

学 位 論 文 題 名

Study of the nonlinear optical response
of a one-dimensional atom and its application
to an optical quantum phase gate

（一次元原子の非線形光学応答と光量子位相ゲートへの応用に関する研究）

学位論文内容の要旨

量子計算や量子暗号に代表される量子情報技術は、近年、量子物理学の分野において急速に発展している研究分野である。量子情報の本質は、情報の基本単位として量子状態を用いることにある。これは量子ビットと呼ばれており、量子力学の不確定性原理に従う重ね合わせ状態を許す。量子情報技術の実現には、この重ね合わせ状態を許す量子ビットを制御する量子情報技術特有の回路ゲート、すなわち量子位相ゲートの構築が必須となる。光量子情報におけるその有力な候補が一次元原子と呼ばれる位相シフトデバイスである。一次元原子は光微小共振器中に単一原子を閉じ込め、その単一原子の非線形性を用いて入出力光間の非線形位相シフトを実現する。現在、この一次元原子を固体デバイスで実装する議論がなされており、その基礎理論の構築が求められている。

本論文の目的は、一次元原子を固体デバイスに応用するための基礎理論を構築することにある。一次元原子を固体デバイスで実現するためには、（１）非線形位相シフトに対するデコヒーレンスの影響と（２）非線形位相シフトに対する共振器中原子位置の影響の解析が重要になる。（１）の問題は、共振器デザインや物質系に起因する制限がどのように非線形位相シフトに影響するか未だ明らかとなっていないためである。一般的に、共振器モード以外へのロス是完全に抑えることは出来ず、また原子２準位間の遷移は付加的な位相緩和効果に敏感である。また、（２）の問題は、これまでの一次元原子の理論解析が bad cavity 極限において共振器場を断熱消去し、共振器構造による効果、すなわち共振器中の原子位置による非線形位相シフトへの効果を解析することができないためによる。一般的に、共振器中の原子位置を頭わに取り扱う理論解析は非常に複雑であり、このような場合、数値計算法が極めて有用となる。本論文では、（１）の問題に対して、共振器デザインに起因する光学ロスやデコヒーレンスの効果を集約したデバイス変数（一般化結合効率）を導入し、最大の π 位相シフトを実現するための条件を明らかにした。また、（２）の問題に対して、光学ブロッホ方程式と結合した有限差分時間領域法（FDTD 法）を用いて、非線形位相シフトの原子位置依存性を数値的に解析し、非線形位相シフトが原子からの双極子放射と入射光間の弱め合い干渉効果により生

じ、共振器中の原子の位置に強く依存することを明らかにした．特に、十分に微弱な入射光に対する位相シフトは、原子位置における局所電場強度よりもむしろ原子の再吸収－再放出過程による干渉効果に強く依存することを明らかにした．

本論文は以下の6章で構成されている．

第1章では、量子情報技術および量子位相ゲートの概要を述べ、また一次元原子の物理的な背景と固体デバイスへの応用に関する問題点を述べる．

第2章では、一次元原子の基本概念を共振器量子電気力学効果の観点から再考する．まず、量子電気力学 (QED) に関する簡単な要約を与える．次に、共振器 QED 効果を要約する自然放出因子の簡単な導出法を与える．これは一次元原子の物理の理解に必須である．また、自然放出因子の観点から、一次元原子のダイナミクスを記述する光学ブロッホ方程式を定式化する．

第3章では、一次元原子から得られる非線形位相シフトにおけるデコヒーレンスの効果を詳細に研究する．一次元原子の光学応答は光学ブロッホ方程式を用いて解析する．このとき、デコヒーレンス効果は共振器モード以外への光学ロスと弾性的な位相緩和の組み合わせにより記述される．上述のデコヒーレンス効果を加味した光学ブロッホ方程式を用いると、任意のデバイスにおいて得られる最大位相シフトを解析することが可能となる．具体的には、 π 位相シフトが可能な条件、および強いデコヒーレンス環境下における最適な位相シフトとそれを与える離調の条件の導出が可能となる．

第4章では、2準位原子によって構成される薄い無限原子層を導入し、その光学応答を再考する．この系は一次元入出力系に帰着することができ、そのダイナミクスは一次元マクスウェル方程式と光学ブロッホ方程式で解析することが可能である．物理的な状況は全く異なるが、この系から得られる光学応答は、数学的に一次元原子からの光学応答と完全に一致することを示す．

第5章では、第4章で導入した原子層からの非線形光学応答を光学ブロッホ方程式と結合した有限差分時間領域法 (FDTD 法) を用いて数値的に解析する． π の非線形位相シフトは原子層が入力場の波腹にある場合において実現されることを示す．また、この結果は入力場と原子層からの双極子放射との弱め合い干渉によって説明できることを示す．非線形位相シフトの原子層位置依存性についても詳細に議論する．

