

3 端子スピン蓄積デバイスにおける Hanle 効果信号の解析

高村陽太^{1,2}, 悪七泰樹¹, 周藤悠介¹, 菅原聡¹

(¹ 東工大像情報, ² 東工大電子物理)

Analysis of Hanle-effect signals observed in three-terminal spin-accumulation devices

Y. Takamura^{1,2}, T. Akushichi¹, Y. Shuto¹, and S. Sugahara¹

(¹Imaging Sci. and Eng. Lab., Tokyo Inst. of Tech., ²Dept. of Physical Electronics, Tokyo Inst. of Tech.)

はじめに

Si チャンネルへのスピン注入/検出や Si チャンネル内でのスピンドイナミクスの理解は, スピン MOSFET¹ 等の Si スピンデバイスを実現するために極めて重要となる. これまで, これらの現象はスピンバルブトランジスタ, 4 端子非局所デバイス, 3 端子スピン蓄積(3T-SA)デバイスなどによる Hanle 効果の測定によって解析が行われてきた. 特に 3T-SA デバイスによる評価は, デバイスプロセスの容易さから最も広く用いられている評価法である. しかし, 3T-SA デバイスにおいて観測される信号にはスピン注入源のトンネル障壁やその Si との界面にトラップされたスピンによる Hanle 効果による信号も重畳されることや, また解析に用いられている単一の Lorentz 関数だけでは表せない信号の観測なども報告されており, 得られた信号が真に Si チャンネルに蓄積したスピンによるものか, 慎重に検討する必要がある.

本研究では, 3T-SA デバイスで観測される Hanle 効果による信号をスピン拡散方程式のインパルス応答を用いて解析を行った. Si チャンネルに蓄積したスピンによる Hanle 効果の信号波形は Lorentz 型とはならず, トラップスピンによる信号波形(Lorentz 型)と分離できることを明らかにした. さらに, 高品質の CoFe/MgO/Si 接合をスピン注入源とした 3T-SA デバイスを作製し, このデバイスによって観測された Hanle 効果による信号波形は上記の 2 つの関数形の重ね合わせを用いることで精度よくフィットできることを明らかにした.

解析方法

Hanle 効果は, 1 次元のスピン拡散方程式のインパルス応答²を求め, このインパルス応答に磁場による歳差運動因子を掛け, 入力とともに時間で畳み込みを用いることで定式化できる.

$$S(x, B) = \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t s_0 \frac{x}{\sqrt{4\pi D(t-t')}} e^{-\frac{x^2}{4D(t-t')}} e^{-\frac{t-t'}{\tau_{sf}}} \cos \omega_L(t-t') u(t') dt' \quad (1)$$

ここで, D は拡散定数, τ_{sf} はスピン緩和時間, ω_L はラーモア周波数, $u(t)$ は入力である. この被積分関数(インパルス応答)は, 従来 Hanle 効果の解析に用いられてきた畳み込み積分の被積分関数の関数形と異なることに注意が必要である(時間に対する畳み込みの場合こちらが正しい). 有限の幅を持った電極下のスピン蓄積による Hanle 効果は, 式(1)をさらに位置 x に関して畳み込みと電極幅に渡る積分を実行することで定式化できる. 一方, トラップスピンに関しては, トラップされたスピンに対するレート方程式を用いて Hanle 効果の表式を求めることができる. チャンネルに蓄積したスピンに対する Hanle 効果信号は, 非 Lorentz 型の関数となるが, トラップスピンの Hanle 効果信号は Lorentz 型の関数となる. これらのスピンが共存する場合は, 上記 2 種の関数形の重ね合わせになる.

実験結果

Fig. 1 に作製した 3T-SA デバイスを示す. スピン注入源の構造は, CoFe/MgO/ n^+ -Si ($P; 4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) である. MgO は, Si 清浄表面に超高真空スパッタで成膜した Mg のラジカル酸化によって形成し, ラジカル酸素アニールによって高品質化してある. CoFe は分子線堆積法により成膜した.

このデバイスによって観測された Hanle 効果信号を Fig. 2 に示す(灰色のドット). また, この観測結果は, 単一の Lorentz 関数では精度よくフィットできず, チャンネルでのスピン蓄積による Hanle 信号(破線)とトラップ電子に対する Hanle 信号(点線)の重ね合わせ(実線)を用いることで精度よくフィットできた. これは, Si チャンネル内に蓄積されたスピンによる Hanle 効果の存在を意味する. フィッティングから求めた Si チャンネル中のスピン緩和時間とトラップスピンの緩和時間は, それぞれ 240 ps と 30 ps となった.

