

スピン起電力-ファラデーの法則を越えて

Spinmotive Force – Beyond Faraday's Law

家田 淳一 量子物性理論研究グループ
Jun'ichi Ieda Research Group for Condensed Matter Theory



概要

近年のナノ加工技術の急速な進展により、スピン角運動量の流れである「スピン流」の物理が広く探求できるようになりました。多くの魅力あふれる創発現象が見いだされているこの流れの中で、私たちは磁気と電気のエネギーをナノスケールの磁石において直接変換するメカニズムを見いだしました。

本成果は、米国物理学協会（AIP）の学術誌アプライドフィジクスレターズに掲載され、1月3日付のAIPフィジクスニュースハイライトに選ばれました。

1. 研究の背景・経緯

今日の情報社会を支えているエレクトロニクス技術。その次世代を担う「スピントロニクス」が世界的に注目されています。エレクトロニクスとはその名の通り、物質中の電子を自在に操る技術のことです。この電子には「電荷」と「スピン」という2つの顔があります (Fig. 1)。電荷の流れが電流であり、エレクトロニクスはこの電流を制御することで発展してきました。一方、スピンとは磁気の素であり、その流れをスピン流と呼びます。

スピントロニクスとは、このスピン流を電流同様に利用して、従来のエレクトロニクスを凌駕する技術革新を実現するものです[1]。スピントロニクスにおいて中心課題となるのが、スピン流と強磁性体中の磁化運動の相互作用を詳しく調べることです。特に、90年代中頃に提唱された「スピントランスファートルク（スピントルク）」の発見[2,3]は、今日にいたるスピントロニクス研究の進展を力強く牽引してきました。例えば、磁気メモリへの情報の書き込み技術である磁化反転操作も、素子サイズが100nm以下になると、従来の磁場駆動の手法よりもスピン流駆動の手法の方が有効であることが示されるなど、スピン注入磁化反転や磁壁の電流駆動といった重要な先端工業技術に結びついています。スピントル

Abstract

Thanks to advanced nano-fabrication technology, physics of “spin current,” a flow of spin angular momentum, is now widely explored generating a number of fascinating emergent phenomena. Among them, we found a new mechanism that directly converts magnetic and electric energies in nano-scale magnets.

This work was published in Applied Physics Letters and selected as interesting research in AIP Physics News Highlights 3rd January 2013.

1. Background

Electronics is indispensable for our daily life in the information society. As the next generation technology, “spintronics” attracts global interests. As the name implies, electronics is an art of controlling electrons in solids. The electron has two personae: its “charge” and “spin” (Fig. 1). The charge is the origin of electricity and its flow leads to an electric (charge) current. On the other hand, the spin gives birth to magnetism and its flow is called a “spin current”. The electronics to date has developed using only the charge currents.

Spintronics aims to overcome the current technology by harnessing both the currents equally [1]. One of the key issues in this field is to understand the mutual interaction between spin current and

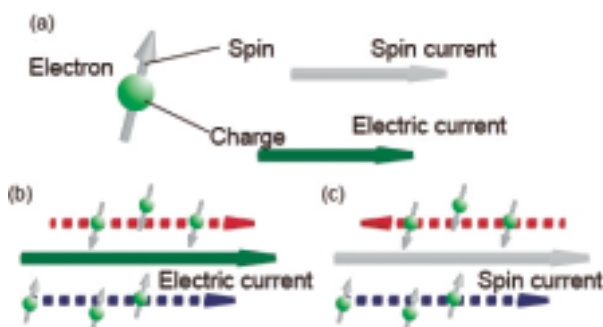


図1 電子の持つ電荷とスピン

(a) 電子には、電荷とスピンという性質がある。電荷の流れが電流となり、スピンの流れがスピン流となる。(b) 通常の電流では、上向きスピンと下向きスピンの電子が同方向に流れるため、全体としてはスピン流にならない。(c) スピン流を作るには、様々な工夫を凝らして異なるスピンを持つ電子を逆向きに流す必要がある。

Fig.1 Electron's charge and spin

(a) A flow of the charge leads to an electric current whereas a flow of the spin leads to a spin current. (b) An ordinary electric current consists of the equal number of up- and down-spin electrons, leading to no net spin current. (c) Generation of spin currents requires an ingenious method to create a “counter-flow” of the up- and down-spins.

