

| | |
|---------|---|
| 氏名 (本籍) | りき たけ よし あき 力 武 克 彰 (山 口 県) |
| 学位の種類 | 博 士 (情報科学) |
| 学位記番号 | 情 博 第 298 号 |
| 学位授与年月日 | 平成 16 年 3 月 25 日 |
| 学位授与の要件 | 学位規則第 4 条第 1 項該当 |
| 研究科、専攻 | 東北大学大学院情報科学研究科(博士課程)応用情報科学専攻 |
| 学位論文題目 | 量子ドット-光キャビティ結合系量子ビットに関する理論的研究 |
| 論文審査委員 | (主 査) 東北大学教授 海老澤 丕道 東北大学教授 堀口 剛 東北大学教授 大野 英男 東北大学教授 枝松 圭一 (工学研究科) (工学研究科) 東北大学助教授 今村 裕志 |

論 文 内 容 要 旨

1 序論

量子計算・量子通信は量子力学の性質を利用した計算・通信原理であり、系の量子性を生かすことによって、従来の技術に比べ遥かに優れた性能を持つことが示されてきている。量子計算・通信を行う主体となる量子コンピュータ、特にその基本構成要素である、量子ビットと量子ゲートの実現化に向けた研究が、近年盛んに行われている。

量子ビットはそれを実現する物理系に応じて、それぞれに長所と短所を持ち合わせていることが知られている。光子系やイオントラップ、NMR は非常に長いコヒーレンス時間を持つが、集積化や多ビットへの拡張は困難である。一方量子ドット内のスピンや励起子を用いた固体素子量子ビットは、そのコヒーレンス時間は比較的短いものの、多ビット化への拡張性が高い。光子は量子情報を遠くにまで運ぶのに最適の媒体であり、固体素子は量子計算に向けた媒体である。これら光子と固体素子の量子ビットを組み合わせることによって、互いの長所を生かした新しい量子情報処理への枠組みができると期待される。そのためには、光子と固体素子との間で量子情報をやり取りし合える素子が必要になる。このような光子と固体素子とを結ぶような量子ゲート素子は、量子中継や量子情報ネットワークの構築に必須となる技術と考えられる。

本研究は、固体素子-光結合量子ゲートとしての、量子ドット-光キャビティ結合系量子ゲートの提案に向けたものである。量子ドット-キャビティ結合系としては、(1)量子ドットの励起子状態と光子の数状態が結合した系、(2)量子ドットのスピン状態と光子の偏光状態が結合した系のふたつの系を考え、それぞれの系のダイナミクスを明らかにする。量子ビット・量子ゲートとしての働きを見るために特に以下の二点に注目し、考察を行った。第一点は量子ドットと光子間の量子的なもつれあい状態(エンタングル状態を)を生成し、制御することができるかどうかであり、第二点は環境との相互作用によって生じる量子干渉性の喪失(デコヒ

ーレンス)の影響を明らかにすることである。これらの解析は量子計算デバイスを実現していく過程において必要不可欠なものである。

本論文は次のように構成されている。第1章は序論である。第2章では、本研究で用いた量子系のダイナミクスの計算手法を述べている。第3章と第4章は量子ドット-キャビティ結合系のダイナミクスに関する理論的解析とその結果である。第3章では量子ドットの励起子状態とキャビティ内の光子数状態が結合した系、第4章では量子ドットに注入されたスピンの状態と光子の偏光状態とが結合した系でのダイナミクスに関する研究結果を示す。第5章で研究結果のまとめをおこなう。

2 デコヒーレンスの解析手法

量子計算では、その計算が行われている間、量子的なコヒーレンスを保っておく必要がある。しかしながら、意図しない環境との相互作用があるとデコヒーレンスが引き起こされ、量子的なコヒーレンスが壊れてしまい量子計算を遂行することが不可能となる。そのため、量子デバイスにおいては、デコヒーレンスの影響を明らかにすることが必要となってくる。このようなデコヒーレンスがある系では、系のダイナミクスはシュレディンガー方程式で記述することができず、ダイナミクスの解析には他の手法が必要となる。本章では、本研究でもらいた2つの解析手法について説明を行った。

一つ目は Lindblad 型マスター方程式を用いた手法である。この手法では Lindblad 演算子と呼ばれる、環境と結合を表す系の演算子を用いてデコヒーレンスの影響を取り入れることができる。マスター方程式は時間に対する一階の微分方程式で与えられ、計算が容易であり、デコヒーレンスによるダイナミクスの減衰率などについて解析的な表式を与えることができるという利点を持っている。ただし、温度などの環境の性質を取り入れた計算は困難である。

