

スピントルクダイオード効果

MgOバリア巨大トンネル磁気抵抗素子の新しい応用

産総研とキャノンアネルバ株式会社が開発したMgOをバリアとする巨大トンネル磁気抵抗素子がマイクロ波の整流検波作用を持つことを発見した。これまでの研究で、同素子ではスピン注入磁化反転が実現し、直接通電によって磁気書き込みのできる記録素子として磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM) への応用が期待されている。また、非常に敏感な磁場センサともなるため、ハード磁気ディスクの読み出しヘッドへの応用研究が急ピッチで進んでいる。今回の発見は、さらにこの素子がマイクロ波を周波数選択的に検波する作用を持つことを示したもので、電子の二つの性質である電荷とスピン(磁石としての性質)を同時に使うスピントロニクス素子に新たな応用が拓けるものと期待される。

Rectification function has been observed in a CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junction (MTJ), which shows the giant tunneling magneto-resistance effect. The junction size was about 100nm x 200nm. Applied radio frequency (RF) current exerts a spin-torque interaction on magnetization in the MTJ, and causes resonant precession of spins. The MTJ shows high resistance only for one direction of the applied RF current and yields dc voltage as a result. The output voltage would be larger than those of semiconductor diodes if critical voltage to switch magnetization is smaller than 25mV. We named this device "spin-torque diode". New applications of spin-tronics devices such as high frequency devices, are expected.

はじめに

電子はマイナスの電気を帯びており、半導体などを用いて、この電子の運動(電流)を制御することにより、情報の伝達と演算処理が可能となる。一方、電子はそれ自身が小さな磁石(スピン)であり、これを整列させることにより永久磁石がつけられ、その配列を制御することで磁気記録を行う。これら、半導体工学と磁気工学はそれぞれ別々に

発展してきたが、1988年の巨大磁気抵抗効果の発見以来、これら2つの分野を融合して新しいエレクトロニクス、即ち「スピントロニクス」を築き上げようという試みが盛んに行われている(図1)。本稿では、このような研究の中でわれわれが発見した「スピントルクダイオード効果」について紹介する。

