

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26390074

研究課題名(和文) 高強度テラヘルツパルスを利用した半導体中電子スピンの超高速自由制御

研究課題名(英文) Ultrafast spin manipulation using the intense THz pulse

研究代表者

森田 健 (Morita, Ken)

千葉大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：30448344

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)：半導体量子井戸中の電子スピンの高速移動すると、スピンの内部有効磁場が作用する。本研究では、テラヘルツパルスによってスピンを高速移動させ、内部有効磁場を利用したスピン制御の原理検証実験を行った。テラヘルツパルス発生機構を組み込んだ時間分解ポンブプローブ光学系を構築し、テラヘルツパルス照射下でのスピンダイナミクスの計測を行った。テラヘルツパルス照射時のスピンの信号変化を観測できず、モンテカルロシミュレーションからもフォノン散乱が原因でスピンの空間移動ができていないことが分かった。

研究成果の概要(英文)：Using the spin precession around the effective magnetic field induced by the spin-orbit interaction in semiconductors, is effective method to manipulate the electron spins without under the external magnetic fields. Recently, the THz pulse which amplitude exceeds 1 MV/cm has been successfully generated by using the tilted-pulse front-phase technique. When such an intense THz pulse is irradiated, the electron spins drift and feel strong effective magnetic field which result in the high speed spin rotation. We setup the optical systems of tilted-pulse front-phase technique for THz pulse generation and time-resolved Kerr rotation for spin dynamics measurement. We measured the spin dynamics under the irradiation of the THz pulse which has the electric field amplitude of 600 V/cm. However, we could not observe the drift motion and the rotation of the spins in our measurements. Our Monte-Carlo simulation shows that the field amplitude is too small to drift the spins at the room temperature.

研究分野：半導体スピントロニクス

キーワード：電子スピン テラヘルツパルス スピン軌道相互作用 パルス面傾斜法 半導体

1. 研究開始当初の背景

半導体中の電子スピンは、「電荷」と「スピン」の両方の性質を併せ持っているが、従来の半導体デバイスでは電氣的に制御しやすい「電荷」の性質しか利用されていなかった。しかし、近年、量子力学的な「スピン」の性質を積極的に利用した量子コンピュータ^[1]が提案され、それを実現するためには省電力で行うスピンの超高速・自由制御が重要となる。ここで、スピンを超高速で自由に制御するとは、スピンの向きを任意の方向に短い時間(ピコ秒以内)で変えることを意味し、また省電力で制御するとは外部磁場を与えないゼロ磁場で制御することである。

従来のスピン制御法は、外部磁場を与えて制御する方法(電子スピン共鳴法)が主流であったが、印加領域が試料サイズに比べて極めて大きくエネルギーが無駄であった。最近、半導体中のスピン軌道相互作用を利用したゼロ磁場スピン制御が行われるようになった。ここでスピン軌道相互作用とは、図1のように電場の中を移動している電子に対し、あたかも磁場が存在するように影響する効果であり、スピンは見かけ上の磁場(有効磁場)の周りを回転(ラーモア歳差運動)する。従って、スピン軌道相互作用の強い半導体量子井戸では、外部磁場の無い状況でも、電子の運動を利用してスピンの回転制御が可能となる。実際、日本電信電話(NTT)のグループでは、表面弾性波^[1]や電界効果^[2]を用いて電子スピンを移動させスピン制御法に成功している。

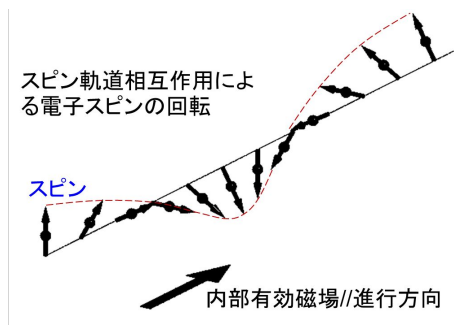


図1. スピン軌道相互作用下での電子スピンのラーモア歳差運動

一方、京都大学の広理らは、パルス面傾斜法によって強い電界(1 MV/cm)を有する高強度 THz パルスの発生に成功した^[3]。ここで注目すべきは、高強度な THz パルスを電子に照射すると、強いパルスの電場成分によって電子が加速し、とてつもなく大きな運動量(波数 k)が得られることである^[4]。電子がガンマ点から離れた k を持つことは、スピン軌道相互作用による内部有効磁場がスピンに対して働くことを意味する。従って、この内部有効磁場によるスピンのラーモア歳差運動を利用すれば、外部磁場を用いない方法で電子スピンの高速回転(制御)が可能になる。