本研究で開発した 3T-SA における Hanle 効果の信号解析法は, チャンネルに蓄積したスピンとトラップスピンによる Hanle 効果の信号を分離できるため, 蓄積スピンのみの評価が可能となる.

参考文献

- 1) S. Sugahara, IEE Proc.: Circuits Devices Syst. **152**, 355 (2005).
- 2) Y. Takamura, T. Akushichi, A. Sadano, T. Okishio, Y. Shuto, and S. Sugahara, J. Appl. Phys. **115**, 17C307 (2014).

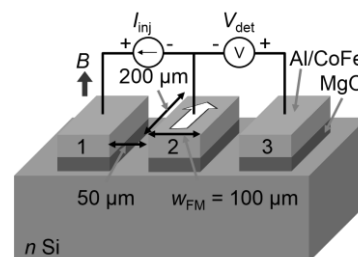


Fig. 1 3T-SA device.

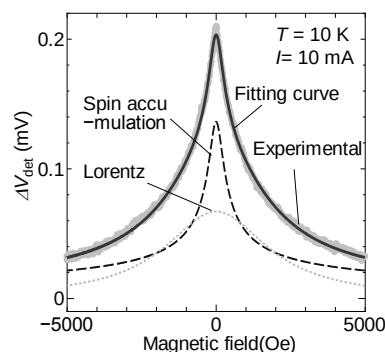


Fig. 2 Hanle-effect signal and fitting curves.

ラジカル酸素アニールによる高品質トンネル障壁を有する CoFe/MgO/Si および CoFe/AlO_x/Si コンタクトを用いたスピン蓄積の評価

悪七泰樹¹, 高村陽太², 周藤悠介¹, 菅原聡¹

(¹ 東工大像情報, ² 東工大電子物理)

Spin accumulation using CoFe/MgO and AlO_x/Si contacts with high quality tunnel barriers prepared by radical-oxygen annealing

T. Akushichi¹, Y. Takamura², Y. Shuto¹, and S. Sugahara¹

(¹ Imaging Sci. and Eng. Lab., Tokyo Inst. of Tech., ² Dept. of Physical Electronics, Tokyo Inst. of Tech.)

はじめに

MOSFET にキャリアスピンによる機能を付加したスピン MOSFET¹ は, CMOS ロジックシステムのエネルギー削減効率を究極的に高められる不揮発性パワーゲーティングのキー・デバイスとして注目されている². スピン MOSFET を実現するために最も重要な課題の一つは Si チャネルへの高効率スピン注入・検出の実現である. CoFe/MgO/n-Si, CoFe/AlO_x/n-Si トンネルコンタクトは Si へのスピン注入・検出の検証に広く用いられているスピン注入源である. これらのトンネル障壁である MgO や AlO_x は主に電子線蒸着法やプラズマ酸化法によって形成されている^{3,4}. 今回, 我々は Si 基板上に堆積した Mg 薄膜および Al 薄膜のラジカル酸化によって MgO, AlO_x 薄膜を形成し, さらにラジカル酸素アニールによって高品質化した MgO, AlO_x 薄膜をトンネル障壁とする CoFe/MgO/n-Si, CoFe/AlO_x/n-Si スピン注入源を作製して, スピン蓄積の評価を行った. ラジカル酸素アニールによるトンネル障壁の膜質改善によってスピン蓄積信号に顕著な変化が現れた. この詳細について報告する.

実験方法

スピン注入源として, Al(100nm)/CoFe(30nm)/MgO/n⁺-Si および Al(100nm)/CoFe(30nm)/AlO_x/n⁺-Si トンネルコンタクトを作製した. P ドープ n⁺-Si 基板のキャリア濃度は $4 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ である. トンネルコンタクト構造の作製はスパッタ/ラジカル酸化/分子線堆積 (MBD)・マルチチャンバーシステムを用いて真空一貫で行った. 超高真空中での熱処理によって Si の清浄表面を形成し, この Si 表面に室温でスパッタ法を用いて Mg または Al を 0.5nm 堆積した. 次に, 室温でラジカル酸化を行い, トンネル障壁を作製した. この後, ラジカル酸素雰囲気中でのトンネル障壁のアニールを 400°C で 30 分間施し高品質化した. 次いで, MBD 法を用いて 400°C で CoFe を堆積した. 比較用のサンプルとしてラジカル酸素アニールを施していないトンネルコンタクトも作製した. スピン注入の評価として, 図1に示す 3 端子スピン蓄積デバイスを作製し, Si チャネルに蓄積されたスピンの Hanle 効果の観測を行った.

