

## 1000 兆分の1秒のスピンの運動をとらえる顕微鏡を世界に先駆けて開発

### 研究成果のポイント

1. 原子1個を観ることができる顕微鏡(走査トンネル顕微鏡:STM、注1)と、1000 兆分の1秒の現象をとらえることができるレーザー技術を組み合わせることで、スピン(電子の自転、注2)の運動をとらえることが可能な新しい顕微鏡技術を開発することに世界で初めて成功しました。
2. 半導体素子の最も重要な構造の1つである量子井戸(注3)の中で向きを揃えた電子のスピンの1000億分の1秒程度の時間で乱れていく様子を、たった1つの量子井戸からの信号として直接とらえることに世界で初めて成功しました。スピンの歳差運動(すりこぎ運動、注4)の信号をとらえることにも成功しています。
3. 今後、スピントロニクス(注5)の研究・開発などにおいて、重要な役割を担うことが期待されます。

国立大学法人筑波大学 数理物質系 重川秀実教授らの研究グループは、1000 兆分の1秒の電子スピンの運動をとらえる顕微鏡の開発に世界で初めて成功しました。

この画期的な顕微鏡開発は、原子1個を観ることができる顕微鏡(走査トンネル顕微鏡: STM)と、1000 兆分の1秒の現象をとらえることができるレーザー技術を組み合わせることで実現しました。この顕微鏡を用いることで、それぞれ幅 6nm と 8nm(1nm は 1000 万分の 1cm)で作製した量子井戸の中で向きを揃えた電子のスピンの1000億分の1秒程度の時間で乱れていく様子を、たった1つの量子井戸からの信号として直接とらえることに世界で初めて成功しました。量子井戸は半導体素子の最も重要な構造の1つで、半導体レーザーや LED の発光、高効率の太陽電池の開発などに応用されています。また、電子スピンの磁場の回りを回転(歳差運動)する様子を観察することにも成功しています。本顕微鏡により、調べたい場所で、原子が並んだ構造を STM で観察しながら、同じ場所でスピンの超高速の運動をとらえ、その性質を議論することが可能になりました。

本研究チームは 2010 年に、時間、空間の両方で極限的な分解能を併せ持つ新しい顕微鏡の開発に世界に先駆けて成功しました。本研究は、そこに、さらにスピンの情報を得る機能を追加することに成功したものです。世界に1つしかない顕微鏡技術であり、今後のスピントロニクスの研究・開発において、重要な役割を担うことが期待されます。

本研究の成果は、イギリス Nature グループが発行する Nature Nanotechnology 誌のオンライン速報版に、2014 年 6 月 29 日(イギリス時間)付けで公開されます。

本研究は、文部科学省科学研究費・基盤研究S「スピンドYNAMIXS可視化技術の開拓と新機能素子開発への展開」(研究期間:平成22~26年度)によって実施されました。

## 研究の背景

電子は、電荷(陽子はプラス、電子はマイナスの電荷を持ちます)とスピンと呼ばれる自転の性質(スピンにより電子は小さな磁石になります)を持っています。これまで、電子機器を支える半導体素子には電荷の性質が、磁石やメモリの開発にはスピンの性質が、それぞれ別々に用いられてきました。しかし、半導体素子は、今や、そのサイズが数 10 ナノメートル(1 ナノメートルは 10 億分の1メートル)で使われる領域に達し、素子の特性を制御するために加えられた不純物原子1つでも、素子の機能に直接的な影響を及ぼす段階に至っています。そうした中で、新しい機能材料・素子を開発するにあたって電子の電荷とスピンの性質両方を併せて利用する試みであるスピントロニクスの研究が盛んに進められています。ただし不純物原子等の影響はスピンにも及びます。従って、2つの性質を十分に利用して新しい機能を生み出すには、ナノメートルの領域で電荷やスピンの高速な運動を調べる方法が必要不可欠となります。

1981年に発明された走査トンネル顕微鏡法(STM)は、固体表面の1つひとつの原子を観察できることで、科学の様々な分野で利用されて多くの成果が得られてきました。しかし、時間の通常の分解能はミリ秒(1000分の1秒)程度で、高速の運動を追うことはできません。一方、レーザーの分野では、フェムト秒(1千兆分の1秒)の超高速の現象をとらえることが可能になりました。しかし通常の方法では、光があたるスポット(通常半径1ミリメートル程度の円)内の情報が平均化されてしまい、例えば、上で述べた不純物原子1個の影響などを調べることはできません。そこでSTMの発明以来、これら2つの技術を融合して、時間と空間の両方で高い分解能を持つ新しい技術を生み出す試みが数多くなされてきました。

本研究グループは2010年に、両技術を融合した新しい顕微鏡法を実現することに世界で初めて成功しました。しかし、その顕微鏡では、スピンの運動の情報は得られず、新しい機能素子を開発する手段として期待されているスピントロニクスの研究・開発に応用するには、さらに一段高い、新しい技術の創出が強く望まれていました。