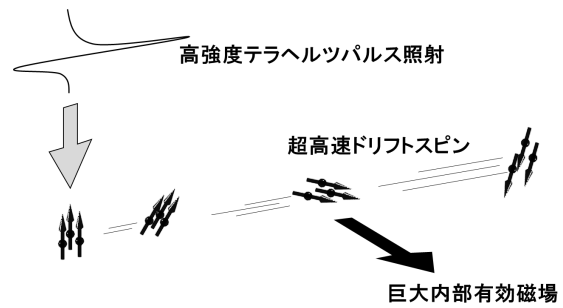


図2. 高強度 THz パルスを照射するとスピンのドリフト運動による巨大内部有効磁場が発生する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、半導体量子井戸中の電子を高強度テラヘルツパルスで移動させ、スピン軌道相互作用による実効磁場(内部有効磁場)で電子スピンを超高速かつ自由に制御することである。実験では高強度テラヘルツパルス発生機構を組み込んだ時間分解ポンププローブ光学系を構築し、スピンの生成・観測を行っている数百ピコ秒の間に高強度テラヘルツパルスを照射する。時々刻々と変化するスピンダイナミクスとテラヘルツパルス波形の関係を明らかにし、テラヘルツパルスによるスピン制御を実現する。本研究では、テラヘルツパルス照射時間内(< 2 ps)でスピンを一周以上回転させることを目標とする。

3. 研究の方法

まず GaAs 量子井戸(井戸幅 4.5 nm)の作製を行った。GaAs 量子井戸を用いたのは、スピンを励起・観測するためのレーザ波長が THz パルス発生を行うためのレーザ光源の波長と一致するからである。次に、スピンダイナミクスを観測するための時間分解光学測定系を構築する。光源としてのパルスレーザーは、千葉大学理学部所有のチタンサファイアレーザーを再生増幅した波長 $0.8 \mu\text{m}$ 、繰り返し周波数 100 kHz のものを使用する。裏面から THz パルスを照射し、スピンの生成・観測を行うスピン光学系は表面側に配置する。従って、スピン光学系は反射配置でスピン計測が可能である時間分解カー回転法を用いる。

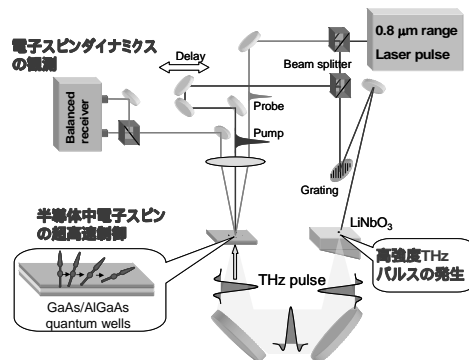
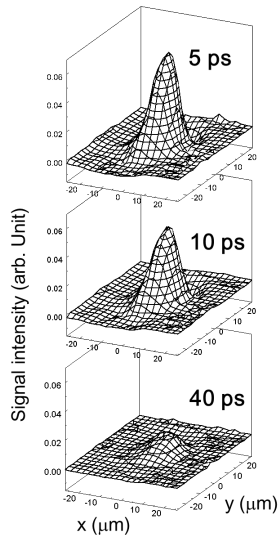