実験結果

図2に CoFe/MgO/Si および CoFe/AlO_x/Si コンタクトによるスピン注入測定およびス

ピン抽出測定の結果を示す. (a)および(b)が AlO_x トンネル障壁, (c)および(d)が MgO トンネル障壁の場合である. (b)と(d)がトンネル障壁形成後にラジカル酸素アニールを行ったものである. この結果から, ラジカル酸化による室温形成トンネル障壁を用いた場合では, どちらのトンネル障壁でもスピン注入・抽出測定で得られた信号はともにローレンツ関数でよくフィッティングできることがわかった. 一方, ラジカル酸化後にラジカル酸素アニールを行ったサンプルでは, 得られたシグナルをローレンツ関数のみでは, 精度よくフィッティングすることができなかった. トラップスピンはローレンツ型のスピン蓄積信号となるが, Si 中の蓄積スピンについてはローレンツ型とはならず, ローレンツ型よりシャープな形状の信号となる⁵. そこで, この二つの関数形を仮定して, フィッティング解析を行った. ラジカル酸素アニールのないものはローレンツ関数のみでフィッティングできるのに対して, ラジカル酸素アニールを行ったサンプルでは 2 つの関数の重ね合わせによって, フィッティングできた. これらの結果は, トンネル障壁の形成後にラジカル酸素アニールを行うことによって, トラップスピンによるシグナル(ローレンツ関数)が減少し, Si へのスピン注入成分が現れることを示している. ラジカル酸素アニールによるトンネル障壁の膜質と界面の高品質化は Si チャネルへのスピン注入に有効である.

参考文献

- 1) S. Sugahara, IEE Proc. Circuits, Devices & Sys. **152**, 355 (2005).
- 2) S. Yamamoto, *et al.*, Electronics Lett. **47**, 1027 (2011).
- 3) T. Uemura, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **101**, 132411 (2012).
- 4) T. Inokuchi, *et al.*, J. Appl. Phys. **111**, 07C316 (2012).
- 5) Y. Takamura, *et al.*, J. Appl. Phys. **115**, 17C307 (2014).

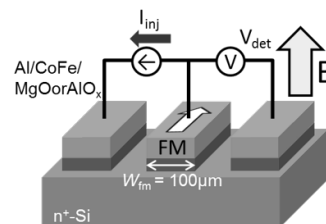


Fig. 1 3T spin accumulation device

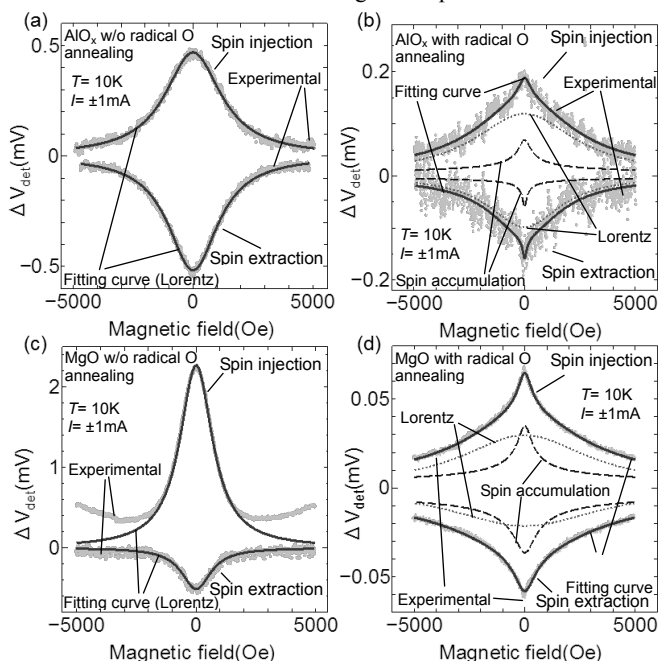


Fig. 2 Hanle-effect signals at 10K for spin injection and extraction measurements using CoFe/MgO/Si and CoFe/AlO_x/Si spin injectors, and their fitting curves (a) AlO_x tunnel barrier without radical-oxygen annealing (b) AlO_x tunnel barrier with radical-oxygen annealing (c) MgO tunnel barrier without radical-oxygen annealing (d) MgO tunnel barrier with radical-oxygen annealing.

B2 型 $\text{Co}_2\text{FeSi}_{0.5}\text{Al}_{0.5}/\text{MgO}/\text{Si}$ スピン注入源の作製と評価

川目悠¹, 悪七泰樹¹, 周藤悠介¹, 高村陽太², 菅原聡¹

(¹ 東工大院像情報, ² 東工大電子物理)

Preparation and characterization of a B2-ordered $\text{Co}_2\text{FeSi}_{0.5}\text{Al}_{0.5}/\text{MgO}/\text{Si}$ spin injector

Y. Kawame¹, T. Akushichi¹, Y. Shuto¹, Y. Takamura², and S. Sugahara¹

(¹ Imaging Sci. and Eng. Lab, Tokyo Inst. of Tech., ² Dept. of Physical Electronics, Tokyo Inst. of Tech.)

