SURE 静岡大学学術リポジトリ
Shizuoka University REpository

z偏光による電子スピン操作

メタデータ	言語: ja 出版者: 静岡大学 公開日: 2020-04-13 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 伊藤, 哲 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10297/00027327

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　　元 年　　６ 月 １９ 日現在

機関番号：１３８０１
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2016～2018
課題番号：１６Ｋ０４９７７

研究課題名（和文）z偏光による電子スピン操作

研究課題名（英文）Electron spin control by z-polarization

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）　　3,800,000円

研究成果の概要（和文）：偏光時間分解ポンププローブ測定法により，結合量子井戸（CQW）中の正孔のスピン緩和を考察した．測定結果から二段階のスピン緩和が確認できた．CQW幅15 nm井戸での長い緩和時間は温度とともに増加したことから，DP効果に従う電子スピン緩和時間であること，CQW幅10 nm井戸での長い緩和時間は温度増加に対して減少傾向が見られることから，価電子帯のバンドミキシングの影響を受けた正孔スピン緩和時間であることが分かった．通常の量子井戸では十数ピコ秒程度の正孔スピン緩和時間が，電子スピンの影響を弱くしたCQW幅10 nm井戸中では200 ps程度まで長くなった．

研究成果の学術的意義や社会的意義
光学的手法で半導体量子構造体における電子状態を制御・観測し，電子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．これまでの研究では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った．光パルスによって電子スピンを任意の方向へ生成，制御することで，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空間制御と高速応答を実現でき，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が期待できる．本研究成果によりえられた正孔のスピン緩和に関する結果は，任意の方向へのスピン生成のために重要な知見である．

研究成果の概要（英文）：Hole spin relaxation in coupled quantum well was investigated by time- and polarization-resolved pump and probe measurements. Two spin relaxation components were observed. Long-relaxation component observed in 15 nm quantum well is considered to be electron spin relaxation which is determined by DP spin relaxation mechanism because it was increased with increasing temperature. On the other hand, Long-relaxation component observed in 10 nm quantum well is hole spin relaxation affected by band mixing in valence band because it monotonically decreased with increasing temperature. The hole spin relaxation time in CQW where electron spin interaction is reduced was prolonged to 200 ps.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：電子スピン　正孔スピン　スピン間相互作用　結合量子井戸

様　式　C－１９、F－１９－１、Z－１９、CK－１９（共通）

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，量子ビットとして演算を行うには，①任意の電子スピン重ね合わせを形成すること，②自由にスピンを操作する必要がある．現状では，①重ね合わせ形成と②その操作のいずれにおいても外部磁場が必要不可欠である．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)］や光スピンシュタ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．また，電子スピンを量子ビットとして応用するためには，その重ね合わせ状態の形成が必要である．量子閉じ込め効果の制御により，電子スピンと正孔スピンのゼーマン分裂エネルギーを制御することで，外部磁場の下で電子スピンの重ね合わせが実証されている［H. Kosaka, *et. al.* Phys. Rev. Lett. 100, 096602 (2008)］.

このように，これまでの研究では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，電子スピンの量子ビット応用を目指し，その基礎的研究として，外部磁場を印加すること無く，z 偏光などの特殊な偏光を用いた光学的手法による電子スピン偏極の生成と制御の実証を目指す．軽い正孔状態には波動関数の空間部分に光の入射方向（z 方向）の電場に反応する成分を持つため，進行方向に電場の振動成分を持つ特殊な z 偏光を用いて，軽い正孔状態を励起すれば，外部磁場の印加無しで，任意の電子スピン重ねあわせの形成が可能となる．また，電子スピン状態を，高空間分解能・高速制御可能な光により制御できれば，電子スピン間の相互作用も合わせて活用することにより，外部磁場の印加無しでの電子スピン量子ビットの操作が可能となる．光パルスによって電子スピンを任意の方向へ生成，制御することで，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，軽い正孔状態の励起によるスピン偏極形成に適した光学的励起条件を明らかにし，新しい手法によるスピン形成，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）z 成分をもつ特殊な円偏光の形成が重要である．

z 成分を持つ円偏光は軌道角運動量が入射方向（z 方向）に垂直方向（x 方向）にあるので，軽い正孔励起子状態を励起できれば，x 方向にスピンを生成できる．これは通常の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．z 成分を持つ円偏光を形成するには z 偏光子や空間位相変調器を用いて，励起ビームの位相を空間的に変調する必要がある．空間的に位相変調されたビームをレンズで集光すれば，(3) の条件である z 方向に振動成分を持つ偏光を集光面で形成できる．測定にはポンププローブ測定法を用いる．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．

本研究では，これらの目的達成のために鍵となる 2 重量子井戸（CQW）における正孔スピンの性質解明を行う．電子と正孔スピンの CQW 内での緩和機構についてポンププローブ法により井戸幅及び温度依存性を測定し，スピン緩和機構を考慮した解析を行うことで，x 方向にスピンを励起する際に鍵となる軽い正孔状態のスピン緩和に関するデータ取得を目指す．

