

半導体系スピントロニクス素子における伝導現象 スピントランジスタの実現に道を拓く

強磁性電極層に (Ga,Mn) As、トンネル障壁に ZnSe といういずれも半導体膜材料を用いた単結晶 TMR (トンネル磁気抵抗: Tunneling Magneto-Resistance) 素子を開発し、電荷キャリアの持つスピンによる伝導現象を詳細に調べた。その結果、(i) 金属系の TMR 素子と同様に、大きな TMR 効果が得られること、(ii) 金属系 TMR 素子には見られない、半導体の正孔 (ホール) の特徴を反映した異方的 TMR 効果が発生することが明らかになった。この成果は、半導体系スピントロニクス素子におけるスピン情報の保存と伝搬を実証するもので、基礎的に重要な意味を持つだけでなく、半導体系スピントロニクス素子の実現に道を拓くものである。

Novel TMR (Tunneling Magneto-Resistance) devices composed of single-crystalline film semiconductors with (Ga,Mn)As for ferromagnetic electrodes and ZnSe for tunnel barrier, were developed. The spin-dependent transport properties of the TMR devices were studied in detail. It has been confirmed with the semiconductor-based TMR devices that (i) large TMR effects can be obtained just like with the metal-based TMR devices, and (ii) anisotropic TMR effects reflecting hole characteristics of semiconductors can be demonstrated in contrast to the metal-based TMR devices. The results verify holding and transfer of spin information in semiconductor spintronic devices. This research will open the way to realization of spin transistors.

スピントロニクス素子の現状

今日の情報通信技術は、ハードディスクに代表される磁気デバイスと、トランジスタや LSI に代表される半導体デバイスを使用することによって成り立っている。それに対して、電子のスピンを利用する磁気デバイス技術と、電子の電荷を利用する半導体デバイス技術は、これまで全く別物として開発されてきた。近年それぞれのデバイス技術が成熟度を高めた結果、性能の限界の壁にぶつかりつつある。この問題を解決するために、電子の電荷とスピンの両方の性質を同時に取り入れ、その相乗効果を利用して新しい機能をもつ素子を実現しようとするスピントロニクス技術が注目されてきた。

スピントロニクス素子の代表例が TMR (トンネル磁気抵抗: Tunneling Magneto-Resistance) 素子である。TMR

素子は非常に薄い絶縁層膜と 2 つの強磁性電極膜から構成される。2 つの強磁性電極の磁化の向きが平行の場合は電流が流れやすく、反平行の場合は流れにくくなる (図 1、2)。2004 年度、産総研では、金属強磁性体の電極と酸化マグネシウム (MgO) からなるトンネル障壁層を組み合わせた画期的な TMR 素子を開発した。この金属系スピントロニクス素子は、すでに DRAM (Dynamic Random Access Memory) に代わる大容量・高速で、不揮発性を兼ね備えたメモリである MRAM (magnetic random access memory) や、超高密度ハードディスクの実現に向けた応用研究が企業で行われる段階になっている。

