

金属薄膜中的逆自旋霍尔效应*

毛 奇 赵宏武[†]

(中国科学院物理研究所, 固态量子信息与计算实验室 北京 100190)

2012-02-14收到

[†] 通讯联系人. Email: hwzhao@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20130106

摘 要 自旋流的产生和测量是自旋电子学面临的重大挑战. 逆自旋霍尔效应提供了对自旋流进行电学测量的有效手段. 文章总结了近年来人们对金属薄膜中的逆自旋霍尔效应的研究, 从非局域电注入、铁磁共振注入、声波共振注入和圆偏振光注入这四种不同的自旋流注入方式来介绍逆自旋霍尔效应的物理机制、实现方式和影响因素.

关键词 自旋电子学, 逆自旋霍尔效应, 铁磁共振, 圆偏振光自旋泵浦, 非局域自旋泵浦, 声波共振

Inverse spin Hall effect in metallic thin films

MAO Qi ZHAO Hong-Wu[†]

(Laboratory of Solid State Quantum Information and Quantum Computation, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract The generation and detection of spin currents define the main challenges of spintronics. The inverse spin Hall effect can be used as an effective means for the electrical measurement of the spin current in metallic thin films. We review the investigation of the inverse Hall effect in recent years by four different spin current injection techniques, that is, by nonlocal electrical pumping, ferromagnetic resonance, acoustic wave resonance, and circularly polarized light injection.

Keywords spintronics, inverse spin Hall effect, ferromagnetic resonance, circularly polarized optical spin pumping, nonlocal electrical spin pumping, acoustic wave resonance

* 国家自然科学基金(批准号: 10834012)资助项目

1 引言

自旋电子学的发展使得基于电子自旋的信息处理和存储器件成为可能，其中关键技术之一是自旋流的产生和探测。上个世纪70年代，Dyakonov和Perel^[1]从理论上预言了自旋霍尔效应(spin Hall effect, SHE)的存在，即自旋流可以在垂直于电荷流和自旋极化方向上产生。Hirsch^[2]提出了一个在金属薄膜中观测SHE的方案，Zhang^[3]、Murakami^[4]、Sinova^[5]等人分别提出了在半导体材料中观察SHE的方案。随后，Kato^[6]和Wunderlich^[7]分别用磁光克尔(Kerr)效应和自旋发光二极管(spin light-emitting diode)在半导体中观察到SHE。半导体中电子自旋的扩散距离 λ_{sf} 较长($\sim 1\mu\text{m}$)，因此可以用光学手段进行探测。而在金属中，由于强烈的自旋轨道耦合作用，电子自旋的扩散距离 λ_{sf} 很短($\sim 10\text{nm}$)，传统的光学手段难以奏效。近年来，人们在金属薄膜中观察到一种新的逆自旋霍尔效应(inverse spin Hall effect, ISHE)，通过将自旋流转化为电荷流，实现了对自旋流的电学测量。目前，ISHE已经在Al^[8]、Au^[9]和Pt^[10]等金属薄膜中观察到，并成为自旋电子学研究的新热点。

在ISHE中，自旋相反的电子由于自旋轨道耦合，向垂直于自旋流 J_s 的方向偏转(图1)。 J_s 的方向、电子自旋的方向 σ 和偏转方向满足右手定则。自旋电子的定向移动可以产生电荷流，这些电荷在薄膜一端积累，就形成了一个垂直于自旋流 J_s 和其自旋极化矢量 σ 的电场 E_{ISHE} ，它们之间的关系可以表示为：

$$E_{\text{ISHE}} = D_{\text{ISHE}} J_s \times \sigma, \quad (1)$$

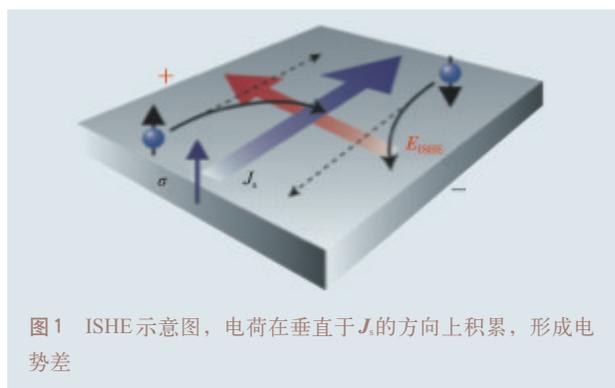


图1 ISHE示意图，电荷在垂直于 J_s 的方向上积累，形成电势差

D_{ISHE} 为自旋霍尔系数。因此，通过测量 E_{ISHE} ，我们就可以知道自旋流的大小和方向。在实验中，通常通过改变磁场方向来验证是否存在ISHE。图1为ISHE示意图。