## 研究内容と成果

本研究では、レーザー光でスピンの状態を操作し、その変化をSTMでとらえる新しい技術を開発することで、1ナノメートルの領域で、1000兆分の1秒の電子スピンの運動をとらえる顕微鏡の開発に世界で初めて成功しました。

量子井戸の中で向きを揃えた電子のスピンの1000億分の1秒程度の時間で乱れていく様子を、たった1つの量子井戸からの信号として直接とらえることが可能となりました(図1、2)。量子井戸とは、半導体素子の最も重要な構造の1つです。また、電子スピンの磁場の回りを回転(歳差運動)する様子を調べることに成功しています(図3)。

これまでは、時間的に、または空間的に平均された情報しか得られませんでした。本顕微鏡の実現により、調べたい場所で(ナノメートルの領域で)、原子構造(原子の並び方)を観察しながら、その同じ場所でスピンの超高速の運動を調べることに可能になりました。世界に1つしかない顕微鏡技術であり、今後のスピントロニクスの研究・開発において、重要な役割を担うことが期待されます。

## 今後の展開

現在、科学技術の多くの分野で開発の限界が言われはじめ、単にこれまでの方法の延長では今後の展開が難しい状況が生じています。こうした事態を打開するには、新しい機能を見出して活用することが一番ですが、併せて、新しい発想に基づく新しい工学の概念を導入することが必要不可欠となります。過去の歴史を見ても明らかのように、こうした試みを実現するには、これまでになく新しい情報を得ることを可能にする実験技術の開拓が重要な鍵となります。

本顕微鏡は、半導体だけでなく他の材料での使用も可能で、光を照射することで起こるいろいろな現象を、同様の方法で調べることができます。今後、スピントロニクスへの応用をはじめとし、異なる領域に適用していくことで、新しい科学技術の発展に貢献できることが期待されます。

参考図

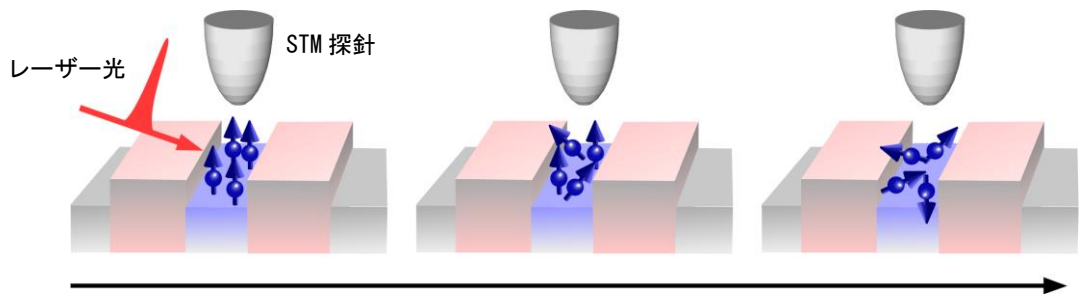


図1 量子井戸中、光照射により配向した電子スピンの向きが乱れていく(緩和していく)様子の模式図。

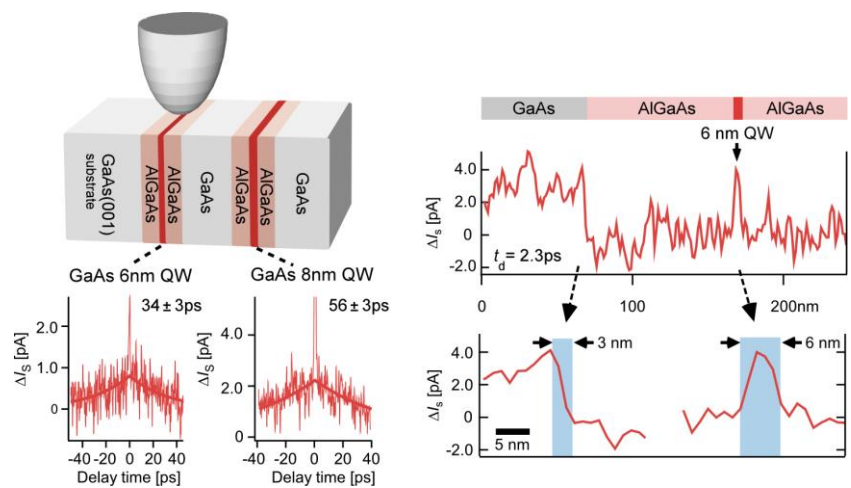


図2 AlGaAs/GaAs 超薄膜/AlGaAs 構造で作製した6ナノメートルと8ナノメートルの量子井戸(QW)の真上にSTM探針を固定して測定する模式図と、それぞれの量子井戸で得られた信号(左図)。34ピコ秒、56ピコ秒の緩和時間で乱れていく。右の図は、光照射によりスピンの向きを揃えてから2.3ピコ秒(1ピコ秒は1兆分の1秒)後に向きが揃っている電子スピンの量を試料に沿って描いたもの。6ナノメートルの井戸の所に信号が観える。拡大図から分かる様に1ナノメートル程度の空間分解能が得られており、異なる時間に対して同様の測定をして並べれば、量子井戸内でのスピン緩和の変化を画像にできる。こうした高い時間(ピコ秒)と空間(ナノメートル)の分解能をあわせて情報を得られる方法は、本顕微鏡以外には存在しない。