半導体系スピントロニクス素子の問題点

TMR 素子に代表されるスピントロニクス素子は、これ

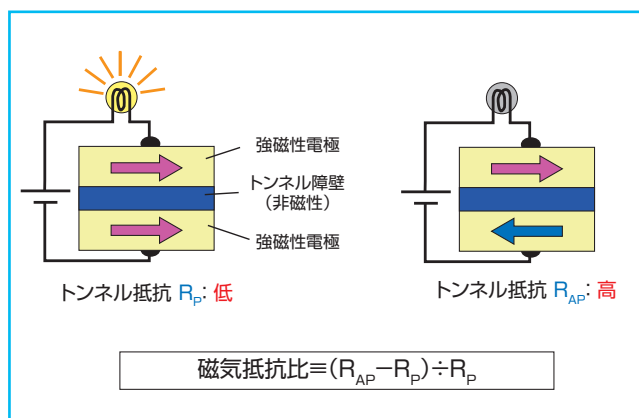


図 1 TMR 素子の磁気抵抗効果

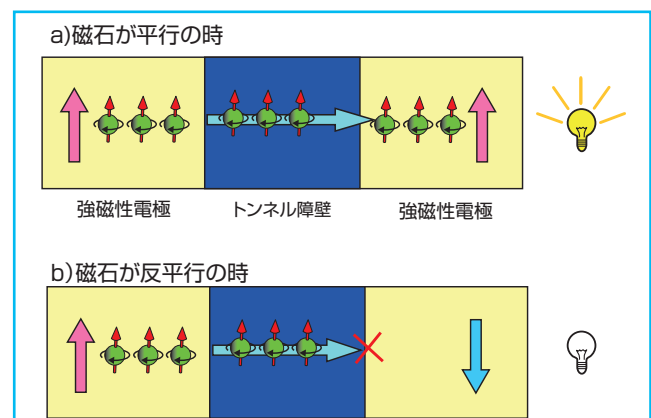


図 2 TMR 効果の原理

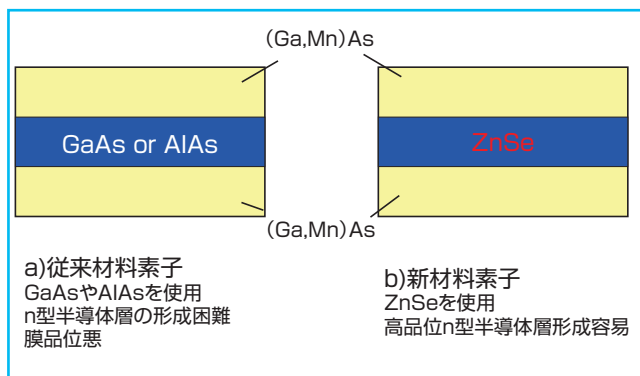


図3 従来材料および新材料半導体 TMR 素子

まで金属強磁性体を用いることにより発展してきた。その大きな理由は、長年の研究の蓄積により、金属強磁性体中のスピン情報の保持と伝搬の機構が良く理解されているためである。金属スピントロニクス素子の成功を背景に、近年、半導体材料を用いたスピントロニクス素子の可能性が注目を集めるようになってきた。金属系スピントロニクス素子では困難な、トランジスタ機能などの半導体機能を併せ持つ、より高度な新機能素子の実現が期待されるからである。現在のMRAMでは、記憶部(金属系TMR素子)と素子選択機能(シリコン系トランジスタ)の分離が必要だが、スピントランジスタが実現すれば、これらを一体化した超大容量の不揮発性メモリや、高機能モバイル機器に必要な不揮発性の論理素子などができるものと期待されている。

半導体スピントロニクス素子を実現するには、(a) 室温で強磁性をもつ半導体材料の開発、(b) 金属系スピントロニクス素子と同様のスピンの保持と伝搬の実現、(c) 強磁性p-n-p接合の3条件が必要である。このうち、(a) に関しては、すでに産総研が2003年にテルル化亜鉛(ZnTe)に磁性遷移金属であるクロム(Cr)を添加した(Zn,Cr)Teの開発に成功している。この材料は室温で強磁性を示す世界初の半導体である。(b) の条件を達成するために、強磁性半導体を電極に用いた全て半導体物質で構成されるTMR素子の研究が各機関で行われている。

しかしながら、これら強磁性半導体物質を用いたTMR素子の研究は、これまで混沌としていた。電極の相対的な磁化方向によって抵抗値が変化するTMR効果(図1)が出現するには、図2に示したように中間の非磁性トンネル層を通過する電子がスピンの向きの情報を保持したまま伝搬していくことが必要である。しかし、半導体中の電子は、金属中の電子に比べて、電子と正孔(ホール)と呼ばれる2種