本文将按照产生自旋流的4种不同方式，即非局域电注入、铁磁共振注入、声波共振注入和圆偏振光注入，来介绍金属薄膜中ISHE的物理机制、实现方式和影响因素。

2 采用非局域电注入自旋流技术研究金属薄膜中的ISHE

在铁磁性/顺磁性金属薄膜中，电子流经铁磁层时，其自旋会产生极化，并通过界面注入到顺磁性金属中，这就是自旋流 J_s 的注入，并在薄膜垂直于 J_s 和 σ 方向的两端产生 E_{ISHE} 。非局域电注入是指测量 E_{ISHE} 的位置距离自旋流注入的位置较远。

采用非局域电注入方式时，金属线中产生的 E_{ISHE} 的测量方法和结果如下：Valenzuela等人^[8]早期在CoFe/Al₂O₃/Al结构中实现了自旋流的注入，并在Al膜中观察到ISHE，但是由于Al的自旋轨道耦合作用太弱，自旋霍尔角仅为 10^{-4} ，实验必须要在低温(4.2K)下进行。随后Kimura等人^[10]利用Py/Cu/Pt

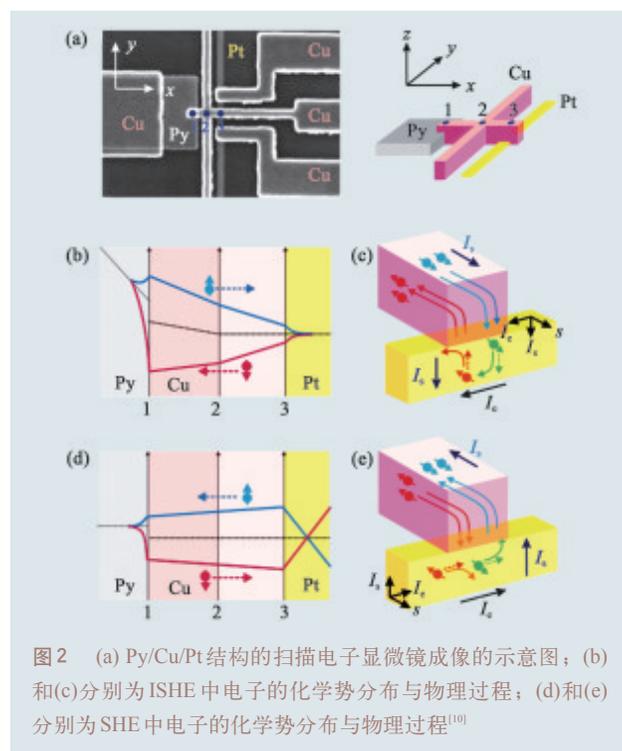


图2 (a) Py/Cu/Pt结构的扫描电子显微镜成像的示意图；(b)和(c)分别为ISHE中电子的化学势分布与物理过程；(d)和(e)分别为SHE中电子的化学势分布与物理过程^[10]

3 采用铁磁共振注入自旋流技术研究金属薄膜中的 ISHE

在铁磁性/非磁性金属薄膜垂直于膜面施加微波磁场，铁磁性金属薄膜的磁矩会绕着外加直流磁场方向做有阻尼的进动(见图 4)，并且进动幅度会逐渐减小，最终磁矩会趋向于有效磁场的方向。由于角动量守恒，电子的角动量会从铁磁性金属向非铁磁性金属耗散，即向非铁磁性金属中注入自旋流。当外加磁场达到铁磁共振(FMR)的频率时，注入的自旋流最大。

Saitoh 等人^[11]早期在 Ni₈₁Fe₁₉/Pt 双层结构中观察到了 ISHE，其中 Ni₈₁Fe₁₉ 层的厚度为 10nm，Pt 层的厚度为 7nm，薄膜的大小为 1 mm×1 mm。定义 I 为微波的吸收强度，与没有附加 Pt 层的样品相比，Ni₈₁Fe₁₉/Pt 结构的共振吸收信号 $dI(H)/dH$ 的半高宽要更宽(见图 5(a))，这说明有自旋流从 Ni₈₁Fe₁₉ 注入到 Pt 中^[12]。

