3 章では、Fundamental 法を適用することで計算式中の算術演算数を極端に低減し、BPM の計算効率を改善する。クランク・ニコルソン(CN: Crank-Nicolson)法に基づく BPM(FCN-BPM)では、Fundamental 法を用いない従来の手法と比べて 85%、ADI 法に基づく BPM(FADI-BPM)では 74%の計算時間で、従来手法と全く同じ計算結果を与えることを見出す。ADI-BPM では、係数行列が可換となるように、各計算ステップにおける屈折率の選択方法に注意を払う必要がある。FADI を用いると、選択し得る屈折率の組み合わせ全てにおいて係数行列の可換性が満たされ、伝搬方向に構造の変化する導波路の場合でも従来と同じ計算精度が維持されることを明示する。

第 4 章では、伝搬ビーム解析におけるパワー保存アルゴリズムを考案する。電界と磁界両方のフレネル方程式を解き、ポインティングベクトルに基づいて電界と磁界の積で厳密にパワーを評価することで、大幅にパワーの保存性が改善されることを明示する。本手法では、計算すべきマトリクス数が従来の 2 倍になるが、効率良く計算パラメータを共有することで、計算メモリの増加量は僅かで済む。次に、FADI-BPM とパワー保存アルゴリズムを用いながら、導波路型偏波変換器の小型化を行う。基本モードと高次モードが混在する混合モード領域の存在を突き止め、直線テーパ形状を曲線テーパ形状に変えることで、従来の半分のデバイス長で広帯域に動作することを明らかにする。

第 5 章では、パワー保存型 FCN-BPM を用いながら、金属膜を装荷した埋め込み型屈曲光導波路を検討する。基板上に金属膜を付加すると、準 TM モードに対して表面プラズモンポラリトンモードと呼ばれる特殊なモードが生成されることが知られている。金属膜が準 TM モードに対してのみ導波路として機能する性質を利用すると、屈曲光導波路のコアと平行に金属膜を装荷することによって準 TM モードで混成導波路が形成され、偶奇のスーパーモードが生成されることを見出す。屈曲導波路では、奇スーパーモードの界がコアに集中するため、直線導波路を伝搬する光波で奇スーパーモードを効率良く励振することで、屈曲損が低減されることを明らかにする。このメカニズムを応用すると、金属膜の幅と装荷位置を調節することで、準 TM モードの屈曲損を準 TE モードのそれまで低減する

ことが可能となり、結果として PDL が抑圧される。更に、トレレンチを付加することで、純粹屈曲損を低減しながら、 $1.3\ \mu\text{m}$ から $1.65\ \mu\text{m}$ の広い波長帯域で $0.4\ \text{dB/cm}$ 以下の低い PDL を達成できることを明示する。

第 6 章では、埋め込み型光導波路において、空気界面からのコア位置を調節するのみで屈曲損を低減できる手法を新たに提案する。コアの深さと固有モード界分布の関係から、コアが空気界面近くに存在すると漏れモードの生成と消失という 2 つの相反する効果が生じることを解明し、屈曲損が最小になる最適なコア位置が存在することを見出す。コア位置を最適な位置に選ぶと、 $7\ \text{mm}$ の屈曲半径において、波長 $1.3\ \mu\text{m}$ から $1.65\ \mu\text{m}$ の広い帯域に渡って $0.88\ \text{dB/cm}$ から $0.25\ \text{dB/cm}$ まで純粹屈曲損を低減可能であることを明示する。本手法は、コアの最適位置が屈曲半径に無依存であり、屈曲半径の変更に伴って構造の最適化を要求される従来の手法には無い特長があることも明確にする。加えて、コアの最適位置を見積もることのできる設計指針も示す。界の最大振幅値のおよそ 12% となる位置に空気層－クラッド境界を設置することで、コアとクラッドの比屈折率差に依らず、純粹屈曲損が最小になることを明らかにする。

第 7 章では、本研究で得られた成果を要約している。

2. 審査結果の要旨

本論文は、高屈折率差の導波路からなる小型光回路を設計するために、高精度で計算負荷の少ない解析法を確立し、これに基づき、屈曲回路で生じる損失を低減する手法を提案したものである。審査の結果、下記の点において新規性と工学的有効性を確認した。

1. 高効率パワー保存型ビーム伝搬法の開発

Fundamental 法と呼ばれる計算手法をビーム伝搬法の定式化に応用し、微分演算回数を飛躍的に減らした新たなアルゴリズムを開発している。これにより計算時間を約 30%短縮している。さらに、従来、高屈折率差の導波路解析で課題となっていた、パワーが保存されない問題点を解決するために、電界と磁界の波動方程式を独立して解き、その後に、ポインティングベクトルでパワーを評価する手法を確立している。スポットサイズ変換器に適用し、従来法で生じていたパワーの相反性における矛盾を解決している。

2. 屈曲導波路の偏波依存損低減法の提案

埋め込み型導波路を屈曲した際に生じる、偏波依存損を低減するために、空気クラッド界面に金属膜を装荷する手法を提案している。金属膜が TM 波のみに導波路として動作することを利用し、TM 波に対して混成系導波路を生じせしめ、モード結合によって、屈曲損を低減する独創的な発想を提示している。金属は光波帯では損失媒質として知られているが、コア近傍に金属膜を装荷することで、TM 波の屈曲損のみを選択的に減少することに成功している。具体的には、 $1.3\ \mu\text{m}$ から $1.65\ \mu\text{m}$ の広い波長帯域で $0.4\ \text{dB/cm}$ 以下の低い偏波依存損を達成している。片方の偏波の屈曲損のみを選択的に減少させる方法は従来になく、新規性と工学的有効性が認められる。

3. 屈曲導波路の総合損低減法の提案

埋め込み型導波路を屈曲した際に生じる純粋屈曲損と遷移損の総合損の低減が、単にコアの埋め込み位置の最適化で行えることを見出している。コアが空気界面へ接近する際、固有モード界の広がり効果と折り返し効果とが、屈曲で生じる漏れ波に関して互いに相反する作用をもつことを明らかにしている。この事実に基づきコアの最適位置の存在を突き止め、界の最大振幅値の約 12%となる位置に空気クラッド界面を設置すればよい、という指針を提供している。提案手法は、従来必要であった追加の製造工程を要せず、屈曲半径、偏波、波長に殆ど依存しない特長を有する。光通信波長帯全域にわたって単にコアの位置調整のみで低損失の光回路を構成できることを見出しており、工学的価値が大きい。

以上、本論文で提案された高効率解析法に基づいて開発された光回路の設計手法は、光回路の小型化の際に遭遇する偏波依存損、屈曲損を低減し、光通信システムの性能を向上し得るものであり、工学に資するところが大きい。よって、本審査小委員会は全会一致をもって提出論文が博士(工学)の学位に値するという結論に達した。

(報告様式Ⅲ)