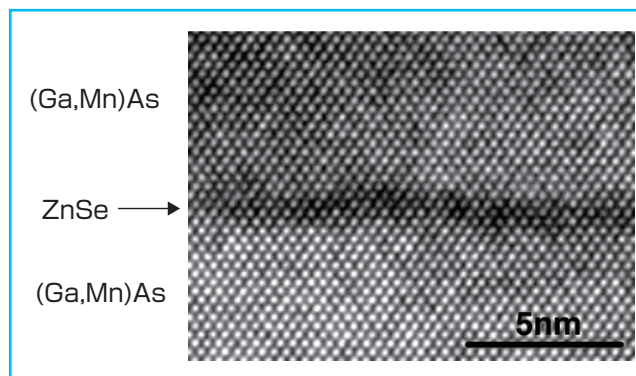


図4 断面電子顕微鏡写真

類のキャリアをもつ、半導体デバイスの基本となるp-n接合界面に空乏層と呼ばれるキャリアがほとんど存在しない領域が形成されるなど、複雑な性質を持っている。特に、空乏層を介したスピン情報の保持・伝搬は難しいと考えられていた。強磁性半導体では、多量のキャリアの存在が強磁性の発生に不可欠と考えられているため、空乏層では強磁性が消失する恐れ(スピンの偏りが無い状態)があるからである。そのため、半導体系TMR素子において、はたしてキャリアがスピンの情報を保持したままトンネル障壁を通過できるかどうか、世界的な論争が繰り返されてきた。さらに、従来、半導体トンネル障壁として用いられてきた材料では、(c) の条件を満たすことができないという根本的な問題も抱えていた。

以上のような半導体系スピントロニクス素子を実現するための基本的な問題点の解決を目指して、今回、産総研では以下に説明するような新型の半導体TMR素子を開発し、そのスピンに依存する伝導特性を詳細に解明した。

3つの成果

(1) すべて半導体材料から構成された新型トンネル磁気抵抗(TMR)素子の開発に成功

(Ga,Mn)Asは半導体物質としては電気を良く通す性質を持つとともに、高品位の結晶が得やすいことから、強磁性半導体の標準物質とみなされている材料である。今回、強磁性半導体電極としてこの(Ga,Mn)Asを採用した。この(Ga,Mn)Asを用いたTMR素子の研究は従来から行われているが、そのトンネル障壁層としてはこれまで、(Ga,Mn)Asと同じIII-V族半導体のGaAsもしくはAlAsが用いられてきた。

しかし、これらの材料で良質の薄膜を得るために必要

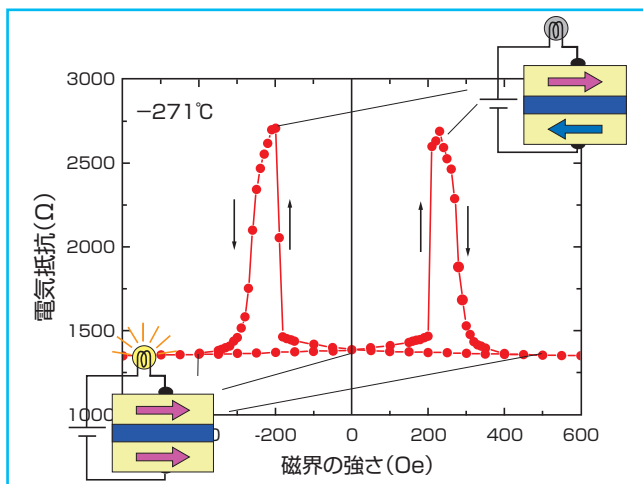


図5 新型素子のTMR効果

な成長温度は (Ga,Mn) As と比べてはるかに高く (500℃～600℃)、(Ga,Mn) As 電極上に重ねて成長させると (Ga,Mn) As 電極自体が壊れてしまうという問題があった。そのため、無理やり温度を下げて (Ga,Mn) As 電極上に GaAs や AlAs を成長していた。このようにして作製されたトンネル障壁の品位は極めて低く、良質の TMR 素子の作製が困難であるとともに、半導体としての重要な特徴である p 型、n 型へのドーピングも出来なかった。

今回、産総研ではトンネル障壁として新たに II-VI 族の半導体であるセレン化亜鉛 (ZnSe) を採用した (図3)。その理由は、ZnSe の最適成長温度が (Ga,Mn) As と同じ程度であるため、(Ga,Mn) As と組み合わせて高品位の TMR 素子が作製できると考えたからである。また、ZnSe は n 型になりやすい半導体材料であるため、p 型の (Ga,Mn) As と組み合わせることにより、将来的に、半導体素子の基本構造である p-n-p 接合の作製が可能になるという利点も併せ持っているためである。ただし、ZnSe を TMR 素子の構成材料として用いた例はほとんどなく、その有効性は未知数であった。そこで、半導体膜作製装置の高性能化を図り、試料作製技術の高度化を徹底して進め、磁気抵抗素子の開発を行った。

