

課題番号 : F-14-TT-0030
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。

2. 実験(Experimental)

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 (スパッタ法)、下地に Cr を 10 nm (電子ビーム法)、磁性電極に Tb₂₆Fe₆₆Co₈ (以下 TFC と略記) を 200 nm (スパッタ法)、その保護膜として Pt を 2 nm (スパッタ法)、チャンネル下地に Ti を 10 nm (電子ビーム法)、チャンネル部に Cu を 400 nm (電子ビーム法)、保護膜として Pd を 20 nm (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

フトオフ工程は故意に省略した。理由は、TFC 電極や Cu チャンネルの酸化・劣化をレジスト膜で防ぐことを意図したからである。そして、TFC 電極からのスピン注入を確認する目的で、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した。電極磁化の反転操作は、4 つの電極のうちの 1 つにレーザーを照射し、TFC のキュリー点 (約 200°C) まで温度を上昇させ、レーザーを照射しない電極の磁化方向とは逆向きに磁場 (0.32 T) を印加し、照射をやめて磁化を固定する。

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/Cu の HR の磁場依存性を Fig. 1(a) に示す。Cu 単体のホール係数は $5.0 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{C}$ 程度であるのに対し、TFC/Cu ではホール係数は $-8.3 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{C}$ と、約 160 倍である。符号も反転している。TFC/Cu では、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。

TFC/Cu の TMR の磁場依存性を Fig. 1(b) に示す。TMR は磁場増加に伴って減少する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 0.6 % である。Cu 単体の TMR の符号は正であるので、この結果は、TFC/Cu 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(論文・学会発表の(1))。モデル計算と測定データを比較することによって、今後、Cu チャンネル領域の μS 値を評価する。

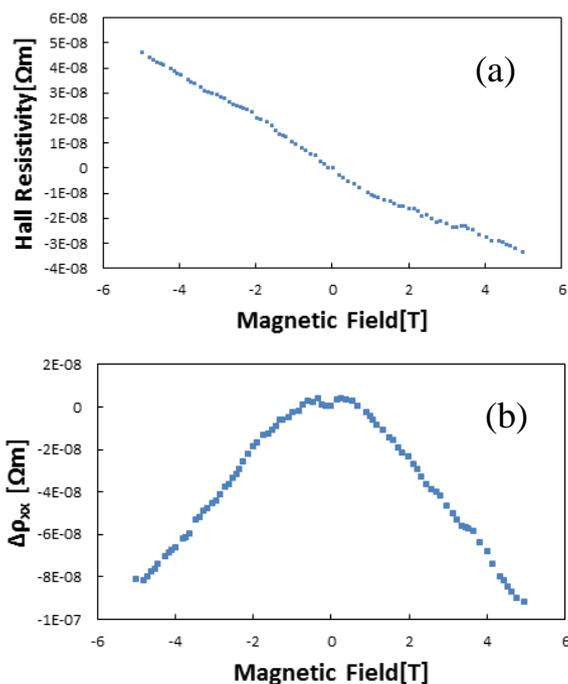


Fig. 1: (a) Room temperature Hall resistivity and (b) transverse magnetoresistivity observed in TFC/Cu under parallel configuration in source and drain magnetizations.

Fig. 1 では、ソースとドレイン電極磁化は、平行配置である。この結果が、化学ポテンシャルのスピンスplitの影響かどうかを調査する目的で、電極磁化を反平行配置にして測定を行った。電流値は 100 μ A である。電流経路に交差する方向の電圧(交差電圧)の磁場依存性を、2種類のソース・ドレインの磁化配置について Fig. 2 に示す。交差角は 90 度からずれているので、HR と TMR の両成分が含まれる。平行磁化ではヒステリシスが無いのに対して、反平行磁化では顕著なヒステリシスが観測された。これが化学ポテンシャルのスピンスplitに影響かどうかは、今後、調査が必要である。

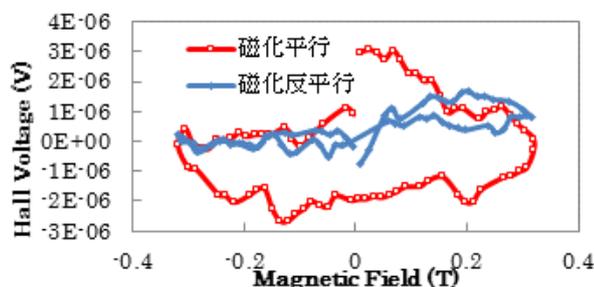


Fig. 2: Cross voltage observed in TFC/Cu under parallel (blue line) and anti-parallel (red line) configuration in source and drain magnetizations.

4. その他・特記事項 (Others)

・参考文献 : [1] M. Sakai, K. Kakizaki, S. Hasegawa,

A. Kitajima, A. Oshima, and H. Awano, “A design of spin polarization analyzer using transverse-longitudinal correlation in resistivities induced by spin-orbit interaction”, Jpn. J. Appl. Phys. 52 (2013) 013004-1~7.

・競争的研究費 : 挑戦的萌芽研究, 2012~2014 年度, 研究代表者・酒井政道, 「電流注入型スピンスplit極度計のデザインと擬似 XOR ゲートへの応用」

・共同研究者: 豊田工業大学 栗野博之教授

5. 論文・学会発表 (Publication/Presentation)

(1) M. Sakai, H. Takao, T. Matsunaga, Y. Tanaka, T. Arai, S. Haruyama, T. Otomo, H. Hiramata, 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.

(2) T. Sakuraba, M. Sakai, T. Arai, Y. Tanaka, H. Hiramata, Z. Honda, A. Kitajima, K. Higuchi, A. Oshima, and S. Hasegawa, JPS Conf. Proc. Vol.1 (2014) p.p 012009-1~6.

(3) S. Haruyama, M. Sakai, T. Sakuraba, H. Hiramata, Z. Honda, A. Kitajima, K. Higuchi, A. Oshima, and S. Hasegawa, JPS Conf. Proc. Vol. 1 (2014) 012016-1~6.

(4) 酒井政道、高尾啓、松永智善、桜庭琢士、本多善太郎、樋口宏二、北島彰、大島明博、長谷川繁彦、栗野博之、日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学春日井キャンパス、2014 年 9 月 10 日。

(5) 酒井政道, イノベーション・ジャパン 2014, 東京ビッグサイト、江東区、2014 年 9 月 11, 12 日

6. 関連特許 (Patent)

(1) 酒井政道, 中村 修, スピントロニクス装置及び論理演算素子, 特許登録第 5551912 号(登録日 2014 年 5 月 30 日)

(2) 酒井政道, 中村 修, 長谷川繁彦, 北島 彰, 大島明博, スピントロニクス装置及び論理演算素子, 特許登録第 5601976 号(登録日 2014 年 8 月 29 日)。