

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：16401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26790058

研究課題名(和文)中空コアフォトニック結晶ファイバを用いた微弱光の伝送とその量子制御に関する研究

研究課題名(英文) Weak signal propagation and manipulation via photonic crystal fibers with a hollow core

研究代表者

北川 晃 (Kitagawa, Akira)

高知大学・教育研究部人文社会科学系教育学部門・講師

研究者番号：90450684

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,300,000円

研究成果の概要(和文)：誘電体内部の電磁場の伝搬の様子は、古典電磁気学の範囲内で屈折率やフレネル係数を用いて記述されている。本研究テーマにおいて、屈折率やフレネル係数を量子論的に矛盾のない表式で記述できることを示した。

現代の光通信技術を支える光ファイバは誘電体でできており、一定の強度の電磁場を用いた運用が想定されてきた。しかしながら、量子暗号プロトコルを始めとした微弱光信号を用いた通信が行われており、古典電磁気学での解析は不可能となっていた。本研究で得られた知見を活用することで、光ファイバ内部の電磁場の伝搬の様子を、量子論的に適正に評価することができる。

研究成果の概要(英文)：Propagation properties of electromagnetic fields in dielectrics are well described with the refractive index and Fresnel coefficients within the classical electromagnetics. In this research, we showed that the refractive index and Fresnel coefficients are consistently represented also in the quantum optics.

The optical fiber, which is an essential element of the optical communication system today, consists of dielectrics. It is supposed that a certain intensity of electromagnetic fields travel in the optical fiber. Recently, however, protocols with weak optical signals, such as the quantum cryptography, are considered, and analysis of them is impossible within the classical electromagnetics. Through the results obtained in the present research, we can correctly evaluate propagation properties of electromagnetic fields in optical fibers from the viewpoint of the quantum optics.

研究分野：量子光学

キーワード：量子光学 光導波路

1. 研究開始当初の背景

- (1) 現代の光情報通信技術において重要な役割を果たす光ファイバでは、一定の強度の電磁波の伝搬が想定されており、その伝搬特性は古典電磁気学を用いて解析されるのが一般的である。しかしながら近年、量子暗号鍵配布プロトコルなどにおいて、光子数一個程度の微弱光通信が実施されており、その量子論的な解析が必要となっていた。
- (2) 現在実用化されている光ファイバは、通信波長帯 (1.55 μm) の電磁波に対して損失の少ない石英を用いて製作されている。こうした誘電体では屈折率が1よりも大きいため、光の伝搬速度は真空中に比べて低下する。また光ファイバは断面方向に空間的な広がりをもっており、伝搬する電磁場強度は空間依存性をもっている。しかしながら従来の電磁場の量子化においては、屈折率が1である一様な空間が仮定されているのが一般的であり、光ファイバのような構造中の記述は十分に検討されてこなかった。
- (3) 従来の石英系光ファイバの損失は理論限界である 0.2dB/km (100km 伝搬して信号強度 1/100) が実現されているが、石英の物性的な性質から、これ以上光ファイバ自体の劇的な低損失化は見込めない。より損失率を下げることのできる可能性として、中空コアと周期構造クラッドを持つフォトニック結晶ファイバの研究が行われている。

2. 研究の目的

- (1) 屈折率が空間的に分布している誘電体内部を伝搬する電磁波を量子論的に記述する表現を与える。また、コヒーレント状態を考えることにより、古典電磁気学の範囲内で記述された表現と比較し、矛盾のないことを確かめる。
- (2) 屈折率差による全反射を導波原理とする光導波路 (光ファイバ) 内部の電磁場について、その量子論的な表現を整理し、伝搬特性について解析する。
- (3) 中空コアと、伝搬電磁波の波長程度の周期構造クラッドを持つ光導波路 (フォトニック結晶導波路) について、その量子論的な表現を整理し、伝搬特性について解析する。
- (4) 光導波路内部の電磁波について、適当な観測過程を組み合わせることで、その導波特性を能動的に制御する方法について検討する。
- (5) 非古典的な光が伝搬する場合について、

その量子論的な特性について検討する。

3. 研究の方法

- (1) 電磁場の表現のため、クーロンゲージの下でのベクトルポテンシャルを考える。

誘電体中における屈折率は、媒質中の原子と電磁波の相互作用を巨視的な視点から特徴付けるパラメータとして導入されているものである。これまでも半古典理論 (原子は量子論的に記述するが、電磁波は古典的に扱う) の範囲内で記述されている例はあったが、本研究テーマでは電磁波自体の量子化が目的である。そのために原子と光の双方を量子論的に記述し、これらの相互作用ハミルトニアンを与える。またその結果生ずる二次的な電磁波が及ぼす効果より、屈折率を量子論的に記述する。

