

# 高強度テラヘルツパルスによる電子スピン制御

志田博貴<sup>A</sup>, 高澤一朗太<sup>A</sup>, 石谷善博<sup>A</sup>, 中嶋誠<sup>B</sup>, 森田健<sup>A</sup>  
千葉大学大学院融合理工学府基幹工学専攻電気電子工学コース<sup>A</sup>  
大阪大学レーザー科学研究所<sup>B</sup>

## Electron spin manipulation by high-intensity terahertz pulse

H. Shida<sup>A</sup>, I. Takazawa<sup>A</sup>, Y. Ishitani<sup>A</sup>, M. Nakajima<sup>B</sup>, K. Morita<sup>A</sup>

*Graduate School of Electrical and Electronic Engineering, Chiba University, Chiba 263-8522, Japan<sup>A</sup>*

*Institute of Laser Engineering, Osaka University, Osaka 565-0871, Japan<sup>B</sup>*

### Abstract

When the electron spin is irradiated with a high-intensity terahertz (THz) pulse, it is accelerated in a short time of several picoseconds due to the electric field and has a large momentum. By the spin-orbit interaction, a spin with a large momentum experiences a large effective magnetic field and rotates around it. Therefore, it is expected that the spin can be rotated and manipulated in a short time. We applied a THz pulse with a maximum electric field intensity of 27 kV/cm to the photoexcited electron spins in the (001) GaAs/AlGaAs multiple quantum wells at room temperature. When the THz pulse is not irradiated, the spin is observed to gradually relax with a relaxation time of 50 ps. On the contrary, when the THz pulse is applied, the spin orientation is not inverted, but it is confirmed that the spin Kerr signal is rapidly modulated during 2 ps. Spatial resolution measurements are performed before and after the time this signal modulation is observed, and it is found that the electron spin moved by about 2 μm by the THz pulse electric field.

### 1. はじめに

近年、電子の「電荷」だけでなく、「スピン」という性質を利用した新しいデバイスの研究が進められている。電子スピンは、上向き・下向きの2つの状態の重ね合わせになっており、スピンをデバイスに利用するにはこの向きを自由に制御する技術が必要となる。

スピン $\mathbf{S}$ は

$$\frac{d}{dt}\mathbf{S} = \frac{g\mu_B}{\hbar}\mathbf{B} \times \mathbf{S} \quad (1)$$

に従って磁場 $\mathbf{B}$ の周りを回転するため、その向きを変えることができる。外部磁場を印加することによる電子スピン共鳴はその一例である。しかし、この電子スピン共鳴を利用したスピン制御は、制御する電子スピンに対して大きな外部磁場装置

が必要となり、デバイスへの応用には向いていない。このような外部磁場装置を用いないスピン制御法として、スピン軌道相互作用を利用する方法がある。スピン軌道相互作用は内部電場を有する物質において生じる。このような物質中を運動する電子スピンには、その運動量 $\mathbf{p}$ に依存した見かけ上の磁場(内部有効磁場)が作用する。従って、電子スピンの運動量を制御することで、外部磁場を用いずに、内部有効磁場を用いた電子スピンの制御が可能になる。

スピン軌道相互作用は、内部電場の由来によって、異なるRashbaタイプとDresselhausタイプの2種に分類される。Rashbaタイプはバンド構造を傾けさせる内部電場に起因し、外部電場の印加や不純物ドーブなどによっても調整できる。Dresselh

ausタイプは結晶構造の反転非対称性による分極電場に起因し、結晶の種類によって決まる。例として、III-V属半導体の(001)量子井戸中における各タイプの内部有効磁場のベクトル $\mathbf{B}_R$ ,  $\mathbf{B}_D$ は、波数 $\mathbf{k} = \mathbf{p}/\hbar = (k_x, k_y, 0)$ をもつ電子スピンの対して

$$\mathbf{B}_R = \frac{2\alpha}{g\mu_B} \begin{pmatrix} k_y \\ -k_x \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

$$\mathbf{B}_D = \frac{2\beta}{g\mu_B} \begin{pmatrix} k_x \\ -k_y \\ 0 \end{pmatrix} + \frac{2\gamma}{g\mu_B} \begin{pmatrix} k_x k_y \\ -k_x^2 k_y \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

