

平成 22 年 6 月 21 日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）

研究期間：2008 ～ 2009

課題番号：20810042

研究課題名（和文）光によるスピン量子制御実現に向けた  
半導体量子構造での光応答の理論解析研究課題名（英文）Theoretical analysis of optical responses of semiconductor  
quantum structures for realization of coherent optical spin manipulations

研究代表者

力武 克彰（RIKITAKE YOSHIAKI）

仙台高等専門学校・情報システム工学科・助教

研究者番号：50515145

研究成果の概要（和文）：半導体量子構造中の電子スピンは量子情報処理デバイス、特に光と固体素子とを結合して実現される量子リピータを実装できる系として有望な系の一つである。本研究課題では、そのような半導体量子構造中の電子スピンの特異な光学応答の解析、およびその光学応答を用いた有用な量子情報処理技術の理論的提案と解析を行った。GaAs 量子ドット中の電子スピンの量子的状態を光学的測定法によって完全に同定する量子スピントモグラフィを提案し実験的な実証を得た。また、長距離間での量子情報通信実現に向け、光子から電子スピンへの新たな量子状態転写の手法を提案した。

研究成果の概要（英文）：The electron spin in a semiconductor is one of the promising candidates for a quantum bit to be used in a quantum information devices and its optical responses are useful for realizing quantum repeaters. We theoretically analyzed the optical responses of the electron spin in the semiconductor quantum structures. We proposed a quantum spin tomography which can completely identify the quantum nature of the electron spin. We also proposed a new scheme for photon-spin quantum state transfer based on the time-bin photon encoding which is suitable for a long distance quantum communication.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,310,000	393,000	1,703,000
2009 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,510,000	753,000	3,263,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・ナノ構造科学

キーワード：量子情報、量子リピータ、電子スピン、光学応答、量子状態転写

## 1. 研究開始当初の背景

半導体量子ドット中の電子スピンはマイ

クロ秒オーダーのコヒーレンス時間を持つことから、固体素子での量子情報デバイスを実現できる系として有望視されている。その

スピン状態を量子的に制御する方法として、非共鳴な光パルス照射によるスピン状態間のラマン遷移を用いる手法が提案されており、実証実験も行われている。光応答を利用した量子ゲート操作は、非常に高速な量子操作(ピコ秒~ナノ秒オーダー)が可能であり、周波数、パルス形状、偏光状態などを変えることで任意のゲート操作を行うことができるという利点を持っている。

また半導体量子構造は、スピン状態が光の偏光状態とよく結合するため、量子情報通信に必須となる量子リピータの光-固体素子インタフェースデバイスを実現する系としても注目されている。本研究代表者は実験グループとの共同研究において、光の偏光状態から半導体量子構造中の電子のスピン状態への量子的な状態転写を世界で初めて実証した。このような光による半導体量子構造中のスピン状態の量子的な生成・制御は、量子情報処理システム実現に不可欠な要素技術となる。

量子情報処理システムを構築するためには、光によるスピン状態の生成・制御を高い忠実度で行わなければならない。そのためには半導体量子構造の電子状態および光応答に関する詳細な知見を得る必要がある。また、量子インタフェースデバイスの動作を確認するため、メモリ用の量子ビットとなる電子スピンの量子状態を正確に測定する手法の開発も望まれる。さらに、光子による長距離間での量子情報通信では、外部からの擾乱に強い特殊な符号化を用いる必要があるが、そのような符号化に対応した光子-電子スピン間量子状態転写が必要となる。

## 2. 研究の目的

本研究では、半導体量子ドットでの電子状態及び光学応答の解析をおこなう。特に量子ドット中のスピンを量子ビットとして用いる状況を考え、光によるスピン状態の量子的な生成・制御に必要な光学遷移を解析することを目的とする。また、半導体量子構造での光応答を用いた新しい量子情報処理デバイスの提案もあわせておこなう。

## 3. 研究の方法

### (1)半導体量子構造での電子状態解析

本研究では、半導体量子構造における電子状態および光学応答を解析するため、デバイスの任意の形状、組成、印加外場に対して電子状態を求めることのできるシミュレータの開発を目指す。半導体のバンド構造を求めるための  $k, p$  摂動法を量子構造へと適応したエンベロープ関数近似法を基礎理論として用い、数値的解析には有限要素