はじめに

近年, 低消費電力集積回路のキーデバイスとして, MOSFET 型のスピントランジスタであるスピン MOSFET が注目されている[1]. スピン MOSFET を実現するためには, スピン注入および検出の高効率化が重要となる. ハーフメタル・フルホイスラー合金 $\text{Co}_2\text{FeSi}_{1-x}\text{Al}_x$ (CFSA) は, B2 構造でも十分なハーフメタル性を示し[2], また室温に比べてキュリー温度($\sim 1100\text{K}$)が十分に高く, さらに Si とのバリアハイトを十分に低減させることが可能であるため, Si チャネルに対する高効率スピン注入源の強磁性電極として極めて有望である[3]. 今回, 我々は Si チャネルへのスピン注入源として実績のある MgO トンネルコンタクト上に, 分子線堆積(MBD)法を用いて高品質 CFSA 薄膜の形成を実現した. さらに, CFSA/MgO/Si 接合をスピン注入源とする 3 端子スピン蓄積デバイスを作製し, スピン注入・抽出の評価を行った.

実験方法

作製したサンプル構造は CFSA(30nm)/MgO(3nm)/ n^+ -Si($4 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$)である. サンプルは, MBD/ラジカル酸化/スパッタ装置を超高真空中で接続したマルチチャンバーシステムを用いて, 真空一貫で作製した. MgO は, マグネトロンスパッタを用いて Si 基板に Mg を 1.5nm 堆積し, 室温でラジカル酸化を行った後, ラジカル酸素を照射しながらアニールを行うことにより膜質を改善した. 次に, MBD 法により $\text{Co}_2\text{FeSi}_{0.5}\text{Al}_{0.5}$ を基板温度 400°C で堆積した. スピン注入源の構造評価は, XPS, XRD (規則度の解析には本研究室考案の拡張 Webster モデル[4]を用いた), TEM を用いた. また, スピン注入の評価は, 3 端子スピン蓄積デバイスを作製し, 蓄積スピンの Hanle 効果測定を用いた.

実験結果

まず, XPS によって界面構造の評価を行った. MgO と Si の界面にサブオキไซด์が MgO の室温形成時から存在したが, 400°C までのラジカル酸素アニールでも変化せず, この界面構造は安定であることがわかった(Si の酸化は進まない). 次に, 400°C でラジカル酸素アニールを施したサンプル上に MBD 法により, CFSA を堆積した. XRD による極点図解析から, CFSA が面内無配向の(100)配向柱状多結晶であることを確認した. また, 明瞭な(200)規則格子線が観測され(Fig.1), CFSA が少なくとも B2 構造を有していることがわかった. 拡張 Webster モデルを用いて算出した B2 規則度は約 63%であった. TEM 観察から, CFSA 薄膜は柱状配向した多結晶であることを確認した. この結果は XRD と一致した. また, MgO/Si 界面には, 大きなラフネスは観測されず, 急峻な界面が形成されていることがわかった(Fig.2). 次に, CFSA/MgO/Si をスピン注入源とする 3 端子スピン蓄積デバイスを作製し, Hanle 効果の測定を行った(Fig.3). スピン抽出測定では, 明瞭な Hanle 信号が得られたが, スピン注入測定では得られなかった. 抽出側で得られた Hanle 信号は, ローレンツ関数ではフィッティングすることは出来ず, Si チャネルに蓄積したスピンを表現できる解[5]をローレンツ関数と重ね合わせることでフィッティングが可能となった. この結果は, CFSA/MgO/Si トンネル接合を用いたスピン抽出の実現を示唆するものである.

参考文献

- (1) S. Sugahara, IEE Proc. Circuits Devices Syst. **152**, 355 (2005).
- (2) T.M. Nakatani et al., J. Appl. Phys. **102**, 033916 (2007).
- (3) Y. Kawame et al., the 12th Joint MMM-Intermag Conference, paper EI-06 (2013).
- (4) Y. Takamura, et al., J. Appl. Phys. **105**, 07B109 (2009).
- (5) Y. Takamura, et al., J. Appl. Phys. **115**, 17C307 (2014).

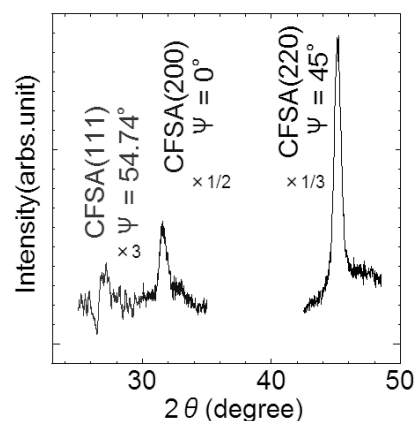


Fig. 1 XRD superlattice lines for a CFSA film formed on a high quality MgO/Si structure.

