

博士学位論文

(内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

氏名	五島 敬史郎 Keishiro GOSHIMA
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	博 乙 第 16 号
学位授与	平成19年7月19日
学位授与条件	学位規程第3条第4項該当
論文題目	半導体量子ドットの励起子を用いた光制御型量子情報素子の開発に関する研究 (Study on Development of Optically Controlled Quantum Information Device Using Exciton of Semiconductor Quantum Dots)
論文審査委員	(主査) 教授 山田 諄 ¹ (審査委員) 教授 内田悦行 ¹ 教授 落合鎮康 ¹ 教授 徳田 豊 ¹

論文内容の要旨

半導体量子ドットの励起子を用いた光制御型量子情報素子の開発に関する研究 (Study on Development of Optically Controlled Quantum Information Device Using Exciton of Semiconductor Quantum Dots)

近年、ナノメータースケールの固体構造が技術的に作成可能なり、それに伴い量子力学を用いたデバイス応用が視野に入ってきた。特に近い将来、大きな壁に直面すると予想される従来型のデバイスに対して量子力学が古典的な物理学と決定的に異なる点を積極的に利用した量子情報処理の研究も盛んに行われている。その中でも代表的なものに量子コンピュータがある。量子コンピュータは、従来のコンピュータと動作原理が根本的に異なり、量子力学の特徴である状態の重ね合わせ、及び2つ以上の量子の別々の状態を重ね合わせることによって生じる量子力学的相関(エンタングルメント)という概念を導入した全く新しい方式である。計算の種類によっては、既存のスーパーコンピュータを遥かに凌ぐ能力があることが理論的に示されており、究極のコンピュータとして実用化が期待されている。しかしながら、この量子計算を実現する各種提案・方法が考えられているが、未だ実用化には至っておらず量子コンピュータの基本素子が実証され始めた段階である。小型、高集積化という観点から、半導体技術を使った方式が最も有力視されてい

る。半導体を用いた技術が注目されているのは、既存の半導体の製造・物性のノウハウが活用できることと、半導体量子ドットが比較的簡便に製作できる技術が確立され、それが量子力学的に優れた物性を持つ事が明らかとなった為である。

本研究では、半導体を用いた量子コンピュータ実現へのいくつかの手法の中でも、拡張性と観測・制御の容易性に優れ、比較的長寿命のコヒーレンスを持つ量子ドット中の励起子を用いた光制御型の方法に着目し、量子コンピュータの基本素子である、1量子ビットの回転ゲートと2量子ビットの制御NOTゲートの実現を目指した。特に、1量子ビットでは、必要不可欠なラビ振動を観測した。また、2量子ビットでは結合量子ドットの中の励起子間での量子力学的相互作用のモデルを提案し、本研究で初めて励起子分子の存在を観測した。

本論文は6章で構成され、以下にその概要を述べる。

第1章「序論」では、本研究におけるコア技術である半導体量子ドット、量子情報処理アルゴリズムに関する実験・理論・製作技術の歴史について解説し、本論文の背景について述べ、本研究の目的を明らかにする。

第2章は、量子コンピュータの動作に必要な状態の重ね合わせ、エンタングルメント、1量子ビットの動作原理、2量子ビットの動作原理、半導体量子ドットの状態密度、励起子等について解説する。

第3章は、量子ドットの作成方法及び観測装置について述べる。MBE装置を使いStranski-Krastanow(S-K)モードを用いた自己組織化InAs/GaAs半導体量子ドットの作成方法について述べる、そして2量子ビットと

1 愛知工業大学 工学部 電気学科 (豊田市)

して2個の半導体量子ドットを上下に近接して配置し、さらにIndium-Flash法を用いて2個のドット間のバリア障壁厚みを精密に制御した結合量子ドットの作成について記述する。測定方法は、レーザ分光分析法の一つとして微小空間の観測に優れた顕微分光実験装置構成について述べる。また、2量子ドットでの観測に用いた2つのレーザ光源を用いた2波長Photoluminescence (PL), Photoluminescence excitation (PLE) 実験方法について記述する。

第4章は、量子ドット1個（単一量子ドット）の光物性、電子状態を詳細に調べ、量子ドット特有の3次元閉じ込めによる離散的な電子準位を確認し、同時に極微細な発光線幅から量子ドット中の励起子が長い位相緩和時間を持つ事を明らかにした。そして、量子演算の基本素子である1qubitの回転ゲートを単一量子ドットのラビ振動を確認する事により、実際に量子ドットの励起子を用いた系で量子演算が実現する事を示した。また、ラビ振動により算出できる励起子と光との相互作用の強さを示す遷移双極子モーメントは40デバイであり、他の原子・分子系と比べて非常に大きな値を持つ事を示し、量子演算素子としてInAs/GaAs量子ドットが有望であることを示した。

第5章は、量子ドット2個（結合量子ドット）の電子状態、励起子間の相互作用、量子ゲート実証について示す。結合量子ドットの発光は4つの発光ピークを確認し、量子力学的に結合した系であることを確認した。それぞれの発光ピークは、反結合状態に起因するピークと結合状態に起因するピークである事を確かめた。そして、結合量子ドットにおいてもラビ振動を確認した。遷移双極子ダイポールモーメントの値は72デバイであり、単一量子ドットより大きな値であることを示した。また、結合量子ドットの励起子間の相互作用について、結合ドット中に2個の励起子を作る事によって相互の励起子分子が存在する事を世界で初めて確認した。その相互作用について詳細に調べ、励起子分子の円偏光依存性を調べた。円偏光励起を用いてスピン選択励起を行い、反平行のスピンで励起した場合のみ、励起子分子が生成されている事を確認した。また励起子分子は、励起子無し→励起子1個→励起子2個（励起子分子）という2段階の過程を経て生成している事実を2つの励起光を用いて確認した。結合ドット中のこれらの実験結果より2量子ビットの量子演算に必要な要素技術、①結合ドットの量子力学的な結合状態、②結合ドットにおけるラビ振動の確認、③結合ドット中に働く相互作用の確認（励起子分子）、④励起子分子のカスケードな過程を明らかにすることが出来た。最後に要素技術を組み合わせて半導体量子ドットでの2量子ビットゲート実証を行った。本研究では、2量子ビット制御NOTゲートと論理的に同じ動作である2量子ビット制御回転(ROT)ゲート動作の初期実験を行った。

