

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760040

研究課題名(和文) スピン間相互作用を利用した光制御によるスピン回転

研究課題名(英文) Optical control of spin state through spin-spin interaction

研究代表者

伊藤 哲 (Ito, Tetsu)

静岡大学・電子工学研究所・准教授

研究者番号：70425099

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)： スピンを量子メモリーや量子ビットとして利用し量子演算を行うには、自由にスピンを回転させ、量子状態を制御する必要がある。本研究では空間分解能が高く、高速制御可能な光パルスのみで(外部磁場なし)のスピン回転の実現を目的とし、光制御によるスピン生成と量子構造の関係解明を行った。

半導体量子構造に直線光励起により円偏光励起とは異なる方向にスピンの励起でき、直線偏光で形成されるスピンは強い励起エネルギー依存性がある事を示した。光制御によるスピン回転を実現するための重要な知見を得る事ができた。

研究成果の概要(英文)： For applying the spin states to quantum memory or quantum bit, controlling spin states are important technology. In this study, we studied creation of spin states and dependence of quantum confinement effect for achieving spin control by optical means under no external magnetic field.

We demonstrated that the spin state can be created in direction different from excitation direction by linearly polarized light in semiconductor quantum confinement structures. The degree of spin polarization showed strong excitation energy dependence. These results are important knowledge for spin control by optical means.

研究分野：量子エレクトロニクス

科研費の分科・細目：応用物理・工学基礎 応用工学・量子光学

キーワード：スピン 量子井戸 有効磁場 交換相互作用

1. 研究開始当初の背景

光学的手法を用いて半導体およびその量子構造体における電子状態を制御・観測する研究は古くから行われており、特に近年では、電子の最後の未開拓な自由度であるスピンを積極的に工学分野へ応用しようとする試みが国内外で活発化している。半導体中の電子スピンは量子情報分野における量子ビットの担体として、(1) アップ&ダウンスピン状態を単純な2準位系に対応させられる(2) スピン保持時間が光双極子の寿命と比べて長い、(3) スピン状態を制御し観測する光学的手法が確立している、といった利点を持つ。これらの理由から電子スピンは量子ビットとして非常に有望ではあるが、量子ビットとして利用し演算を行うには、自由にスピンを回転させる必要がある。これまでのスピンに関する研究においては外部磁場によってスピンを操作する事が必要不可欠であったが、外部磁場は局所的あるいは高速に制御することが難しい。量子演算素子への応用を考えた場合、マイクロメートルオーダーで集積された量子素子をサブナノ秒オーダーの高速でそれぞれ独立に制御する必要があるため、外部磁場制御に変わる方法が求められるが、外部磁場を用いないでスピンを操作する方法は未だに確立されていない。

2. 研究の目的

本研究は、空間分解能が高く高速制御可能な光パルスによるスピンの回転を提案し、実証を試みるものである。スピンの相互作用による有効磁場が他のスピンに与える影響を明らかにし、外部磁場無しでの光パルスによるスピンの回転を目指す。光パルス制御によって従来の外部磁場によるスピンの操作では達成出来なかったサブマイクロメートルオーダーの空間制御とサブナノ秒オーダーの高速応答を実現させ、半導体中のスピンを量子ビットとして用いる量子情報素子への応用を目指す。光スピン操作という新領域を切り開く。また、この相互作用を得るために適した光学的励起条件を半導体のバンド構造計算により明らかにし、新しい手法によるスピンの測定技術の創出を目指す学術的な意義を持つ研究でもある。

3. 研究の方法

本研究で最も重要な点は(1)異なる方向に2つのスピンを励起することと、(2)それらを区別して観測することである。このために直線偏光を照射し、スピンの重ね合わせ状態を形成することで今まではあまり注目されていない方向のスピンを形成する。直線偏光は円偏光の重ね合わせであり、このような状態の光により励起された電子・正孔もスピンの重ね合わせ状態となる。スピンの重ね合わせ状態はそれらとは垂直な方向へのスピンの偏極を意味するため、上記(1)に必要なスピンの励起が可能となる。(2)の条

件を満たすように、エネルギーが異なる円偏光と直線偏光を用いて系を励起すれば、エネルギー分離することによりスピンの回転を観測することが可能となる。またこれらに平行して、半導体のバンド構造解析を行い、光の偏光状態と電子・正孔の遷移メカニズムを解明することによって、効率的にスピンの回転を起こすための光励起条件を解明する。