FMR 信号 dI/dH (见图 5(b))是由两部分贡献构成的：Pt 层中的 ISHE 信号和 Ni₈₁Fe₁₉ 层中的反常霍

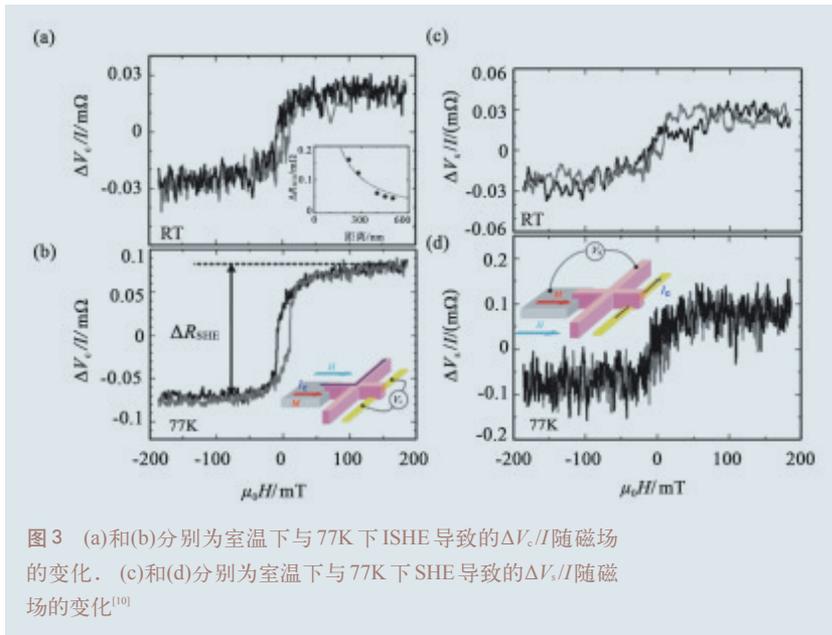


图3 (a)和(b)分别为室温下与 77K 下 ISHE 导致的 $\Delta V_c/I$ 随磁场的变化。(c)和(d)分别为室温下与 77K 下 SHE 导致的 $\Delta V_c/I$ 随磁场的变化^[10]

结构(Py 为铍墨合金，其常见的化学式有 Ni₈₀Fe₂₀ 和 Ni₈₁Fe₁₉ 两种)产生自旋流，分别在室温和 77K 的条件下在 Pt 薄膜中测量到 E_{ISHE} ，其中 Py 层厚度为 30nm，Pt 层的宽度是 80nm，厚度是 4nm，Py 距离 Pt 层中心的距离约为 400nm(见图 2(a))。

Py, Cu 和 Pt 的电阻率分别为 15.4×10^{-8} , 2.1×10^{-8} 和 $15.6 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ ，因此电场在 Cu 线的分压不大。自旋流注入 Pt 中时，由于界面处自旋向上和自旋向下的电子的化学势与 Pt 内部的化学势不同(见图 2(b))，导致从 Py 层向 Pt 层注入自旋流，并转化为 E_{ISHE} 。实验观察到 77K 时的自旋霍尔电阻 ($R_{\text{SH}} = \Delta V_c / I$) 比室温下的大 (ΔV_c 为逆自旋霍尔电压的变化)， R_{SH} 随着面内磁场的增强而增强，并逐渐饱和(见图 3(a), (b))。如果在 Pt 层两端施加电场，Py 层中也可以探测到自旋霍尔电压 ΔV_c 的变化(见图 3(c), (d))，这表明自旋流到电荷流以及从电荷流到自旋流的转化是可逆的。 $\Delta V_c / I$ 和自旋霍尔电阻 $\Delta V_c / I$ 大致相等，说明电荷流和自旋流的相互转化符合昂萨格(Onsager)关系。实验估算得到室温下 Pt 的自旋霍尔角 $\alpha_{\text{SH}} = \sigma_{\text{SH}} / \sigma_c = 3.7 \times 10^{-3}$ ，比 Al 大一个数量级，认为是 Pt 的原子序数较大引起了较强的自旋轨道耦合作用。