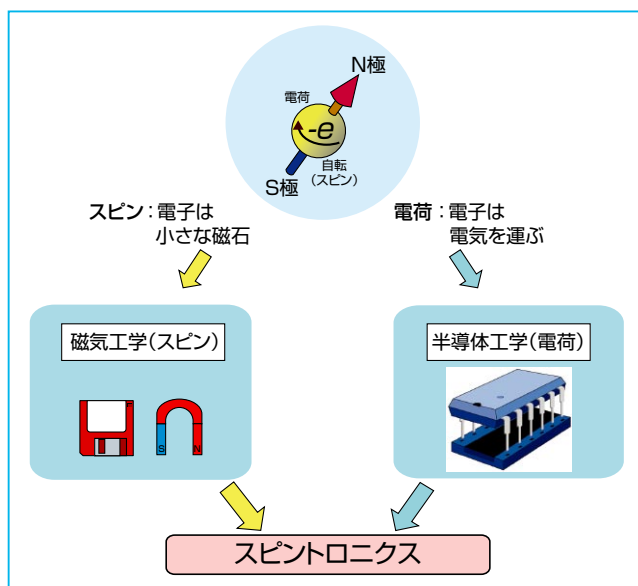


図1 スピントロニクス

電子はもともと電気を運ぶ性質(電荷)と磁石となる性質(スピン)を同時に持っている。スピントロニクスは磁気工学と半導体工学を融合し、新機能/新素子を生み出す。

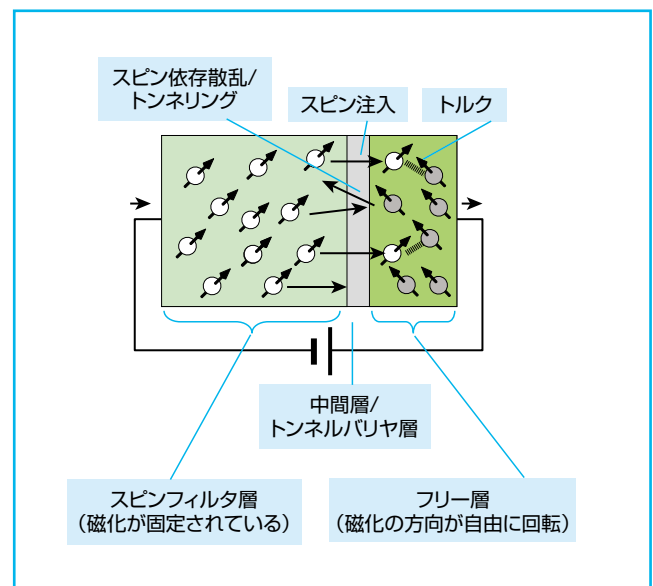


図2 スピン注入の概念

中間層(トンネルバリア層)で隔てられた強磁性層間に電流を流すと電子がそのスピンを保持したまま注入される。その結果、スピンに依存した散乱やトルクが生じる。

スピントロニクス素子の4つの機能

金属スピントロニクス素子の代表的な構造を図2に模式的に示す。Cuなどの非磁性金属やMgOなどの非磁性絶縁体を強磁性層ではさんだ構造をしている。この素子に通電すると、一方の磁化を固定した強磁性金属層（スピンフィルタ層）でスピンの向きを揃えられた伝導電子が他方の強磁性金属層（フリー層）にスピンを保存したまま注入され（スピン注入）、界面でスピン依存散乱を受けたり、また、フリー層内部で局在磁気モーメントと相互作用してトルクが生じるなどの現象を引き起こす。

この結果、これまでに金属スピントロニクス素子には、室温において3つの機能が発見されていた。即ち、①強磁性層の磁化配置によって電気抵抗が大きく変化する巨大磁気抵抗効果およびトンネル磁気抵抗効果、②強磁性層間に通電することにより磁化配置が変化するスピン注入磁化反

転、および、③電流と磁場を同時に加えたときに生じるマイクロ波のスピン注入自励発振である（図3）。

巨大磁気抵抗効果およびトンネル磁気抵抗効果は、ハード磁気ディスクや磁気RAM（MRAM）の記録の読み出しに利用される。スピン注入による磁化反転は、磁場を用いない省エネルギー型MRAMにおける記録の書き込み技術として利用される。

スピントルクダイオード効果

われわれは、これら3つの効果に加えてトンネル磁気抵抗素子には高周波電流を整流する特性、すなわちスピントルクダイオード効果があることを発見した（図3④）¹⁾。図4にスピントルクダイオード効果の測定回路および測定例を示した。図中左側の積層構造はCoFeB/MgO/CoFeBトンネル磁気抵抗素子^{2, 3)}の側面模式図である。素子の上面

