

課題番号 : F-13-OS-0016, S-13-OS-0010
 利用形態 : 共同研究
 利用課題名 (日本語) : 擬ゼロホール係数材料を用いた電流-スピン流変換機能
 Program Title (English) : Generation of spin current using quasi-zero Hall coefficient conductors
 利用者名 (日本語) : 酒井政道¹⁾, 櫻庭琢士¹⁾, 平間弘晃¹⁾, 大友貴史¹⁾, 春山翔太¹⁾, 大島明博²⁾, 長谷川繁彦²⁾
 Username (English) : M. Sakai¹⁾, T. Sakuraba¹⁾, H. Hirama¹⁾, T. Otomo¹⁾, S. Haruyama¹⁾, K. Higuchi²⁾, A. Kitajima²⁾, A. Oshima²⁾, S. Hasegawa²⁾
 所属名 (日本語) : 1) 埼玉大学大学院理工学研究科物質科学部門, 2) 大阪大学産業科学研究所
 Affiliation (English) : 1) Division of Material Science, Graduate School of Science and Engineering, Saitama University, 2) The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University.

1. 概要 (Summary)

イットリウム (Y) の水素吸蔵相 YH₂ は、擬ゼロホール係数特性を有する特異な両極性伝導体である。この擬ゼロホール効果を利用した純スピン流の生成機構を我々は理論的に提案している[1]。ただし、YH₂ は非磁性体なので純スピン流を生成するにはスピン偏極したキャリアを注入しなければならない。本研究ではチャンネル長が約 10 μm の準微小ホール素子を、YH₂ を用いて作製し、強磁性電極(Ni, Co)によるスピン偏極電流の注入を試みた。その評価方法として、ホール抵抗 (HR) 及び横磁気抵抗 (TMR) 測定を行った。また、比較のために電極を Au、電流チャンネルを YH₂ とした素子 (Au-YH₂)、及び電極を Co、電流チャンネルを Au とした素子 (Co-Au) を作製、同様の実験を行った。

本研究では、測定結果とモデル計算結果とを比較することによって、スピン注入効果を評価する。HR および TMR の理論表式の導出は、アップスピン電子/正孔とダウンスピン電子/正孔がそれぞれ独立に電気伝導に寄与する二流体モデルに基づき、(1)外部磁場、(2)スピン軌道相互作用 (SOI) による非対称散乱、(3)YH₂ のパウリ常磁性に起因する僅かスピン偏極に加えて、(4)アップスピンとダウンスピンキャリア間に生じる、電極からのスピン注入による化学ポテンシャルの分裂 (スピン蓄積効果) を考慮する。

2. 実験 (Experimental)

実験では、主に、ナノ薄膜形成システム、マスクアライナー、高温熱処理装置、反応性イオンエッチング装置を

使用した。試料作製はフォトリソグラフィー及び電子ビーム蒸着法で行った。Si ウエハ上に SiO₂ をスパッタ法で成膜し、下地に Cr を 10 nm、電極に Co を 200 nm、試料下地に Ti を 10 nm、チャンネル部に Y を 400 nm、保護膜に Pd を 20 nm 蒸着した。3%水素ガス雰囲気中で水素化(温度 22 °C 反応時間 10 分)を行い、試料部 YH₂ を得た。Fig. 1 は微小ホール素子の顕微鏡観察画像 (600 倍) である。用いた電極は Ni, Co の 2 種類で、Ni-YH₂、Co-YH₂ と表記する。同様にして、Au-YH₂、Co-Au も作製した。ホール抵抗及び横磁気抵抗測定は交差法、比抵抗測定は van der Pauw 法により行った。10 Hz、100 μA 以下の交流電流を流し、ロックインアンプで試料電圧の測定を行う。磁場は、0 T → 5 T → -5 T → 0 T の順番で印加する。測定温度は 298 K である。

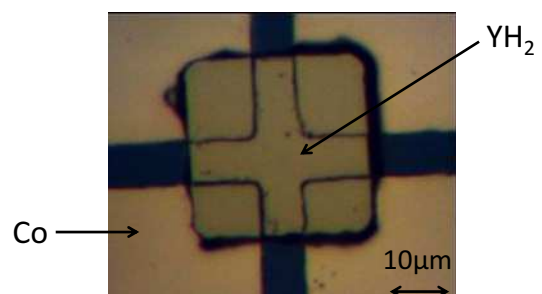


Fig.1 Optical microscope image of our Hall device consisting Co electrodes YH₂ channel.

