



東北大学

2014年3月7日
東北大学大学院工学研究科

半導体中のスピン検出感度を40倍に増幅成功

本研究のポイント

- ◆ 半導体スピン検出において謎であった巨大信号の起源を解明
- ◆ バイアス電圧によりスピン情報を増幅し電気信号への変換を実現
- ◆ 新機能スピントロニクスデバイス開拓への期待
- ◆ スピン増幅実現に向けた要素技術を構築

東北大学大学院工学研究科博士課程後期3年塩貝純一（日本学術振興会特別研究員）、好田誠准教授、新田淳作教授の研究グループは、東北大学金属材料研究所野島勉准教授、ドイツ・レーゲンスブルグ大学 Dieter Weiss 教授らの研究グループとの共同研究により、独自のスピンエサキトンネル接合素子を作製し、半導体を流れる電子スピンの検出感度を従来よりも最大約40倍まで増幅させることに成功しました。この結果は、スピントロニクスの分野にスピン信号増幅というこれまでになかった機能を付加することとなり、スピン情報の高感度電気検出など新たなスピントロニクスデバイスへの展開が期待できます。

これまで、シリコン Si やゲルマニウム Ge 等の IV 族半導体をチャネル材料としたスピントロニクスデバイスにおけるスピン検出に関する研究において、スピン蓄積があると仮定したときの理論予想よりもスピン信号がはるかに大きい値を示しており、この異常信号の起源が分かっていませんでした。このことから、これらの実験で得られた信号が半導体中に蓄積したスピン信号であるかどうかということが疑問視されていました。

本研究では、強磁性半導体ガリウムマンガンヒ素(Ga,Mn)As と非磁性半導体ガリウムヒ素 GaAs のヘテロ接合が形成するスピンエサキダイオード構造を用いることにより、半導体中のスピン流を検出する際の異常に大きい電子信号の起源を解明し、スピン検出感度を最大約40倍まで増幅することに成功しました。

本研究の知見を応用し、最適な強磁性と半導体界面を設計することにより、さらなるスピン信号の増幅ができると考えられます。本研究の成果は2014年2月15日米国物理学会誌 Physical Review B の速報版(Rapid Communications)に掲載されました。

1. 研究の背景と経緯

電子のもつスピンの性質を電子デバイスに組み込むことにより、従来のエレクトロニクスデバイスを超えるような性能をもつデバイスの開発を目指す半導体スピントロニクス分野¹⁾が注目されています。この分野における基盤技術として、半導体へのスピン注入(半導体中のスピンを揃える操作)、スピン制御(半導体中でスピンの方向を回す操作)、スピン検出(電氣的にスピンの情報を読み出す操作)が挙げられます。また、これまで実現されていない技術として、半導体中のスピン信号を増幅すること(スピン増幅)があります。これらを全て電氣的に高効率に行うことが全スピン集積回路を構築する上で重要とされています。

これまで半導体中のスピン注入及びスピン検出に関する研究は、GaAs 等の III-V 族半導体や Si や Ge 等の IV 族半導体をチャネル材料としたスピントロニクスデバイスにおいて行われてきました。特に、IV 族半導体においては、従来のエレクトロニクスデバイスと非常に整合性が良いことから、半導体スピントロニクスにおいても Si へのスピン注入が注目されています。しかしながら、電氣的な手法を用いた Si や Ge などへのスピン注入及びその検出においては、スピンが実際に蓄積されていると仮定した場合の理論値よりも 2 ~ 3 桁程大きな電気信号が得られており、これが真のスピン蓄積信号であるかどうか疑問視されているため、Si のスピン蓄積・検出技術における未解決の課題として残されていました。

一方、スピン増幅はスピン集積回路構築に関して新たな機能を付加する可能性があるだけでなく、微小なスピン蓄積を高感度に検出する技術となりうるということが考えられ、これまでの材料以外へのスピン注入実験への応用が期待できます。

