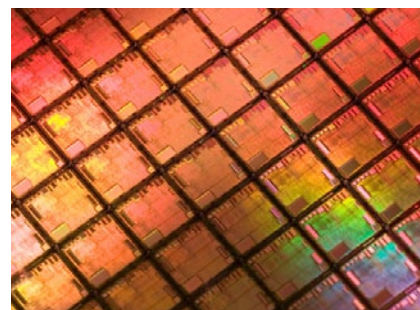


コンピューターの処理情報は、近年、驚くほど増大しています。増え続ける情報に対し、電荷輸送を利用した既存の半導体素子では、処理能力に限界があります。そこで期待されているのがスピントロニクスです。しかし、その基本となる電子スピンの制御は、一筋縄ではいかず、半導体では超低温でしか確認されていませんでした。今回、室温で初めてシリコンでのスピンの制御に成功し、いよいよスピントロニクスデバイスの実用化が現実味を帯びてきました。



© DAVE PORTER / ALAMY

## NEWS nature news

語数：548 words 分野：材料工学・電子工学・物質工学・物性物理学・量子力学

Published online 25 November 2009 | Nature | doi:10.1038/news.2009.1107

<http://www.nature.com/news/2009/091125/full/news.2009.1107.html>

# Spin success for silicon

Replacing electron charge with electron spin paves the way for a new mode of computing.

Geoff Brumfiel

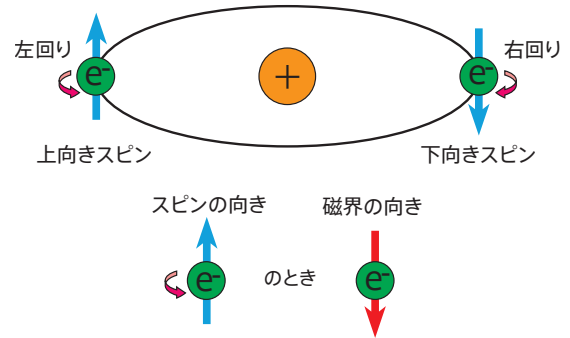
1. Low-power computer chips that don't **rely on** an **electrical current** to handle data have just come a big step closer.
  2. The key result, **unveiled** today in *Nature*<sup>1</sup>, sounds **deceptively** simple: scientists have **injected** electrons **into** silicon at room temperature and set a majority of them spinning in the same direction.
  3. But the experiment "is a real breakthrough", says Jaroslav Fabian, a theoretical physicist at the University of Regensburg, Germany. "Silicon is entering in a big way into spintronics."
  4. Conventional electronics uses the electron's charge to move and process information. Spintronics — or **spin-transport electronics** — offers an alternative, relying on the electron's **magnetism**, or spin, to **encode** information.
  5. Charge can be stored and is easy to **manipulate** using **electric fields**, properties that have enabled electrical engineers to develop ever-smaller chips over the past four decades. "But there are now increasing concerns that this progress may **come to a halt**," says Ron Jansen, a physicist at the University of Twente in Enschede, the Netherlands. As chips **shrink** they also become more complex and operate at higher speeds, driving an **exponential growth** in the amount of power needed to move electrons around them. Unless an alternative can be found, Jansen says, **electronic devices** may soon become too **power-hungry** to be practical.
  6. Jansen and others believe that the answer may lie in spin. Rather than moving charges around, spin-based devices would simply have to **flip** the direction of an electron's internal bar magnet.
- Single-layer success**
7. The difficulty with spintronics is that although electron spins are readily aligned in magnetic materials, they are less **well-behaved** in the **semiconductors** used in the electronics industry. To build a **spintronic device**, researchers must be able to move spin-aligned electrons from magnetic to semiconductor materials without losing that alignment.
  8. Previous experiments had managed the feat at ultra-cold temperatures, or by using **exotic** semiconductors such as **gallium arsenide**. But now Jansen and his colleagues have successfully injected spin electrons **en masse** into everyday silicon at room temperatures<sup>1</sup>.
  9. The team began with a magnetic **nickel-iron alloy** used in the **read head** of **hard-disk drives**, and an ordinary **slab** of silicon. Between the two they sandwiched an ultra-thin layer of **aluminium oxide**, roughly a nanometre thick. The aluminium oxide **acts as** an **insulator**, but when a **voltage** is applied some electrons are able to **quantum-mechanically tunnel** from the magnetic material into the silicon. The aluminium-oxide interface **allows** some spin directions to pass through more easily than others, creating a net excess of spins pointing in the same direction.
  10. The key to the team's success was the single layer of aluminium oxide. Previous experiments had used two or more such layers, which **stifled** the flow of spin-aligned electrons. A single, thin coating between the magnetic material and the silicon allowed the electrons to flow smoothly at room temperature.
  11. The simplicity and **reliability** of the technique are likely to make it a new standard in the field, says Shinji Yuasa, a researcher at the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology in Tsukuba, Japan.
  12. But there are still a few more steps before spintronics can **come to fruition**, says Jansen. Crucially, researchers must develop reliable ways to flip spins around once they are in silicon. Still, "The building blocks are there," he says. "Now **it's just a matter of building something**."
- Reference  
1. Dash, S. *et al. Nature* **462**, 491-494 (2009).