3. 結果と考察 (Results and Discussion)

Ni-YH₂ 及び Co-YH₂ における HR の磁場依存性を Fig. 2 に、TMR 比の磁場依存性を Fig. 3 に示す。Ni-YH₂ のゼロ磁場比抵抗は $3.09 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$ 、ホール係数は $-6.12 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{C}$ である。単純な YH₂ のホール係数+

$1 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{C}$ 程度であるので、Ni-YH₂では符号が反転し、絶対値が約6倍である。一方、Co-YH₂では、ゼロ磁場比抵抗は $2.51 \times 10^{-6} \Omega \text{ m}$ となり、Ni-YH₂の場合とほぼ同値であるが、HRは、 $\pm 3 \text{ T}$ 付近に極値をとる3次関数を示し、TMR比もNi-YH₂に比べて約100倍大きい正のTMRを示す。また、 $\pm 3 \text{ T}$ 付近で傾きが大きく減少しており、この点は、ホール抵抗で見られた極値とほぼ一致している。

比較のために行ったAu-YH₂, Co-Auのホール測定では正の横磁気抵抗は見られず、Co-YH₂のような異常ホール効果も見られなかった。Au-YH₂では試料部YH₂由来と見られるホール抵抗及び横磁気抵抗、Co-Auでは試料部Au由来と考えられるホール抵抗及び横磁気抵抗のみが観測された。

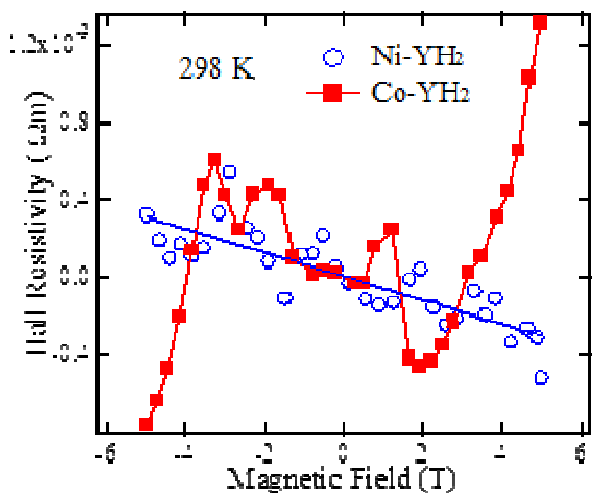


Fig. 2 Magnetic field dependences of the Hall resistivities in Ni-YH₂ and Co-YH₂ at 298 K.

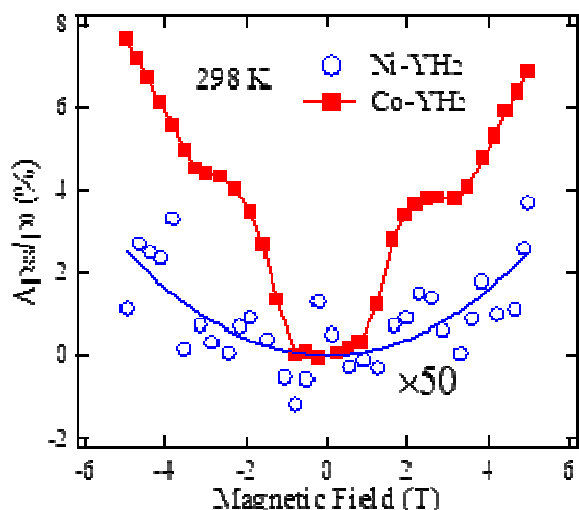


Fig. 3 Magnetic field dependences of transverse magnetoresistivities in Ni-YH₂ and Co-YH₂ at 298 K.

Co-YH₂で観測されたHRとTMRの挙動は、ローレンツ力では説明がつかない現象である。Co電極からのスピン注入の効果を評価するために、理論計算と比較する。前述の条件下で計算すると、HRとTMRの表式はそれぞれ以下ようになる。ただし、スピン軌道相互作用の磁場換算値(S)が外部磁場(B)に比べて十分大きい場合としている。

$$\rho_{yx} = \frac{n_h - n_e}{e\mu(n_h + n_e)} \left[\left(1 - \mu^2 S^2 + 2\mu^2 S^2 \left(\frac{\Delta E}{E} \right)^2 \right) \mu B - (1 + \mu^2 S^2) \mu S \frac{\Delta E}{E} \right]$$

$$\rho_{xx} = \frac{1}{e\mu(n_h + n_e)} \left(1 + \mu^2 S^2 + \mu^2 B^2 - 4 \frac{\mu^4 S^2 B^2}{1 + \mu^2 S^2} - 2\mu^2 S B \frac{\Delta E}{E} \right)$$

ここで、 μ は正孔および電子キャリア移動度、 $n_{h(e)}$ は

正孔(電子)濃度、 S は正孔および電子のスピン軌道相互作用パラメータで原理的に正・負両方の値を取り得る。 E はアップスピンとダウンスピンキャリアのドリフト運動に対する電場の平均値であり、 ΔE はスピン分裂に起因するその差である。金属のように強く縮退した場合、 $\Delta E/E$ は電流スピン偏極度に近似的に等しい。上式から分かることは、スピン蓄積は、(1)異常ホール効果をもたらすだけでなく、正常ホール効果に影響を与えること、また、スピン蓄積は、(2) S の符号が正の場合には負のTMR項、逆に S の符号が負の場合には正のTMR項を与えることである。これらの特徴を用いると、Ni-YH₂及びCo-YH₂の測定結果を定性的に説明できる。すなわち、電極にCoを使った方がYH₂におけるスピン蓄積効果が大きく、 S 値の符号を負と考えれば、観測された正の異常ホール効果及び正のTMRを説明できる。Co電極からのスピン注入の証拠を今後、さらに積み重ねて行く必要がある。