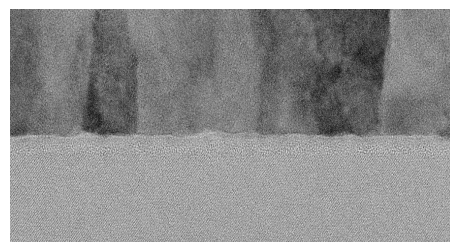


Fig. 2 TEM image of the fabricated CFSA/MgO/Si structure

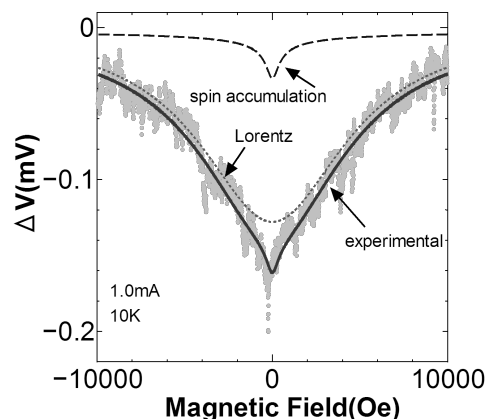


Fig. 3 Hanle-effect signal and its fitting curve

CoFe/TiO₂/Si トンネルコンタクトの作製とそのスピン注入源への応用

高橋克典¹, 悪七泰樹¹, 周藤悠介¹, 高村陽太², 菅原聡¹

(¹ 東工大像情報, ² 東工大電子物理)

Fabrication of a CoFe/TiO₂/Si tunnel contact and its application for spin injector

K. Takahashi¹, T. Akushichi¹, Y. Shuto¹, Y. Takamura², and S. Sugahara¹

(¹ Imaging Sci. and Eng. Lab., Tokyo Inst. of Tech., ² Dept. of Physical Electronics, Tokyo Inst. of Tech.)

はじめに

スピン MOSFET[1]を実現するためには Si チャネルに適合したスピン注入源の開発が重要になる。特に、オン状態におけるチャネル抵抗を考慮した設計が、スピン注入効率とデバイス性能から重要になる。スピン MOSFET の実現が期待されるナノスケールのチャネルでは、チャネル抵抗は非常に低く、これまで研究が進められている AlO_x や MgO をトンネル障壁としたスピン注入源では、抵抗が大きすぎて適切ではない。今回、我々はナノスケールのチャネルに適合したスピン注入源のトンネル障壁として、TiO₂を提案する。TiO₂は Si との接合において伝導帯側に 0.1eV 程度の低いエネルギー障壁を形成[2]することから、CoFe₂Si_xAl_{1-x}などの低仕事関数の強磁性金属を用いることで、非常に低いトンネル障壁(低抵抗)のスピン注入源を実現できると期待される。また、TiO₂は低抵抗の MTJ として研究されていたこともあり、TMR も観測されている[3]。したがって、強磁性金属/TiO₂/Si トンネルコンタクトはスピン MOSFET のスピン注入源として有望である。ラジカル酸化を用いた TiO₂/Si 構造の形成と、これを用いたスピン注入源の検討について報告する。

実験方法

Si 上への TiO₂ の形成では、界面におけるシリサイドの形成を防ぐために、まず室温で Si 上に Ti をスパッタで堆積し、さらに室温でラジカル酸化を行うことで TiO₂ の形成を行った。次いで、膜質の向上のために、この TiO₂/Si 構造形成後に、ラジカル酸素雰囲気中でアニールを行った。界面構造を XPS によって評価を行い、電気特性はダイオードを作製して、電流密度-電圧 (J - V) 特性から評価した。さらに、3 端子スピン蓄積デバイスを作製して、Si へのスピン注入を評価した。

