

半導体における強磁性の研究

東北大学 電気通信研究所 教授

大野英男



研究の背景

今日の電子工学は半導体と磁性体によって支えられています。これらは別々に使われてきましたが、半導体の世界と磁性体の世界に橋を架けることにより、新しい世界が拓かれます。これは電子のもつ電荷だけではなく磁性の元となるスピンの特性を利用するためスピントロニクスと呼ばれ、これまでなかった全く新しい現象や素材を開発したり応用したりする研究分野です。我々の研究では、両者を物質レベルで融合し、磁性を持つ半導体を作成することに成功しました。また、不揮発性の磁性素子と半導体集積回路を素子レベルで融合し、これまで不可能であった待機電力がゼロという画期的な集積回路の基盤技術を構築しつつあります。ここでは、基礎的研究である前者の「磁性体であり半導体である物質」を創成した研究についてご紹介します。

研究の成果

ヒ化ガリウム (GaAs) やインジウムヒ素 (InAs) などの磁性を帯びないIII-V族化合物半導体は高速トランジスタやレーザに使われています。これに磁性不純物であるマンガン (Mn) を高い濃度まで添加したところ、自然界にはない強磁性を示す半導体ができることを発見しました。普通の半導体が磁石にもなることが示されたのです。そしてこの現象は半導体において電子が不足した状態であるキャリアの濃度によって、強磁性相互作用が決まるということを理論的に明らかにしました。これをキャリア誘起強磁性といいます。

その後、電界 (電圧がかかっている空間の状態) によりキャリア濃度を増減させられる電界効果素子構造を用いて、強磁性半導体中のキャリア濃度を変化させ、同じ温度のまま強磁性-常磁性相転移をどちらの方向にも転移できる電界制御を実現しました (図1)。また保磁力や磁化ベクトルの方向も電界で制御できることを示しました (図2)。磁性体の磁気的性質を、温度を変えずに可逆的に変化させたのです。これは、磁石が初めて文献に登場する紀元前5世紀のギリシャから現在に至る長い磁性体の歴史上で、初めて実現した現象です。

これ以外にも強磁性半導体と非磁性半導体を組み合わせた構造に電流を流すことにより、非磁性半導体へスピンを注入できることを示しました。電流は電荷の流れですが、これに加えて強磁性体からはスピンの流れを示したのです。また、強磁性半導体において、磁区と磁区の境界である磁壁が電流と共に移動することを示しました。これは電流と共にスピンの流れが流れるために起こる現象です。この現象を用いた高速のメモリ素子の研究が進んでいます。

今後の展望

普通の半導体を磁石にしたことから、半導体物理・工学の分野に新しい軸を加えることになりました。しかし強磁性半導体に見られるキャリア誘起強磁性、金属-半導体転移、異常ホール効果などの多くの基礎的現象の理解はまだ不完全です。また転移温度が室温より低いため、まだ製品等に適用することができません。これらの課題を解決すべく、我々は今も研究を続けています。

一方、これらの一連の研究に刺激され、金属磁性体における磁性の電界制御や、電気的な磁化方向スイッチングについて研究されるようになってきました。基礎的な研究から省エネルギーの電界による磁化スイッチングという新しい技術が生まれようとしています。自らが示した新しい概念が世界に広がっていくのは、基礎的研究の醍醐味と言えましょう。

関連する科研費

平成9-11年度 重点領域研究 (スピン制御による半導体超構造の新展開) 「スピン制御された半導体超構造の電子物性と応用」

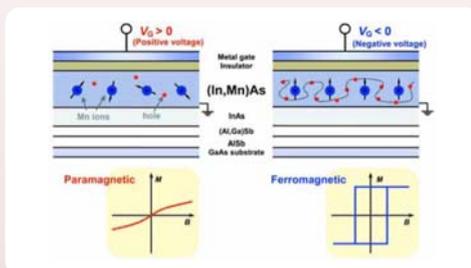


図1 電界を印加して強磁性半導体 (In,Mn)As 中のキャリア (正孔) を増減させることにより、等温・可逆的に強磁性相をオン・オフした。

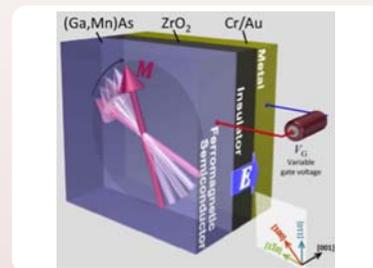


図2 電界を印加して強磁性半導体 (Ga,Mn)As 中のキャリア (正孔) を増減させることにより、磁化方向を制御した。

(記事制作協力: 日本科学未来館科学コミュニケーター 五十嵐海央)