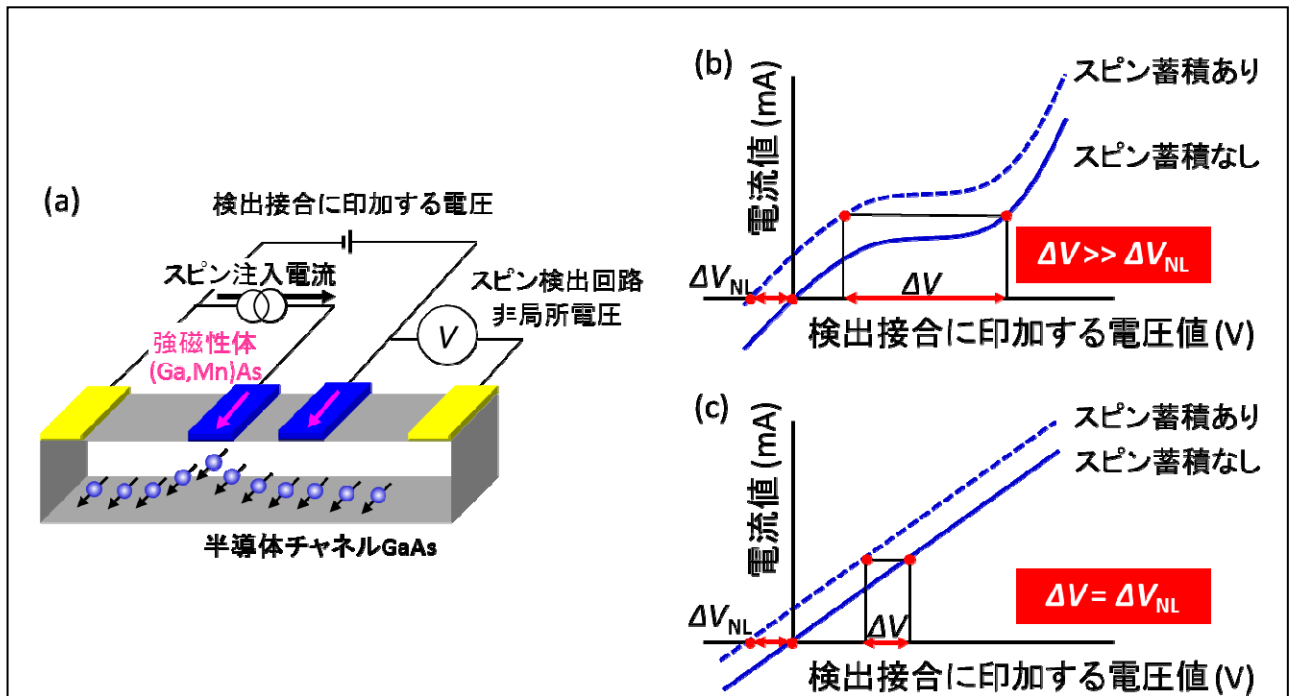


図 1. (a) スピン注入素子におけるスピン信号の測定配置。検出電極に電圧を印加する場合。(b) 検出電極における電流-電圧特性。実線はスピン蓄積が無いとき。点線はスピン蓄積の影響で電流-電圧特性がシフトしている。検出接合に電圧を印加していないときはスピン蓄積信号を ΔV_{NL} として測定する。非オーミック性が強いところでは ΔV として電気検出する。(c) 完全にオーミック性を保った一般的な接合の場合。この場合、スピン蓄積信号は電圧に依存性せず、増幅効果は得られない。

2. 研究成果の概要

本研究では、強磁性半導体(Ga,Mn)As²⁾と非磁性半導体 GaAs の接合が作るスピンスキューダイオード構造³⁾をスピン注入・検出電極として利用しました。(Ga,Mn)As は p 型半導体と磁石(強磁性体)の両方の性質を持つスピントロニクス材料です。 n 型半導体 GaAs との接合をすることで、(Ga,Mn)As の価電子帯から GaAs の伝導帯へのバンド間トンネル効果により、高効率にスピンを注入・検出できると期待されています。このような材料において、 n 型 GaAs へのスピン蓄積を電氣的に検出する実験を行いました。

図 1(a)にスピン注入素子と電気検出の測定配置を示します。左側の強磁性体電極から半導体へ電流を流すと下の半導体チャンネルにスピンが蓄積されます(**スピン注入**)。蓄積されたスピンは半導体中を流れ(**スピン輸送**)、右側の強磁性体へ到達します。この時、右側の強磁性電極の電圧を測定すると、スピンの蓄積量に比例した電圧が発生します(**スピン検出**)。検出接合に印加する電圧はスピン検出感度を制御するために印加しています。スピン検出感度はスピンの蓄積量を電圧測定する際の変換係数として定義されます。スピン検出感度が高ければ大きなスピン電気信号が得られることとなります。