クの発見から約10年後、同じ相互作用から「スピン起電力」と呼ばれる現象が発見されました[4]。スピントルクが、スピン流と磁化の間における角運動量のやりとりを実現するのに対し、スピン起電力はエネルギーの受け渡しを可能とします。このため、スピン起電力は将来のスピンエレクトロニクス応用技術において重要な構成要素となると目されています。

この短いノートでは、私たちが最近行ったスピン起電力の理論に関する進展をご紹介します。

2. 研究の内容

まず手始めに、スピントルクの説明から始めたいと思います。スピン流は、自身のもつ角運動量を受け渡すことにより、磁性体の磁化にトルクを作用することができます。このことを理解するために、磁壁（二つの磁区を隔てるナノ領域の境界）を持つような極小の磁石でできた細線を例にとって考えてみましょう（図2）。

いま、このような磁壁を有する断面積が一定の強磁性細線（図2(a)）に、左から右へスピン流を流します。このとき伝導電子のスピンは強い交換相互作用の働きにより磁化の方向にそろっており、磁壁内部の磁化の変化に沿って回転します。これは、伝導電子のスピン角運動量が磁壁領域を通過する前後で変化したことを意味しています。角運動量保存則のため、伝導電子のスピン角運動量の変化分は磁化の変化により相殺され、磁壁中の局在スピンは伝導電子のスピンとは逆向きに回転します。以上の結果、磁壁はスピン流の流れの方向に移動することになります（図2(b)）。これがスピントルク効果によって生じる、「電流誘起磁壁移動」という現象です。電流誘起磁壁移動は、これまでに様々な強磁性体を用いた実験により実証されており、この現象を用いたナノデバイス応用も盛んに研究されています[5]。

さて、それではスピン起電力の説明に移ります。同じ磁性細線に、今度は磁場 H を加えてみます。磁場の中では、磁性体の持つゼーマンエネルギーは、磁壁位置の変

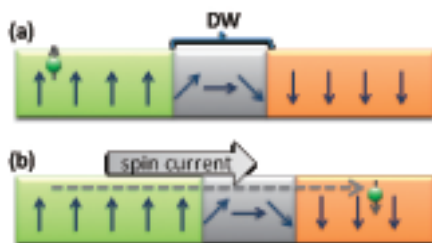


図2 電流による磁壁移動

電流 J を加える前(a)と後(b)。磁壁は電子スピンと角運動量の受け渡しを通じて、電子スピンの流れる方向(電流と逆方向)に移動する。

Fig.2 Current-induced DW motion

The exchange interaction mediates angular momentum transfer between conduction electron spin and magnetization, leading to DW motion along the flow of a spin current.

magnetization. This interaction leads to the so-called “spin-transfer torque” (STT) [2,3] and “spinmotive force” (SMF) [4]. The concept of STT was proposed in the mid-'90s and has been proved to be more useful than the conventional method in coding information in magnetization of nanodevices. In this sense, STT is one of the guiding principles in developing the field of spintronics. Later the SMF, an effect that stems from the same interaction that leads to STT, was discovered. While STT is responsible for the angular-momentum-transfer, SMF enables the energy-transfer between spin current and magnetization. Therefore, it is anticipated that SMF becomes an important building block for future spintronics devices.

In this Note we describe our recent contribution to the theory of SMF and its future applications.

2. Contents of the study

Let us begin with introduction of STT first. Spin current can exert a torque on the magnetization by transferring the angular momentum and thus causes the magnetization dynamics. In order to see this, let us consider a ferromagnetic nanowire containing a magnetic domain wall (DW), a nano-scale boundary between two magnetic domains (Fig. 2).