第6章では、本論文の結果を要約し、将来的な展望について議論する．

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 笹 木 敬 司

副 査 教 授 末 宗 幾 夫

副 査 教 授 武 藤 俊 一

副 査 助 教 授 竹 内 繁 樹

学 位 論 文 題 名

Study of the nonlinear optical response of a one-dimensional atom and its application to an optical quantum phase gate

(一次元原子の非線形光学応答と光量子位相ゲートへの応用に関する研究)

量子情報技術は、近年、量子エレクトロニクス分野において急速に発展している研究分野である。量子情報技術の実現には、重ね合わせ状態を許すビット（量子ビット）を処理する量子情報特有の回路ゲート、すなわち量子位相ゲートの構築が必須となる。特に光を用いた量子情報におけるその有力な候補のひとつが、本論文で議論されている一次元原子と呼ばれる非線形位相シフトデバイスである。一次元原子は光微小共振器中に閉じ込められた単一原子と入力光子との非線形相互作用を利用して非線形位相シフトを実現する。現在、この一次元原子を固体デバイスで実装する議論がなされており、その基礎理論の構築が求められている。

本論文は、一次元原子を固体デバイスに応用するための基礎理論を構築することを目指すとして、2つの問題点、すなわち（１）非線形位相シフトに対するデコヒーレンスの影響と（２）非線形位相シフトに対する共振器中原子位置の影響を解析している。これまでの一次元原子の理論解析では、共振器構造や物質系に起因する制限がどのように非線形位相シフトに影響するかを議論していないため（１）の問題は重要であるといえる。本論文では、共振器構造に起因する光学ロスやデコヒーレンスの効果を集約したデバイス変数（一般化結合効率）を導入し、最大の π 位相シフトを実現するためのデバイスの条件を明らかにしている。また（２）の問題として、一般的に共振器中の原子位置を顕わに取り扱う理論解析は複雑になり、共振器構造による効果、すなわち共振器中の原子位置による非線形位相シフトへの影響を解析することは難しい。本論文では、光学ブロッホ方程式と結合した有限差分時間領域法（FDTD 法）を導入し、非線形位相シフトの原子位置依存性を数値的に解析し、非線形位相シフトが共振器中の原子の位置に強く依存することを明らかにしている。

本論文は以下の６章で構成されている。

第１章では、量子情報技術および量子位相ゲートの概要を述べ、また一次元原子の物理的背景と固体デバイスへの応用に関する問題点を述べている。

第２章では、一次元原子の基本概念を共振器量子電気力学効果の観点から再考し、その

効果を要約する変数，自然放出因子の簡単な導出法を与えている．また，その自然放出因子の観点から，一次元原子のダイナミクスを記述する光学ブロッホ方程式を定式化している．

第3章では，第2章で導入された光学ブロッホ方程式を用いて，一次元原子から得られる非線形位相シフトにおけるデコヒーレンスの効果を詳細に解析している．デコヒーレンス効果は共振器モード以外への光学ロスと弾性的な位相緩和の組み合わせにより記述されており，任意のデバイスにおいて得られる最大位相シフトを与える条件を導出している．具体的には，最大の π 位相シフトが得られる条件，および強いデコヒーレンス環境下における最適な位相シフトとそれを与える離調の条件を明らかにしている．

第4章では，2準位原子によって構成される薄い無限原子層の光学応答が議論されている．この系は一次元入出力系に帰着することができ，そのダイナミクスは一次元マクスウェル方程式と光学ブロッホ方程式で解析することが可能である．物理的な状況は異なるが，この系から得られる光学応答が数学的に一次元原子からの光学応答と完全に一致することが示されている．

第5章では，第4章で導入された原子層からの非線形光学応答を光学ブロッホ方程式と結合した有限差分時間領域法（FDTD 法）を用いて，非線形位相シフトの原子層位置依存性が数値的に解析されている． π の位相シフトは原子層が入力場の波腹にあるときに得られること，また，この結果が入力場と原子層からの双極子放射との弱め合い干渉によって説明できることが示されている．非線形位相シフトは，原子層の位置が波腹から離れるとともに減少し，原子層位置に強く依存する．特に，十分に微弱な入射光に対する位相シフトは，原子による光の再吸収－再放出過程による干渉効果に強く依存することが示されており，位相シフトが単に原子位置における局所電場強度だけによるものではないことを明らかにしている．

第6章では，本論文の結果が要約されており，将来的な展望についても議論されている．

これを要するに，光を用いた量子情報処理において重要となる量子位相ゲートの実現に 응용が期待される一次元原子の固体デバイス化が可能であること，またその条件を明らかにするとともに，FDTD 法による数値解析から非線形位相シフトにおける原子位置の重要性を明らかにし，一次元原子の固体デバイス化に関する有益な知見を得たものであり，著者の研究は光量子エレクトロニクスの分野に貢献するところ大なるものがある．

よって著者は，北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める．