と記述される。ここで $x$ ,  $y$ ,  $z$ はそれぞれ[100], [010], [001]と平行で、 $\alpha$ はRashba係数、 $\beta$ は一次Dresselhaus係数、 $\gamma$ はバルクDresselhaus係数であり、 $\beta = -\gamma\langle k_z^2 \rangle$ の関係がある。ここで $\langle k_z^2 \rangle$ は量子井戸の幅によって調整できる。また $\mathbf{B}_R$ は $\mathbf{k}$ に線形であり、 $\mathbf{B}_D$ は $\mathbf{k}$ に線形な第一項のリニア項の他に第三項のキュービック項がある。キュービック項は $k_x$ と $k_y$ の3次の項で、スピン緩和の原因になり得る。特に、電子スピンの運動量 $\mathbf{p}$ が大きい時に支配的となり、スピンの緩和を早めてしまう。

スピン軌道相互作用を用いた電子スピン制御では、内部有効磁場は、先述した通り、電子スピンがもつ波数 $\mathbf{k}$ の向きや大きさに依存するため、如何にしてスピンの運動量 $\mathbf{p}$ を与えるかが重要になる。従来手法として、試料に電極を取り付け、一定の弱電場を与えることで電子スピンの運動量を与える方法がある。この手法では数ナノ秒でスピンの向きを反転できた報告がある<sup>[1]</sup>。しかし、半導体量子コンピュータ<sup>[2]</sup>ではより高速な電子スピン制御が求められる。

近年、Heblingらによって考案されたパルス面傾斜法<sup>[3]</sup>により、1 MV/cm以上の電場強度を有する高強度なテラヘルツ (THz) パルスの発生<sup>[4, 5]</sup>が可能になった。このようなTHzパルスを電子スピンの照射することで、その電場成分 $\mathbf{E}_{\text{THz}}(t)$ によって電子スピンを数ピコ秒という短い時間で加速させる。この時の運動量ベクトルの時間変化

$\mathbf{p}(t)$ は

$$\mathbf{p}(t) = -e \int \mathbf{E}_{\text{THz}}(t) dt \quad (3)$$

であり、高強度な $\mathbf{E}_{\text{THz}}(t)$ によって、電子スピンの大きな運動量を与えることができる。これにより数ピコ秒レベルの高速電子スピン制御の実現が期待される。

THzパルスの磁場成分を用いたスピン制御は、磁性体の分野で既に報告<sup>[6]</sup>されているが、THzパルスの電場成分とスピン軌道相互作用を利用した半導体中の光励起電子スピンの制御は未だ報告されていない。そこで本研究では、半導体量子井戸中の電子スピンに対して、THzパルスを照射することでその高速制御を実現し、極限スピン制御技術を確立することを目的とする。

## 2. 実験試料・手法

本実験では、繰り返し周波数が1 kHz, 中心波長が800 nmのフェムト秒パルスレーザーを使用し、(001)方向に成長させた60周期のGaAs/AlGaAs多重量子井戸を実験試料として用いた。この試料には不純物ドーピングを行っていないため、Rashbaタイプのスピン軌道相互作用は弱く、Dresselhausタイプが支配的であると考えられる。電子スピンの時空間ダイナミクスは時空間分解 Kerr 回転法により観測した。Kerr 回転法とは、円偏光のポンプ光パルスによって選択的に励起された電子スピンに対して直線偏光のプロブ光パルスを照射すると、そのスピンの偏極率に比例して、プロブ光の反射光の偏光が傾く Kerr 効果という現象を利用した観測手法である。ポンプ光に対してプロブ光の光路長に差を与えることで、それぞれが試料に到達するまでの時間が変わるため、スピンの時間分解測定ができ、ポンプ光に対してプロブ光の試料の照射位置を変えることで空間分解測定ができる。そして光励起した電子スピンの緩和する前に、ニオブ酸リチウムからパルス面傾斜法によって発生させた最大電場強度27 kV/cmのTHzパルス (Fig. 1) を試料裏側から照射し、その前後の時間においてスピン信号