二つ目の解析手法は実時間経路積分を用いた方法である。デコヒーレンスを引き起こす環境として調和振動子を仮定すると、系のダイナミクスは環境の影響を表す影響汎関数を用いることによって、実時間経路積分表示で厳密に記述することができる。本論文では Makri らによって提案された、影響汎関数の数値計算法を用いてデコヒーレンスの解析を行った。この手法では環境の情報(温度や状態密度)を詳細に取り入れた計算が可能になるという利点がある。欠点としては計算コストが高く、また数値計算であるために解析的な結果を出すことができないことがあげられる。

3 励起子状態と光子数状態を用いた量子ビット結合系

本章では量子ドット-キャビティ結合系として、励起子状態と光子数状態を用いた量子ビット結合系を考える。固体素子量子ビットとしては量子ドット内の励起子状態を用い、光子量子ビットとしてはキャビティ内の光子の数状態($n=0,1$)を用いる。これらふたつの量子ビットが結合した系のダイナミクスを追い、どのようなエンタングル状態が得られるか、またデコヒーレンスの影響について、結合系のエンタングメントの大きさを表す指標を用いて議論した。

まず、デコヒーレンスがない理想的な場合での、結合系のダイナミクスについて考察を行う。量子ドットの励起子状態とキャビティ内の光子との結合は、原子系の解析に一般的に用いられている Jaynes-Cummings モデルによって記述される。この結合系のエネルギー固有状態は、ベル状態と呼ばれる、励起子状態と光子数状態とが最ももつれ合った状態になっている。結合系のダイナミクスはベル状態でも

ある、二つのエネルギー固有状態間での量子的な振動(ラビ振動)によって生じ、エンタングルメントの生成と消滅が周期的に繰り返して起こることを見た。

デコヒーレンスの影響を調べるため、量子ドットで位相緩和が起こる場合と、量子ドットでエネルギー散逸が起こる場合の 2 つの状況を考え、それぞれにおいて結合系のダイナミクスの計算を行った。ダイナミクスの解析には実時間経路積分の手法を用いた。

量子ドットで位相緩和が起こる場合では、結合系のダイナミクスは減衰振動的な振る舞いをみせる。結合系のエンタングルメントの大きさを表す、量子ドットのエントロピーや entanglement of formation といった指標もやはり減衰振動的な振る舞いをするが、時刻が無限大の定常状態において entanglement of formation の値が有限に残ることが示された。これは定常状態において、二つのベル状態間での平衡状態が形成され、有限のエンタングルメントが残るためと考えられる。なお、定常状態において有限のエンタングルメントが残るという性質は、量子計算の初期状態としてベル状態を用意することに用いることができるのではないかと期待される。

量子ドットでエネルギー散逸が起こる場合においても、結合系のダイナミクスおよびエンタングルメントの指標は減衰振動的な振る舞いをする。この場合、結合系のダイナミクスは二つのベル状態間でのコヒーレントな振動から、励起も光子もない最低エネルギー状態への緩和を反映したものとなる。定常状態においては、位相緩和が起こる場合とは異なり、entanglement of formation はゼロとなりエンタングルメントがなくなってしまうことがわかった。また量子ドットのエントロピーの振動周期が、ラビ振動の半分の周期から、ラビ振動と同じ周期へと変化するという特異な振る舞いが起こることを示した。

4 スピン状態と光子の偏光状態を用いた量子ビット結合系

この章では、量子ドット-キャビティ結合系として、量子ドット内のスピン状態を用いた量子ビットと、光子の偏光状態を用いた量子ビットの結合系を考える。固体素子量子ビットとしては量子ドットに注入されたホールのスピン状態を用い、光子量子ビットとしてはキャビティ内の光子の偏光状態を用いる。

まず、この結合系において量子ドット内のホールのスピン状態とキャビティ内の光子の偏光状態とを結合する方法について考察を行った。量子ドットの光学遷移の偏光状態に対する選択則を考慮し、量子ドットに 1 電子 2 ホールが励起されている trion 状態を介した遷移を用いることによって、スピン状態と光子の偏光状態との結合が可能であることを示した。

上記の様な、スピン状態と偏光状態との結合を取り入れたモデルを考え、結合系の量子状態のダイナミクスを計算した。trion 状態への励起エネルギーとキャビティ内の光子のエネルギーの差であるデチューニングと、量子ドット-光子間の結合エネルギーとの大小関係によって、結合系のダイナミクスの振る舞いが異なってくる。デチューニングがゼロの場合や、結合エネルギーと同程度の場合では、量子計算に用いることのできる論理基底の状態と、論理基底ではない trion 状態がともに同程度ダイナミクスに寄与する。trion 状態の占有確率がゼロとなる状態を取り出すことによって、スピンと光子の量子状態を交換させたり、両者間のエンタングル状態を生成したりすることができ、結合系が量子ゲートの働きをするがわかった。一方、デチューニングが結合エネルギーよりも十分に大きな場合では、結合系のダイナミクスは trion 状態を中間状態とするスピン反転ラマン過程によるものとなる。この場合 trion 状態の占有確率は無視できるほど小さい。また、状態を取り出す時間を変えることによって、様々なエンタングル状態を得ることができる。ただし、量