Conduction electrons move from left to right with their magnetic moment aligned parallel to the magnetization due to the strong exchange interaction between the conduction spins and magnetization (Fig. 2 (a)). As a result, the magnetic moment of the conduction electrons rotates along the magnetization configuration and changes the direction before and after passing through the DW region. This means that the angular momentum of the conduction electrons is changed. Because of the conservation of angular momentum, change of the spin angular momentum of the conduction electrons is compensated by change in the magnetization, and localized spin within the DW rotates in the opposite way to the conduction electron spins. This results in the DW motion along the direction of the conduction electron's flow (Fig. 2 (b)).

Such current-induced DW motion has been demonstrated in various ferromagnetic materials and its nanodevice applications have been studied extensively [5].

Next, let us move on to the SMF. We apply a magnetic field H in the same magnetic nanowire (Fig. 3). In the presence of the magnetic field, the total Zeeman energy of the nanowire increases or decreases in response to change in the DW position. This energy change is transferred to the conduction electron spin

化に応じて増減します (図3)。この磁気的なエネルギー変化分は、先ほどと同じ交換相互作用を通じて伝導電子系に受け渡され、スピン流を駆動する原動力となります。この状況を、磁壁と伝導電子系間のエネルギーと角運動量の保存則の観点で考察すると、細線の両端に生じる電圧 V と磁場 H の間に、次の関係式が導かれます [4]。

$$V = (Pg\mu_B/e)H \quad (1)$$

ここで、 g は電子の g 因子、 μ_B はボーア磁子、 e は素電荷、そして P は物質パラメータとして伝導電子のスピン偏極率 (強磁性体においては $0 < P \leq 1$ の値をとります。) を表しています。これが、磁場誘起磁壁移動に伴うスピン起電力の生成であり、スピン自由度を介して、磁気的なゼーマンエネルギーから電圧が直接取り出せるということの意味しています。

今回私たちは、この磁壁の運動を制御することで、直流磁場を交流電圧に直接変換する機構 (磁気パワーインバータ) を考案しました [6]。直流の入力エネルギーを時間的に変化させる仕組みとして、図4(a) に示すような周期的に横幅を変えた磁性細線を用いました。変調に伴う細線中の磁壁は、ゴム膜のように伸縮に伴いエネルギーが変化します (図4(b))。このとき、通常の入力磁場によるスピン起電力に加え、磁壁に蓄えられた固有の磁気エネルギーによるスピン起電力が発生します。この結果、磁壁移動に伴って発生する出力電圧にはこの磁壁エネルギーの変動を反映した交流成分が重ね合わされることが示されます (図5)。この交流成分の振幅や周波数などの特性は、外部から入力する直流磁場の強さや細線の形状を調整することで制御することが可能です。適切な磁性材料を用いた場合、MHz帯からGHz帯までの良好な交流特性が得られることがわかりました。

3. 成果の意義と波及効果

近年のナノ加工技術の進展は目を見張るものがあり、これまでベールに隠されていたスピン起電力の性質を実験的に詳しく調べることができるようになってきました。以下、スピン起電力の持つ特性をまとめておきます。(1) 通常の誘導起電力では、電圧を取り出すために、時間変

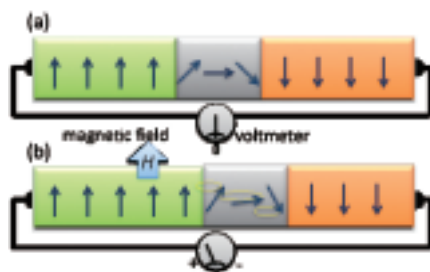


図3 磁場による磁壁移動

磁場を加える前(a)と後(b)。磁場 H を加えると、磁壁領域にある磁化が歳差運動すると同時に磁場と平行にそった方の磁区が成長し磁気的なゼーマンエネルギーが減少する。その分が伝導電子系に受け渡され、細線の両端につないだ電圧計に起電力として観測される。