TOPICS

スピントロニクス (spintronics) とは

エレクトロニクスは、固体中の自由電子の「電荷」を制御することで、さまざまな機能を実現しているが、スピントロニクスは、電子の「スピン」の向きを制御することで、より優れた情報処理を実現しようとしている。ここでいうスピンは「磁性」とほとんど同義語で、固体中にある大量の自由電子のスピンを、磁界(磁場)によって、上向きないしは下向きに整列させたり反転させたりすることを意図している。

そもそもスピンとは、電子やクォークなどの素粒子がもっている内部自由度の1つ。実体は固有の角運動量で、スピン角運動量ともいう。直観的には粒子の自転と考えればよい。素粒子で構成される原子核や原子などもスピンをもつ。スピンは、下向き(右回り)と上向き(左回り)の2方向しか取りえない。原子の中の軌道電子は、自転する惑星が太陽の周りを公転しているように、原子核の周りをスピンしながら回っている。また、基本的に、例えばs軌道のように(上の図)、同じ軌道上には、スピンの向きが異なる2個の電子しか入ることができない。



スピンの方向と磁界は、反対方向になる。つまり、外部磁界がないとき、上向きスピンは下向きの自発磁界をもつ(下の図)。逆に、下向きの外部磁界を与えれば、スピンは上向きになる。このように電子は小さな磁石と考えられ、その集団でスピンの制御を実現するのがスピントロニクスといえる。

SCIENCE KEY WORDS

タイトル spin: スピン Topics 参照。

タイトル silicon: ケイ素 Si

原子番号 14。14 族 (V 族) 元素で半導体的性質を示す。

リード electron charge: 電荷

物質が帯びている電気のこと。正電荷と負電荷がある。エレクトロニクスは、この電荷をさまざまな構造や仕組みで制御する技術。

1. electrical current: 電流

電気の流れ。電子やイオンなどが移動することで起こる電荷の移動現象。

4. spin-transport electronics: スピン輸送エレクトロニクス

スピントロニクスと同義。

4. magnetism: 磁性 7. magnetic は形容詞で「磁性的」

反磁性、常磁性、強磁性、反強磁性など、その物質に固有の磁気的性質のこと。物質に外部磁界をかけると、磁界とその物質がもっている磁気モーメント(原子核の磁気モーメント、電子の軌道磁気モーメント、電子のスピン磁気モーメント)が相互作用して、固有の磁性が現れる。

