

掺铌SrTiO₃中的逆自旋霍尔效应

何冬梅 彭斌 张万里 张文旭

Inverse spin Hall effect in Nb doped SrTiO₃

He Dong-Mei Peng Bin Zhang Wan-Li Zhang Wen-Xu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 106101 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20190118

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190118>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

NiFe/Pt薄膜中角度相关的逆自旋霍尔效应

Angle dependent inverse spin Hall effect in NiFe/Pt thin film

物理学报. 2015, 64(24): 247202 <https://doi.org/10.7498/aps.64.247202>

光电协同增强的场效应对LaAlO₃/SrTiO₃界面中持续光电导的调控

Light-enhanced gating effect on the persistent photoconductivity at LaAlO₃/SrTiO₃ interface

物理学报. 2019, 68(6): 067302 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182204>

La施主掺杂SrTiO₃单晶的阻变性能研究

Resistance switching of La doped SrTiO₃ single crystals

物理学报. 2018, 67(18): 187303 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180904>

Sr掺杂对La_{1-x}Sr_xMnO₃/LaAlO₃/SrTiO₃界面电子结构的影响

Effect of Sr doping on electronic structure of La_{1-x}Sr_xMnO₃/LaAlO₃/SrTiO₃ heterointerface

物理学报. 2017, 66(18): 187301 <https://doi.org/10.7498/aps.66.187301>

超构材料中的光学量子自旋霍尔效应

Quantum spin Hall effect in metamaterials

物理学报. 2017, 66(22): 227803 <https://doi.org/10.7498/aps.66.227803>

掺铌 SrTiO_3 中的逆自旋霍尔效应*

何冬梅 彭斌 张万里 张文旭†

(电子科技大学电子科学与工程学院, 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 成都 611731)

(2019 年 1 月 22 日收到; 2019 年 3 月 18 日收到修改稿)

采用磁控溅射法在未掺杂和掺杂的 SrTiO_3 基片上沉积了 NiFe 薄膜, 通过翻转测试法分离出掺杂样品中的自旋整流电压和逆自旋霍尔电压. 研究表明: 在未掺杂的 SrTiO_3 基片中, 翻转前后测试的电压曲线基本一致, 为 NiFe 薄膜自旋整流效应产生的电压. 对于掺 Nb 浓度 x 为 0.028, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2 的 SrTiO_3 基片, 分离出的逆自旋霍尔电压随掺杂浓度增加而减小, 在掺杂浓度为 0.15 和 0.2 的样品中没有探测到明显的逆自旋霍尔电压. 本文的结果表明, 在 SrTiO_3 中掺入强自旋轨道耦合的杂质, 通过掺杂浓度可以实现对 SrTiO_3 中逆自旋霍尔效应的调控, 这类可调控的自旋相关研究为自旋电子器件的研究和开发提供了更多的可能性, 具有很大的潜在应用价值.

关键词: 掺杂, SrTiO_3 , 逆自旋霍尔效应**PACS:** 61.72.-y, 77.90.+k, 76.50.+g**DOI:** 10.7498/aps.68.20190118

1 引言

自旋霍尔效应 (spin Hall effect, SHE) 是指在具有自旋轨道耦合 (spin-orbit coupling, SOC) 的材料中, 在纵向电流的驱动下, 自旋向上和向下的电子在横向方向上沿相反的方向运动, 从而形成自旋流. SHE 的逆过程, 即基于 SOC, 自旋相反的电子向垂直于自旋流的方向偏转形成电荷流, 称为逆自旋霍尔效应 (inverse spin Hall effect, ISHE). SHE 已经在轻金属^[1]、重金属^[2,3]、半导体^[4]等许多非磁性材料中被证实. 同时, ISHE 也在重金属薄膜中得到了深入的研究^[5,6]. SHE 及 ISHE 成为自旋流产生及探测的关键过程, 也将成为未来低功耗逻辑器件的重要候选.