4. その他・特記事項 (Others)

参考文献

[1] M. Sakai, T. Sakuraba, Z. Honda, S. Hasegawa, A. Kitajima, K. Higuchi, A. Oshima, O. Nakamura, Jpn. J. Appl. Phys. 50, 103002-1~9 (2011).

共同研究者: 樋口宏二, 北島 彰, 法澤寛寛

(大阪大学ナノテクノロジー設備供用拠点)

5. 論文・学会発表 (Publication/Presentation)

- (1) M. Sakai, D. Kodama, Y. Okano, T. Sakuraba, Z. Honda, A. Kitajima, A. Oshima, K. Higuchi, S. Hasegawa, O. Nakamura, Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 093001-1 – 093001-8 (2013).
- (2) H. Hirama, M. Hayakawa, T. Okoshi, M. Sakai, K. Higuchi, A. Kitajima, A. Oshima, S. Hasegawa, J. Crystal Growth **378**, 356-360 (2013).
- (3) T. Okoshi, M. Hayakawa, H. Hirama, M. Sakai, K. Higuchi, A. Kitajima, A. Oshima, S. Hasegawa, J. Crystal Growth **378**, 388-392 (2013).
- (4) T. Sakuraba, H. Hirama, M. Sakai, Z. Honda, M. Hayakawa, T. Okoshi, A. Kitajima, A. Oshima, K. Higuchi, S. Hasegawa, J. Crystal Growth **378**, 351-355 (2013).
- (5) T. Sakuraba, M. Sakai, T. Arai, Y. Tanaka, H. Hirama, Z. Honda, A. Kitajima, K. Higuchi, A. Oshima, S. Hasegawa. The 12th Asia Pacific Physics Conference, A1-PWe-14, 平成 25 年 7 月 17 日.
- (6) S. Haruyama, M. Sakai, T. Sakuraba, H. Hirama, Z. Honda, A. Kitajima, K. Higuchi, A. Oshima, S. Hasegawa, The 12th Asia Pacific Physics Conference, A1-PTh-14, 平成 25 年 7 月 18 日.
- (7) 大友貴史, 丹羽康太, 酒井政道, 小坂昌史, 長谷川繁彦, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会予稿集 19p-C11-9 (平成 25 年 9 月 19 日, 同志社大学).
- (8) 酒井政道, 本多善太郎, 北島 彰, 大島明博, 長谷川繁彦, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会予稿集 19p-C11-11 (平成 25 年 9 月 19 日, 同志社大学).
- (9) 桜庭琢士, 酒井政道, 本多善太郎, 平間弘晃, 新井達也, 田中祐輔, 北島 彰, 大島明博, 樋口宏二, 長谷川繁彦, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会予稿集 19p-C11-12 (平成 25 年 9 月 19 日, 同志社大学).
- (10) 春山翔太, 酒井政道, 桜庭琢士, 平間弘晃, 北島彰, 大島明博, 樋口宏二, 長谷川繁彦, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会予稿集 19p-C11-13 (平成 25 年 9 月 19 日, 同志社大学).
- (11) 平間弘晃, 大越朋哉, 桜庭琢士, 酒井政道, 北島彰, 大島明博, 樋口宏二, 長谷川繁彦, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会予稿集 19p-C11-10 (平成 25

年 9 月 19 日, 同志社大学).

- (12) 春山翔太, 酒井政道, 桜庭琢士, 平間弘晃, 本多善太郎, 北島彰, 大島明博, 樋口宏二, 長谷川繁彦, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会 17p-F10-5 (平成 26 年 3 月 17 日, 青山学院大学相模原キャンパス).
- (13) 桜庭琢士, 酒井政道, 本多善太郎, 小坂昌史, 工藤 駆, 切金大介, 北島彰, 大島明博, 樋口宏二, 長谷川繁彦, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会 17p-F10-4 (平成 26 年 3 月 17 日, 青山学院大学相模原キャンパス).
- (14) 大友貴史, 丹羽康太, 斎藤由明, 酒井政道, 切金大輔, 小坂昌史, 長谷川繁彦, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会 17a-F10-1 (2014 年 3 月 17 日, 青山学院大学相模原キャンパス).
- (15) 平間弘晃, 酒井政道, 斎藤由明, 北島彰, 大島明博, 樋口宏二, 長谷川繁彦, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会 18p-PG12-3 (平成 26 年 3 月 18 日, 青山学院大学相模原キャンパス).

6. 関連特許 (Patent)

特許出願済み 2 件