

課題番号 : F-15-TT-0042
利用形態 : 共同研究
利用課題名(日本語) : スピン偏極キャリアを利用する排他的論理和ゲートの作製
Program Title (English) : Fabrication of EXOR gate consisting of two magnetic electrodes with anti-parallel magnetization
利用者名(日本語) : 酒井政道、高尾 啓、飯笹圭太郎、西間木 誠
Username (English) : M. Sakai, H. Takao, K. Iizasa, M. Nishimagi
所属名(日本語) : 埼玉大学大学院理工学研究科物質科学部門
Affiliation (English) : Division of Material Science, Graduate School of Science and Engineering, Saitama University

1. 概要(Summary)

排他的論理和(EXOR)ゲートは、NANDやNORのような万能ゲートと共に並んで汎用的な論理演算ゲートである。我々は、従来とは全く異なる原理によって動作するEXORゲートを理論的に提案している[1]。それは、自由電子のもつスピン軌道相互作用とスピン偏極度との結合性を利用して、単一の電流チャンネル領域で、論理演算プロセスを完結させるものであり、これを使えば、原理上、MOSトランジスタの数を、従来技術の約10分の1にすることが出来る。そのような素子作製には、(I)スピン注入用強磁性電極磁化の平行・反平行着磁、(II)高 μS 値非磁性導体の開発(μ はキャリア移動度、 S はスピン軌道相互作用による有効磁場)、(III)素子チャンネル長の短小化、と云う3段階を経る必要がある。25年度の第1段階に引き続き、26年度は第2段階に進み、非磁性チャンネル材料としてCuを用いた研究を行った。27年度は、第2段階ではあるが、26年度のCuの代わりにAuを非磁性チャンネル部に用いた研究を行った。

2. 実験(Experimental)

【利用した主な装置】

スパッタ(磁性材料)蒸着および分子線エピタキシー複合装置

【実験方法】

非磁性チャンネル領域の μS 値評価方法は、ホール抵抗(HR)及び横磁気抵抗(TMR)に対する強磁性電極からのスピン注入効果の測定にもとづく。ホール素子の製作はフォトリソグラフィによる。Siウェハ上にSiO₂をスパッタ法で成膜し、下地にCrを10nm(電子ビーム法)、磁性電極にTb₂₆Fe₆₆Co₈(以下TFCと略記)を128nm(スパッタ(磁性材料)蒸着および分子線エピタキシー複合装置)、

その保護膜としてPtを2nm(スパッタ法)、チャンネル下地にTiを10nm(電子ビーム法)、チャンネル部にAuを400nm(電子ビーム法)、保護膜としてPdを20nm(電子ビーム法)蒸着した。非磁性チャンネル領域形成後のリフトオフ工程は26年度のCuの場合と条件を揃えるために、故意に省略した。理由は、TFC電極やチャンネル部の酸化・劣化をレジスト膜で防ぐことを意図したからである。比較のために、TFC電極の代わりにAu電極ホール素子も作製した。作製したホール素子の模式的俯瞰図をFig. 1に示す。

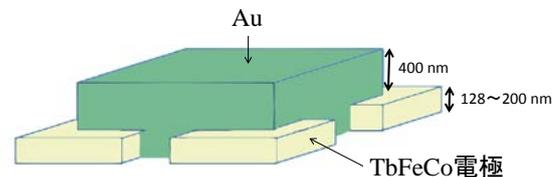


Fig. 1: Schematic perspective of our Hall device fabricated in the present study.

我々は、ソースとドレイン電極の磁化が互いに平行な場合と反平行の場合とでどのような違いが現れるかに注目する。電極磁化の反転操作は以下のとおりである: 1. TFCの保磁力(約-0.4 T)以上の磁場を印加し、ソース電極とドレイン電極の磁化方向をそろえる; 2. ドレイン電極にレーザーをAu越しに照射し、キュリー点(~200 °C)まで熱する; 3. この状態で保磁力以下(+0.2 T程度)の磁場を30秒印加することによりドレイン電極の磁化方向を反転させる。

3. 結果と考察(Results and Discussion)

試料は便宜上、(電極材料)/(電流チャンネル材料)と表記する。TFC/AuのHRの磁場依存性をFig. 2(a)に示す。比較のために、TFC電極の代わりにAu電極ホール素子(Au/Au)も作製したので、そのデータも図中に示

している。電流は 100 μA の交流(周波数 10 Hz)である。空間的に一様な外部磁場を印加しているため、ソース・ドレイン電極の磁化は互いに平行である。Au/Au のホール係数が $-6.0 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{C}$ であるのに対し、TFC/Au では $-3.1 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{C}$ と、約 52 倍である。TFC/Cu の HR には、磁場によって生じる正常ホール効果だけではなく、強磁性電極からのスピン注入由来の異常ホール効果も含まれている可能性が高い。TMR の磁場依存性を Fig. 2(b)に示す。TFC/Au では負の横磁気抵抗を示しており、その TMR 比は 5T の磁場下では約 6 % である。Au/Au の TMR は殆ど観測されない。この結果は、TFC/Au の示す負の TMR がローレンツ力以外の原因による可能性、具体的には、外部磁場、スピン軌道相互作用、及び化学ポテンシャルのスピン分裂の3つの因子が同時に関与する機構が考えられる(M. Sakai, H. Takao, T. Matsunaga, Y. Tanaka, T. Arai, S. Haruyama, T. Otomo, H. Hirama, T. Sakuraba, Z. Honda, K. Higuchi, A. Kitajima, A. Oshima, S. Hasegawa, and H. Awano, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 54 (2015) p.p.013001-1~11)。モデル計算と測定データを比較することによって、今後、Au チャネル領域の μS 値を評価する。

