

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26790057

研究課題名(和文)正孔スピン重ね合わせ状態を利用した電子スピン操作

研究課題名(英文)Electron spin operation through hole spin superposition

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) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：異なる井戸幅を持つGaAs/AlGaAs多重量子井戸において偏光・時間分解PL測定及びポンプロープ測定を極低温で行った。直線偏光でスピン偏極を励起・観測方向に垂直な方向に形成した。スピン偏極度の振動がファラデー配置の1Tの磁場で観測された。この振動はスピン重ね合わせ状態の歳差運動に起因すると考えられ、直線偏光のPL成分の物理的起源が直線偏光によって形成されたスピン偏極であることが分かった。井戸幅の増加により、この偏極の緩和時間は減少した。価電子帯のバンド混合効果がスピン緩和時間に影響していると考えられる。これらの測定結果から直線偏光により正孔スピンの重ね合わせが形成できることが解明された。

研究成果の概要(英文)：We have performed polarization- and time-resolved photoluminescence (PL) measurements under magnetic field and pump and probe measurements for GaAs/AlGaAs multiple quantum wells (MQWs) with different well width at liquid helium temperature. Spin polarization was created by linearly polarized photon perpendicular to the direction of excitation and observation. Oscillation of degree of polarization was observed with a magnetic field of 1 T in Faraday configuration. The oscillation is originated from the precession of spin superposition state. This indicates that physical origin of the linearly polarized PL components is spin polarization created by linearly polarized excitation photon. Relaxation time decreased with increasing well width. Band mixing in the valence band induced the well dependent spin relaxation time. Our results clearly reveal that the superposition states of holes are created by linearly polarized lights.

研究分野：量子エレクトロニクス

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、半導体中の原子核スピンとの相互作用により状態の保持が困難であり、量子ビットとして演算を行うには、自由にスピンを操作する必要がある。一方で、正孔はブロッホ関数の対称性により原子核スピンによる相互作用を受けないが、価電子帯におけるバンド混合効果によりスピン重ねあわせ状態の生成と観測は困難である。また、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操作する方法は未だに確立されていない。

国内外とも半導体中のスピンに関する研究は、電子スピンを主な対象として行われている。この電子スピンに関する研究は、外部磁場を印加することによってスピンを回転(スピン歳差運動)させ、その振動周期に当たるラーモア周波数に着目した測定・解析が中心である。また、半導体量子構造中で、偏極したスピン間に働く相互作用に関する研究も行われてきている。例えば電子スピンと原子核スピンとの間に生じる超微細相互作用を利用した全光NMRの研究[G. Salis et. al. Phys. Rev. Lett. 86, 2677 (2001)]や光スピントルク効果を利用したスピン回転の研究[J. A. Gupta, et al. Science 292, 2458 (2001)]が挙げられる。申請者も、結合量子井戸を用いて2つの電子スピン系の間で働く相互作用に関する実験的研究を行ってきた[T. Ito, et. al. J. Appl. Phys. 110, 033109 (2011)]。半導体量子構造内の電子スピンの挙動やスピン間に働く相互作用を解き明かすためには外部磁場の印加が必要不可欠であり、いずれも試料全体に数秒から数分間をかけて定常的な高磁場を印加し、顕微分光法により量子構造からの光信号を空間分離して測定している。

2. 研究の目的

本研究では、上記研究では注目されてこなかった正孔スピンの量子重ねあわせ状態の形成と緩和過程の解明を行い、正孔スピンの量子ビット応用を目指す。同時に、光パルスによる電子スピン重ね合わせ状態の制御と

操作の実証も行う。電子スピン重ねあわせ状態の形成には正孔スピン重ねあわせ状態が大きく寄与していると考えられるが、これまでの研究では正孔スピンの影響については議論されてこなかった。正孔スピンの生成と緩和過程の基礎的知見を得るとともに、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操作を提案し、実証を試みる。光パルス制御によって、従来の外部磁場によるスピン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し、光スピン操作という新領域を切り開く。また、スピン重ねあわせ状態の形成実現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測定技術の創出を目指す。

3. 研究の方法

スピン状態操作の実証で最も重要な点は(1)異なる方向に2つのスピン系を励起し、(2)それらを区別して観測することである。また、これらを実現するために(3)正孔スピンと電子スピンの重ねあわせ状態の実現が重要である。

図1にこれらの課題を解決する概念図を示す。直線偏光は円偏光の重ね合わせであるので、上向きスピンと下向きスピンの重ね合わせを生成できる。これは図1のスピン2で示したように、円偏光で形成したスピン1とは垂直方向のスピンが形成されたことになり、上記(1)の条件を達成できる。ただし、重ねあわせ状態は壊れやすいので、(3)の条件