5. electric field(s): 電場

電界ともよばれ、電荷をおいたとき生じる電気的な力が作用する空間。

5. electronic device(s): 電子デバイス

電子回路を構成するトランジスタやコンデンサなどの素子。集積回路や液晶表示装置などの電子部品を含める場合も多い。

7. semiconductor(s): 半導体

金属のように電気を通しやすい導体と、電気を通さない絶縁体との中間的性質をもつ物質。

7. spintronic device: スピントロニクスデバイス

電子スピンをうまく利用した電子回路や装置。

8. gallium arsenide: ガリウムヒ素、ヒ化ガリウム GaAs

ガリウムとヒ素からなる III-V 族化合物半導体。発光ダイオードや半導

体レーザーに広く使用されている材料。電子移動度がシリコンより大きいので、通信用高速論理回路素子などにも使われる。

9. nickel-iron alloy: ニッケル鉄合金

鉄とニッケルの合金。磁性をもち、熱膨張性が低い。ニッケルの含有量により物理的な性質、特に熱膨張係数が異なるので、それぞれの性質に合わせた低膨張合金や各種ガラス封着合金が、エレクトロニクス産業などで利用されている。

9. read head: 読み出しヘッド、読み取りヘッド

ハードディスク上の磁気記録を読み取る磁気ヘッド部分(下記参照)。

9. hard-disk drive(s): ハードディスクドライブ

磁性体を塗布した金属やガラスの円盤(ハードディスク)を高速で回転させ、磁気ヘッドを近づけて情報を書き込んだり読み出したりする、代表的な外部記憶装置。

9. aluminium oxide: 酸化アルミニウム Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

無色の固体で、酸、アルカリにほとんど溶けず、熱的にも安定。耐火物や研磨材、絶縁体、レーザー材料などに用いられている。

9. insulator: 絶縁体

電気を通しにくい物質。熱絶縁体をさすこともある。

9. voltage: 電圧

電場や導体内における、ある2点間の電位差のこと。単位はボルト。電位とは、静電場中に置いた単位電荷がもつ電気的な位置エネルギー。

9. quantum-mechanically tunnel: 量子力学のトンネル効果

古典力学では、地点Aから地点Bに物質が進むとき途中に高い障壁があると、それを越えるためには、障壁の位置エネルギーより大きな運動エネルギーを与えなければならない。しかし量子力学では、障壁を越えられない運動エネルギーなのに、あたかも壁を突き抜けたかのようにして、地点Bに到達することができる。この現象をトンネル効果という。

WORDS AND PHRASES

リード paves the way for ~: 「~への道を開く」

1. rely on: 「~に依存する」、「~を利用する」

2. unveil(ed): 「発表する」

2. deceptively ~: 「~のように見える、思われる、聞こえる」

“deceptively simple” には、「単純そうだが実は難しい」と「難しくそうだが実は単純」の意味があるので、文脈をから判断する必要がある。

2. inject(ed) A into B: 「AをBに注入する」

4. encode: 「符号化する」

5. manipulate: 「操作する」

5. come to a halt: 「止まる」

5. shrink: 「縮む」、「小さくなる」

5. exponential growth: 「指数関数的な増加」、「急激な増加」

5. power-hungry: 「大量の電力を必要とする」

6. flip: 「反転させる」

7. well-behaved: 「行儀のよい」、ここでは「向きがそろっている」の意。

8. exotic: 「エキゾチックな」、「風変わりな」、「特異な性質を有している」

8. en masse: 「まとめて」、「ひとまとめで」

9. slab of ~: 「~の板」

9. act(s) as: 「~として作用する」

9. <A> allow(s) <B> to ~: 「AによってBは~できるようになる」

10. stifle(d): 「抑える」、「抑制する」

11. reliability: 「信頼性」

12. come to fruition: 「実を結ぶ」

12. it's just a matter of ~: 「~の問題にすぎない」

## 参考訳

## シリコンにおける電子スピンの制御への大きな一歩

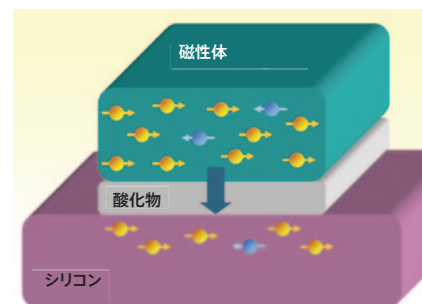
電子の電荷の代わりにスピンを利用することで、新しいコンピューター技術への道が開かれる。

