

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：92704

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24686004

研究課題名(和文) ダイナミック量子ドットを用いたスピン量子情報伝送

研究課題名(英文) Spin quantum information transfer using dynamic quantum dots

## 研究代表者

眞田 治樹 (Sanada, Haruki)

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・量子光物性研究部・主任研究員

研究者番号：50417094

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 17,200,000円

研究成果の概要(和文)：電子スピンは量子情報処理で使われる量子ビットの有力候補である。これまでスピンの操作には電子スピン共鳴(ESR)が不可欠と考えられてきたが、一般的なESRで必要となる外部磁場の空間領域は電子一個の占める範囲よりもはるかに広いため、磁場発生に要したエネルギーの大部分が無駄になってしまう点が問題とされていた。そこで我々は、半導体に超音波を伝搬させることで実現される「ダイナミックドット」を用いた実験を行い、外部磁場が全くなくても通常のESRと同様のスピンの運動が生じる様子を観測することに成功した。本現象を用いれば、移動経路の適切な設計により、スピンの向きを任意方向に変化させることが可能になる。

研究成果の概要(英文)：Electron spins are possible candidates as qubits for solid state quantum computer. The most promising approach for spin control is based on electron spin resonance (ESR). However, ESR requires external magnetic fields, which are generated in spaces that greatly exceed individual electrons, thus making these complex and inefficient techniques unsuitable for device applications. We carried out spin transport experiments using trajectory-controlled "dynamic dots", which are realized by applying surface acoustic waves on semiconductor quantum wells. We observed the spin behavior of ESR even in the absence of external magnetic fields. This phenomenon allows us to manipulate spins in any three-dimensional direction by designing appropriate channel structures.

研究分野：半導体スピントロニクス

キーワード：スピン スピン軌道相互作用 表面弾性波 電子スピン共鳴 量子ドット

1. 研究開始当初の背景

固体中で量子計算を実現するためには、計算の全過程を通してコヒーレンスが保たれている必要がある。量子ビットの有力候補でもある半導体量子ドットは、ナノスケールの電子閉じ込めによって内部の量子状態を外部環境から遮断できるため、1~2個の静止したスピン量子ビットであれば1 μm以上コヒーレンスを維持できる。しかし、今後量子ビット数を拡大するためには、離れた量子ビット間における相関の制御や、量子情報の取り出しが不可欠であり、コヒーレンスを保持したまま量子情報をいかに伝送するか、という難題を克服しなければならない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、「ダイナミック量子ドット」を利用したスピン量子情報の伝送技術を確認し、固体量子情報研究の新展開を図ることである。ダイナミック量子ドットとは、半導体に表面弾性波 (Surface Acoustic Wave: SAW) を伝搬させることで実現される「動く量子ドット」である。従来の量子ドットの特徴である「長いコヒーレンス時間」に加え、「スピン偏極電子を輸送できる性質」を併せ持つため、量子情報伝送手段として極めて有望である。

3. 研究の方法

当初の計画に沿ってスピンパケット輸送に関する実験を進める中で、ダイナミックドットが移動する際の経路 (チャンネル) を精密に制御できることが分かった。この移動経路の制御技術を利用して、新現象「移動スピン共鳴」の実験を行い、実磁場を必要としないスピン量子情報処理に関する新しい手法に関する結果を得た。以下にその研究方法について説明する。

(1) 移動スピン共鳴の原理

通常、電子スピン共鳴 (ESR) は、外部から加えた静磁場と振動磁場を必要とする。これに対し、移動スピン共鳴は、外部磁場の代わりにスピン軌道相互作用を利用する。スピン軌道相互作用は、電場の中を移動する電子に対し、あたかも磁場が存在するように影響する効果である。

スピン軌道相互作用による有効磁場 ( $B^{SO}$ ) は、電子の速度ベクトル ( $v$ ) に比例する。我々が用いた半導体量子井戸構造における有効磁場ベクトルを、速度ベクトル空間でプロットすると、図1(a)のようになる。電子の移動方向が変化すると有効磁場の方向も変化することが分かる。