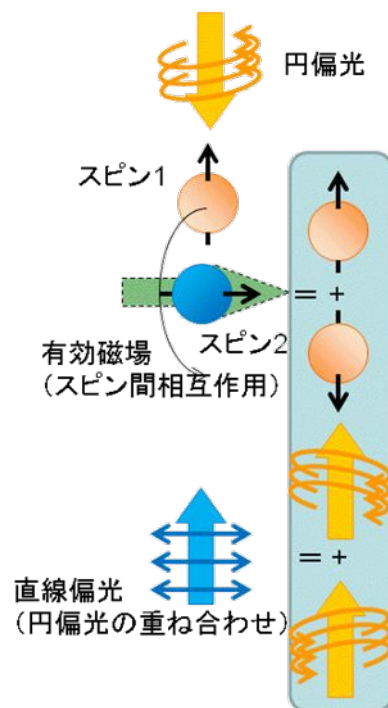


図1: 直線偏光(円偏光の重ね合わせ)でスピン1と垂直方向にスピン2を生成  
スピン2が作る有効磁場でスピン1を回転

を満たすためには共鳴励起に近い条件での励起を行う必要がある。井戸幅の異なる2重量子井戸にスピン1と2を別々に形成し、スピン1をエネルギー的に分離して測定すれば、(2)の条件を達成できると考えた。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、効率的にスピン回転を起こすための光励起条件を解明する。

#### 4. 研究成果

まず第1に、直線偏光励起による偏光時間分解 PL 測定を行い、スピン重ねあわせ状態の励起エネルギー及び励起パワー密度による変化を議論した。井戸幅 4, 8, 12 nm の GaAs/AlGaAs 多重量子井戸(MQW)を測定に用いた。直線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偏極を形成し、ストリークカメラを用いて、偏光度(D.P. =  $(I_+ - I_-) / (I_+ + I_-)$ )の時間発展を、励起エネルギーを変化させ系統的に評価した。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測定したところ、励起エネルギーに対して緩和時間は 30 ps 程度であったが、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。励起パワー密度を増加させたところ、緩和時間は減少した。これは励起キャリア密度が増加することにより、電子・正孔間に働く交換相互作用が増加しスピン緩和を促進させたと考えられる。また、井戸幅の増加に対してスピン緩和時間が減少することが分かった。これは円偏光励起の場合と逆の傾向である。井戸幅の増加により LH と HH 準位のエネルギー分裂量が減少し、バンド混合が増加したことにより、スピン緩和が促進されたものと考えられる。これらの結果はスピン重ねあわせ状態の解消・緩和には LH 状態が寄与していることを示唆している。図2にファラデー配置で磁場を印加した場合のスピン偏極度の時間変化を示す。ファラデー配置の磁場を印加することにより、直線偏光度が時間的に変動(歳差運動)したことから、直線偏光の起源がスピンであることを確認した。

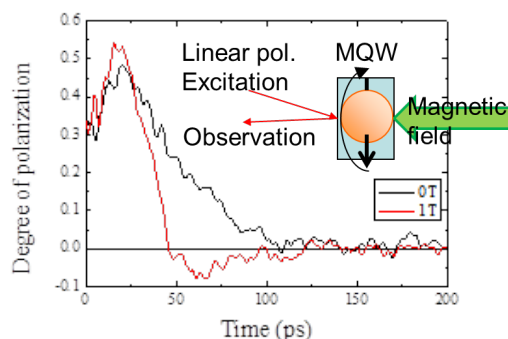


図2 スピン偏極度の時間変化

第2に、PL 測定よりも高精度な時間分解評価を行うために、ポンププローブ法測定系の構築を行い、円偏光、直線偏光におけるスピン偏極とその緩和時間の測定を行った。PL 測定と同様に、円偏光励起(ポンプ)と直線偏光励起で異なる緩和時間が観測された。PL 測定と対応した MQW 試料を用いて、直線偏光励起のスピン緩和時間の比較・評価を行った。図3に緩和時間の井戸幅依存性を示す。励起パワー密度の増加により緩和時間が減少する点、量子閉じ込め効果の増加(井戸幅の減少)により緩和時間が増加する点において、PL 測定と同様の傾向が観測された。また、観測された緩和時間は PL 測定で観測されたものと同程度であった。これらにより、ポンププローブ測定によってもスピン重ねあわせの緩和時間の評価が可能であることが分かった。