ジェフ・ブラムフィール

1. 電流に頼ることなくデータ処理を行う低消費電力型コンピューターチップの実現に向けて、このほど大きな前進があった。
2. 本日（2009年11月25日）、*Nature* に発表された研究結果<sup>1</sup>を要約すると、室温でシリコンに電子を注入し、その多くを、同じスピンの向きにそろえることができたということになり、いかにも単純そうに聞こえる。
3. しかし、レーゲンスブルク大学（ドイツ）の理論物理学者 Jaroslav Fabian は、この実験は「真のブレイクスルーです」という。「シリコンがスピントロニクスに華々しくデビューしたのです」。
4. 従来のエレクトロニクスでは、電子のもつ電荷を利用して情報の輸送と処理を行っている。一方、スピントロニクス（スピン輸送エレクトロニクス）では、電子の磁性、あるいはスピンを利用して情報を符号化するという方法をとる。
5. 電荷は、蓄積できるだけでなく、電界を用いて容易に操作することもできる。電気工学者は、電荷のこうした特性を利用して、過去40年にわたってチップをどんどん小型化してきた。「ところが、この進歩が止まってしまうのではないかという懸念が高まってきているのです」とトゥエンテ大学（オランダ・エンスヘデ）の物理学者 Ron Jansen はいう。チップが小型化すると、より複雑になり、動作速度も上がるため、チップ上で電子を移動させるために必要な電力量は急激に大きくなる。このまま小型化を推し進めれば、やがて電子デバイスの消費電力が大きくなりすぎ、実用に適さなくなってしまうかもしれない、と Jansen は話す。
6. Jansen たちは、スピンがこの問題を解決するかもしれないと考えている。スピンを利用したデバイスでは、電荷を移動させなくても、電子の内なる棒磁石（スピン）の向きを反転させるだけでよいからだ。

### 単層にして成功を得る

7. スピントロニクスが直面している困難は、磁性材料で電子スピンの向きをそろえるのは容易だが、エレクトロニクス産業で使われている半導体で電子スピンを行儀よく整列させるのは容易ではな



サンドイッチ構造により、室温で磁性体からシリコンへ、スピン偏極した電子が注入される。

8. これまでもこの離れ業に成功した実験はあったが、超低温にしたり、ヒ化ガリウム（ガリウムヒ素）のように特異な性質をもつ半導体を用いたりする必要があった。ところが今回、Jansen たちは、室温で、ごく普通のシリコンにスピン電子をまとめて注入することに成功したのだ<sup>1</sup>。
9. Jansen の研究チームは、ハードディスクの読み出しヘッドに使われる磁性体のニッケル鉄合金と普通のシリコン板で研究を始めた。この2つの材料の間には、厚さ約1ナノメートルの極薄の酸化アルミニウム層をはさんだ。酸化アルミニウム層は絶縁体として働くが、電圧を印加すると、一部の電子が、量子力学のトンネル効果によって、磁性材料からシリコンに移れるようになる。今回の実験では、ある向きのスピンをもつ電子が、そうでない電子よりも酸化アルミニウム層をすり抜けやすくなったことで、同じ向きのスピンをもつ電子が多数存在している状態（スピン偏極）が作り出された。
10. 今回の成功のカギとなったのは、単層の酸化アルミニウムを用いたことだった。これまでの実験では、2層以上の酸化アルミニウムを用いていたため、スピンの向きがそろった電子の流れが抑制されていた。今回は、磁性材料とシリコンの間の層を薄くしたことで、室温で電子がスムーズに流れるようになったのだ。
11. 産業技術総合研究所（茨城県つくば市）の湯浅新治研究グループ長は、この手法は単純で確実であるため、この分野の新しい標準的手法となる可能性が高いとみている。
12. しかし Jansen は、スピントロニクスが実を結ぶまでには、さらにいくつかの段階を踏む必要があるという。なかでも重要なのは、シリコンに注入された電子のスピンの向きを確実に反転させる方法を開発することだ。それでも「『ブロック』はそこにあります。あとはこれを組み立てればよいのです」と Jansen は語る。（菊川要 訳）