良好な磁気抵抗特性を得るには、素子を構成する薄膜すべてが単結晶であり、かつ、接合界面が平坦なことが重要である。そこで、試料作製には高品位の膜が得られる分子線エピタキシー法を用いた。酸化を防ぐため、試料は一貫して超高真空中で作製した。図4は作製した試料断面の透過電子顕微鏡写真である。素子の ZnSe 層の厚さは 1nm である。ZnSe 層と上下の (Ga,Mn)As 層はともに単結晶であり、接合界面が平坦になっていることが確認できる。

(2) スピン情報の保持と伝搬のメカニズムを解明

今回、強磁性電極に用いた (Ga,Mn) As は -160℃ 以下の

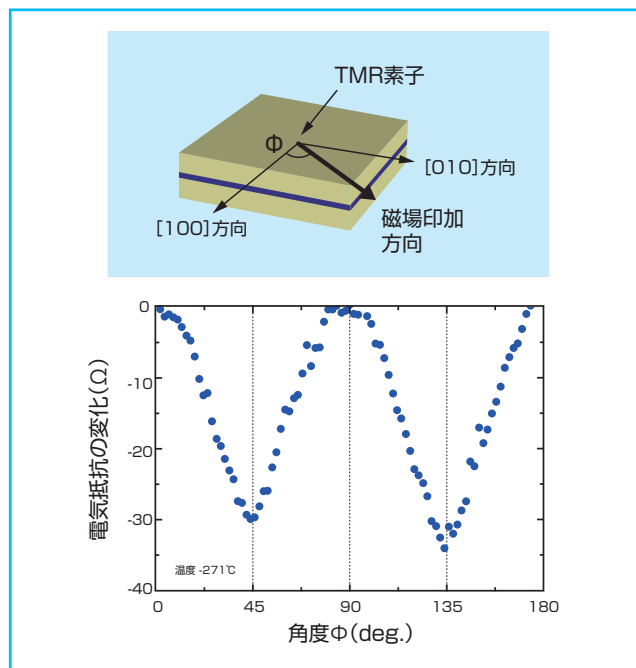


図6 異方性TMR効果

温度でしか強磁性にならないため、電気伝導特性は -271℃ の低温で評価した。TMR 素子の電流-電圧特性を解析した結果、ZnSe と (Ga,Mn) As の界面の近くに 1 nm ほどキャリアが存在しない空乏層の形成が確認された。これは n 型 ZnSe と p 型 (Ga,Mn) As の組み合わせを反映したものと考えられる。

TMR 素子に外部から磁場をかけて、2つの (Ga,Mn) As 電極の磁化の方向をお互いに平行または反平行にし、電気抵抗の大きさの変化 (すなわち磁気抵抗) を調べた。その結果、図5に示すように、今回作製した TMR 素子は、磁化方向により、抵抗値が2倍も変化する (磁気抵抗 (MR) 比 100% に相当) ことがわかった。このことは、素子の内部で、電荷を運ぶ電子が持つスピンの情報 (上向き、下向き) が保持されながら、一方の電極から他方の電極へ伝搬していることを示すものである。このように、今回の実験により、半導体材料で構成され、空乏層がある半導体素子に特有の電子状態においても、金属系のスピントロニクス素子と同様に、スピンの情報を保持したまま電子を伝搬させられることが明確に示された。

また、従来の金属系の TMR 素子では観察されなかった新しい現象も見出された。図6はその現象を捉えたものである。これは、強い磁場をかけて2つの強磁性層の磁化方向を平行に固定したまま、試料を回転させて、電気抵抗の変化を観測したものである。このような測定条件では、当然、通常の TMR 効果は発現しない。すなわち、素子の電気抵抗に変化は見られないはずである。それにもかかわらず、素子の電気抵抗は特定の結晶方向に磁場をかけたときに高く (あるいは低く) なっている。これは、「異方性