図3. 本研究の実験系の概略図。高強度 THz パルス発生光学系とスピン検出光学系を融合し、光学系をセットアップする。

高強度 THz パルス発生光学系の構築は、パルス面傾斜法^[5]によって行う。光学系の構築は連携研究者（中嶋）のアドバイスの下、光学測定グループが行う。生成した THz パルスの電場強度と時間波形は、ZnTe (110) 結晶による THz EO サンプリグ法によって明らかにする。図 3 のようにスピンダイナミクスの観測系と高強度 THz パルス発生系を組み合わせ、独自の光学系を構築する。レーザ光源から出射したパルスは Beam splitter で分かれ、一方は THz パルス発生系、もう一方は時間分解スピン光学系を通過する。光路長はほぼ一致するように構築し、スピンの生成された直後に高強度 THz パルスが照射できるように設計されている。実際の実験では、THz パルスが照射された数十 ps までの間に着目し、高い分解能（0.01 ピコ秒以下）で時々刻々と変化するスピンダイナミクスを観測する。同様の状況を計算で再現し、THz パルスの波形・偏光とスピンの向きとの関係を明らかにする。最終的には、THz パルスの強度や偏光方向さらに量子井戸に印加するゲート電場を変え、スピンの回転角や回転方向が自由に制御できることを示す。

4. 研究成果

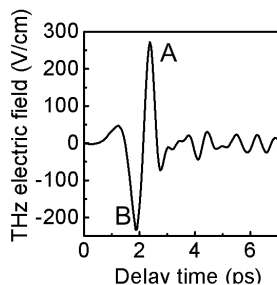
研究方法で述べたとおり、ポンプとプローブ



パルスによるスピンの生成・検出を行うスピン光学系は試料表面側で行った。その光学系を用い、室温で観測した GaAs 系量子井戸中のスピンの時空間ダイナミクスを図 4 に示す。スピンは、50 ps 程度で緩和し、ほとんど拡散しないことが分かる。

図 4. GaAs 量子井戸におけるスピンの時空間ダイナミクス。

THz パルス発生光学系を用いて観測した THz パルスの時間波形を図 5 に示す。ピーク



電場強度が数百 V/cm 程度の THz パルスが得られることを確認した^[7]。

図 5. ピーク電場強度が数百 V/cm 程度の THz パルスが得られることを確認した。

最終年度では、それまでに独立に構築していたスピン光学系と THz パルス光学系を連結させ最終光学

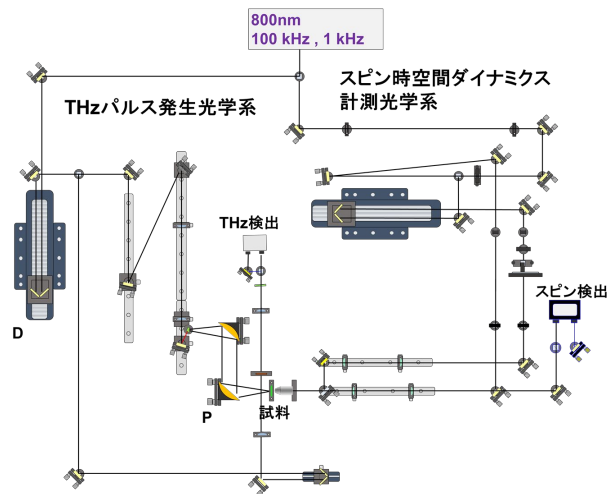


図 6. 本研究の実験系の概略図。高強度 THz パルス発生光学系とスピン検出光学系を融合した、最終光学系をセットアップした。

系を構築した。光学系を図 6 に示す。試料の右側がスピン光学系、左側が THz パルス発生光学系となっている。ビームスプリッターから二つの光学系へ分かれたスピン光学系を経た光パルスとテラヘルツ光学系で生成した THz パルスが、試料に同時刻に到着するように光学系の調整を行った。図中のスピン光学系の自動ステージ上のリトロフレクターを動かすことで、ポンプとプローブパルスの遅延時間 t_1 を変化されることができる。つまり、スピンが励起されてから t_1 だけ経過した時間のスピンの状態を観測することが可能である。一方、先ほどの自動ステージを固定した (t_1 を固定) 状態で、図中の自動ステージ D を変化することで、スピンが励起直後 ($t_2 = 0$ ps) を基準に、その前後の時間帯で THz パルスを照射するタイミングを変えることができる。