屈折率境界面における、電磁波の反射と透過の性質について、量子光学的な観点から調べる。古典的な表現においては、境界面に平行な電磁波成分の連続性より反射率・透過率 (フレネル係数) が計算されている。しかしながらこの表現においては、二つの媒質のどちら側から入射するかによって、透過率が見かけ上では一致しない表現になっている。量子論的な解析においても、古典電磁気学での手法を踏襲するが、透過率の対称性を実現するために、電磁波を適当に規格化するものとする。これは境界面における電磁波のエネルギー密度を保存する観点から必要な手順である。また広く用いられているビームスプリッター演算子の表現との整合を確認する。

電磁場の量子論的表現に位置依存性を適切に取り込むために、空間領域を有限の大きさに区切って、領域ごとに電磁場を記述する。それぞれの領域境界面における電磁場の振る舞いは、ステップでの振る舞いに従う。

- (2) 先の段階(1)で導出した記述法を元に、従来型の屈折率差による全反射を導波原理とする光導波路内部の電磁波の表現を求める。

ステップ型 (屈折率が階段状に変化する) 方形導波路について、コア・クラッドの各領域を有限幅の微小領域に分割する。また、それぞれの微小領域における電磁場演算子を記述する。擬古典的な状態であるコヒーレント状態で期待値をとることにより、得られた表現が古典電磁気学での表現と一致することを確認する。

グレーデッド型(屈折率が連続的に変化する)方形導波路について、領域を微小領域に分割し、各領域において電磁場演算子を記述する。特にコヒーレント状態を考えた場合、電磁波がサイン曲線状の軌跡をたどりながら伝搬されることを確認する。

- (3) 中空コアおよび誘電体による電磁波の波長程度の周期構造クラッドを備えた導波路(フォトニック結晶導波路の一種)では、ブラッグ回折を導波原理として光の閉じ込めが実現できる。この光導波路について、伝搬する電磁場を量子論的に記述する。
- (4) 従来の導波路光学においては、光導波路内部の電磁場は定常状態として解析されるのが普通である。本段階では、光導波路端面において入射した電磁場の波形が、伝搬とともに形を変え、最終的に定常状態になる様子をシミュレートする数値解析プログラムを開発する。また微弱光の伝搬の場合では、光導波路内部で観測を行うことにより、電磁波の波形(波動関数)に影響を受けるが、これにより伝搬特性にどのような影響があるか、調べる。
- (5) 非古典的な光(スクィーズド状態、光子数状態)について、誘電体中の伝搬特性(屈折率による光速度の低下)がコヒーレント状態と同様に記述できるか否かについて考察する。

4. 研究成果

- (1) クーロンゲージを課したベクトルポテンシャルからスタートすることで、以下の電磁場の記述は、すべてマクスウェル方程式を満たすことが保証される。

原子と電磁波の非共鳴領域(原子のエネルギー準位間隔よりも電磁波のエネルギーの方が小さい場合)を考え、その結合を摂動論的に扱うことで、相互作用ハミルトニアンを解析的に導いた。本ステップにおいては、原子に加えて電磁波をも量子論的に記述し、特にコヒーレント状態を考えた。この相互作用により、一次光の一部が仮想的に励起され、二次光が同じ方向に発生する。一次光と二次光は位相がほぼ 90° 異なっており、その合成波は位相が短くなる。これは実効的に光の速度が遅くなることに対応している。この結果より屈折率を量子論的に表現できることが明らかになったため、電磁場の量子論的な記述においても屈折率を用いてよいことがわかった。

誘電体中の屈折率境界面において、電

磁波の接線成分が連続である条件より、電磁波の反射・透過の性質を調べた。このステップでも、引き続きコヒーレント状態を仮定した。今回の方法は、古典電磁気学における方法と同じであるが、境界面のどちら側から入射しても透過率が同じになるように記述するためには、境界面を単位時間あたりに通過するエネルギー密度の保存を考慮する必要がある。そのために電磁場を適当な因子で規格化することで、規格化フレネル係数を導いた。この規格化フレネル係数で結びつけられた入出力電磁場の記述は、量子光学で広く用いられているビームスプリッター演算子の記述と矛盾のないものであることがわかった。

屈折率が空間的に分布している領域における電磁波の伝搬を扱うため、空間を微小な有限領域に分割することを考えた。各領域においては、屈折率が一樣であると仮定した。それぞれの境界面においては、電磁場の振る舞いはステップの規格化フレネル係数で特徴付けられている。この手法により、任意の屈折率分布を持つ領域における電磁波の伝搬を量子論的に扱うことができることがわかった。

