

# 一种研究自旋翻转散射效应的新方法<sup>\*</sup>

曾中明<sup>1</sup> 丰家峰<sup>1</sup> 王勇<sup>1</sup> 韩秀峰<sup>1,†</sup> 詹文山<sup>1</sup> 张晓光<sup>2</sup> 张泽<sup>3</sup>

(1 中国科学院物理研究所 北京凝聚态物理国家实验室 北京 100080)

(2 美国橡树岭国家实验室纳米材料、计算科学和数学研究中心 橡树岭 3783-6164)

(3 北京工业大学 北京 100022)

**摘要** 金属中自旋翻转散射长度远长于电子平均自由程,近来关于自旋翻转散射效应的研究主要集中于扩散区域.文章作者提出了一种使用双势垒磁性隧道结来研究纳米尺度结构中弹道区域的自旋翻转散射效应的新方法.这种方法可以从磁电输运性质的测量,得出中间隔离层中的自旋翻转散射效应的温度和偏压关系,进一步可以得出诸如电子平均自由程和自旋翻转散射长度等自旋散射信息,以及中间层的态密度和量子阱信息.

**关键词** 自旋翻转散射,双势垒磁性隧道结,自旋极化输运

## A new method for probing spin – flip scattering in ballistic nanosystems

ZENG Zhong-Ming<sup>1</sup> FENG Jia-Feng<sup>1</sup> WANG Yong<sup>1</sup> HAN Xiu-Feng<sup>1,†</sup>

ZHAN Wen-Shan<sup>1</sup> ZHANG Xiao-Guang<sup>2</sup> ZHANG Ze<sup>3</sup>

(1 Institute of Physics, Beijing National Laboratory of Condensed Matter Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

(2 Center for Nanophase Materials Sciences and Computer Science and Mathematics Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee 37831-6164, USA)

(3 Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

**Abstract** Because the spin – flip length is longer than the electron mean – free – path in a metal, past studies of spin – flip scattering were limited to the diffusive regime. We have developed a method that uses a magnetic double barrier tunnel junction to study spin flip scattering in nanometer sized spacer layers near the ballistic limit. We extract the voltage and temperature dependence of the spin – flip conductance  $G_s$  in the spacer layer from magnetoresistance measurements. In addition to spin scattering information, such as the mean – free – path (70nm) and the spin – flip length (1.0—2.6 $\mu\text{m}$ ) at 4.2K, this technique also yields information on the density of states and quantum well resonance in the spacer layer.

**Keywords** Spin – flip scattering, double barrier magnetic tunnel junction, spin polarized transport

## 1 引言

自从1988年在Fe/Cr多层结构中发现的巨磁电阻效应以来<sup>[1]</sup>,对自旋电子学的研究与开发取得了迅速的进展.目前自旋电子学中最重要研究热点之一是自旋翻转散射(spin-flip scattering)及与其相关的物理效应,如自旋注入和自旋积聚效应<sup>[2–10]</sup>.而上述效应均与一个重要的物理参量——自旋翻转散射长度(spin-flip length)有关,如何有效

地观测自旋翻转散射长度既是自旋电子学中的一个非常重要的基本问题,也是人工设计自旋电子学材料结构和研制各种自旋电子学器件的基础.

对自旋翻转散射长度的测量要追溯到1985年,

<sup>\*</sup> 国家重点基础研究发展计划(批准号:2006CB93200)、国家杰出青年基金(批准号:50325104,50528101)、国家自然科学基金(批准号:10574156)、中国科学院知识创新工程重大课题和王宽诚基金

2006-11-22 收到初稿 2006-12-28 收到修改稿

<sup>†</sup> 通讯联系人. Email: xfhan@aphy.iphy.ac.cn

Johnson 等人采用“铁磁电极/金属线/铁磁电极”结构来研究金属线中的自旋翻转散射效应<sup>[5]</sup>. 该实验的核心是在金属铝线上沉积两铁磁电极, 一个作为自旋注入, 另一个作为检测探头, 然而在这个实验中, 测量的信号非常弱小(皮伏数量级). 近年来, 随着微加工技术的发展, Jedema 等人<sup>[9]</sup>采用类似的结构制备了质量更高的样品, 在室温和低温下观察到了明显的自旋极化输运, 进一步得出了室温下 Cu 的自旋翻转散射长度为 350nm.  $A.2K$  为  $1\mu\text{m}$ . 然而, 由于自旋翻转散射长度较长(通常为几百纳米数量级), 要从实验上对自旋翻转散射长度进行可靠测量, 要求金属线的长度是该金属的平均自由程的数倍长, 因此上述研究均是在扩散区进行的. 而在磁性多层膜和隧道结中, 各层的厚度均是纳米尺度, 其总厚度也很难达到扩散区所需的尺度, 因此这些多层膜中的电子输运几乎是弹道性质的. 然而, 目前尚未有关于弹道区的自旋翻转散射效应的研究.

最近, 我们提出采用双势垒磁性隧道结——“铁磁性层(FM)/绝缘层(I)/非磁性金属层(NM)/绝缘层(I)/铁磁性层(FM)”来研究弹道区域的自旋翻转散射效应. 这种方法可以得出诸如电子平均自由程和自旋翻转散射长度等自旋散射信息, 以及中间层的态密度和量子阱信息. 研究结果发表在美国《物理评论快报》上(Phys. Rev. Lett., 2006 97: 1066051). 本文简要介绍这种方法的基本原理、样品制备及结果分析.