正如前面所述, SHE 通常通过材料本征的 SOC 引起的能带结构变化获得, 不同材料的选择成为调控该效应的重要手段, 能带的几何特征 (Berry curvature) 决定了效应的大小^[7,8], 称为内

禀的 SHE. 近年来, 由掺杂原子非对称散射所引起的外禀的 SHE 也引起了大家的研究兴趣^[9–11]. 例如, Fert 等^[12]在掺有 5d 重金属的 Cu 中发现了自旋霍尔角值较大的 SHE, 其中, Cu 的本征 SHE 是可以忽略的. Gradhand 等^[13]证明了在 C 和 N 掺杂的重金属 Au 中有巨大的 SHE. 在掺杂材料中, 体系的 SHE 被杂质的强 SOC 增强, 这与源于材料能带结构的内禀 SHE 是不同的. 而且掺杂原子的强 SOC 也可以获得 ISHE, 这为非磁性材料 ISHE 的调控提供了重要的途径. 本文通过掺杂 Nb 在 SrTiO_3 (STO) 中检测到了 ISHE 电压, 并通过掺杂浓度的改变实现了对 ISHE 电压的调控, 为基于 ISHE 的自旋调控提供了新的维度, 也为自旋晶体管的发展提供了更多的可能^[14].

2 实验方法

采用磁控溅射法在不同掺杂浓度 (掺杂浓度 $x = 0.028, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$, 原子百分比) 的

* 国家重点研发计划 (批准号: 2017YFB0406403) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xwzhang@uestc.edu.cn

$$L = \frac{\Delta H^2}{4(H - H_r)^2 + \Delta H^2}, \quad D = \frac{2\Delta H(H - H_r)}{4(H - H_r)^2 + \Delta H^2}. \quad (4)$$

频率 f 和线宽 ΔH 满足 (5) 式, 拟合可以得到该样品的阻尼系数 $\alpha = 0.018$, 本征项 $\Delta H_0 = 2.58$ Oe, 其中 $\gamma = 1.76 \times 10^7 \text{Oe}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 为旋磁比, 拟合曲线如图 3(a) 所示.

$$\Delta H = \Delta H_0 + \frac{4\pi\alpha f}{|\gamma|}. \quad (5)$$

通过 Kittel 方程 (即 (6) 式) 可以拟合频率 f 和共振场 H_r 的关系, 从而得到样品的有效饱和磁化强度 $4\pi M_s = 7694$ Gs, 磁各向异性场 $H_k = 3.5$ Oe, 拟合曲线如图 3(b) 所示.

$$2\pi f = \gamma \sqrt{(H_r + H_k)(H_r + H_k + 4\pi M_s)}. \quad (6)$$

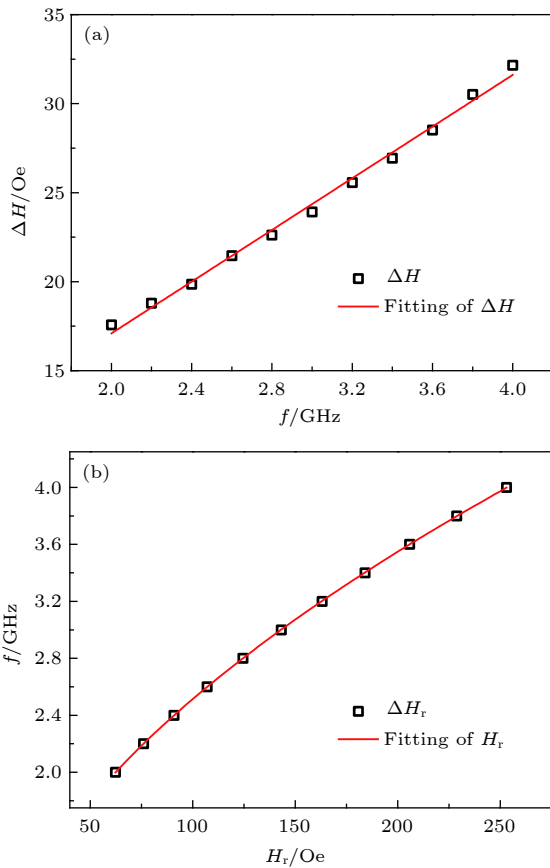


图 3 NiFe/STO 中铁磁共振线宽 ΔH 随频率 f 的变化曲线 (a) 和频率 f 随铁磁共振场 H_r 的变化曲线 (b)

Fig. 3. Linewidth (ΔH) of ferromagnetic resonance varies with frequency f (a) and frequency f varies with resonance field (H_r) (b) in NiFe/STO.