ここで図1(b)のように、正弦波状のチャネ

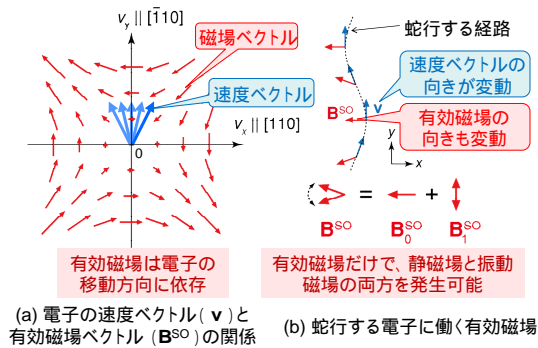


図1 移動スピン共鳴の原理

ルに沿って移動する電子を考える。チャンネルの各位置における接線方向は、電子の  $v$  ベクトルを決める。つまり、蛇行運動する電子は移動とともに  $v$  ベクトルの方向が変化するため、有効磁場ベクトル  $B^{SO}$  も周波数  $f = v_y / \lambda$  ( $v_y$  は速度の  $y$  方向成分、 $\lambda$  は蛇行チャンネルの波長) で変動することになる。この変動磁場は、電子が移動する座標系からみれば、静磁場と振動磁場のベクトル和になる。そのため周波数が  $f_R = \Delta E / h$  ( $\Delta E$  はスピン分裂エネルギー、 $h$  はプランク定数) に一致したときに、ESR と等価な共鳴現象が生じると予想できる。

(2) 試料

試料は GaAs と AlGaAs からなる厚さ 20 nm の量子井戸構造を分子線エピタキシ法により成長した (図 2(a))。試料の表面には櫛型電極 (IDT: Inter-Digital Transducer) を形成した。この IDT に高周波を加えると、試料表面に表面弾性波が伝搬し、周期的な局所ひずみが生じる。圧電物質である GaAs の内部ではピエゾ電場が発生するため、量子井戸内部の電子はピエゾ電場から力を受け、SAW の伝搬方向に移動する。

さらに、電子の移動経路を制御するために、試料表面に Ti の薄膜を蒸着した。SAW の伝搬領域に金属薄膜が存在すると、その直下のピエゾ電場を遮蔽する。この薄膜にスリットを開けておけば、そのスリット直下の部分が周囲に比べより強い電場となる。その結果、ピエゾ電場は動く閉じ込めポテンシャル (ダイナミックドット) をつくり、スリットに沿って電子を長距離運ぶことができる。実験では「直線チャンネル」と「蛇行チャンネル」の2種

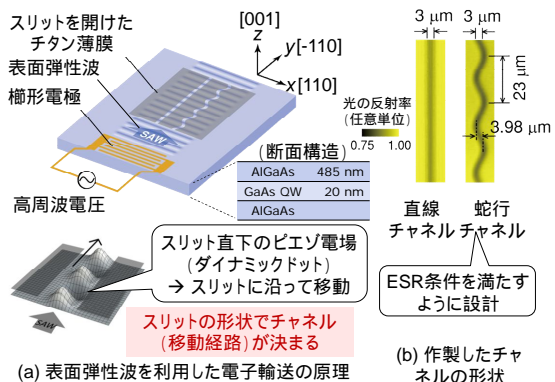


図2 試料構造

類を作製し比較した(図2(b))。

### (3)測定方法

電子が移動する際のスピンの振る舞いは、磁気光学効果を利用したポンプ・プローブ法で測定した。チタンサファイアレーザからの光をポンプ光とプローブ光に分けて試料に照射する。円偏光のポンプ光を、チャンネルのある位置に照射すると、スピンの揃った電子が選択的に生成される。一方、プローブ光は直線偏光として試料に照射し、反射光の偏光軸の回転量である Kerr 回転角 (KR: Kerr Rotation) を測定する。KR はプローブ光照射位置におけるスピンの z 軸成分に比例するため、プローブ光照射位置を 2 次元スキャンすることによって、スピンの 2 次元分布を計測できる。試料はクライオスタットの中で 8K に冷却し、外部から磁場を印加することもできるようにした。