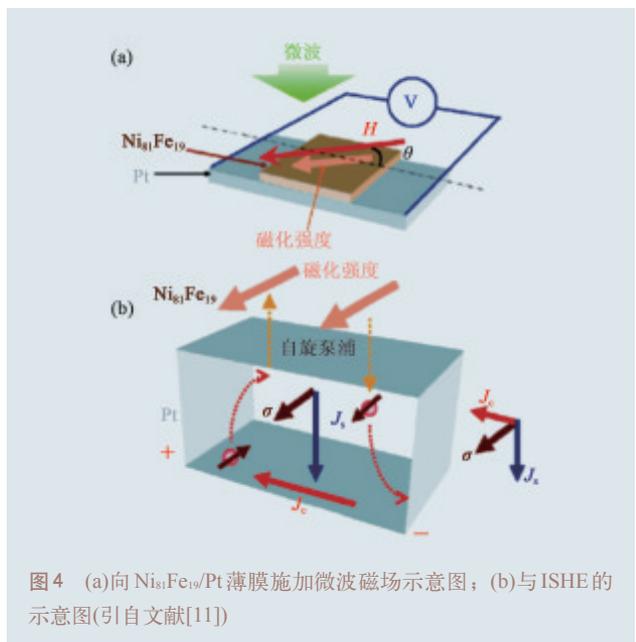
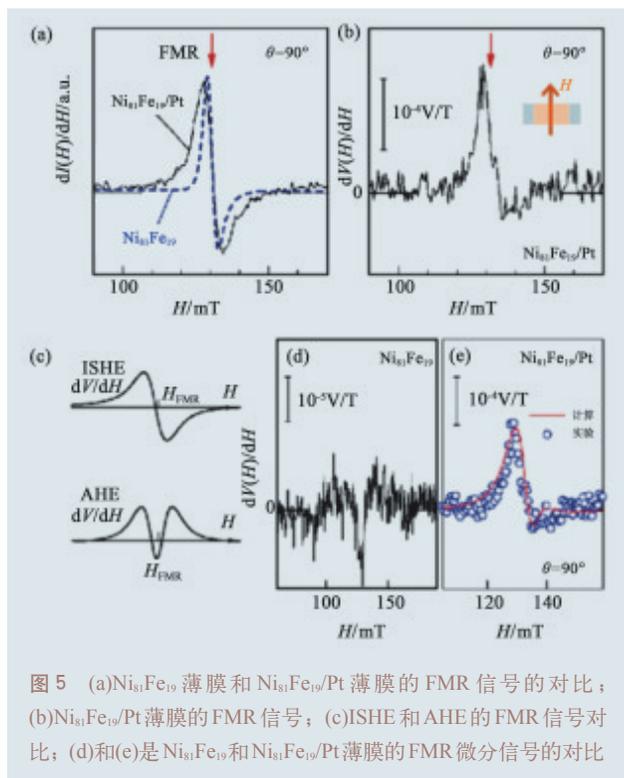


图4 (a)向 Ni₈₁Fe₁₉/Pt 薄膜施加微波磁场示意图；(b)与 ISHE 的示意图(引自文献[11])



尔效应(AHE)信号. ISHE 信号是关于磁场零点对称的, AHE 信号是关于磁场零点反对称的(见图 5(c)). 实验表明, 在只存在 $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ 层时, dV/dH 近似偶对称(见图 5(d)); 而在附加有 Pt 层时, dV/dH 近似奇对称(见图 5(e)), 说明此时 ISHE 信号的贡献占主要部分.