図 1(b)に示すものは検出電極における電流-電圧特性です。スピン蓄積があるときは無いときに比べて電流-電圧特性がシフトするため、その差を電圧として検出することにより、スピン情報を電氣的に読みだすことが出来ます。低電圧におけるオーミック性があるところでは ΔV_{NL} 、非オーミック性⁴⁾が強いところでは ΔV をスピン電気信号として検出されます。このため、非オーミック性が強いと大きなスピン信号が得られることが期待できます(**スピン増幅**)。ここでオーミック性は接合の電流-電圧特性のどれだけ直線性があるかという性質です。一方、オーミック性が保たれている検出電極の場合、図 1(c)のようになり、増幅効果は得られません。

図 2 にスピンスキューダイオード検出電極の電流-電圧特性、そこから計算したオーミック性、及び得られたスピン増幅効果の検出電極に印加する電圧依存性を示します。ここで、オーミック性は接合の微分抵抗値(dR)と抵抗値(R)の比(dR/R 値)で評価しています。オーミック接合であれば $dR/R=1$ となりますが、大きなエネルギー障壁等により電流が流れにくくなると、 $dR/R > 1$ となります。また、スピン信号の増幅率は実験値と接合がオーミックであると仮定したときに期待できるスピン信号の比として定義しています。スピンスキューダイオード構造においては、正のバイアスを印加して図中領域(i)から同領域(ii)に変わりにしたがって、バンド間トンネルによる電流が抑制されて電流が流れにくくなるため、直線的な電流-電圧特性が得られず、 dR/R 値が大きくなり、非オーミック性が強くなります。図 2(c)で実際に測定した増幅率を示します。低バイアス領域(図中オーミック領域)で $dR/R \approx 1$ であり、観測された増幅率は約 1 と一定で、大きな増幅を示しません。一方で、0.3~0.4 V 付近(同非オーミック領域)の dR/R 値が大きくなる領域でスピン信号が増大しており、 dR/R 値が最大のところで、約 40 倍の信号増幅ができていくことが分かります。本研究で得られた知見は非オーミック性が強いスピンスキュー構造を用いることで初めて得られた成果です。