法を用いることを検討した。

### (2)半導体量子構造でのスピンの光学応答を用いた新しい量子情報処理技術の提案

半導体量子構造での特異な光学応答を利用し、量子情報システムの実現に必要なとなる、新技術の提案を行なう。特に スピン状態トモグラフィの提案と、 タイムピン符号化光子から電子スピンへの量子状態転写の提案を行なう。 は、スピンを用いた量子情報デバイスの評価に必要な不可欠な技術である。本研究では、光の偏光状態から半導体量子構造の電子スピンへの量子状態転写で用いられる光学応答を利用する事で、半導体電子スピンの量子的な状態を同定する手法を提案した。 は、光ファイバを用いた長距離間での量子情報通信に適応できる技術となる。光ファイバによる長距離間伝送では安定的に偏光状態を保つことが非常に困難であるため、実際の量子情報通信においてはタイムピン符号化と呼ばれる、光子の波束形状に量子情報を載せて伝送する手法がとられている。そこで本研究では新たに、タイムピン符号化された光子から直接電子スピンへと量子状態転写を行うための手法について理論的提案を行った。

## 4. 研究成果

### (1)半導体量子構造での電子状態解析

本研究では、磁場が印加された半導体量子井戸構造での電子状態を、エンベロープ関数近似法を基礎理論として用い、その数値的有限要素法で求めるシミュレータを目指した。しかしながら三次元モデルでの有限要素法による実装にあたっては、ハミルトニアン行列の計算、特に任意方向の磁場を取り入れるためのベクトルポテンシャルの計算とその微分計算、および適切な境界条件の取り入れが非常に煩雑であることが分かってきた。現時点において、任意形状の GaAs 量子ドットにおいて、任意方向の磁場をかけた場合での軽い正孔と重い正孔の間の混成効果を取り入れた4バンドモデルにおいて、正孔準位を解析できるシミュレータのプロトタイプが作成できている状態に留まった。

なお、スピンの光学応答を解析するためには、少なくとも伝導帯とスプリットオフ軌道も含めた8バンドモデルへの拡張、またヘテロ構造への拡張も必要となってくる。これら多バンドモデルへ拡張したシミュレータ実装については今回、工数的に対応困難であると判断し、これ以上の開発は保留とした。残念ながら半導体ナノ構造での一電子状態解析シミュレータ開発に関しては十分な研究成果を得ることができなかった。そのため研究の重点課題を半導体量子構造での特異な

光学応答を用い量子デバイスの開発へと移すこととした。

(2)半導体量子構造でのスピンの光学応答を用いた新しい量子情報処理技術の提案  
スピン状態トモグラフィの提案

半導体量子構造の電子のスピン状態を測定する手法としては、カー回転測定など、量子構造中でのスピン状態に依存した光学応答を用いた、プローブ光の偏光状態の変化をとらえる方法がよく用いられてきた。しかし、従来行われているカー回転測定では重い正孔状態からの遷移による光学応答を用いるため、量子井戸に対し面直のz軸方向へのスピンの射影成分だけが得られ、スピンの量子性をはかるために必要なx軸およびy軸方向への射影成分を得ることができなかった。

研究代表者は実験グループとの共同研究により、磁場で分裂した軽い正孔状態を用いることで、光の偏光状態から半導体量子構造中の電子のスピン状態への量子状態転写が可能であることを示してきた。今回、転写で用いる選択則をプローブとして利用すること任意の向きのスピンを測定できる可能性があると考えた。そこで、転写で用いられている軽い正孔準位からの遷移による光学応答の理論解析を行った。その結果、量子ドットの電気感受率テンソルが、量子ドットにあらかじめ生成している電子スピンのx,y,z軸方向成分すべてに依存することを明らかにした。得られた電気感受率テンソルを用いてプローブ光のカー回転の解析を行ったところ、回転角はスピンのz軸射影成分、楕円率はy軸射影成分に比例することがわかった。入射するプローブ光の偏光および、試料を透過したプローブ光の偏光の測定基底を様々に変えてやることによって、スピンx,y,z軸射影成分のすべてを決定できるトモグラフィ測定が可能であることを理論的に示した。またこのトモグラフィの結果は実験グループとの共同研究により実験的な実証も行なわれた(図1)。