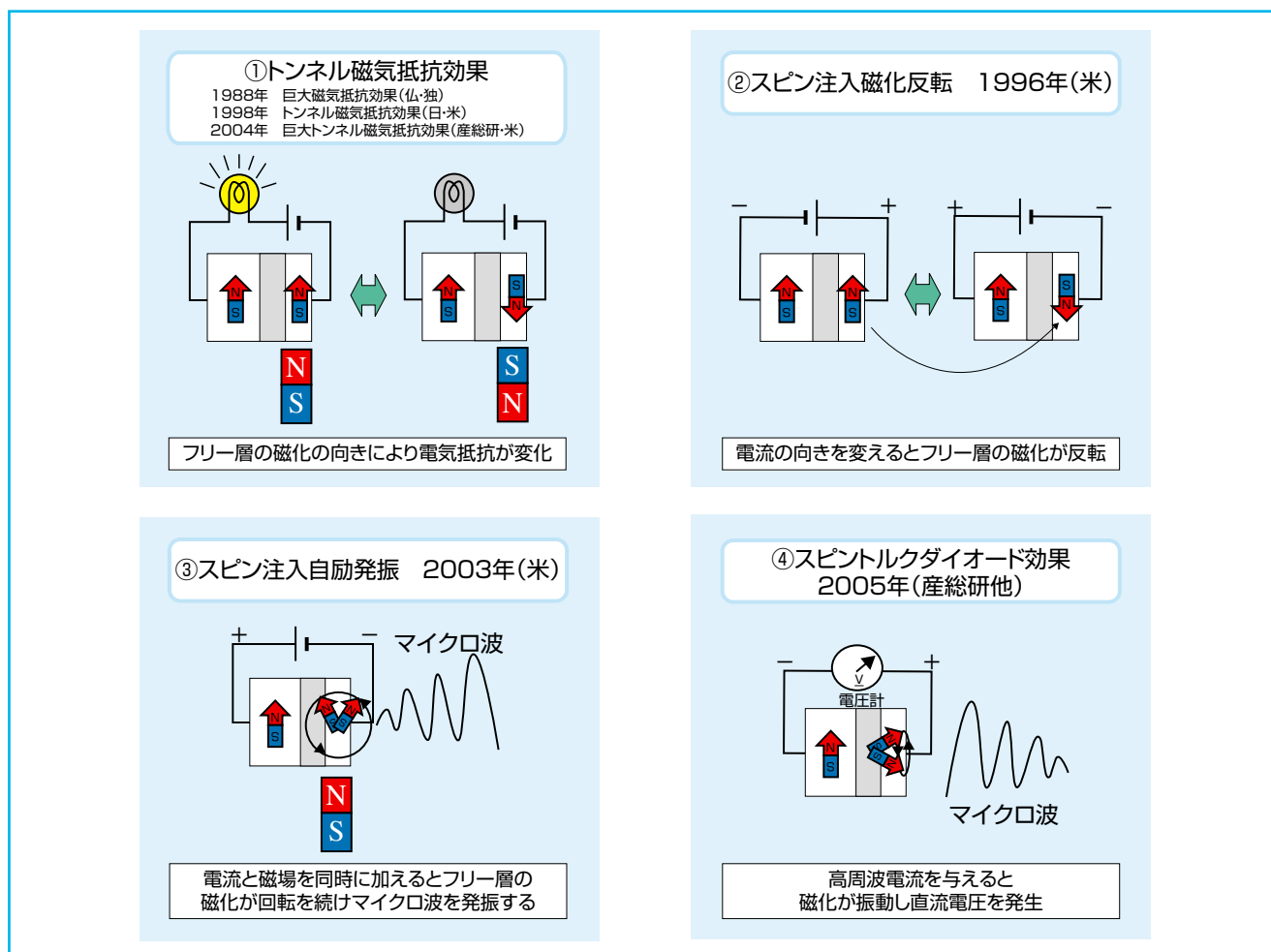


図3 強磁性金属スピントロニクス素子が示す4つの効果

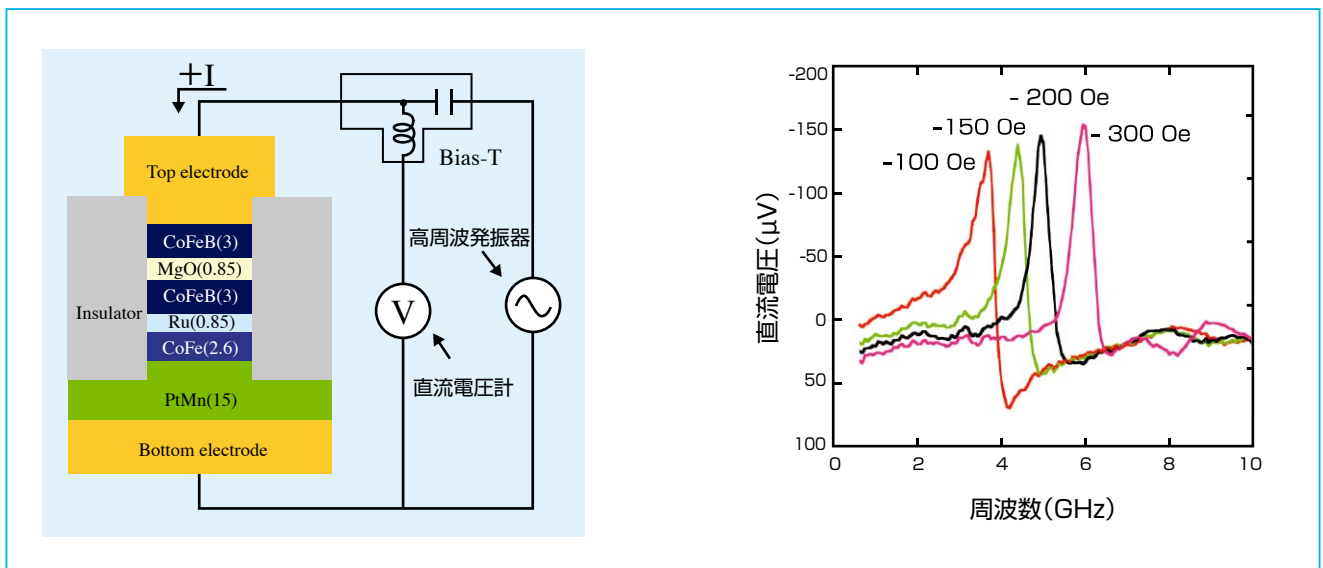


図4 スピントルクダイオード効果を測定する素子と回路（左図）、および測定信号（右図）

左図で、カッコ内の数字は膜厚 (nm) を示す。測定は室温で行い、外部磁場を下部固定磁性層に 30 度傾けて印加した。右図中の -100 Oe などの数字は印加した外部磁場の大きさを表す。

