

## スピントロニクスへの期待

佐藤 勝昭\*



最近、「日米で次世代半導体 米マイクロンなど 20 社超参加——量産技術、16 年度めどに」という新聞記事を読んだとき、「スピントロニクスはここまでできたか」と感慨ひとしおであった。1960 年代後半、筆者は、電子のもつ電荷とスピンの<sup>2</sup>2つの性質を用いた固体素子を目指し、磁性半導体  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  を研究していた。この磁性半導体は大きな磁気抵抗効果を示したが、キュリー温度が 130 K と低く、実用的なデバイスにはつながらなかった。その後、宗片・大野らが発見した III-V 族系磁性半導体において磁性の電気的制御が実現したが、キュリー温度の低さが実用を阻んでいる。

スピントロニクスの革新的展開は、1988 年 Fert, Grünberg らの磁性金属/非磁性金属ハイブリッド構造における巨大磁気抵抗 (Giant Magneto-Resistance: GMR) 効果によって開かれた。数年のうちに GMR はスピントロニクスとしてハードディスクの高密度化に貢献、人類はコイルを用いずに効率よく、磁気情報を電気信号に変換する手段を得たのである。引き続き、宮崎らにより室温におけるトンネル磁気抵抗 (Tunnel Magneto-Resistance: TMR) 効果が見いだされ、新たな不揮発性メモリ素子 MRAM (Magnetoresistive Random Access Memory) を生むきっかけとなる。さらに、TMR は、 $\text{MgO}$  をトンネル障壁に採用する湯浅らの研究によって大幅な改善が得られ、大きく進展した。

これに次ぐ革新的展開は、スピントランスファートルク (Spin Transfer Torque: STT) を用いた磁化反転現象の理論的予言と実験的検証によりもたらされた。この現象を用いた STT-MRAM は、磁界発生用の電流線が不要であるため、DRAM をしのぐ高密度集積も可能となり、サンプル出荷にまで至った。ついに人類は、コイルなしに電気信号を磁気情報へ変換する道を手にしたのである。

これまで、スピンの流れは電荷の流れに付随するものであったが、電荷の流れを伴わない純粋のスピンの存在が理論予測され、ここ 10 年ほどの間に実験的に検証された。純粋スピン流を用いれば、ジュール熱を伴わずに情報を伝送できるので、集積回路の高密度化・微細化による金属配線によるエネルギー散逸の問題を解決できるものと期待されている。このスピン流の発生と検出には、スピンホール効果、逆スピンホール効果の理論と実験的検証が大きく寄与した。これらの効果には、ベリー位相の概念がバックにあり、固体の中に宇宙論が成立するとされる。熱スピン流によるスピンゼーバック効果の発見、スピン波の運ぶスピン流、さらには、スピン波とフォノンの相互作用、トポロジカル絶縁体など、スピントロニクスのベースとなる学理は大きく飛躍しつつある。また最近、STT とは異なる原理を用いて電流の代わりに電圧を用いて磁気を制御する道も開かれつつある。

スピントロニクスにおいては日本人研究者の活躍が目覚ましいが、スピンに関する科学・技術研究は、我が国において<sup>とくとう</sup>湧々たる地下水脈が流れる数少ない領域の 1 つである。この特集をきっかけに、若い研究者がこの分野にどんどん参画し、思いもかけない発見とイノベーションがもたらされることを強く期待している。

\* (独) 科学技術振興機構 研究広報主監

# Expectations for spintronics

Katsuaki SATO\*

Recently, I read an article stating that, "Mass production technology for the next generation of semiconductors may be possible by 2016 in the United States and Japan, with the participation of over 20 manufacturers, including Micron U.S." I was deeply moved that "the journey of spintronics had reached this level." During the latter half of the 1960s, the author was studying about the magnetic semiconductor  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$ , in order to realize a solid-state device that took advantage of two characteristics of the electron, which were its electric charge and its spin. Although this magnetic semiconductor demonstrated a great magnetic resistance effect, its Curie temperature was a low of 130K, and it wasn't leading to a practical device. Later, electric control of the magnetic properties was realized using the diluted III-V magnetic semiconductors discovered by Munekata and Ohno, et al., however, they were not being put into practical use due to their low Curie temperature.

The innovative development of spintronics had its gates opened in 1988, with the Giant Magnetoresistance Effect (GMR) of the magnetic metal/nonmagnetic metal hybrid structure by Fert and Grünberg, et al. Over a few years, the GMR contributed to the increase in the density of the hard disc as a spin valve, and humanity obtained a means to efficiently convert magnetic information into electric signals without using a coil. After that, Miyazaki et al., discovered the Tunnel Magnetoresistance Effect (TMR) at room temperature, providing an opportunity for the birth of non-volatile memory devices, MRAM (Magnetoresistive Random-Access Memory.) Furthermore, the TMR was significantly improved and it greatly advanced due to the study by Yuasa et al., in which MgO was employed as the tunnel barrier.

The next innovative development was brought on by a theoretical prediction and an empirical validation of the magnetization reversal phenomena that uses Spin-Transfer Torque (STT). The STT-MRAM that utilizes this

phenomenon doesn't require any electric current wires for generating a magnetic field, allowing for a high-density integration that is more than DRAM, and finally, a sample was able to be released to the market. At last, humanity had obtained a way to convert electric signals into magnetic information without a coil.

Up to that point, the spin current had been something that accompanied the electric charge current, but then a theoretical prediction of the existence of a pure spin current that wasn't accompanied by the electric charge current was made, and it has been empirically validated in the last 10 years. Using the pure flow of spin allows information transmission without having Joule heat, so the expectation is that this can solve the issues of energy dissipation from the metal wire of high-density, minute integrated circuits.

Theory and its empirical validation of the spin Hall effect and inverse spin Hall effect greatly contributed to the generation and detection of this spin current. These effects are based on the concept of Berry's phase and it is assumed that a cosmology can be established in solid matter. Furthermore, theories that are the basis of spintronics, such as the discovery of the spin Seebeck effect with the thermal spin current, the spin current carried by a spin wave, the interaction between the spin current and phonons, and topological insulators, are experiencing a great leap forward. In addition, recently, a path to control the magnetic properties by using an electric voltage instead of an electric current using a principle that is different from the STT, is about to open up.

In the field of spintronics, Japanese researchers are taking a remarkably active role. Scientific and technological research on spin is one of the very few fields where we have a calm yet powerful ground water flow in our country, Japan. I strongly hope this March issue opens opportunities for young researchers to actively participate in this field and bring unexpected discoveries and innovations.

\* Supervisor of Research Publications, Japan Science and Technology Agency (JST)