の時空間変化の様子を観測した。また実験はすべて室温で行った。

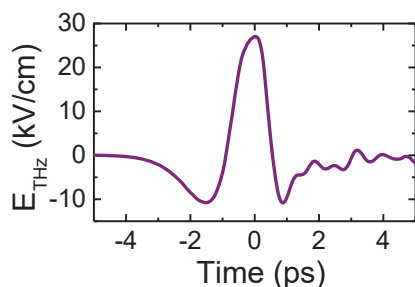


Fig. 1. 発生させた THz パルスの電場波形

### 3. 実験結果と考察

ポンプ光とプローブ光を試料の同じ箇所照射し、電子スピンの時間分解測定を行った結果を Fig. 2 に示す。ここで正と負の Kerr 信号はそれぞれ上向きと下向きに励起した時の電子スピンの信号である。黒の破線は、THz パルスを照射しなかった場合の Kerr 信号を表し、赤線と青線は、スピンを励起してから 13 ps 程経過した後 (Fig. 2 中の矢印で示した時間) に Fig. 1 で示した THz パルスを照射した場合の Kerr 信号を表している。THz パルスを照射していない時の電子スピンは励起されてから 50 ps 程度でゆるやかに緩和したが、THz パルスが照射されると、13 ps 付近に 2 ps 程度の急峻な信号変調が見られた。この変調は、電子スピンのスピントラキ相互作用由来の内部有効磁場の周りを回転して傾いた結果であると考えられる。

この Kerr 信号の変調が、スピントラキ相互作用の影響によるものだとすれば、THz パルスによって

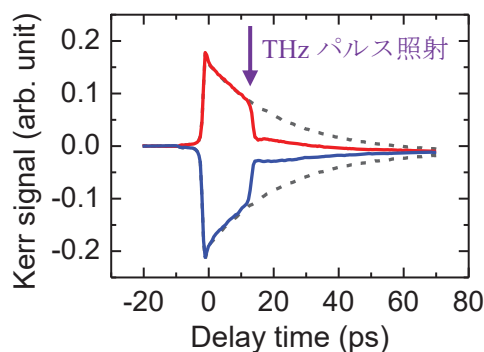


Fig. 2. THz パルス照射なし (破線) と THz パルス照射あり (実線) の場合のスピンの時間分解測定結果

電子スピンはドリフトしたはずである。そこで、信号変調が見られる 13 ps 前後の時間において一軸の空間分解測定を行った。測定した方向は、発生させた THz パルスの偏光と試料配置の関係から電子スピンのドリフトしたと考えられる [110] 方向とした。Fig. 3(a) の灰色の実線は、Fig. 2(a) の THz パルスを照射した時の Kerr 信号 (Fig. 2 の赤線) を 9 ps から 15 ps までの範囲で拡大したもので、この THz パルス照射により観測された信号変調の前後の時間に対して空間分解測定を行った結果が、Fig. 3(b) の各プロット (丸印) である。これらをガウス関数でフィッティング (Fig. 3(b) の実線) し、そのフィッティング結果を用いて規格化したものが Fig. 3(c) である。Fig. 3(c) から THz パルス照射により、電子スピンの分布が僅かに負の方向にずれている様子が見られた。そこでこのガウス関数のピーク位置の時間変化を Fig. 3(a) の Kerr 信号に重ねると (Fig. 3(a) の赤丸)、THz パルスの照射によりスピン分布が 2  $\mu\text{m}$  程度負の方向に移動していることが分かった。このスピン分布の移動は、THz パルス照射によってスピンの波数が与えられたことの証左である。このことから、Fig. 2 の信号変調は、スピントラキ相互作用の影響であることが分かった。従って、これらの実験結果は THz パルス照射によってピコ秒レベルの高速電子スピン制御が実現できるということを示唆している。

このように電子スピンの高速制御が期待できる結果は得られたが、スピンの反転していなければ、スピン制御技術を確立したとは云えない。今回、スピンの反転が見られなかった原因としては、LO フォノン散乱と式 (2.2) の Dresselhaus タイプのキュービク項による影響が考えられる。LO フォノン散乱は散乱後の個々のスピンの波数ベクトル  $\mathbf{k}$  の向きや大きさを変えるため、スピンの緩和 (DP 機構<sup>7)</sup>) を引き起こす他、電子スピンの運動を妨げる。この LO フォノン散乱が起こる確率は温度が高いほど高くなる。そのため、散乱を抑制するには、今回のような室温ではなく低温 ( $\leq 77\text{ K}$ ) で実験を行う必要がある。またスピン緩和のもうひとつの原因