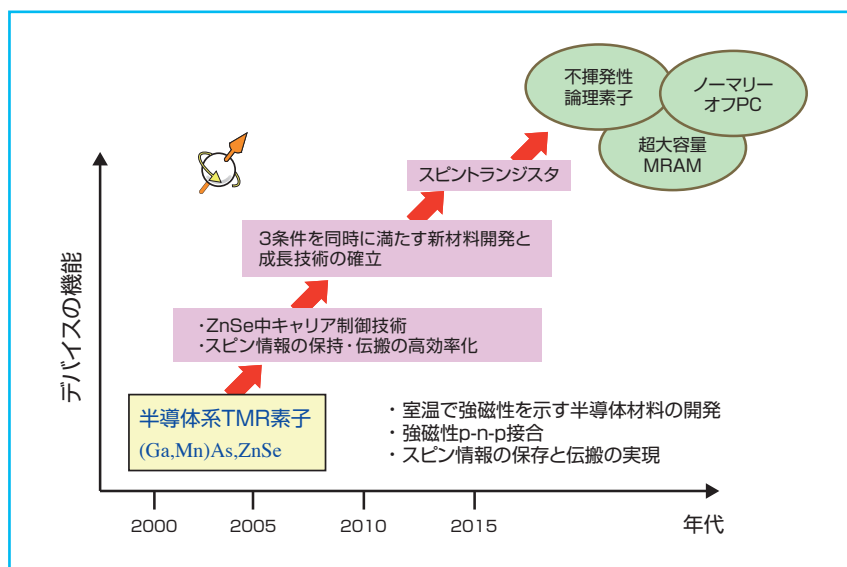


図7 今後の展開と期待される半導体スピントロクスデバイス

TMR効果」と呼ばれる、正孔によって電気伝導する半導体系TMR素子に固有の現象で、通常のTMR効果とは発生原理が全く異なるものである。観測された異方性TMR効果による電気抵抗の変化は、図5で示したTMR効果のそれと比較して約1/40程度と非常に小さかった。従来の半導体TMR素子の研究では、これら2つの効果が分離されていなかったために、実際に金属系のスピントロクス素子のような通常のTMR効果を利用した素子の作製が可能かどうか論争になっていたのである。素子の作製が分離したことで理論的に可能であることが示された。

(3) スピントランジスタの開発につながる成果

今回の成果は、学術的に重要な意義を持つばかりでなく、半導体スピントロクス素子の実現に大きく寄与するものである。これまで、半導体スピントロクス素子の実現に必要な3つの条件のうち、「スピンの保持と伝搬の実現」と「強磁性p-n-p接合」が未解決であった。今回の成果は、n型半導体ZnSeの有効性と重要性、空乏層を介してもスピン情報の保存・伝搬が可能であることを示した点で、2つの課題が解決できることを初めて示したものである。もう1つの条件である「室温で強磁性を示す半導体材料の開発」は、すでに産総研で強磁性転移温度が室温に達する(Zn,Cr)Teの開発に成功している。現在、まだ(Ga,Mn)Asほどの高品位の薄膜はできていないが、その解決を目指して研究を行っている。このように、現状では、3つの課題を個別に取り扱っている状態だが、さらに材料探索をし、結晶成長技術を確立してこれらの課題を同時に解決できれば、それは不揮発性論理素子などの心臓部となるスピントランジスタの開発につながるものと期待される。

これからの展開

図7に今後の研究展開とスピントランジスタの実現により期待される半導体スピントロクスデバイスを示す。今回の成果を踏まえ、現在のところZnSe層への電子ドーピングによるキャリア制御技術と、更なるスピン情報の保持・伝搬の効率化に取り組んでいる。これにより、素子性能を劣化させることなく、ZnSe層の膜厚をトランジスタ化に必要と考えられる数百nm程度まで増加させる。その上で低温でしか強磁性にならない(Ga,Mn)Asの代わりに、室温でも強磁性を示す(Zn,Cr)Te等の新材料を用いたスピントランジスタ素子の開発にも取り組んでいく。その際、必要に応じて新しい強磁性半導体材料開発も行う。以上の研究を通して、スピントランジスタ実現に必要な3つの条件を総合的に解決することにより、室温で動作可能なスピントランジスタを開発し、不揮発性論理素子やノーマリー・オフ・コンピュータ(究極の省エネルギーコンピュータ)等の実現を図る。

用語解説

◆スピントランジスタ

通常のトランジスタに強磁性の不揮発性を付加させた素子。スピントロクス分野における最終目標となる素子の一つ。不揮発性論理素子や超大容量不揮発メモリに必要。現在、世界中で研究開発が行われている。

・関連情報

●米国物理学会発行のPhysical Review Letters誌の2005年8月19日号に掲載された。

●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 スピントロクスグループ

研究員 齋藤 秀和

E-mail: h-saitoh@aist.go.jp

〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第2