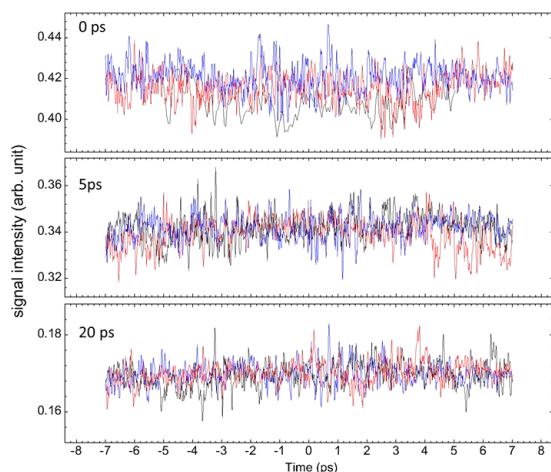


図 7. 本研究の実験系の概略図。高強度 THz パルス発生光学系とスピン検出光学系を融合した、最終光学系をセットアップした。

$t_1 = 0, 5, 20$ ps でスピンのカー回転の信号を固定し (スピン光学系の自動ステージを固定し) 照射する THz パルスの時間を $t_2 = \pm 7$ ps 変化させた (自動ステージ D を変化) 信号を図 7 に示す。赤、黒、青の信号は同じ条件

で三回測定した結果であり、全ての信号は一定で変化していないことから、THz パルス照射下でのスピンドイナミクスの変化は観測できていないことが分かった。主な原因として、本学所有のパルスレーザーでは生成する THz パルスの強度が弱く (600 V/cm が限界)、この程度の THz パルス強度では、生成した電子 (スピン) の空間移動がそもそもできなかったことが考えられた。

上記の解釈の妥当性を検証するため、我々は THz パルス照射下での電子スピンの時空間ダイナミクスのモンテカルロシミュレーションを行った^[6]。図 8 に、ピーク強度 10 kV/cm の三角波を仮定した THz パルス照射下での電子スピンの時空間ダイナミクスを示す。シミュレーションでは、LO フォノン散乱を考慮し、室温では、10 kV/cm でさえ、スピンの空間移動が起こらないことを示し、THz パルスによる高速スピン制御を実現するためには、低温の条件下で且つ 10 kV/cm 以上の THz パルスを用いる必要があることが分かった。

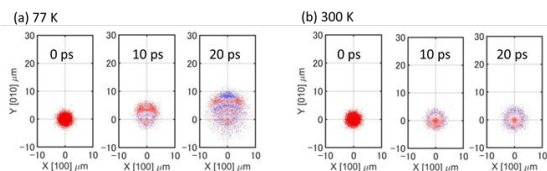


図 8. ピーク強度 10 kV/cm の三角波を仮定した THz パルス照射下での電子スピンの時空間ダイナミクスのモンテカルロシミュレーション結果。(a) 77K, (b) 300 K でのシミュレーション結果。

今後は、高強度 THz パルスが生成可能な 1 パルスあたりのエネルギーが mJ クラスのパルスレーザーを所有する研究機関との共同研究を実施し、実験を継続する予定である。

[参考文献]

- [1] H. Sanada *et al.*, Nature Phys. **9**, 280 (2013).
- [2] Y. Kunihashi *et al.*, Nature Phys. **9**, 280 (2013).
- [3] H. Hirori *et al.*, Appl. Phys. Lett. **98**, 091106 (2011).
- [4] H. Hirori *et al.*, Nature Commun. **2**, 594 (2011).
- [5] J. Hebling *et al.*, Opt. Express **10**, 1161 (2002).
- [6] I. Takazawa, K. Morita, *et al.*, The 64th JSPS Spring Meeting, March 19-22, (2017).
- [7] K. Morita, *et al.*, The 63th JSPS Spring Meeting, March, (2016).
- [8] R. Kurosawa, K. Morita *et al.*, Appl. Phys. Lett. **107**, 182103, (2015)