Fig.3 Field-induced DW motion and generation of an electrical voltage

Applying a magnetic field a DW moves toward the direction of lowering the Zeeman energy and the released energy is converted to a voltage via the SMF mechanism.

via the exchange interaction, giving rise to a driving force for spin currents. By considering energy and angular momentum conservation between the DW and the conduction electron system, we obtain the induced electric voltage

$$V = (Pg\mu_B/e)H. \quad (1)$$

Here g is the g -factor, μ_B is the Bohr magneton, e is the elemental charge, and P denotes a material dependent parameter for the spin polarization of conduction electron ($0 < P \leq 1$ for ferromagnets).

In a recent work [6], by further controlling the DW motion, we have proposed a basic concept of a “magnetic power inverter,” a device that converts DC magnetic fields to AC electric voltages, and investigated its operation characteristics using model calculations. This device consists of a magnetic nanowire with the width modulation as shown in Fig. 4(a). In such a patterned wire, a DW behaves like an elastic membrane and the DW energy changes by the DW position as shown in Fig. 4(b). Accordingly, a DW introduced in the nanowire is subjected to not only an applied DC magnetic field but also an effective magnetic field arising from the modulation of the DW energy that is proportional to the wire width. In this case, the output voltage has an AC component reflecting the alternating DW energy in addition to a normal DC component due to the input DC magnetic field (Fig. 5). Characteristics of the AC component such as amplitude (several μV) and frequency (MHz to GHz) can be tuned by design of the wire shape, choice of materials, and magnitude of applied magnetic fields.

3. Importance of the result and its impact

The recent development of nano-fabrication

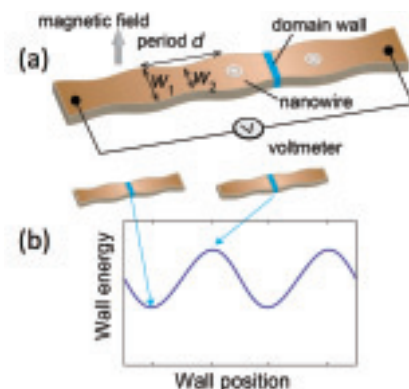


図4 磁気パワーインバータの模式図

(a) 横幅の広い部分 (W_1) と狭い部分 (W_2) が周期 d で繰り返される加工を施した磁性細線に外部磁場をかけ、磁壁を移動させる。(b) 磁壁のエネルギーは細線の断面積に比例するため、 W_1 で大きくなり、 W_2 で小さくなる。

Fig.4 Design of magnetic power inverter

(a) A magnetic field is applied to induce domain wall motion in a nanowire that is periodically patterned with wider (W_1) and narrower (W_2) widths. (b) The wall energy is proportional to the wire width and becomes larger (smaller) at W_1 (W_2).

動する磁場を用意する必要がありました。これに対し、スピン起電力は静磁場からも電圧を取り出せます。(2) 磁場と電圧の変換レートは (1) 式に示されているように、物質パラメータであるスピン偏極率以外は普遍定数によって与えられ、高い変換効率が期待できます。(3) この効果を用いた応用では、自己駆動型の素子となるため基本的に待機電源が不要となり、磁気と電気のエネルギー変換というユニークな機能性を磁気ナノ構造体に付与することができます。

4. 今後の予定

1831年の発見以来、ファラデーの見いだした誘導起電力は電気と磁気の間を支配する電磁気学の根幹であると同時に、商業用発電装置から身の回りの家電製品まで様々な電気機器の動作原理として活躍しています。スピン起電力とは、このファラデーの電磁誘導の法則の一般化であり、電磁気学にスピン流を加えることで導かれるスピントロニクスの新概念です。現在、様々なナノ磁性体の系において、実際にスピン起電力が観測されています[7]。