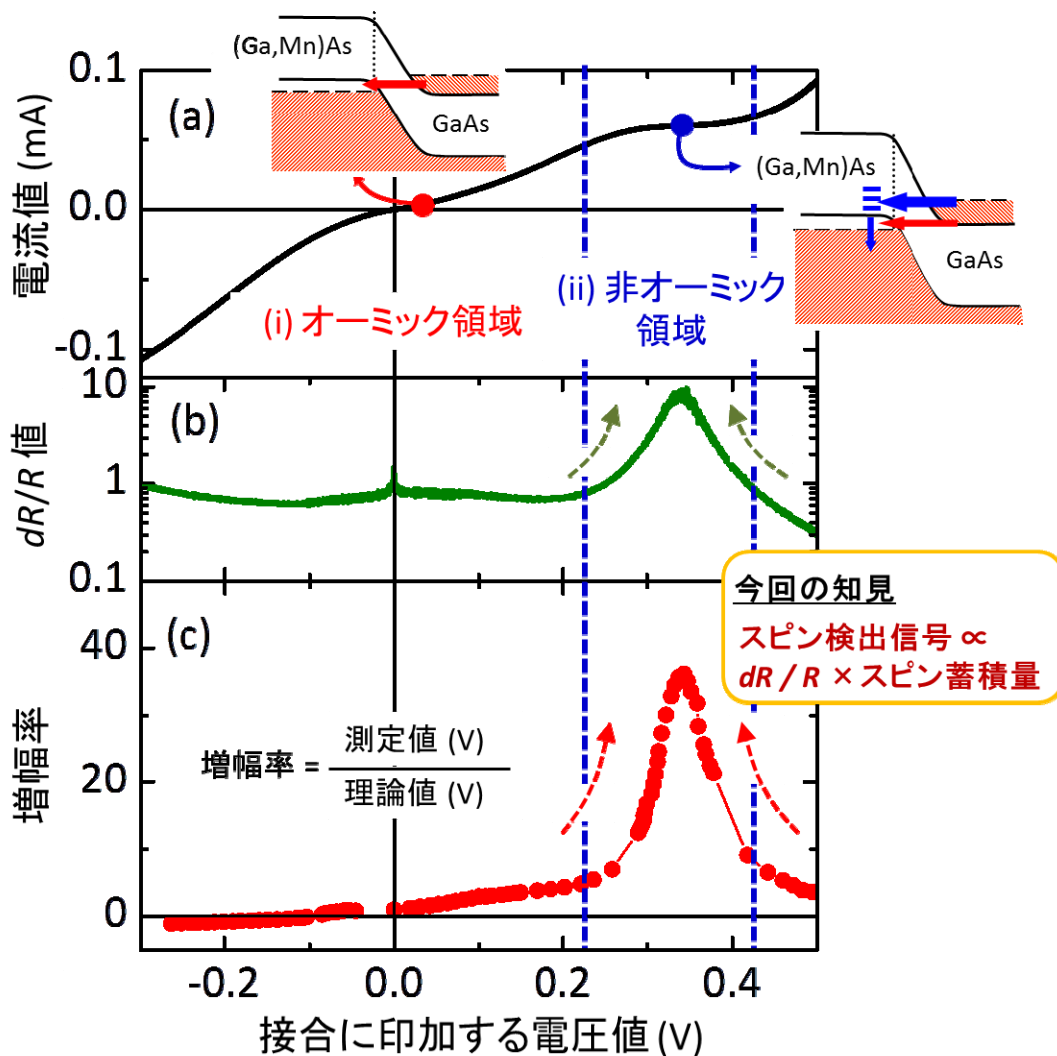


図 2. (a) 本研究で用いたスピンエサキダイオード構造の電流-電圧特性。挿入図は各バイアス領域におけるトンネル電流の様子をエネルギー図で表したもの。(b) 電流-電圧特性から計算した接合のオーミック性 (dR/R 値)の電圧依存性。(c) 本研究で得られた増幅効果。非オーミック領域で最大約 40 倍の増幅効果が得られた。

3. 将来の展望

本研究で得られた成果により、スピン増幅のための指針が明らかになり、強磁性・半導体接合の dR/R 値を大きくした材料を用いれば微小な量のスピン情報を電気的手法で高感度に測定することが可能です。このスピン増幅機能は、バイアス電圧により電氣的に制御可能であり、スピントロニクスデバイスの開拓に重要な役割を果たすことが期待されます。

4. 発表論文の詳細

タイトル : Giant enhancement of spin detection sensitivity in (Ga,Mn)As/GaAs Esaki diodes"

著者名 : Junichi Shiogai, Mariusz Ciorga, Martin Utz, Dieter Schuh, Makoto Kohda, Dominique Bougeard, Tsutomu Nojima, Junsaku Nitta, and Dieter Weiss

論文名 : Physical Review B **89**, 081307(R) (2014)

5. お問い合わせ先

東北大学大学院工学研究科
博士課程後期3年 塩貝純一
TEL : 022-795-7317
Email : j.shiogai@s.tohoku.ac.jp

東北大学大学院工学研究科
教授 新田淳作
TEL : 022-795-7315
Email : nitta@material.tohoku.ac.jp

6. 用語の説明

1)半導体スピントロニクス

電子のもつ電荷とスピン(磁石としての役割)の両方の性質を利用することで、書き換え可能な不揮発性メモリと演算機能を有するデバイスを実現することにより、従来のエレクトロニクスデバイスを凌駕する省エネルギー化・高集積化を目指す分野。ここで、不揮発性とは電源を切っても情報を保持する性質。

2)強磁性半導体(Ga,Mn)As

発光ダイオード等の光デバイスの材料である III-V 族半導体 GaAs の Ga に磁性元素である Mn を置換したものであり、磁石と半導体の性質の両方を有するスピントロニクス材料である。Mn がアクセプターの役割を果たすため、*p* 型の半導体となる。また、GaAs 上にエピタキシャル成長でき、原子レベルで清浄な(Ga,Mn)As / GaAs 界面が作製できる。

3)スピンエサキダイオード

江崎玲於奈氏により初めて発見されたトンネル効果デバイスであるエサキダイオードのスピン版。通常のエサキダイオードは高ドーピングの *p* 型半導体と *n* 型半導体の接合により形成され、*p* 型半導体の価電子帯から *n* 型半導体の伝導帯へトンネル電流が流れる。スピンエサキダイオードは *p* 型の強磁性半導体(Ga,Mn)As と *n* 型 GaAs により形成され、トンネル電流により高効率なスピン注入・検出が可能である。

4) 非オーミック性

図 1(b)に示すように電流-電圧特性がオームの法則からずれて直線的(一定の抵抗値)とならず、非線形な関係にある場合を指す。スピンエサキダイオードでは、ある電圧領域ではトンネル電流が半導体のバンドギャップによって阻害されるため大きな非オーミック性(抵抗値が電圧に依存)が現れる。