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 6 件)

H. Sakamoto, B. Ma, K. Morita and Y. Ishitani, “Raman study of the quantum interference of multiple discrete states and a continuum of states in phonon energy region of semiconductors: example of p-type Ga_{0.5}In_{0.5}P films”, J. Phys. D: Appl. Phys. **49**, 375107 (2016). 査読有
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/49/3/375107>

T. Iwahori, B. Ma, K. Morita, and Y. Ishitani, “Theoretical investigation of non-thermal equilibrium exciton dynamics in GaN based on hydrogen plasma model”, Japanese Journal of Applied Physics **55**, 05FM06 (2016). 査読有
<http://doi.org/10.7567/JJAP.55.05FM06>

T. Kamijoh, B. Ma, K. Morita, and Y. Ishitani, “Depth profile characterization technique of electron density in GaN films by infrared reflection spectra”, Japanese Journal of Applied Physics **55**, 05FH02 (2016). 査読有
<http://doi.org/10.7567/JJAP.55.05FH02>

Y. Ishitani, K. Takeuchi, N. Oizumi, H. Sakamoto, B. Ma, and K. Morita, H. Miyake, and K. Hiramatsu, “Excitation and deexcitation dynamics of excitons in a GaN film based on the analysis of radiation from high-order states”, J. Phys. D: Appl. Phys. **49**, 245102 (2016). 査読有
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/49/2/4245102/meta>

R. Kurosawa, K. Morita, M. Kohda, and Y. Ishitani, “Effect of cubic Dresselhaus spin-orbit interaction in a persistent spin helix state including phonon scattering in semiconductor quantum wells”, Applied Physics Letters **107**, 182103, (2015). 査読有
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4935044>

Y. Ishitani, K. Hatta, K. Morita, B. Ma, “Dielectric absorption of s-polarized infrared light resonant to longitudinal optical phonon energy incident on lateral (0001) GaN/Ti stripe structures”, J. Phys. D: Appl. Phys. **48**, 095103 (2015). 査読有
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/48/9/095103/pdf>

[学会発表](計 6 件)

高澤一朗太, 森田健 他, 高強度 THz パルス照射下での電子の時空間シミュレーション

ヨン, 第64回応用物理学会春季学術講演会, パシフィコ横浜, 2017年3月

K. Morita et al., "Electron spin g-factor in $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Al}_{0.47}\text{As}$ multiple quantum wells measured by time-resolved Faraday rotation, PASPS 9, Kobe Japan August 2016

高岩悠、森田健、他, $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$ (001) 多重量子井戸中の電子スピン緩和の外部光照射強度依存性, 第77回応用物理学会秋季学術講演会 講演予稿集, 朱鷺メッセ 新潟, 2016年 9月

森田健 他, 時間分解ファラデー回転法による $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$ 多重量子井戸における電子g因子測定, 第63回応用物理学会春季学術講演会, 東工大, 2016年3月
塩澤建人、馬ベイ、森田健 他, M字型光学系を利用したチェレンコフテラヘルツパルス発生, 第76回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場, 2015年9月

黒澤亮太、森田健, Monte Carlo法に基づく InGaAs 量子井戸中スピン偏極の高温における空間マッピング, 第62回応用物理学会春季学術講演会、東海大学、2015年3月

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: テラヘルツ光発生装置及びテラヘルツ分光装置

発明者: 森田 健

権利者: 千葉大学

種類:

番号: 特願 2014-207663

出願年月日: 2014年10月9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

<http://photonics.te.chiba-u.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森田 健 (MORITA, Ken)

千葉大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 30448344

(2) 研究分担者

北田 貴弘 (KITADA, Takahiro)

徳島大学・ソシオテクノサイエンス研究部・

特任教授

研究者番号: 90283738

(3) 連携研究者

好田 誠 (KOHDA, Makoto)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 00420000

(4) 研究協力者

中嶋 誠 (NAKAJIMA, Makoto)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センタ・准教授

研究者番号: 40361662