本研究の背景となるスピントロニクスでは、これまで磁気メモリ、磁気ヘッド、磁気センサーなど、既存のエレクトロニクス素子の高性能化を主眼とした応用が追及されてきました。これらはまた、究極的な「省エネルギー」技術の有力候補として広く認知されるようになってきました。これに加え、スピン起電力は、磁気・電気エネルギー相互変換の新原理を提供し、ナノ磁性体を用いたエネルギーハーベスティングなどスピントロニクスに「創エネルギー」の基本概念を導入するものです。

本成果は、磁気と電気という異種のエネルギー形態を直接結びつけた、高効率なこれまでにないエレクトロニクス分野を切り開く大きな一歩であり、待機電源が不要な電子素子などへの応用が期待されます。

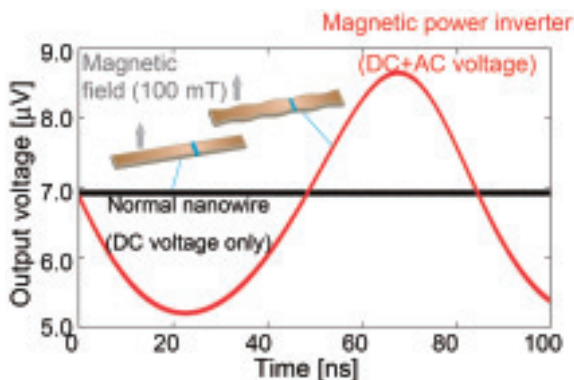


図5 磁気パワーインバータの出力電圧

一定の静磁場のもとで通常の磁性細線における出力が直流電圧(黒線)のみであることにに対し、形状加工を施した磁性細線では交流電圧が加わる(赤線)ことを理論計算により明らかにした。

Fig.5 Output voltage characteristics

In a normal nanowire a DC magnetic field induces a DC output voltage (black) whereas in a periodically patterned nanowire we have theoretically shown that an AC output voltage is superposed in addition to the DC component (red).

technology of magnetic nanostructures allows us to access SMFs. Striking features of the SMF are listed as follows: (1) In contrast to the inductive voltage where the time variation of a magnetic flux is required, solely a static magnetic field can generate an electric voltage. (2) The conversion rate is given by fundamental constants apart from the spin polarization of the sample, enabling efficient energy-conversion. (3) Applications using this effect can operate as active devices with zero stand-by power and such power-conversion ability between magnetic and electric systems provides a unique functionality in magnetic nanostructures.

4. Perspectives

Since the discovery of Faraday's law of induction in 1831 it has been one of the fundamental laws in electromagnetism and played a pivotal role as an operation principle of various electric devices ranging from power generators to electric appliances. Spinmotive force is a generalization of Faraday's law of induction, which is derived by adding the spin current to the conventional electromagnetism, and offers a new concept of spintronics. Now the SMF is observed in a variety of magnetic nanostructures [7].

In spintronics applications, higher performance of existing devices, such as magnetic memory, magnetic head, and magnetic sensors, has been pursued so far. Now they are widely recognized as promising candidates for ultimate "energy saving" technology. Additionally, SMF introduces the basic concept of "energy harvesting" technology in spintronics and paves a new pathway to the magnetic and electric energy conversion using a magnetic materials.

This work brings a novel concept that directly bridges different types of energy with frequency modulation and opens a new route for efficient energy conversion technology in nanodevices.

参考文献 References

- [1] S. Maekawa, S. O. Valenzuela, E. Saitoh, and T. Kimura eds, Spin Current (Oxford University Press, 2012).
- [2] J. C. Slonczewski, J. Magn. Magn. Matter **159**, L1 (1996).
- [3] L. Berger, Phys. Rev. B **54**, 9353 (1996).
- [4] S. E. Barnes and S. Maekawa, Phys. Rev. Lett. **98**, 246601 (2007).
- [5] S. S. P. Parkin *et al.*, Science **320**, 190 (2008).
- [6] J. Ieda and S. Maekawa, Appl. Phys. Lett. **101**, 252413 (2012).
- [7] See a review article: J. Ieda, Y. Yamane, and S. Maekawa, SPIN **3**, 1330004 (2013).