4. 研究成果

スピンの量子重ね合わせ状態を形成する事により、励起方向と異なる方向へスピンを形成する事を目指し、その基本的なメカニズム解明のため、直線偏光と円偏光励起による偏光時間分解 PL 測定を行った。実験には井戸幅 5, 8, 12 nm の GaAs/AlGaAs 多重量子井戸(MQW)を測定に用いた。直線偏光および、円偏光レーザーパルス(時間幅 2 ps)を MQW 試料に照射しスピンの偏極を形成し、ストリークカメラを用いて、スピンの偏極度の時間発展を測定した。発光と励起エネルギーの差 ΔE を変化させ、系統的に評価し、 $\Delta E = 0$ 共鳴条件での測定も可能とした。図1は井戸幅 8 nm の MQW を直線偏光励起した場合の 18 K における測定結果である。 $\Delta E = 15$ meV で励起した場合(a)は直交する2つの直線偏光 PL 成分に差が見られなかったが、 $\Delta E = 2.6$ meV の場合(b)は違いが見られ、(c)に示したような偏極度の時間変化を得た。

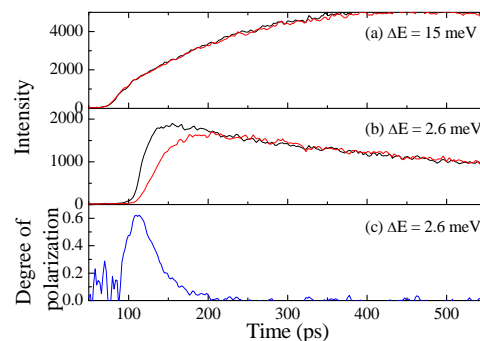


図1. PL 強度と偏極度の時間発展

図2に発光エネルギー近傍を励起した場合の、直線および円偏極度の時間変化測定から求めた緩和時間の井戸幅依存性を示す。直線偏光励起の場合()は一成分の指数関数でフィッティングされ、井戸幅によらず 30 ps 程度であった。一方で円偏光励起の場合()は二成分でフィッティングされ、短い成分は直線偏光における緩和時間よりも長く、井戸幅の増加とともに減少した。発光エネルギー近傍を異なる偏光で励起することで、係数と位相が異なる重ね合わせ状態を生成することができ、それらの時間変化をそれぞれ個別に観測できたと考えられる。

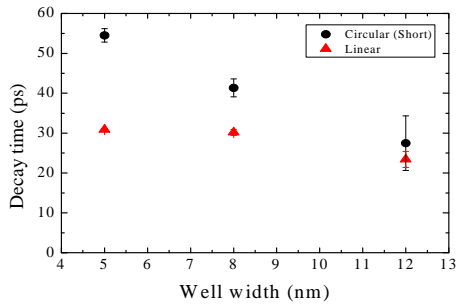


図 2. 緩和時間の井戸幅依存性

図 3 に井戸幅 8 nm の MQW を直線偏光励起した場合の 18 K における偏光度の時間変化を示す。励起エネルギーに対して緩和時間は 30 ps 程度でほぼ一定であったが、励起が発光エネルギー (1.565 eV) から高エネルギー側に離れるにしたがって偏光度の初期値 (ピーク値) は徐々に減少し、ゼロに近づくことが観測された。

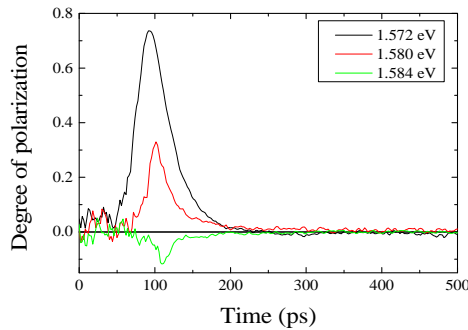


図 3. スピン偏極度の時間発展

図 4 に偏光度の初期値の励起エネルギー依存性を示す。直線偏光励起 (●), 円偏光励起の場合 (○) とともに、励起エネルギーの増加とともに偏光度の初期値が減少した。また、円偏光で軽い正孔 (LH) 状態を励起すると偏光の反転が起こることがスピン選択則から期待される。円偏光励起では大きな偏光反転が観測され、直線偏光励起では偏光度がゼロに近い値を示した。正孔の重ね合わせ状態の解消・緩和には LH 状態が寄与していることを示唆する結果を得た。