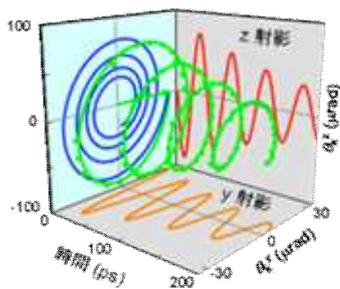


図 1. スピン状態トモグラフィを用いて測定した、x軸の回りを歳差運動する電子スピン状態の時間変化

タイムピン符号化光子から電子スピンへの量子状態転写の提案

タイムピン符号化では、光子は遅延時間  $\tau_d$  の2パルスからなる波束形状を持ち、2つのパルスの相対強度と相対位相に量子情報( )が載せられる。タイムピン符号化された光子から電子スピンへの量子状態転写(タイムピン量子状態転写)の概念図を図2に示す。転写を行う系は半導体量子ドット(GaAs)を想定し、重い正孔準位  $|3/2\rangle_{hh}$  からスピン状態  $| \uparrow \rangle$  にある電子を励起する光学遷移を利用する。量子ドットには磁場が印加されており、光子により生成された電子スピンは光子により量子ドットに励起された電子スピンは印加磁場の方向を回転軸とした歳差運動をする。タイムピンの遅延時間と電子スピンのラーモア歳差運動の半周期とを合わせることで、光子の持つ量子状態( )に対応した量子状態をもった電子スピンを量子ドットに励起することが可能となることを示した。

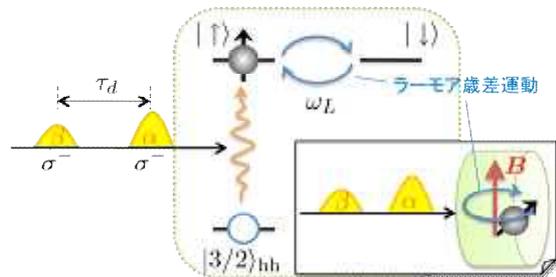


図 2. タイムピン量子状態転写。量子ドットには磁場が印加され、光子により励起された電子スピンは歳差運動をする。

また、量子コヒーレンスを保った高品質な転写を行なうためのデバイス条件を明らかにするため、光子入射から電子スピン生成までの一連の量子ダイナミクスを求め、転写後における電子スピン状態より転写忠実度の解析を行った。図3に転写忠実度のデバイスパラメータ依存性を示す。デバイスパラメータとしては、光子-励起子結合強度 および、量子ドットに電子スピンと同時に励起される正孔を引き抜く速度  $\nu$  をとり、それぞれタイムピン遅延時間  $\tau_d$  の逆数で正規化してある。入射光子が同じ強度、同位相をもつ2つのパルスからなる場合(  $\theta = \pi/2$  )の結果を示した。転写忠実度は、原点付近では1に近く、  $\nu$  が  $1/\tau_d$  よりも大きな領域では急激に小さくなるという、強いデバイスパラメータ依存性を持つ事がわかった。このことは転写を行うシステム及び環境が2つのパルスを識別できない状況において初めて量子的なコヒーレンスを保った転写が可能

であることを示唆している。この知見は偏光状態やタイムビン符号化に限らず、一般の量子状態転写に関して言えるものである。

なお、今回提案を行ったタイムビン量子状態転写の手法は、離散準位と単純な光学遷移だけを仮定しており、今回検討した GaAs 量子ドット系以外の一般的な電子系に適用可能なものあり、固体素子量子リピータ実現を実現する物理系を広げるものとなる。