は約 $100\text{nm} \times 200\text{nm}$ の楕円である。高周波発振器はコンデンサを通して高周波電流をトンネル磁気抵抗素子に印加し、電圧計は素子で発生した直流電圧を測定する。また電圧計に高周波電流が流れ込まないようにインダクタンスを設けた。図4右に測定結果を示した。特定の周波数の高周波電流を与えると大きな直流電圧が得られる。

図5にスピントルクダイオード効果の原理を示した。図5(A)においてスピンを伴った電子は素子の下部から上部に向かって通過する。このとき電子は下から上にスピンを伴って流れる。これをスピン流とも呼ぶ。この結果、上部のフリー磁性層の磁化は下部の固定磁性層の磁化と平行になる方向に回転し、磁気抵抗効果により素子の抵抗が小さくなる。

このため電流を流しても素子の両端に現れる電圧は正で小さい。一方、上部から下部に向かって電子が通過すると (図5(B)), 先程とは逆に上部フリー磁性層から右向きスピンが失われていくのでフリー層の磁化は、下部固定磁性層の磁化と反平行になる方向に回転する。その結果、電気抵抗が大きくなり同じ電流に対して大きな負の電圧が素子の両端に発生することになる。高周波電流を素子に流すと(A)および(B)の状態が高速で繰り返すことになる。その結果、平均的に素子両端に負の直流電圧が発生する。これが、整流作用である。