## 4. 研究成果

図3に外部磁場がゼロのときのスピンの2次元マッピングの結果を示す。グラフ中の赤色・青色は Kerr 回転角の正・負、つまりスピンの上向き・下向き状態に対応する。

直線チャンネル(図3(a))では、円偏光励起によって原点(0, 0)に注入されたスピンはスリットに沿って長距離輸送される。Kerr 回転角の振動はスピンがスピン軌道相互作用に起因する静的な有効磁場の周りを歳差運動する様子を反映している。一方、蛇行チャンネルにおけるスピン歳差運動(図3(b))では、移動距離  $y$  が 30  $\mu\text{m}$  付近を超えところで、歳差運動の位相が反転の様子が観測された。この振る舞いは、蛇行運動する電子スピンに対し振動磁場が働き、「ラビ回転」と呼ばれる ESR 特有のスピンの運動が生じたためと解釈できる。

本現象が間違いなく共鳴現象であることを確かめるために、x 軸方向に外部磁場を印加した結果を図4に示す。直線チャンネルの結果(図4(a))にみられる振動は、磁場の周りのスピン歳差運動に起因し、その回転周波数は実磁場と有効磁場の和の大きさに比例する。外部磁場が 23 mT に近づくにつれて振動

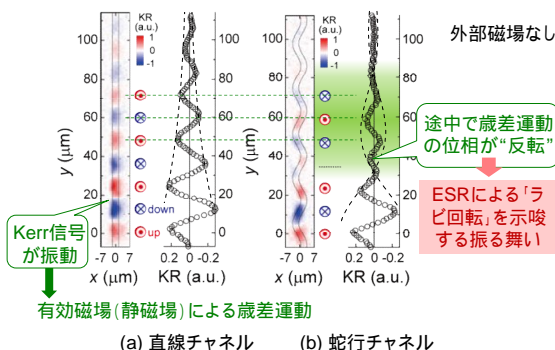


図3 チャンネルに沿って移動する電子スピンの空間分布

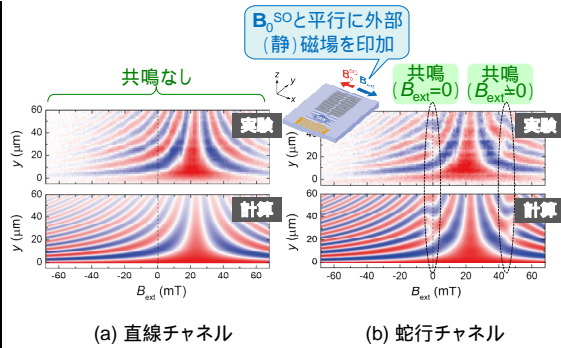


図4 スピンの振る舞いの外部磁場依存性

の間隔が広がっていき、23 mT では赤の領域しか現れなくなる。これは歳差運動が停止したことを示しており、このときの外部磁場がスピン軌道相互作用の有効磁場を打ち消している証拠である。一方、蛇行チャンネル(図4(b))では、0 T と 46 mT の付近で、歳差運動の位相が特徴的に変化する様子が見られる。これはスピン軌道相互作用のつくる振動磁場の影響によるものであり、通常の ESR と同様に共鳴現象が生じていることを示している。これらの実験結果は、理論計算でも良く再現できることから、ESR と等価な現象が外部磁場がゼロの状況でも確実に生じていることが確かめられた。