実験結果

はじめに、室温でラジカル酸化によって形成した TiO₂/Si およびラジカル酸素アニール処理した試料を XPS によって評価した。Fig. 1(a),(b)に Ti2p スペクトル, Si2p スペクトルをそれぞれ示す。室温でのラジカル酸化後 400°C のラジカル酸素アニールまでは界面にサブオキシドが観測されるのみで界面構造に劣化がないことがわかった。一方、500°C でラジカル酸素アニールを行うと Si⁴⁺ (SiO₂) は観測されないものの、Si のサブオキシドの増大が確認され、界面構造が変化することがわかった。次にラジカル酸素アニールの効果を Al/CoFe/TiO₂/n⁺-Si(P;4×10¹⁹cm⁻³)/Al 構造のダイオードを作製し、 J - V 特性から評価した。室温でラジカル酸化のみを行った試料ではバラツキが大きかったが、400°C でラジカル酸素アニールを行うことで、特性のバラツキは大きく減少した。ピンホールなどの欠陥が減少したと考えられる。また、この J - V 特性から、TiO₂ と Si との間の障壁高さはおよそ 0.1eV 程度と見積もることができた。次に、CoFe/TiO₂/n⁺-Si(P;4×10¹⁹cm⁻³)をスピン注入源としたスピン蓄積デバイスの作製を行い、蓄積スピンの Hanle 効果の測定を行った。Fig. 2(a),(b)に結果を示す。注入および抽出で明瞭な Hanle 信号の観測に成功した。また、得られた波形はローレンツ関数のみではフィッティングすることができず、Si チャネルに注入された蓄積スピンの Hanle 効果を正しく表現できる関数形[4]を加えることで、波形を再現することができた。この結果は、CoFe/TiO₂/n⁺-Si トンネルコンタクトによって、Si チャネルへスピン注入できたことを示唆する。

参考文献

- 1) S. Sugahara, IEE Proc. Circuits, Devices & Sys. **152**, 355 (2005).
- 2) J. Robertson, J. Vac. Sci. Technol. B **18**, 1785 (2000).
- 3) J. Gang. Zhu, and C. Park, Mater. Today, **9**, 36(2006).
- 4) Y. Takamura, *et al.*, J. Appl. Phys. **115**, 17C307 (2014).

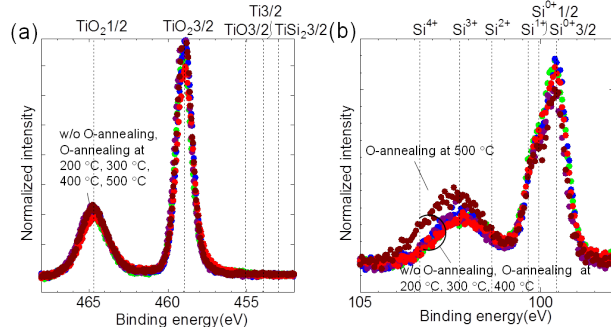


Fig. 1 (a) XPS Ti2p spectra and (b) Si2p spectra for an as-oxidized TiO₂/Si sample at room temperature and TiO₂/Si samples with radical oxygen annealing at 200°C, 300°C, 400°C, and 500°C

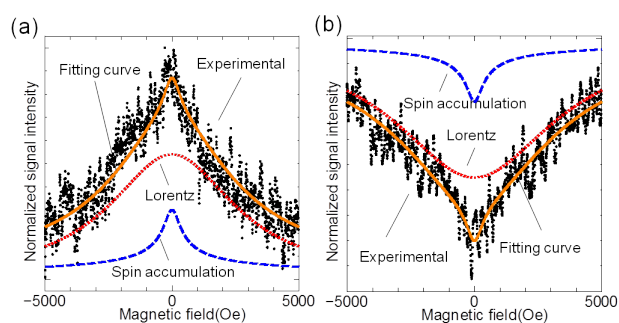


Fig. 2 Hanle-effect signals at 10K for (a) spin injection and (b) spin extraction measurements. Their various fitting curves are also shown.

GaAsにおける四端子非局所スピバルブ信号と Hanle 信号のゲート制御

宮川拓望, 秋保貴史, 蝦名優也, 山本眞史, [○]植村哲也
(北海道大学)

Gate control of spin-valve signal and Hanle signal in GaAs observed by a four-terminal nonlocal geometry

T. Miyakawa, T. Akiho, Y. Ebina, M. Yamamoto, and T. Uemura,
(Hokkaido Univ.)

はじめに

スピントランジスタをはじめとする半導体スピン機能デバイスの実現には、強磁性体電極から半導体へのスピン注入、および、チャンネル中を伝導するスピン偏極電流のゲート制御が必須である。スピン注入に関してはこれまで盛んに研究がなされ、Si や GaAs, Ge などさまざまな半導体チャンネルにて実証がなされている。一方、ゲート制御に関しては三端子 Hanle 効果測定により観測される強磁性電極直下へのスピン蓄積信号のゲート制御が報告されている[1]ものの、半導体チャンネル中を伝導するスピン偏極電流により生成されるスピン信号のゲート制御に関する報告例はない。今回、我々は GaAs チャンネルにおける四端子非局所スピバルブ信号および Hanle 信号のゲート制御を実証したので報告する。