実際には素子に加わる交流電流は小さく磁化の振動も小さい。ところが高周波電流の周波数が素子のフリー磁性層

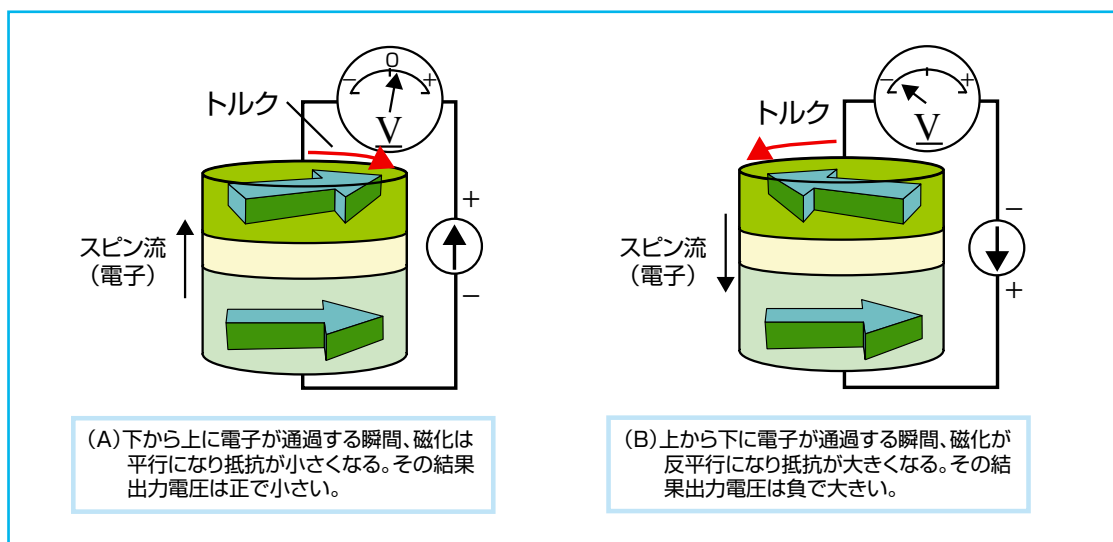


図5 スピントルクダイオード効果の原理

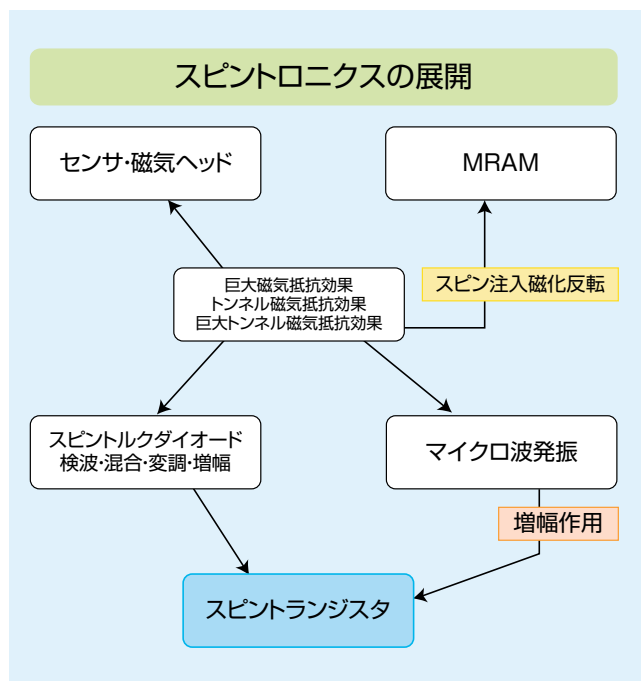


図6 スピントロニクス素子の今後展開

巨大磁気抵抗効果の発見に始まったスピントロニクス素子は、ハード磁気ディスクの読み取りセンサからMRAMさらにはマイクロ波素子へと応用の可能性を拡げている。

の磁化の固有振動数(歳差運動の周波数)と一致すると共鳴して、磁化は激しく振動し、素子の両端には大きな直流電圧が現れる。これが、図4において特定の周波数で大きな電圧が発生した理由である。即ち、スピントルクダイオード効果では高周波は周波数選択的に整流される。

素子に現れる電圧は与えた交流電圧の二乗に比例する(二乗検波)。また、整流出力電圧はスピン注入磁化反転の臨界電圧 V_c が小さいほど大きくなる。 V_c が25mVより小さくなるとスピントルクダイオードの特性は半導体ダイオードを凌駕する可能性がある。現在の V_c は約1ボルトである。

まとめと今後の展開

スピントロニクス素子の今後の展開の概念図を図6に示す。

金属スピントロニクス素子でダイオードができたことの意味は大きい。半導体の場合もそうであったように今後、3端子化ができればトランジスタ動作が期待できる。巨大磁気抵抗素子では既に高周波の発振が起きていることから、原理的には電気信号の増幅が可能と考えられる。強磁性体からできたトランジスタは原理的に増幅率と記録特性を併せ持つため「スピントランジスタ」として、その実現が期待されている。また、2端子素子には、高周波の検波の

他に、発振、混合(周波数変換)、変調、増幅などの機能が期待できる。即ち、スピントロニクスはMRAMやセンサ以外にも高周波応用など新しい応用分野を生み出す可能性がある。

今後は、本素子を使った回路の帰還位相特性(フィードバックの位相特性)を制御することにより増幅作用を実証したいと考えている。さらに、3端子化することにより世界初の室温で増幅率のあるスピントランジスタを実現したい。

関連情報

- 1) A. A. Tulapurkar, Y. Suzuki, A. Fukushima, H. Kubota, H. Maehara, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, N. Watanabe, and S. Yuasa, Nature, 438(2005)339.
- 2) S. Yuasa, A. Fukushima, T. Nagahama, K. Ando, Y. Suzuki, Jpn. J. Appl. Phys., 43 (2004) L588, and S. Yuasa, T. Nagahama, A. Fukushima, Y. Suzuki and K. Ando, Nature Mater. 3 (2004) 868.
- 3) D. D. Djayaprawira, K. Tsunekawa, M. Nagai, H. Maehara, S. Yamagata, N. Watanabe, S. Yuasa, Y. Suzuki and K. Ando, Appl. Phys. Lett., 86(2005) 092502.
- 共同研究者
元産総研・現スタンフォード大: Ashwin Tulapurkar, 産総研エレクトロニクス研究部門: 福島章雄、久保田均、湯浅新治、キヤノンアネルバ: 前原大樹、恒川孝二、David Djayaprawira、渡辺直樹

● 問い合わせ先

独立行政法人 産業技術総合研究所

エレクトロニクス研究部門 (大阪大学大学院基礎工学研究科教授)

客員研究員 鈴木 義茂

E-mail: suzuki-y@mp.es.osaka-u.ac.jp

〒 560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3