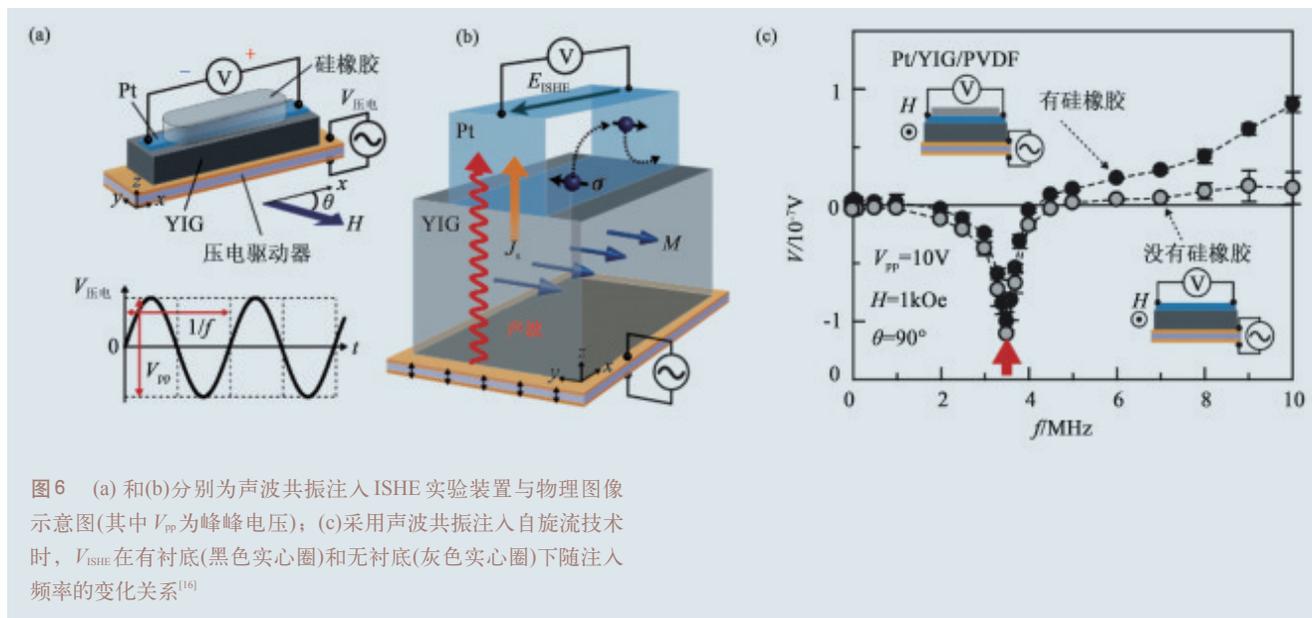
O. Mosendzde^[13]和 Ando 等人^[12]分别研究了 Pt 薄膜中逆自旋霍尔电压 V_{ISHE} 与微波功率 P_{MW} 和薄膜尺

寸的关系. 实验结果表明, $V_{\text{ISHE}} \propto j_s \propto P_{\text{MW}}$. $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ 层的宽 w 和长 l 分别定义为垂直和平行于磁场方向的长度, V_{ISHE} 与铁磁层的宽度 w 成正比, 与长度 l 无关, 这与(1)式一致, 并同时说明产生的自旋流在毫米尺度上分布均匀.

4 采用声波共振注入自旋流技术研究金属薄膜中的 ISHE

将铁磁绝缘体/顺磁金属的薄膜放到压电陶瓷片上, 压电陶瓷两端加交流电产生振动(见图 6(a)), 这样声波就可以通过声子将能量传递给铁磁绝缘体中的磁振子, 从而将自旋流注入到顺磁金属中^[14], 最终在金属薄膜的两端探测到 E_{ISHE} (见图 6(b)).

Uchida 等人^[14]采用声波共振注入自旋流技术在 Pt/ $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (YIG) 结构中观察到了 ISHE. 声波是在压电陶瓷薄膜两端加频率为 f 的交流电时产生的, 因此电流和振动产生的热流会导致自旋泽贝克 (spin Seebeck, SS) 效应^[15]伴随产生, 这种干扰信号可以通过去掉 Si 衬底来过滤. 有和没有 Si 衬底的样品的测量结果表明(见图 6(c)), 自旋泽贝克效应产生的电动势与声波注入产生的 E_{ISHE} 符号相反, 而声波共振注入产生的 V_{ISHE} 在相同频率时为最大, 说明声波共振实现了自旋流的注入. 进一步的研究表明^[16], 这个频率与压电陶瓷的磁致伸缩系数和 YIG/压电陶瓷界面的透射系数有关.