実験方法

p 型 GaAs (001) 基板上に p-GaAs バッファ層 ($\text{Be} = 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 250 nm), ud-Al_{0.3}Ga_{0.7}As (50 nm), n⁻-GaAs (Si = $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 700 nm), n⁺-GaAs (Si = $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 30 nm), Fe (10 nm) を MBE 法により成長した。その後、Ar イオンミリング、EB リソグラフィ等を用いて p-i-n 接合型バックゲートを有する横型スピン輸送デバイスに加工した。Fig. 1 に示すように、電極 1, 3 間に一定の電流 (I_{bias}) を流し、電極 2, 4 間の電圧 (V_{NL}) を計測する cross nonlocal 配置にて、スピバルブ信号と Hanle 信号のゲート電圧 (V_G) 依存性を 77 K にて測定した。 V_G は接地された電極 3 を基準に、p 型バックゲートに印加した。

結果と考察

Fig. 2 に、 $I_{\text{bias}} = 20 \mu\text{A}$, $V_G = 0, -1.5, -2.5 \text{ V}$ のときのスピバルブ信号と Hanle 信号を示す。 $I_{\text{bias}} > 0$ のとき、スピン偏極電子は電極 3 から n-GaAs に注入される。Fig. 2 に示すように、スピバルブ信号および Hanle 信号の大きさは V_G により明瞭に変化しており、このことから、GaAs チャンネルを流れるスピン偏極電流のゲート変調が実証された。スピン注入の標準的なモデルによれば、スピバルブ信号の変化量 (ΔV_{NL}) はチャンネルのシート抵抗 (ρ_{sh}) に比例する。しかしながら、今回の結果では、 V_G を 0 から -2.5 V まで変化させた時に、 ρ_{sh} はおよそ 5 倍となったのに対して、 ΔV_{NL} はおよそ 2 倍となり、両者は一致しなかった。このことは、 ΔV_{NL} の V_G による変化は単に ρ_{sh} の変化だけでは説明できず、その他の要因、例えば、スピン注入効率が V_G により変化することなども考慮する必要があることを示唆している。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 25286039 の助成を受けて行われた。

1) Y. Ando et al., APL **99**, 132511 (2011).

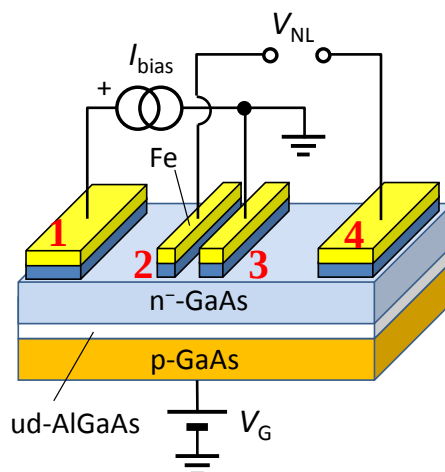


Fig. 1. Schematic device structure and circuit configuration.

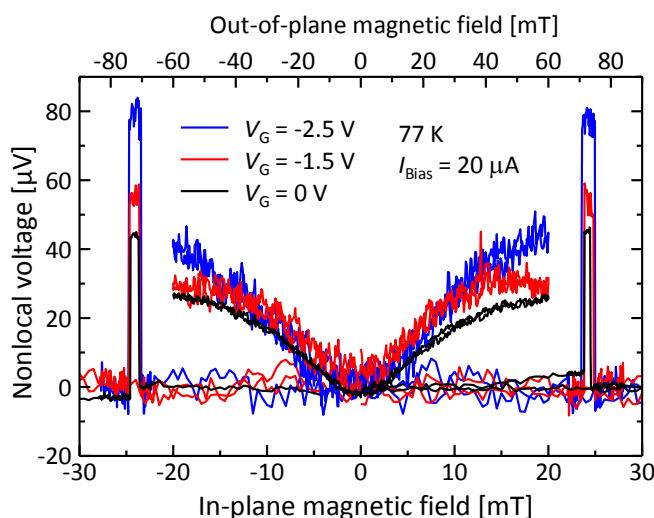


Fig. 2. Spin-valve signals and Hanle signals at $I_{\text{bias}} = 20 \mu\text{A}$ for $V_G = 0, -1.5$, and -2.5 V .