3.2 掺杂 SrTiO₃ 的 ISHE 电压信号测试

当微波频率 $f = 3.4$ GHz, 微波功率 $P = 200$ mW

时, 掺杂浓度为 0.05Nb 的 STO 翻转前后测试结果如图 4 所示, 对于掺杂的 STO 体系, 由于 V_{ISHE} 的存在, 在对样品进行翻转测试时, 翻转使得自旋注入的方向相反, 导致 V_{ISHE} 的符号发生变化, 因此翻转前后样品两端所测得的电压信号 V_{be} 和 V_{af} 不同. 从图 4 可知, 我们在掺杂的 STO 中获得了明显的 V_{ISHE} 信号, 通过对翻转前后两个电压信号的简单处理, 得到了分离后的 V_{SRE} 和 V_{ISHE} 随磁场的变化曲线, 如图 4 中插图所示.

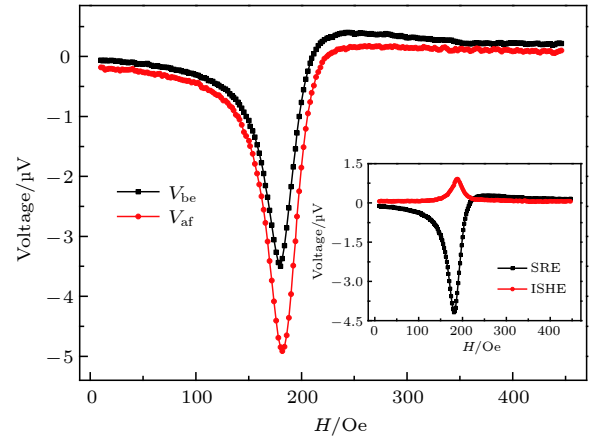


图 4 NiFe/0.05Nb:STO 体系 3.4 GHz 时的测试曲线, 插图为该体系 3.4 GHz 时的 V_{SRE} 和 V_{ISHE} 随外磁场的变化曲线

Fig. 4. Test curve at 3.4GHz in NiFe/0.05Nb:STO, the inset shows the variation of V_{SRE} and V_{ISHE} with external magnetic field at 3.4 GHz.

当 STO 基片 Nb 的掺杂浓度为 $x = 0.028, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$ 时, 通过同样的方法我们可以得到, 当微波频率 $f = 3.4$ GHz, 微波功率 $P = 200$ mW 时, 不同掺杂浓度 NiFe/Nb:STO 体系的 V_{ISHE} 如图 5 所示. 可以看到, 掺杂浓度 x 为 0.028, 0.05, 0.1 的样品中探测到明显的 V_{ISHE} 信号, 这是由于杂质引入的自由电子使得自旋能从铁磁层中扩散到 STO 中. 因此通过自旋泵浦效应, 来自 NiFe 层的自旋流注入到了 STO 中, 并通过杂质的强自旋轨道耦合转换为电荷流, 从而在样品两端测得 V_{ISHE} 信号. 对于掺杂浓度 x 为 0.15, 0.2 的样品, 则没有探测到明显的 V_{ISHE} 信号, 我们将在下文中讨论其原因.

对于每一个掺杂浓度的样品, 通过 (5) 式拟合频率 f 和线宽 ΔH 的关系, 可以得到相应样品的阻尼系数 α , 拟合曲线如图 6 所示. 拟合得到的阻尼系数 α 与掺杂浓度 x 的关系如图 6 中的插图

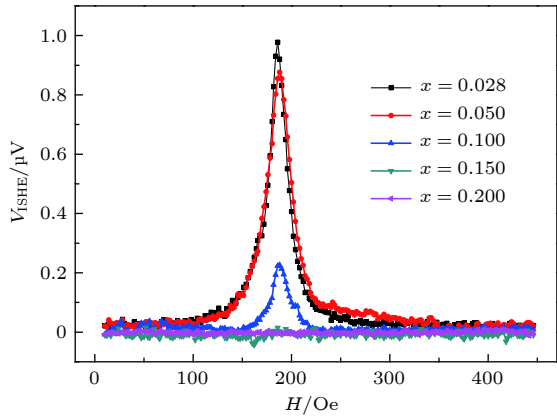


图 5 3.4 GHz 时不同掺杂浓度的 V_{ISHE} 随外磁场的变化曲线

Fig. 5. Variation curve of V_{ISHE} with different doping concentrations with external magnetic field at 3.4 GHz.