第6章で本研究を総括する。

論文審査結果の要旨

この論文は、量子コンピュータの基本素子として、半導体量子ドットの励起子を用いた光制御型量子情報素子の物性と開発について論述している。近年、ナ

ノメータスケールの固体構造が技術的に作成可能となり、量子力学を用いたデバイス応用が視野に入ってきた。中でも代表的なものに量子コンピュータがある。量子コンピュータは、量子力学の特徴である状態の重ね合わせを用いた超並列性により、計算の種類によっては既存のスーパーコンピュータを遥かに凌ぐ能力があることが理論的に示されており、究極のコンピュータとして実用化が期待されている。しかし、量子計算を実現する各種の方法が考えられているが、未だ実用化には至っていない。小型、高集積化という観点から、半導体を使った方式が最も有力視されている。それは、既存の半導体の製造・物性のノウハウが活用でき、半導体量子ドットが量子力学的に優れた物性を持つ事が明らかになった為である。

こうした状況を背景に、本研究では、半導体を用いた量子コンピュータ実現へのいくつかの手法の中でも、拡張性と観測・制御の容易性に優れた量子ドットの励起子を用いた光制御型に着目し、量子コンピュータの基本素子である、1量子ビットの回転ゲートと2量子ビットの制御NOTゲートの実現を目的としている。特に、1量子ビットにおいて必要不可欠なラビ振動を観測し、2量子ビットにおいては結合量子ドットの中の励起子間での量子力学的相互作用のモデルを提案し、世界で初めて励起子分子の存在を観測するなど量子コンピュータ実現へ向けて大きく前進した。

本論文は6章で構成されている。

第1章「序論」では、半導体量子ドット、量子情報処理アルゴリズムに関する実験・理論や製作技術の歴史について解説し、本研究の背景と目的を述べている。

第2章では、量子コンピュータの動作に必要な状態の重ね合わせ、1量子ビット及び2量子ビットの動作原理、半導体量子ドットの状態密度、励起子等について解説している。

第3章では、量子ドットの作成方法及び観測装置について述べている。MBE装置を使った自己組織化InAs/GaAs半導体量子ドットの作成方法について述べ、2量子ビットとして2個の半導体量子ドットを上下に近接して配置し、2個のドット間の障壁厚みを精密に制御した結合量子ドットの作成について記述している。測定方法は、レーザ分光分析法の一つとして微小空間の観測に優れた顕微分光実験装置について述べ、2量子ドットでの観測に用いた2つのレーザ光源を用いた2波長Photo Luminescence (PL), Photo Luminescence Excitation (PLE) 実験方法について記述している。

第4章では、単一量子ドットの光物性、電子状態を詳細に調べ、量子ドット特有の3次元閉じ込めによる離散的な電子準位を持つ事を明らかにしている。量子演算の基本素子である1量子ビットの回転ゲートを、単一量子ドットのラビ振動を確認する事により量子演算が実現出来ることを示している。また、ラビ振動より算出される遷移双極子モーメントは40デバイであり、他の原子・分子系と比べて非常に大きな値を持つ事を示し、量子演算素子としてInAs/GaAs量子ドットが有望であることを明らかにしている。

第5章では、結合量子ドットの電子状態、励起子間の相互作用、量子ゲート実証について示している。結合量子ドットからの4つの発光ピークを詳しく調べ、これが量子力学的に結合した系であることを確認して

いる。それぞれの発光ピークは、反結合状態と結合状態に起因するピークである事を確かめ、結合量子ドットにおいてもラビ振動を確認している。遷移双極子ダイポールモーメントの値は72デバイであり、単一量子ドットより大きな値である事を示している。また、結合量子ドットの励起子間の相互作用について、結合ドット中に2個の励起子を作る事により励起子分子が存在する事を世界で初めて観測している。円偏光励起を用いてスピン選択励起を行い、反平行のスピンで励起した場合のみ、励起子分子が生成されている事を確認している。結合ドット中のこれらの実験結果より2量子ビットの量子演算に必要な要素技術、①結合ドットの量子力学的な結合状態、②結合ドットにおけるラビ振動の確認、③結合ドット中に働く相互作用の確認(励起子分子)、④励起子分子のカスケードな過程を

明らかにしている。最後に要素技術を組み合わせる半導体量子ドットでの2量子ビットゲートを実証するため、2量子ビット制御NOTゲートと論理的に同じ動作である2量子ビット制御回転(ROT)ゲート動作の初期実験を行っている。

第6章では、本研究で得られた研究成果を総括し、今後の課題について言及している。

以上のように、本論文は量子コンピュータの基本素子として、半導体量子ドットの励起子を用いた光制御型量子情報素子の特性を明らかにし、量子演算素子の基本動作を確認する等、学術上、工学上寄与するところ大なるものがある。よって、本論文提出者五島敬史氏は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと判定した。

(受理 平成20年3月19日)