最後に、本成果の学術的意義と今後の展望について記述する。電子スピンは量子情報処理で使われる量子ビットの有力候補である。これまで、スピンの操作には電子スピン共鳴(ESR)が不可欠と考えられてきたが、一般的な ESR で必要となる外部磁場の空間領域は電子一個の占める範囲よりもはるかに広いため、磁場発生に要したエネルギーの大部分が無駄になってしまう点が問題とされていた。今回ダイナミックドットの優れた性質を利用することで示された「移動スピン共鳴」は、外部磁場が全くなくても通常の ESR と同様のスピンの運動が生じる現象である。本現象を用いれば外部磁場に頼ることなく、移動経路の適切な設計により、スピンの向き、すなわちスピン量子情報を自由に变化させることが可能になる。

今後は、スピンエコーなどのパルス ESR の技術を取り入れた量子状態制御や、ゲート制御スピン軌道相互作用との組み合わせも興味深く、固体量子情報処理の実現に向けた研究への発展が期待できる。

## 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6件)

1. 眞田治樹, 「磁場を使わない電子スピン操作 移動スピン共鳴」、パリティ(査読無) pp.48-51 (2014)、[http://pub.maruzen.co.jp/book\\_magazi](http://pub.maruzen.co.jp/book_magazi)

ne/magazine/parity-back/parity2014/2014\_02/1402\_cont.html

2. 好田誠、眞田治樹、「半導体におけるスピ  
ン軌道相互作用の新展開」、応用物理(査  
読無)、第 83 巻 第 3 号、pp.200-204  
(2014)、  
http://www.jsap.or.jp/ap/2014/03/ob8  
30200.xml
3. 眞田治樹、国橋要司、後藤秀樹、小野満  
恒二、寒川哲臣、「無磁場 ESR による電子  
スピン操作」、NTT 技術ジャーナル(査読  
無)、Vol.25 No.9, pp.60-64 (2013)、  
http://www.ntt.co.jp/journal/1309/to  
p.html
4. H. Sanada, Y. Kunihashi, H. Gotoh,  
K. Onomitsu, M. Kohda, J. Nitta,  
P. V. Santos, and T. Sogawa,  
"Manipulation of mobile spin coherence  
using magnetic-field-free electron  
spin resonance" Nature Physics (査読  
有), 9, 280 (2013).  
DOI:10.1038/nphys2573

〔学会発表〕(計 19 件)

1. 眞田治樹、「表面弾性波による電子スピン  
操作」、物理学会 2014 年秋季大会シンポ  
ジウム「表面スピンの基礎物性とスピ  
ントロニクス応用」(招待講演)、2014 年 9  
月 8 日、中部大学春日井キャンパス(愛  
知県春日井市)
2. H. Sanada, Y. Kunihashi, H. Gotoh,  
K. Onomitsu, M. Kohda, J. Nitta,  
P. V. Santos, and T. Sogawa,  
"Coherent manipulation of electron  
spins in acoustically induced moving  
dots", 18th International Conference  
on Quantum Dots (QD2014) (招待講演)、  
2014 年 5 月 13 日、ピサ(イタリア)
3. 眞田治樹、国橋要司、後藤秀樹、小野満  
恒二、好田誠、新田淳作、P.V. Santos、  
寒川哲臣、「移動スピン共鳴」、第 61 回  
応用物理学会春季学術講演会、シンポジウ  
ム「スピン流物理の新展開」(招待講演)、  
2014 年 3 月 18 日、青山学院大学相模原  
キャンパス(神奈川県相模原市)
4. H. Sanada, Y. Kunihashi, H. Gotoh,  
K. Onomitsu, M. Kohda, J. Nitta,  
P. V. Santos, and T. Sogawa,  
"Manipulation of electron spin  
coherence using acoustically induced  
moving dots in semiconductors",  
International Symposium on Advanced

Nanodevices and Nanotechnology (ISANN  
2013) (招待講演)、2013 年 12 月 13 日、  
カウアイ島(アメリカ合衆国)