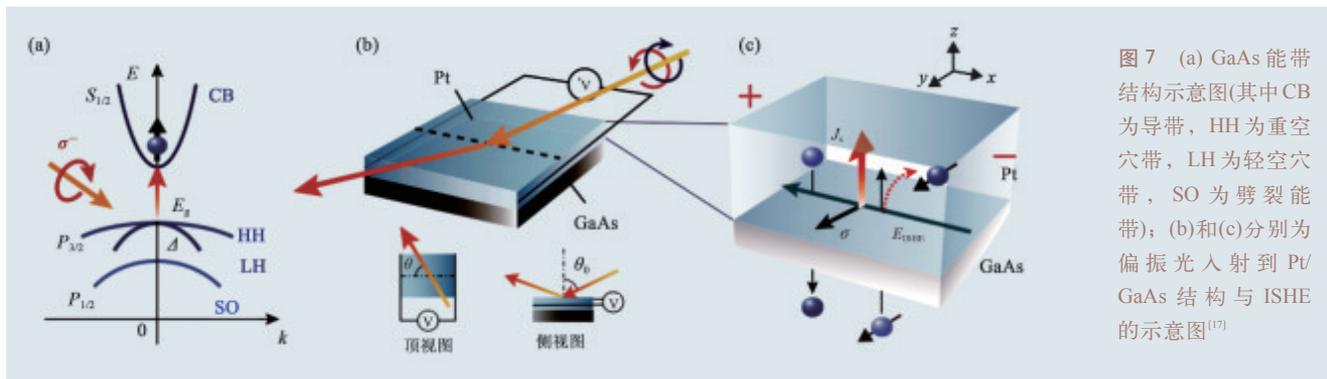


图7 (a) GaAs能带结构示意图(其中CB为导带, HH为重空穴带, LH为轻空穴带, SO为劈裂能带); (b)和(c)分别为偏振光入射到Pt/GaAs结构与ISHE的示意图^[17]

5 采用圆偏振光注入自旋流技术研究金属薄膜中的ISHE

在Pt/GaAs薄膜中,圆偏振光透过Pt薄层入射到GaAs层, GaAs价带中的电子会吸收能量跃迁到导带(见图7(a)).控制入射圆偏振光的能量和角度,将在GaAs中产生光电子并经过GaAs/Pt界面形成自旋流,最终在Pt层的两端探测到 E_{ISHE} .

Ando等人^[17, 18]在Pt/GaAs双层结构中成功观察到光致ISHE. Pt层的厚度为5nm, GaAs衬底的Si掺杂浓度 $N_D=4.7 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$,入射圆偏振光的波长为670nm,入射光与薄膜样品平面法线的夹角为 65° ,与薄膜平面内的夹角为 θ (见图7(b)).实验分别测量了右旋圆偏振光和左旋圆偏振光照射样品表面时产生的逆自旋霍尔电压 V^R 和 V^L .实验发现 $V^R - V^L$ 与 $\sin\theta$ 成正比(见图8(a)),与(1)式一致.

定义圆偏振光的偏振度 $P_{\text{circ}} = \frac{I^+ - I^-}{I^+ + I^-}$,其中 I^+ 和

I^- 分别是右旋和左旋圆偏振光的光强.实验发现,归一化后的 $V^R - V^L$ 与偏振度 P_{circ} 呈线性关系(见图8(b)).虽然圆偏振光的偏振度和大小需要考虑Pt层引入后的修正^[18],但圆偏振光的角动量在传播过程中守恒.利用光致ISHE可以探测与圆偏振光角动量成正比的 E_{ISHE} ,因此该结构还可用于制作探测偏振光的新型器件.

6 展望

ISHE是在金属薄膜中进行自旋流测量的重要方法.目前,传统自旋流注入的技术,如非局域电注入和铁磁共振注入技术已经比较成熟,圆偏振光注入和声波共振等新的注入方式也被相继发现.这些方式各有特点:非局域电注入的特点是物理意义明确,但在扩散型输运中自旋流指数衰减,注入效率比较低;铁磁共振和声波共振注入的特点是将自旋流直接注入到金属薄膜中,但需要的尺寸比较大;圆偏振光注入的特点在于它可以偏振光的信息转化为自旋流信息,但效率较低.现在ISHE实验的难点在于自旋流的产生和注入的效率普遍不高, E_{ISHE} 需要用锁相技术进行测量,而自旋流在金属薄膜中会很快衰减并转化为横向电压,其动力学过程尚不得而知.现有的理论认为,在电阻率不同的金属中,ISHE有内部和外部两种不同的产生机制^[19, 20],但还需要更多的实验来证明和完善.