４．研究成果

半導体量子構造中の正孔スピンは空間部分の波動関数の非対称性により原子核スピンの影響

を受けないという利点を持つため，量子情報処理技術への応用が期待されている．正孔スピンの量子重ねあわせ状態は直線偏光による共鳴励起条件下で形成され，ポンププローブ測定で観測される．本研究では，結合量子井戸を用い，正孔スピンを孤立させた状況下での正孔スピン緩和時間の評価について検討し，以下に示す研究成果を得た．

本研究では，ポンププローブ法による偏光時間分解測定を行った．右回り円偏光ポンプで試料を励起して量子井戸中に上向きスピン偏極を作り，ポンプ光に対し時間遅延を付けた直線偏光をプローブ光として照射すると，試料中のスピン偏極を反映した反射光が得られる．この反射光を上向きスピン由来でポンプ光の偏光と平行成分であるI^+と，下向きスピン由来でポンプ光の偏光と反平行成分であるI^-に分けて検出した．

本研究で測定した試料のうち，CQW は井戸幅の異なる二つの GaAs 井戸層が薄い AlGaAs 障壁層を隔てて存在し，波動関数が結合しているため，トンネル効果による狭い井戸（幅 10 nm）から広い井戸（幅 15 nm）への電子の流出が起こり，狭い井戸での電子に対する正孔の密度を上げている．MQW 試料中には同じ幅の GaAs 井戸層が 10 nm の AlGaAs 障壁層を隔てて 20 層積層されているため井戸から井戸へのキャリアのトンネルは起こらず，各井戸でのプローブ光反射率変化が増幅され，良い S/N 比の信号が得られる．本研究では，これらの井戸におけるスピン緩和時間の比較により，正孔スピン緩和時間の試料構造による制御を検証した．

I^+とI^-の和分の差 $(I^+ - I^-)/(I^+ + I^-)$を遅延時間に対してプロットするとスピン偏極度の時間変化を示すグラフが得られ，これを指数フィッティングすることでスピン緩和時間が得られる．幅 4 nm，8 nm，12 nm 井戸の MQW 試料の測定から，二段階の緩和成分が確認できた．それらの短い緩和時間と長い緩和時間を，横軸に温度をとってプロットしたものをそれぞれ Fig.1，Fig.2 に示す．Fig.1 では温度の上昇に伴いスピン緩和時間が単調に減少している様子が分かる．これは価電子帯の重い正孔準位と軽い正孔準位のバンド混合によりスピン緩和が促進されていることを示している．よって，この傾向から MQW の短い緩和時間は価電子帯に存在する正孔スピン緩和時間であると結論付けた．Fig.2 では，60 K までは温度の上昇に伴い緩和時間が長くなる傾向が確認できる．これは電子スピン緩和機構の一つ，DP 効果によるものであることが推測される．これは結晶の反転対称性の欠如により伝導帯のエネルギーがスピンの状態によって分裂し，それによって生じる有効磁場がスピン緩和を促進する効果である．この効果中は，温度の上昇によってキャリアの散乱回数が多くなるほど有効磁場の反転がランダムプロセスとして働き，スピン緩和を抑制する方向に働く．この効果は価電子帯よりも伝導帯に存在するキャリアに大きな影響を与えるため，Fig.2 に示した MQW の長いスピン緩和時間は電子スピン緩和時間であることが分かる．

MQW の測定により，スピンの物理的起源が温度依存性測定により推定できることが確認できた．次に，同様の手法を CQW に適用することで，CQW 中の正孔のスピン緩和を考察した．CQW の測定結果からも二段階の緩和が確認できたが，そのうち長い緩和時間を横軸に温度をとりプロットしたものを Fig.3 に示した．このグラフから，CQW 幅 15 nm 井戸での長い緩和時間は温度とともに増加していることから，MQW 同様 DP 効果に従う電子スピン緩和時間であること，CQW 幅 10 nm 井戸での長い緩和時間は温度増加に対して減少傾向が見られることから，価電子帯のバンドミキシングの影響を受けた正孔スピン緩和時間であることが分かる．MQW 中では十数ピコ秒程度だった正孔スピン緩和時間が，電子スピンの影響を排除した CQW 幅 10 nm 井戸中では 200 ps 程度まで長くなっていることが分かる．試料構造による正孔スピン緩和時間制御の可能性を示唆する結果を得た．