5. H. Sanada, Y. Kunihashi, H. Gotoh,  
K. Onomitsu, M. Kohda, J. Nitta,  
P. V. Santos, and T. Sogawa,  
"Coherent manipulation of electron  
spins travelling in semiconductors  
without external magnetic fields",  
International Symposium on Nanoscale  
Transport and Technology (ISNTT2013),  
2013 年 11 月 29 日、NTT 厚木研究開発セ  
ンタ(神奈川県厚木市)
6. T. Sogawa and H. Sanada, "Spin  
transport and manipulation by surface  
acoustic waves", 12th Asia Pacific  
Physics Conference (APPC12) (招待講演)、  
2013 年 7 月 15 日、幕張メッセ(千葉県  
千葉市)
7. H. Sanada, Y. Kunihashi, H. Gotoh,  
K. Onomitsu, M. Kohda, J. Nitta,  
P. V. Santos, and T. Sogawa,  
"Magnetic-field-free electron spin  
resonance in winding GaAs channel",  
16th International Conference on  
Modulated Semiconductor Structures  
(MSS-16) (招待講演)、2013 年 7 月 2 日、  
ヴロツワフ(ポーランド)
8. 眞田治樹、「表面弾性波による電子スピン  
操作」、物理学会第 68 回年次大会、領域  
4, 3, 5, 7, 10 合同シンポジウム「フォ  
ノンの理解・制御によるエレクトロニク  
スの新展開」(招待講演)、2013 年 3 月 27  
日、広島大学東広島キャンパス(広島県  
東広島市)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 2 件)

1.  
名称：電子スピン制御装置および制御方法  
発明者：眞田治樹、国橋要司、後藤秀樹、寒  
川哲臣、好田誠、青木あすか、新田淳作  
権利者：NTT および東北大学  
種類：特許  
番号：特願 2014-107791  
出願年月日：2014 年 5 月 26 日  
国内外の別：国内
2.  
名称：電子スピン操作素子  
発明者：眞田治樹、後藤秀樹、寒川哲臣、バ  
ウロサントス  
権利者：NTT およびポール・ドルーデ固体エ  
レクトロニクス研究所

種類：特許  
番号：特願 2013-034618  
出願年月日：2013年3月13日  
国内外の別：国内

〔その他〕

報道発表：

日本電信電話株式会社ニュースリリース  
「磁場を使わずに電子スピンの向きを任意  
方向に変えることに世界で初めて成功～量  
子コンピュータの実現につながる新現象「移  
動スピン共鳴」を発見～」  
2013年3月15日

新聞記事掲載：

1. 科学新聞（4面）  
「量子コンピュータ実現へ新知見 磁場  
使わず電子スピンを制御」  
2013年3月29日
2. 通信興業新聞（1面）  
「量子コンピュータの要素技術 NTT など  
が共同実験」  
2013年3月25日
3. 日経産業新聞（10面）  
「数年の計算、数秒に 電子で物理現象  
素子試作狙う」  
2013年3月19日
4. 日経新聞（17面）  
「スパコンを超える計算能力に道」  
2013年3月19日
5. 日刊工業新聞（25面）  
「電子スピン 向き自在に NTT など、新  
たな動作原理を実証」  
2013年3月18日

ホームページ：

<http://www.br1.ntt.co.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

眞田 治樹 (SANADA, Haruki)  
NTT 物性科学基礎研究所・量子光物性研究  
部・主任研究員（特別研究員）  
研究者番号：50417094

### (2) 研究分担者

該当なし

### (3) 連携研究者 該当なし

### (4) 研究協力者

国橋 要司 (KUNIHASHI, Yoji)  
後藤 秀樹 (GOTOH, Hideki)  
小野満 恒二 (ONOMITSU, Koji)  
好田 誠 (KOHDA, Makoto)  
新田 淳作 (NITTA, Junsaku)  
パウロ サントス (Paulo V. SANTOS)  
寒川 哲臣 (SOGAWA, Tetsuomi)