GaAs における過渡 oblique Hanle 信号に対する核磁気共鳴の影響

蝦名優也, 秋保貴史, 山本真史, 植村哲也
(北海道大学)

Influence of nuclear magnetic resonance on transient oblique Hanle signals in GaAs

Y. Ebina, T. Akiho, M. Yamamoto, and T. Uemura,
(Hokkaido Univ.)

はじめに

近年, 強磁性体電極から半導体に注入された電子スピンの核スピンが効率的に偏極される動的核スピン偏極(DNP), 及び, 核磁気共鳴(NMR)による核スピン制御が量子情報デバイスへの応用の観点から注目されている. 最近, 我々は, DNP に要する時間スケールよりも早い時間スケールで外部磁場を掃引する過渡 oblique Hanle 効果測定により, GaAs における核スピンの外部磁場の变化に対する過渡応答特性や DNP による核磁場の生成時間を明らかにした[1]. 本研究の目的は, DNP により生成された核スピン偏極に対する NMR の過渡 oblique Hanle 信号に及ぼす影響を明らかにすることである.

実験方法

半絶縁性 GaAs (001)基板上に undoped-GaAs バッファ層 (250 nm), n^- -GaAs (700 nm, $\text{Si} = 3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$), n^+ -GaAs (30 nm, $\text{Si} = 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), Fe (10 nm)を MBE 法により成長した. その後, Ar イオンミリング, EB リソグラフィー等を用いて横型スピン輸送デバイスに加工した (Fig. 1). 過渡 oblique Hanle 効果測定は 4.2 K で非局所配置において行った. 外部磁場 ($\mathbf{B}_{\text{ob}}$)は $\mathbf{B}_{\text{ob}} = B_{\text{ob}}\mathbf{u}$ ($\mathbf{u}$ は $(\sin 13^\circ, 0, \cos 13^\circ)$ の単位ベクトル)の条件で印加した. 初期状態として核磁場を生成するため, $B_{\text{ob}} = +40 \text{ mT}$, $I = -10 \mu\text{A}$ 印加のもとで 150 秒待機した後に非局所電圧(V_{NL})の B_{ob} 依存性を測定した. B_{ob} は $+40 \text{ mT}$ から -40 mT へ 0.38 mT/s の速さで掃引し, RF 磁場は Fig. 1 における y 軸方向に印加した.

結果と考察

Fig. 2 に, RF 磁場がない場合と 175kHz の RF 磁場を照射した場合それぞれの oblique Hanle 測定結果を示す. RF 磁場がない場合, 生成された核磁場に由来する二つのサイドピークが観測された. 一方, RF 磁場のもとでは, 両サイドピークの大きさは減少し, 負側のピークは完全に消失した. この原因を明らかにするため, 非局所信号(V_{NL}/I)が極小となる磁場の値 (Fig. 2 の緑色矢印)の RF 周波数依存性を評価したところ, ^{71}Ga に対する磁気回転比から見積もられる共鳴磁場に相当するところで非局所信号が低下することがわかった. また同様に, 変化量は小さいものの, ^{69}Ga (Fig. 2 の橙色矢印)や ^{75}As (Fig. 2 の黒色矢印)の NMR に起因した非局所信号の変化も観測された. これらのことから, RF 磁場印加に伴う過渡 oblique Hanle 信号の変化は, NMR による核磁場の消失が原因であることがわかった. 従来の定常状態での oblique Hanle 信号測定では NMR による信号変化は共鳴磁場のところだけで生じるのに対し, 過渡信号に対しては共鳴磁場以外のところでも見られ, NMR の検出が容易であることが示された. このことは, 核スピンの外部磁場の变化に対する過渡応答特性を評価できることに加え, 本手法の特徴の一つである.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 25286039 の助成を受けて行われた.

参考文献

- 1) T. Akiho *et al.*, PRB **87**, 235205 (2013)

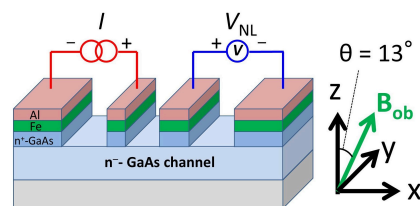


Fig. 1 : Schematic diagram of device structure.

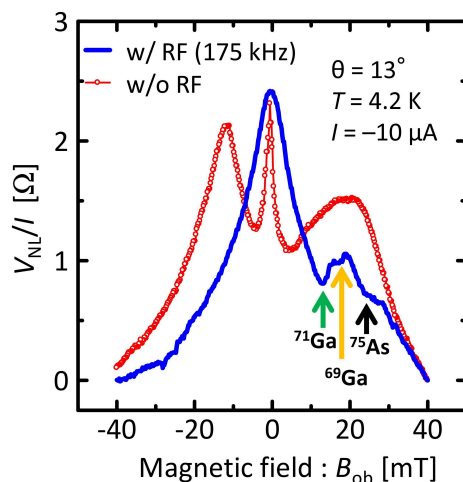


Fig. 2 : B_{ob} dependence of V_{NL}/I with and w/o RF magnetic field, where V_{NL} is the nonlocal voltage, and I is the injection current.