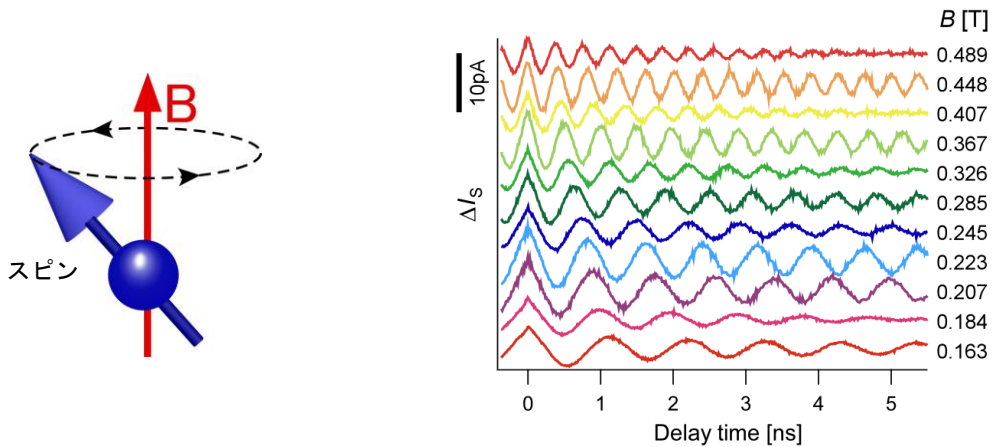


図3 スピンの歳差運動の様子を示す模式図(左)。磁場をかけると、コマのすりこぎ運動のように、スピンの向きが磁場の軸のまわりを回転する。右の図は、磁場  $B$  の強さを変化させた時の歳差運動による振動の様子をとらえた結果 ( $\Delta I$  はトンネル電流信号変化、 $T$  は磁場の強さの単位)。横軸はスピンの向きを揃えてからの時間 (ns はナノ秒)。磁場の強さにより、歳差運動の速さ(振動の速さ)が変化する様子が確認される。時間と共に信号強度が落ちるのは、最初揃って回っているスピンの向きが、量子井戸の場合と同じくバラバラになっていくため。

### 用語解説

#### 注1) 走査トンネル顕微鏡 (STM)

1981年に発明された顕微鏡、1986年にノーベル賞を受賞。細い探針を試料表面に  $1\text{nm}(10^{-9}\text{m})$ 程度に近づけ、探針と試料の間に  $1\text{V}$ 程度の電圧を印加すると、 $1\text{nA}(10^{-9}\text{A})$ 程度のトンネル電流が流れる。トンネル電流は試料-探針間距離に指数関数的に依存するため、トンネル電流を一定にして探針を試料表面に沿って走査すると、 $0.01\text{nm}$ 程度の凹凸を検知することが可能で、原子の構造(実際は原子構造にともなう電子雲の分布)を知ることができる。

#### 注2) スピン

地球は、一年で太陽の回りを一回り(公転)するとともに、一日一回、回転(自転)する。電子も原子核の回りを回るとともに自転する。この自転の性質をスピンと呼ぶ。

#### 注3) 量子井戸

半導体の超薄膜が異なる種類の物質に挟まれ、電子がその薄膜中に閉じ込められているとき、その薄膜構造を量子井戸と呼ぶ。電子素子の基本的な構造で、半導体レーザー、LED、太陽電池などの開発において利用され重要な役割を担っている。

#### 注4) 歳差運動

コマは自転しながら、その軸が円を描いて回転する。地球も自転しながらその軸は同様に回転している。この運動を歳差運動と呼ぶ。その様子から、みそすり運動、すりこぎ運動とも呼ばれる。

#### 注5) スピントロニクス

固体中の電子が持つ電荷とスピンの両方の性質を工学的に利用、応用する分野。スピンという言葉とエレクトロニクス(電子工学)という言葉から生まれた造語。

### 掲載論文

【題名】 Probing ultrafast spin dynamics with optical pump-probe scanning tunneling microscopy.  
(光ポンププローブ走査トンネル顕微鏡による超高速スピンドYNAMICKSの検出)

【著者名】 Shoji Yoshida, Yuta Aizawa, Zi-han Wang, Ryuji Oshima, Yutaka Mera, Eiji Matsuyama, Haruhiro Oigawa, Osamu Takeuchi, and Hidemi Shigekawa.

【掲載誌】 Nature Nanotechnology

### 問合わせ先

重川 秀実 (しげかわ ひでみ)

筑波大学 数理物質系 教授