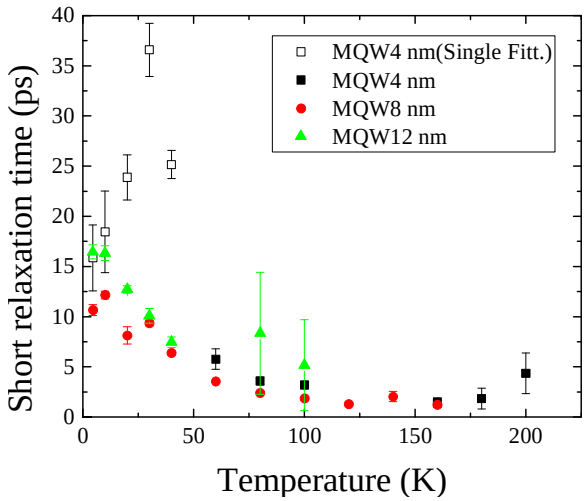


Fig.1 Temperature dependence of short relaxation time from MQW with a well width of 4 nm (■, □ (derived by single exp. fitt.)), 8 nm (●) and 12 nm (▲).

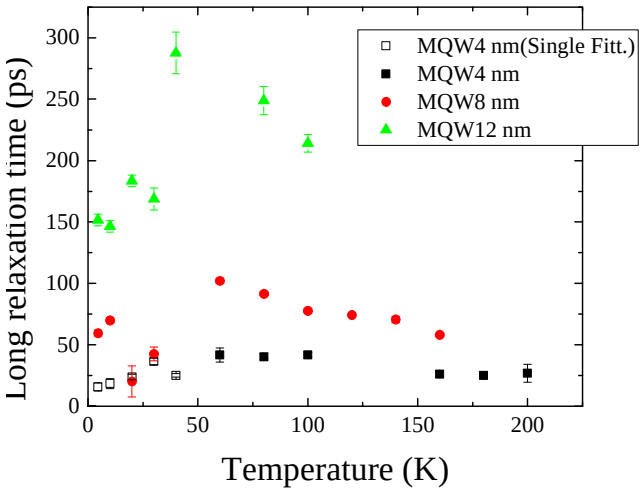


Fig.2 Temperature dependence of long relaxation time from MQW with a well width of 4 nm (■, □ (derived by single exp. fitt.)), 8 nm (●) and 12 nm (▲).

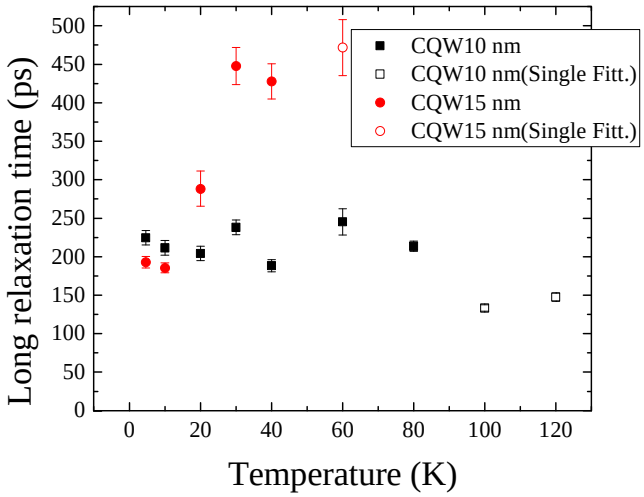


Fig.3 Temperature dependence of long relaxation time from CQW with a well width of 10 nm (■, □ (derived by single exp. fitt.)) and 15 nm (●, ○ (derived by single exp. fitt.)).

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 0 件）

〔学会発表〕（計 5 件）

① Tetsu Ito, Hiroki Muramatsu, Hideki Gotoh, Masao Ichida, Hiroaki Ando, “Phase Relaxation of Hole-Spin Superposition in GaAs/AlGaAs Quantum Wells”, The 4th International Conference on Nano Electronics Research and Education, 2018

② 村松 弘基，伊藤 哲，後藤 秀樹，市田 正夫，安藤 弘明，「偏光時間分解ポンププローブ測定によるスピン重ね合わせ状態における位相緩和の観測」2018年　第79回　応用物理学会秋季学術講演会, 2018

③ Hiroki Muramatsu, Tetsu Ito, Hideki Gotoh, Masao Ichida, Hiroaki Ando, “Observation of Phase Relaxation in Spin Superposition by Polarization- and Time-Resolved Pump and Probe Measurements”, 2018 International Conference on Solid State Devices and Materials, 2018

④ Hiroki Muramatsu, Tetsu Ito, Hideki Gotoh, Masao Ichida, Hiroaki Ando, “Observation of electron- and hole-spin relaxation by pump and probe measurement under different excitation polarization”, The First Materials Research Society of Thailand International Conference, 2017

⑤ Tetsu Ito, “Control of electron- and hole-spin state by polarized photon”, The 18th Takayanagi Kenjiro Memorial Symposium, 2016

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕
○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕
ホームページ等
https://www.rie.shizuoka.ac.jp/?page_id=55

６．研究組織

(1)研究分担者　無し

(2)研究協力者
研究協力者氏名：村松　弘基
ローマ字氏名：Hiroki Muramatsu

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。