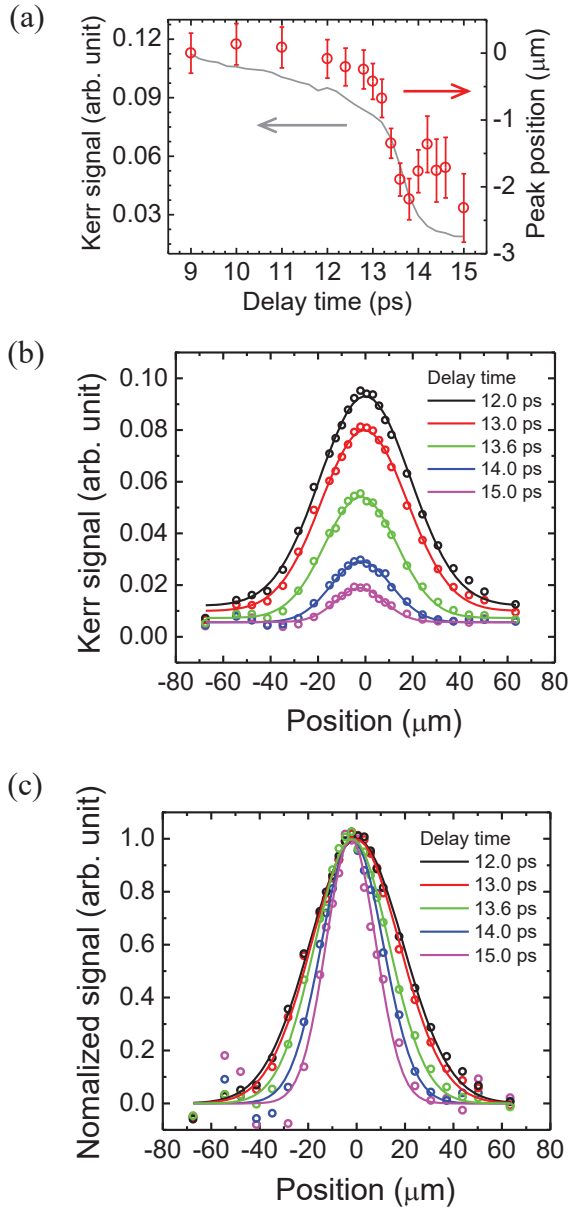


Fig. 3. (a) THz パルス照射前後の時間での Kerr 信号の時間変化 (実線) とスピン分布のピーク位置の移動 (丸印)。 THz パルス照射前後での (b) スピン分布 (丸印) とガウス関数フィット (実線) と (c) それらを規格化した結果

である Dresselhaus タイプのキュービック項は、先で述べたように、スピンの波数 $k$ が大きい時に強く作用する。本研究では THz パルスの電場 (Fig. 1) によって、スピンには大きな $|k|(\geq 10^9 \text{ m}^{-1})$ が与えられていることが式(3)から見積られる。これはキュービック項が作用するには十分な波数の大きさである。THz パルスの電場強度を大きくすれば、大きな $|k|$ によってスピンを高速に回転

させることができるが、その分スピンの緩和時間を短くしてしまう。このトレードオフの関係があるため、電子スピンに照射する THz パルスは適切な電場強度に調整する必要があり、これは今後の課題とする。

#### 4. まとめ

(001) GaAs/AlGaAs量子井戸中の光励起電子スピンに対してTHzパルスの照射を試みたところ、2 psというごく短い時間でのスピンのKerr信号の変調や、スピン分布の移動を観測することができた。これらの結果からTHzパルスの電場を用いることで、半導体中の電子スピンを数ピコ秒という短い時間で制御できる可能性が高まった。この進展は、スピンの高速制御が要求されるスピントロニクス分野のデバイス開発において非常に重要な成果と云える。

#### 参考文献

- [1] Y. Kato *et al.*, Nature **427**, 50 (2004).
- [2] D. Loss *et al.*, Phys. Rev. A **57**, 120 (1998).
- [3] J. Hebling *et al.*, Opt. Express **10**, 1161 (2002).
- [4] H. Hirori *et al.*, Appl. Phys. Lett. **97**, 091106 (2011).
- [5] H. Hirori *et al.*, Nature Commun. **2**, 594 (2013).
- [6] K. Yamaguchi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105**, 237201 (2010).
- [7] M. I. D'yakonov and V. I. Perel', Sov. Phys. JETP **33**, 1053 (1971).