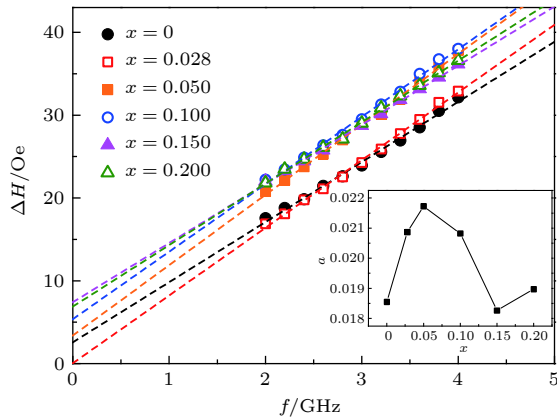


图 6 各掺杂浓度样品频率 f 与线宽 ΔH 的拟合曲线, 插图为阻尼系数 α 与掺杂浓度的关系

Fig. 6. Fitting curves of frequency f and linewidth ΔH at different doping concentrations, the inset shows the relationship between the damping coefficient α and the doping concentration.

所示.

从图 6 中可以看出, 与无 ISHE 的本征 STO 相比, 掺杂后有 ISHE 的样品 (掺杂浓度 x 为 0.028, 0.05, 0.1 的样品) 阻尼系数 α 明显增加, 这主要是因为体系中的自旋泵浦效应, 当发生铁磁共振时, 磁矩的一致进动使得自旋流从 NiFe 层注入到相邻的掺杂 STO 层, 导致掺杂 STO 中出现自旋累积的弛豫, 使得 NiFe 的磁化进动阻尼增大, 在测试结果中表现为阻尼系数 α 增大, 这一结果与许多有关 FM/NM 体系的文献报道一致^[18,19]. 增强的阻尼 $\Delta\alpha$ 是自旋扩散的主要表征参数, 曾被用作自旋注入和转化的主要特征. 与此同时, 当掺杂浓度 x 较大时, 在没有逆自旋的样品中, 我们得

到的阻尼系数恢复到无掺杂的样品中的数值. 该结果暗示在氧化物界面和体内的自旋输运和自旋转化更加复杂, 可能需要构建新的理论模型进行解释.

在我们的数据中, 需要特别指出: 随掺入 Nb 的增加, ISHE 电压信号减弱, 这一方面来源于电阻的减小, 同时从阻尼系数的增加量的减少也表明自旋-电荷流转化效率在降低, 自旋流的扩散与转化并没有随电导率的增加而提高, 这可能是高的掺杂浓度降低了自旋相干扩散长度.

4 结 论

本文重点研究了金属氧化物 STO 中的逆自旋霍尔效应, 通过在 STO 中掺入有强自旋轨道耦合作用的杂质 Nb, 在 NiFe/Nb: STO 体系中观察到了自旋流向电荷流的转变, 通过翻转测试法改变自旋注入的方向分离出了自旋整流电压和逆自旋霍尔电压. 对于未掺杂的 NiFe/STO 体系, 则没有探测到明显的逆自旋霍尔电压. 通过改变掺杂浓度, 发现逆自旋霍尔效应与掺杂浓度并不呈正比关系, 而存在一个逆自旋霍尔电压最大值对应的掺杂浓度. 本文工作为氧化物自旋电子学的进一步发展, 优化自旋-电压转换效率提供了参考.