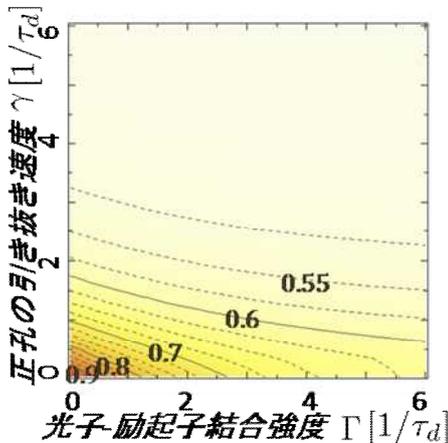


図 3. 転写忠実度のデバイスパラメータ依存性。縦軸は正孔の引き抜きレート、横軸は光子-励起子間結合強度を表わす。 $\gamma = 1/2$ とした。

#### 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4件)

Takahiro Inagaki, Hideo Kosaka, Yoshiaki Rikitake, Hiroshi Imamura, Yasuyoshi Mitsumori, Keiichi Edamatsu, "Measurement of Electron Spin States in a Semiconductor Quantum Well Using Tomographic Kerr Rotation", Jpn. J. Appl. Phys. 49, 04DJ09 (2010), 査読有。

T. Inagaki, H. Kosaka, Y. Rikitake, H. Imamura, Y. Mitsumori, K. Edamatsu, "Optical measurement of electron spin coherence in a semiconductor quantum well", Physica E 42 922-925 (2010), 査読有。

Hideo Kosaka, Takahiro Inagaki, Yoshiaki Rikitake, Hiroshi Imamura, Yasuyoshi Mitsumori and Keiichi Edamatsu, "Spin coherence tomography of optically imprinted electrons in a semiconductor", Nature, 457, 702 (2009), 査読有。

H. Kosaka, H. Shigyou, Y. Mitsumori, Y. Rikitake, H. Imamura, T. Kutsuwa, K. Edamatsu, "Coherent spin state transfer from light to electrons in a semiconductor", Proc. of International Conference on Quantum

Communication, Measurement and Computing (QCMC2008), pp. 245-248 (2009), 査読有。

〔学会発表〕(計6件)

力武克彰、今村裕志、小坂英男、「タイムビン光子から電子スピンへの量子状態転写についての理論的解析」(ポスター)、第57回応用物理学関係連合講演会(湘南キャンパス)、2010年3月20日。

力武克彰、今村裕志、小坂英男、「タイムビン量子状態転写の半導体量子構造による実現手法の考察」(ポスター)、日本物理学会2009年秋季大会(熊本大学黒髪キャンパス)、2009年9月25-28日。

力武克彰、「スピン量子制御に向けた半導体ナノ構造光応答シミュレータの開発」、財団法人新世代研究所研究助成報告会(明治大学紫紺館) 2009年12月4日

Y. Rikitake, H. Imamura and H. Kosaka, "Optical spin coherence tomography of an electron in a semiconductor quantum dot" (Poster), International Symposium on Nanoscale Transport and Technology 2009 (ISNTT2009), Atsugi, Japan, Jan. 20-23, 2009.

Yoshiaki Rikitake, Hiroshi Imamura, and Hideo Kosaka, "Quantum state transfer from a time-bin photon qubit to an electron spin qubit" (Poster), International Symposium on Physics of Quantum Technology (ISPQT2008), TU-G1, Nara, Japan, Nov. 25-28, 2008.

力武克彰、今村裕志、小坂英男、「タイムビン光子量子ビットからスピン量子ビットへの量子状態転写」、日本物理学会2009年春季大会、30aSK-10、立教大学、2009年3月27-30日

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: 量子非破壊光子検出装置及びサブプロアソニアン光子数分布光生成装置

発明者: 小島邦裕, 今村裕志, 力武克彰  
権利者: 独立行政法人科学技術振興機構, 独立行政法人産業技術総合研究所

種類: 特許

番号: 特願2008-296160(P2008-296160)

出願年月日: 平成20年11月19日

国内外の別: 国内

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等 なし

6 . 研究組織

(1)研究代表者

力武 克彰 (RIKITAKE YOSHIAKI )  
仙台高等専門学校・情報システム工学科・  
助教  
研究者番号 : 50515145

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者 なし