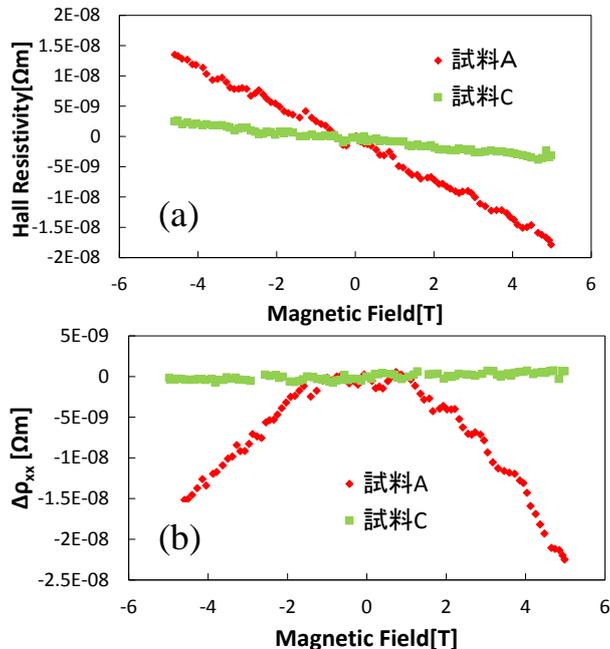


Fig. 2: (a) Room temperature Hall resistivity and (b) transverse magnetoresistivity observed in TFC/Au and Au/Au under parallel configuration in source and drain magnetizations.

次に、ソースとドレイン電極磁化が、互いに平行の場合と反平行の場合とで、HR 信号にどのような違いがあるの

か調査した。電流は 100 μA の交流(周波数 10 Hz)である。結果を Fig. 3 に示す。測定は TFC の保磁力以下の磁場範囲($-0.3 \sim 0.3 \text{ T}$)で行った。平行=>反平行=>平行と云う磁化配置の変化と共に、HR も変化するが、平行に戻した場合、最初の状態に戻っていない。これらの変化の再現性を現在調査中である。

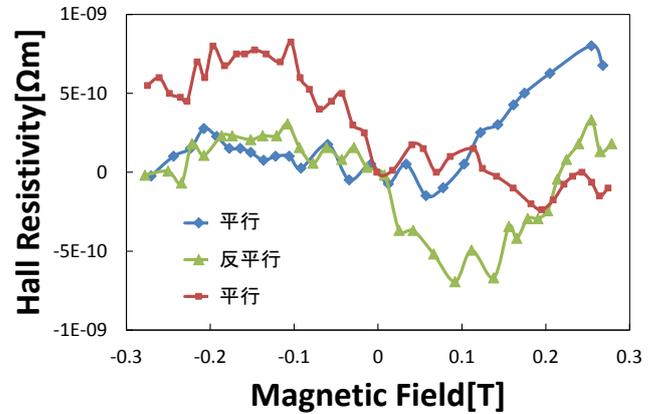


Fig. 3: (a) Room temperature Hall resistivity in TFC/Au measured for parallel and antiparallel magnetizations of TFC electrodes.

4. その他・特記事項(Others)

共同研究者: 栗野博之(豊田工業大学)、黒川雄一郎(豊田工業大学)

参考文献:[1]M. Sakai, H. Takao, T. Matsunaga, Y. Tanaka, T. Arai, S. Haruyama, T. Otomo, H. Hirama, T. Sakuraba, Z. Honda, K. Higuchi, A. Kitajima, A. Oshima, S. Hasegawa, and H. Awano, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 54 (2015) p.p.013001-1~11.

外部資金: 基盤研究 C(一般), 2015~2017 年度, 研究代表者・酒井政道, 「両極伝導性水素吸蔵体を利用した電荷・スピンの相反型蓄積機能」.

5. 論文・学会発表(Publication/Presentation)

[1] TbFeCo を電極とした Au 及び Cu チャネルの磁気電気伝導特性、飯笹圭太郎ら, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 13p-PA1-10, 名古屋.

[2] TbFeCo/YH₂ の実験的磁気電気伝導特性に対する回帰分析, 高尾啓ら, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 13p-PA1-7, 名古屋.

6. 関連特許(Patent)

(1)酒井政道ら, スピン偏極度測定方法及び測定データ、並びにこれを用いた論理演算ゲート及び信号暗号化復元化方法, 特許登録第 5880937 号(登録日 2016 年 2 月 12 日).