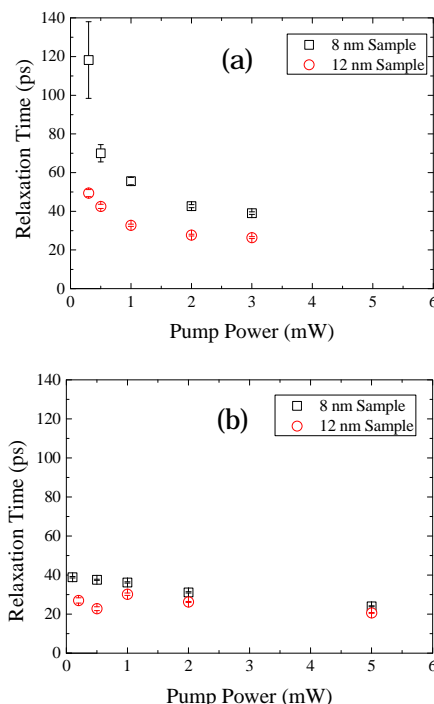


図3 (a)ポンププローブ測定と(b)PL 測定における緩和時間の井戸幅及び励起パワー依存性

本研究で観測されたスピン重ねあわせは正孔スピンが寄与するものであり、これまで着目されてこなかった正孔スピン重ねあわせ状態の形成及び緩和を実験、理論の両面から解明することで、将来的なスピンの量子ビット応用をめざす上での重要な知見が得られた。特に、正孔スピンはブロッホ関数の対称性により半導体内の原子核スピンによる相互作用が無い場合、正孔スピン状態の制御が確立されれば、原子核スピンの影響を受けず、比較的長い時間スピン状態を保持できるため、量子メモリの実現が可能となる。また、電子スピンの重ねあわせ状態を直線偏光

(円偏光の重ね合わせ)で制御し、光パルスにより円偏光励起の場合とは異なる方向に偏極させられることを示唆した。これにより形成された電子スピン間に働く相互作用起源の有効磁場を利用して、外部磁場無しでの電子スピン操作の可能性が示され、学術的な領域拡大も期待できる。

また、半導体量子構造中でのバンド構造を  $k \cdot p$  摂動法により解析してきており、この知見を利用すればスピン重ねあわせ状態の形成・操作に適したバンド構造と光の偏光状態の関係が解明できる。これにより、利用できるスピン方向の自由度が向上し、光の偏光状態を電子スピン状態に転写する量子メディア変換技術等への波及効果も期待できる。また近年、スピン効果は MRAM への応用で注目を集めており、本成果はこのような新しい素子の動作原理としての発展も期待できる。

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, and Hiroaki Ando, Evaluation of hole-spin superposition in GaAs/AlGaAs quantum wells through time-resolved photoluminescence measurements, Applied Physics Letters **104**, 252406 (2014)査読あり

[学会発表](計 6 件)

Tetsu Ito, Hideki Gotoh, Masao Ichida, and Hiroaki Ando, Observation of hole-spin superposition in GaAs quantum well by time-resolved photoluminescence measurements, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (ISNTT2015), November 18th 2015, Kanagawa, Japan

Soichiro Fuma, Tetsu Ito, Hideki Goto, Masao Ichida, and Hiroaki Ando, Evaluation of Spin Relaxation Time by Polarization- and Time-Resolved Pump and Probe Measurements, 3rd International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering, September 24th 2015, Chisinau, Moldova

Tetsu Ito, Hideki Gotoh, Masao Ichida, and Hiroaki Ando, Observation of Hole-Spin Superposition in GaAs Quantum Well under Magnetic Field, 17th International Conference on Modulated Semiconductor Structures, July 30th 2015, Sendai, Japan

伊藤 哲, 後藤 秀樹, 夫馬 宗一郎,

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わせ状態の直線偏光分解ポンプロープ測定法による評価, 2015 年 第 62 回応用物理学会春季学術講演会 (2015 年 3 月 12 日) 東海大学湘南キャンパス, 神奈川県平塚市

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わせ状態に対するバンド混合効果, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会 (2014 年 9 月 19 日), 北海道大学 札幌キャンパス, 北海道札幌市

Tetsu Ito, Hideki Gotoh, Masao Ichida, and Hiroaki Ando, Effects of Band Mixing on Hole-Spin Superposition in GaAs/AlGaAs Quantum Wells, 2014 International Conference on Solid State Devices and Materials, September 10th 2014, Tsukuba, Japan

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