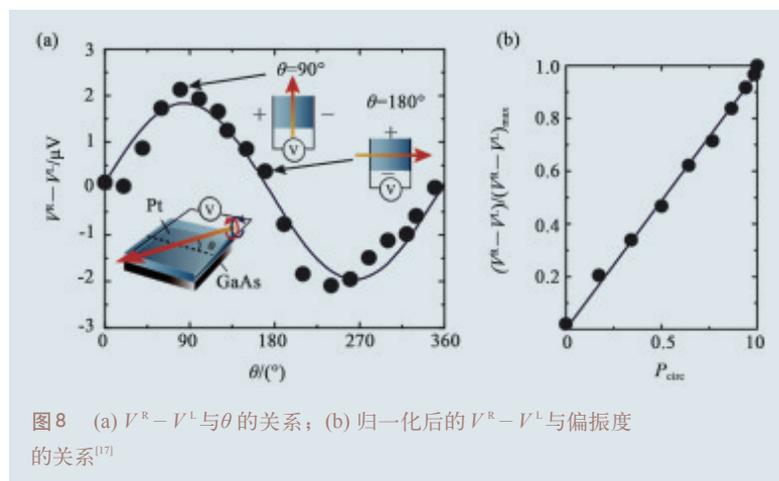


图8 (a) $V^R - V^L$ 与 θ 的关系; (b) 归一化后的 $V^R - V^L$ 与偏振度的关系^[17]

参考文献

- [1] Dyakonov M I, Perel V I. *Physics Letters A*, 1971, 35: 459
- [2] Hirsch J E. *Physical Review Letters*, 1999, 83: 1834
- [3] Zhang S. *Physical Review Letters*, 2000, 85: 393
- [4] Murakami S. *Physical Review B*, 2004, 69: 241202
- [5] Sinova J, Culcer D, Niu Q *et al.* *Physical Review Letters*, 2004, 92: 126603
- [6] Kato Y K, Myers R C, Gossard A C *et al.* *Science*, 2004, 306: 1910
- [7] Wunderlich J, Kaestner B, Sinova J *et al.* *Physical Review Letters*, 2005, 94: 047204
- [8] Valenzuela S O, Tinkham M. *Nature*, 2006, 442: 176
- [9] Seki T, Hasegawa Y, Mitani S *et al.* *Nat. Mater.*, 2008, 7: 125
- [10] Kimura T, Otani Y, Sato T *et al.* *Physical Review Letters*, 2007, 98: 156601
- [11] Saitoh E, Ueda M, Miyajima H *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88: 182509
- [12] Ando K, Takahashi S, Ieda J *et al.* *Journal of Applied Physics*, 2011, 109: 103913
- [13] Mosendz O, Vlaminck V, Pearson J E *et al.* *Physical Review B*, 2010, 82: 214403
- [14] Uchida K, Adachi H, An T *et al.* *Nat. Mater.*, 2011, 10: 737
- [15] Uchida K, Takahashi S, Harii K *et al.* *Nature*, 2008, 455: 778
- [16] Uchida K. Acoustic spin pumping: Direct generation of spin currents from sound waves in Pt/Y₃Fe₅O₁₂ hybrid structures, <http://arxiv.org/abs/1108.4238v1>, 2011
- [17] Ando K, Morikawa M, Trypiniotis T *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 96: 082502
- [18] Ando K, Morikawa M, Trypiniotis T *et al.* *Journal of Applied Physics*, 2010, 107: 113902
- [19] Onoda S, Sugimoto N, Nagaosa N. *Physical Review Letters*, 2006, 97: 126602
- [20] Miyasato T, Abe N, Fujii T *et al.* *Physical Review Letters*, 2007, 99: 086602

Advanced Research Systems

New!

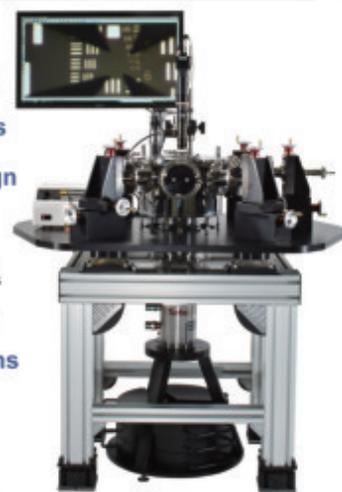
*最高温度可达1100K
*有光窗存在下实现4K样品温度

产品特色:
更低温度1.5K
更高温度1100K
超低振动<5nm
超高真空1E-11Torr
强大制冷功率
更多。。。



超低温真空探针台

- Cryogen Free
- Up to 8 Probes
- Modular Design
- 4K - 800K
- DC, LF, MW, & FO Probe Arms
- Magnet Options Available



典型应用: 光学, 非光学, 电学, 磁学, XRD, 低振动, UHV, And More



7476 Industrial Park Way * Macungie, PA 18062 * USA Tel: 610.967.2120 * Fax: 610.967.2395

www.arscryo.com *ars@arscryo.com