参考文献

- [1] Valenzuela S O, Tinkham M 2006 *Nature* **442** 176
- [2] Kimura T, Otani Y, Sato T, Takahashi S, Maekawa S 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 156601
- [3] Liu L, Pai C F, Li Y, Tseng H W, Ralph D C, Buhrman R A 2012 *Science* **336** 555
- [4] Kato Y K, Myers R C, Gossard A C, Awschalom D D 2004 *Science* **306** 1910
- [5] Kumar A, Bansal R, Chaudhary S, Muduli P K 2018 *Phys. Rev. B* **98** 104403
- [6] Nakayama H, Ando K, Harii K, Fujikawa Y, Kajiwara Y, Yoshino T, Saitoh E 2010 *IEEE Trans. Magn.* **46** 2202
- [7] Jungwirth T, Qian N, Macdonald A H 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 207208
- [8] Guo G Y, Murakami S, Chen T W, Nagaosa N 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 096401
- [9] Bottegoni F, Ferrari A, Cecchi S, Finazzi M, Ciccacci F, Isella G 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 152411
- [10] Ramaswamy R, Wang Y, Elyasi M, Motapothula M, Venkatesan T, Qiu X, Yang H 2017 *Phys. Rev. Appl.* **8** 024034
- [11] Tse W K, Das S S 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 056601
- [12] Fert A, Levy P M 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 157208
- [13] Gradhand M, Fedorov D V, Zahn P, Mertig I 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 186403

- [14] Choi W Y, Kim H J, Chang J, Han S H, Abbout A, Saidou H B M, Manchon A, Lee K J, Koo H C 2018 *Nano Lett.* **18** 7998
- [15] Zhang W, Peng B, Han F, Wang Q, Soh W T, Ong C K, Zhang W 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 102405
- [16] Wang Q, Zhang W, Peng B, Zhang W 2017 *Aip. Adv.* **7** 125218
- [17] Mosendz O, Vlaininck V, Pearson J E, Fradin F Y, Bauer G E W, Bader S D, Hoffmann A 2010 *Phys. Rev. B* **82** 214403
- [18] Ando K, Takahashi S, Ieda J, Kajiwara Y, Saitoh E 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 103913
- [19] Deorani P, Yang H 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 232408

Inverse spin Hall effect in Nb doped SrTiO₃*

He Dong-Mei Peng Bin Zhang Wan-Li Zhang Wen-Xu[†]

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, School of Electronic Science and Engineering,

University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

(Received 22 January 2019; revised manuscript received 18 March 2019)

Abstract

The inverse spin Hall effect (ISHE), namely spin flows converted into charge currents due to spin orbital interaction, is investigated extensively in heavy metals, such as Pt, W, Au, etc. Recently, the effect was also found in Cu doped with Au. Their difference is that the spin Hall effect is from the intrinsic effect which is related to the topological character of the electronic bands, while the ISHE is mainly from the extrinsic spin dependent scattering by the impurities. The impurity scattering can give opportunities to tune the effect, for example by impurity concentration, which is impossible by the intrinsic mechanism. In this work, we extend the material to the doped oxides. NiFe films are deposited on undoped and doped SrTiO₃ substrates by magnetron sputtering, respectively. The spins are injected from the magnetic thin films by spin pumping through using a shorted microstrip transmission line fixture at different frequencies and room temperature. The spin rectification voltage and the inverse spin Hall voltage in the doped sample are separated by the inverting spin injection direction method, which is realized by flipping the samples. The results show that in the undoped SrTiO₃ substrate, the voltage curves before and after flipping the sample are basically the same, which is due to the voltage generated by the spin rectification effect of the NiFe film. For Nb-doped SrTiO₃ substrates with Nb concentration $x = 0.028, 0.05, 0.1, 0.15$ and 0.2 , the inverse spin Hall voltage decreases with doping concentration increasing and is not detectable in sample with doping concentration of 0.15 , nor with doping concentration of 0.2 . The decrease of the ISHE effect may be due to the spin coherent length decreasing with the increase of the impurity concentration. The correlation between spin-charge conversion and transportation needs knowing in detail. Nevertheless, the results show that by doping strong spin-orbit coupling impurities into SrTiO₃, thus by changing the doping concentration, the inverse spin Hall effect in SrTiO₃ can be controlled. This tunable spin-charge conversion provides more possibilities for developing the spintronic devices and it will have great potential applications in the future.

Keywords: doping, SrTiO₃, inverse spin Hall effect

PACS: 61.72.-y, 77.90.+k, 76.50.+g

DOI: 10.7498/aps.68.20190118

* Project supported by National Key R&D Program of China (Grant No. 2017YFB0406403).

[†] Corresponding author. E-mail: xwzhang@uestc.edu.cn