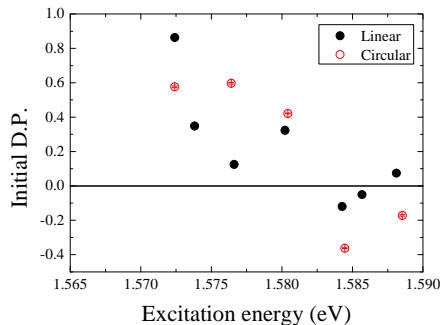


図 4. 初期偏光度の励起エネルギー依存性

これらの光学測定に加えて、対応する量子

井戸構造における、重い正孔 (HH) 状態と LH 状態のバンド構造 (分散関係) を $k \cdot p$ 摂動理論により、計算を行った。点で HH 状態である状態はエネルギーが増加するに従って LH 状態が混ざり込む事が計算から得られたプロッホ関数の解析から明らかになった。測定で LH 状態に励起エネルギーが近づくと初期偏光度が減少するのはこの LH 状態の混ざり込みや、点で LH の状態を直接励起していることが原因であると考えられる。今後は井戸幅を系統的に変化させた計算を実験結果と比較することにより、励起状態の解明を行う。

以上より、スピンを励起方向と異なる方向へ形成するためには、正孔スピン重ね合わせ状態を形成する事が重要であることがわかった。正孔スピン重ね合わせ状態を形成するためには励起から発光に至る間にフォノン散乱が少ない共鳴励起に近い条件で励起を行う必要があることがわかった。また、同じ共鳴励起の条件であっても、井戸幅が減少し、HH 状態と LH 状態のエネルギー差が広がることにより、重ね合わせ状態が形成されやすくなることが分かった。このようなスピン重ね合わせ状態の形成には、価電子帯におけるバンド混合効果が寄与していると考えられる。励起エネルギーを発光エネルギーから増加させると、徐々にスピン偏極度は減少した。この時、円偏光では LH 準位の励起により負の偏光度が観測されたが、直線偏光ではゼロに近づくだけであった。円偏光励起と直線偏光励起ではバンド構造の励起の仕方が異なり、それが偏光度のエネルギー依存性に現れていると考えられる。

スピン回転を達成するのに必要な励起と異なる方向へスピン偏極を形成するには直線偏光を用いてほぼ共鳴励起の状態では、量子閉じ込めが強く、バンド混合効果が小さな狭い量子井戸を用いる事が有効であることが分かった。今後はこれらの得られた知見を用い、スピン間の相互作用を利用したスピン回転の実証を目指す。

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)

Tetsu Ito, Hideki Gotoh, Masao Ichida, Hiroaki And, Evaluation of hole-spin superposition in GaAs/AlGaAs quantum wells through time-resolved photoluminescence measurements, Applied Physics Letters **104**, to be published (2014)

[学会発表](計 4 件)

Tetsu Ito, Hideki Gotoh, Masao Ichida, Hiroaki Ando, Creation and Relaxation of Hole-Spin Superposition in

GaAs/AlGaAs Quantum Well, The 15th Takayanagi Kenjiro Memorial Symposium, November 2013

Tetsu Ito, Hideki Gotoh, Masao Ichida, Hiroaki And, Dynamics of Hole-Spin Superposition in GaAs/AlGaAs Quantum Wells, 2013 International Conference on Solid State Devices and Materials, Fukuoka, Japan, September 2013

伊藤哲, 後藤秀樹, 市田正夫, 安藤弘明, GaAs 量子井戸における正孔スピン重ねあわせ状態の励起エネルギー依存性, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 同志社大学京田辺キャンパス, 2013 年 9 月

伊藤哲, 後藤秀樹, 市田正夫, 安藤弘明, GaAs 量子井戸における正孔スピン重ね合せ状態のダイナミクス評価, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川工科大学, 2013 年 3 月

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 哲 (ITO, Tetsu)

静岡大学・電子工学研究所・准教授

研究者番号: 70425099