子操作に必要な時間は、デチューニングがゼロや結合エネルギーと同程度の場合に比べ、ずっと長くなってしまふ。

デコヒーレンスとして、多体状態である trion 状態での位相緩和を考え、それが結合系のダイナミクスに与える影響について議論を行った。デコヒーレンスの解析には Lindblad 型マスター方程式を用いた。trion 状態での位相緩和により、結合系のダイナミクスは減衰を受けるが、デチューニングを結合エネルギーよりも十分大きくとることによって、その減衰を小さくできることを明らかにした。量子計算においては、デコヒーレンスが起ころ時間までに何回量子操作が行えるかがデバイスの性能を表す指標となるが、デチューニングを大きくとることにより量子操作が可能な回数も大きく取れることがわかった。

また、結合系の量子状態を制御する方法として、振動電場を量子ドットへ照射することを考え、その場合でのダイナミクスの変化を考察した。振動電場の照射による AC シュタルク効果により、結合系のエネルギー準位を制御することができ、その結果として、量子振動を抑制することが可能であることがわかった。

5 結論

本研究では固体素子と光子を結びつける量子ゲートの提案に向けて、量子ドット-光キャビティ結合系のダイナミクスを明らかにした。量子ドット-光キャビティ結合系として、励起子状態を用いた量子ビットと光子数状態を用いた量子ビットの結合系、スピン状態を用いた量子ビットと光子の偏光状態を用いた量子ビットの結合系、のふたつの系を提案した。それらふたつの系どちらにおいても、そのダイナミクスの過程において固体素子量子ビットと光子量子ビットとのエンタングル状態を形成することを示した。得られるエンタングル状態は、デチューニングなどのパラメータを変えることにより、様々に変化させることができることを明らかにした。また、デコヒーレンスによるダイナミクスの変化を解析し、デコヒーレンスの影響を軽減する方法を明らかにすることができた。

論文審査の結果の要旨

近年、量子計算や量子通信とよばれる量子力学の基本原則に基づいた新しい情報処理技術が注目をあつめており、量子情報処理デバイスの作成に関する研究も盛んに行われている。光子や NMR(Nuclear Magnetic Resonance)を用いた量子ビットは非常に長いコヒーレンス時間を持つが、集積化や多ビットへの拡張は困難である。一方半導体量子ドットなどの固体素子を用いた量子ビットは、そのコヒーレンス時間は比較的短いものの、集積化や多ビット化への拡張性が高い。そのため、光子と量子ドットなどを組み合わせることにより互いの長所を生かした新しい量子情報処理の枠組みが重要である。著者はこれらのことを踏まえて、強く結合した固体素子量子ビット-光子量子ビット系を用いた量子ゲートの提案をめざして、結合系における量子もつれ合い状態（エンタングルメント）のダイナミクスを調べ、デコヒーレンスについて理論的な評価を行った。この論文はその成果を取りまとめたもので、全編 5 章よりなる。

第 1 章は序論である。

第 2 章では、デコヒーレンスについての理論的な概観とこの研究で用いた 2 つの解析方法、Lindblad 型マスター方程式及び実時間経路積分と、それらの関係について述べている。

第 3 章では、量子ドットの励起子状態と光子の数状態の結合系について、エンタングルメントの生成・制御についての理論予測とデコヒーレンスの評価を述べている。結合系エンタングルメントの指標を用いてこの系が量子計算に使える可能性があることを示したことは評価できる。

第 4 章では、量子ドットのスピン状態と光子の偏光状態の結合系について、III-V 族半導体量子ドット系を想定し、Lindblad 型マスター方程式を用いて trion 状態を介した過程によるエンタングルメントの生成と時間発展の解析を行うことにより得られた結果について述べている。光子のエネルギーによって変化するエンタングル状態や量子操作可能時間等の特徴を示し、また振動電場の照射によって量子振動を制御できることを示しているが、これらは量子ゲートの設計に際して有用な知見である。

第 5 章は結論である。

以上要するに本論文は、量子ドットとキャビティ内光子の結合系における量子ビットのエンタングルメントのダイナミクスの解明とデコヒーレンスの評価によって、同系の量子ゲートの提案に向けた大きな一歩となるものであり、量子情報工学および応用情報科学の発展に資するところが少なくない。

よって、本論文は博士（情報科学）の学位論文として合格と認める。