- (2) 先の段階(1)で明らかになった誘電体中を伝搬する電磁波の量子論的な記述を用いて、光導波路内部の電磁波の伝搬特性を解析した。本段階でも、引き続きコヒーレント状態の場合について考察した。

屈折率差による全反射を導波原理とするステップ型導波路について、導波路内部の電磁場の量子論的な記述を詳細に調べた。電磁場強度の空間的な分布を考慮するため、導波路内部の空間を微小な有限幅を持つ領域に分割し、それぞれの領域において電磁場を記述した。特にコア部分においては、コア・クラッド境界面に垂直な軸の正・負方向成分を持つ電磁場が存在しており、これらを重ね合わせた電磁場を定義することで、その干渉効果を表すことができた。またコア・クラッド境界面において、電磁波は全反射を起こすが、不確定性関係を考慮することにより、クラッド部分へ波長程度の浸みだしを起こすことが説明できることが明らかになった。以上で得られた結果は、古典電磁気学での記述と矛盾のないものである。

屈折率が連続的に変化するグレーデッド型導波路について、導波路内部の電磁場の量子論的な記述を詳細に調べた。屈折率の空間的な変化を扱うために、導

波路内部の空間を微小な有限幅を持つ領域に分割し、それぞれの領域において電磁場を記述した。それぞれの領域の境界面において、電磁波は規格化フレネル係数に従って振る舞うが、屈折率が連続的に変化している極限を考えることにより、反射される成分がゼロに収束することを確かめた。その結果、透過波がサイン曲線に近い軌跡をたどりながら、導波路内部を伝搬する様子が記述できることがわかったが、これは古典電磁気学での記述と矛盾のないものである。

- (3) 中空コアと波長程度の誘電体周期構造クラッドを持つフォトニック結晶導波路内部の電磁波伝搬特性を量子論的に解析した。段階(2)での手法と同じく、導波路内部の空間を微小な有限幅領域に分割し、それぞれの領域で電磁場を記述した。領域間の各境界面においては、電磁場は規格化フレネル係数で関連けられている。ここで得られた結論は、古典電磁気学における記述と矛盾のないものであり、クラッドへの電磁場の浸みだしが十分少ないことが確認された。
- (4) 長手方向に均一な構造をもった導波路を考え、端面より入射する電磁場の波形が定常状態になる様子をシミュレートする数値計算プログラムを開発した。本手法において、マクスウェル方程式より導かれる波動方程式の空間依存部分(ヘルムホルツ方程式)を数値的に解いている。初期状態として、コア部分に広く分布する初期波形を与えたとき、大部分の電磁波が導波モードとしてコア内部に閉じ込められ、定常状態になることを確認した。特に微弱なコヒーレント光を仮定した場合、定常状態として得られた波形は、導波路内部における光子の存在確率であると考えられる。光導波路内部において、光子の有無を測定する過程を導入することを考え、それに対応するように波形を整形する操作を行ったところ、最初導波モードであった波形が崩れ、放射モードへ移行してしまう現象が起こりうるということが明らかになった。このことより、適切でない測定過程は、伝搬特性に悪影響を与えてしまうことがわかった。適切な測定過程の条件については、今後の継続課題として検討したい。
- (5) 非古典的な微弱光に対応する電磁場の伝搬特性について考察を行った。今回の解析により、原子と電磁波の相互作用により生成される二次光の位相変化は、コヒーレント状態の振幅に寄らないことが明らかになった。このことは、任意の量子状態について、量子論的な観点から

の屈折率が一様に定義できることを示している(任意の量子状態はコヒーレント状態で展開できるため)。これより、コヒーレント状態以外の非古典的な微弱光についても、同様に屈折率を用いて記述できることがわかった。このことは、量子暗号プロトコルにおける長基線通信路における電磁波の伝搬を解析する上での根本的な仮定、すなわち非古典的な光を含む微弱光についても、屈折率に応じた速度の低下を伴うという事実が確認されたことを意味している。

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1件)

A. Kitagawa, "Quantum description of electromagnetic fields in waveguides", 査読なし, 2015, arXiv:1510.06836.

[学会発表](計2件)

北川 晃, 「光導波路内の微弱光信号の量子論的解析」, 第32回量子情報技術研究会 QIT2015-3 (大阪大学 豊中キャンパス, H27 5/25 登壇).

北川 晃, 「中空コア光ファイバによる微弱光伝送の量子論的解析」, 第33回量子情報技術研究会 QIT2015-57 (NTT 厚木研究開発センタ, H27 11/24 登壇).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北川 晃 (KITAGAWA, Akira)

高知大学 教育研究部 人文社会科学系

教育学部門 講師

研究者番号: 90450684