## 2 理论基础

这种方法的理论基础是双势垒隧道结(DMTJ)的顺序隧穿模型<sup>[11,12]</sup>, 即: 双势垒结构的隧穿是两个依次进行的隧穿过程. 电子先从左电极相干隧穿到阱中间层的量子化能级上, 然后阱中的电子通过各种散射机制, 丧失其与初态的相位联系, 建立某种平衡分布, 然后再从阱中相干隧穿到右电极. 根据文献[12]所述的双势垒隧道结的等效电路图, 经过一定的数学处理, 我们可以得出 DMTJ 的磁电阻比值 TMR 可用单势垒隧道结(SMTJ)的平行时电导( $G_p$ )和反平行时电导( $G_{AP}$ )以及 Cu/I/Cu 隧道结的电阻表示, 即:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{2} \frac{G_p - G_{AP}}{G_{AP} + \sqrt{G_p + G_{AP}\gamma G_s}}, \quad (1)$$

式中  $\gamma = \sqrt{R_N}$ . 由上式可知, 只要测量出双势垒隧道结的磁电阻、单势垒隧道结的电导和 Cu 隧道结的

电阻值, 就可以得出  $G_s$ . 虽然在单势垒隧道结也存在自旋翻转散射效应, 但在双势垒隧道结中也存在这样的类似效应, 因此上式中的这种效应就可以相互抵消. 在一定的偏压  $V$  下, Cu 的化学势自旋劈裂为:

$$\Delta\mu = eV \frac{\sqrt{G_p - G_{AP}\gamma G_s}}{G_{AP} + \sqrt{G_p + G_{AP}\gamma G_s}}. \quad (2)$$

我们可以使用自旋翻转电流来评估自旋翻转长度  $l_{sf}$ :

$$G_s \Delta\mu/e = I_{sf} = \frac{eNv_F}{l_{sf}}, \quad (3)$$

式中  $N$  是 Cu 层中积聚的电子数,  $v_F$  为费米速度,  $v_F/l_{sf}$  是自旋翻转速率.

使用双势垒结构的最大优点是: 每个自旋通道的电导与两通道间的自旋翻转电导是在同一数量级, 同时不会减小平均自由程, 也不会增加样品的尺寸. 理论方面的详细描述请参阅文献[12—14].

## 3 样品制备

我们设计的单势垒隧道结的结构为: Ta(5)/Cu(30)/Ta(5)/Ni<sub>79</sub>Fe<sub>21</sub>(10)/Ir<sub>22</sub>Mn<sub>78</sub>(12)/FM/Al(0.9)-O/FM/Ni<sub>79</sub>Fe<sub>21</sub>(10)/Cu(30)/Ta(5), 双势垒磁性隧道结的结构如下: Ta(5)/Cu(30)/Ni<sub>79</sub>Fe<sub>21</sub>(10)/Ir<sub>22</sub>Mn<sub>78</sub>(12)/FM/Al(0.9)-O/Cu(0.5, 1.4)/Al(0.9)-O/FM/Ir<sub>22</sub>Mn<sub>78</sub>(12)/Ni<sub>79</sub>Fe<sub>21</sub>(10)/Cu(30)/Ta(5), FM = Co<sub>75</sub>Fe<sub>25</sub>(4) 或 Co<sub>60</sub>Fe<sub>20</sub>B<sub>20</sub>(3), 单位为 nm. 我们利用超高真空、多功能磁控溅射仪来沉积磁性隧道结多层膜, 其中 AlO<sub>x</sub> 势垒层由等离子体氧化 0.9 nm 的金属铝膜制备, 然后采用紫外曝光和 Ar 离子刻蚀技术, 微加工制备出长短轴分别为 4 $\mu\text{m}$  和 2 $\mu\text{m}$  大小的椭圆形磁性隧道结. 溅射前真空腔内本底真空优于  $5.0 \times 10^{-7}$  Pa, 溅射时氩气(Ar)压为 0.07Pa. 样品的制备和微加工过程均在超净实验室里完成, 具体微加工过程类似于文献[15]的描述. 采用标准四探针法和物理性能测试系统(PPMS)对双势垒磁性隧道结样品进行了磁电输运特性的测量. 为了考察样品的制备质量情况, 我们采用高分辨透射电镜对样品的断面进行了分析, 图1给出了中间 Cu 层厚度为 1.4nm 的 DMTJ 样品的透射电镜图. 从图可以看出, 两个 AlO<sub>x</sub> 势垒层(图中的两条白线), 与上下两个铁磁钉扎层和中间自由铁磁层一起, 构成了一个较好的双势垒磁性隧道结.

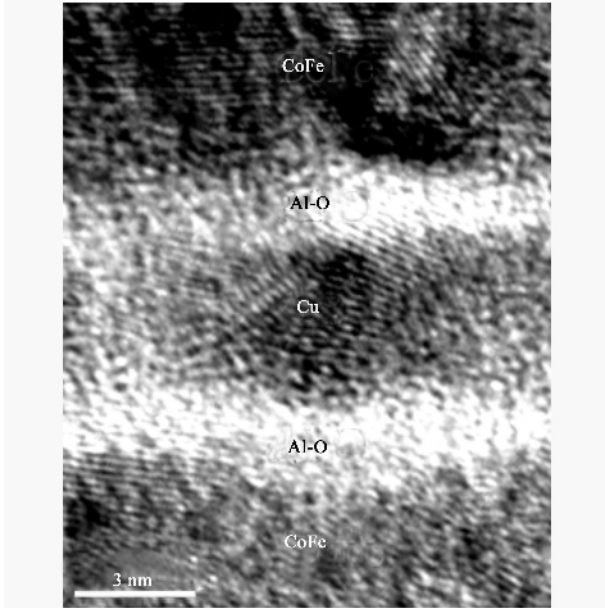


图1 Cu = 1.4 nm 样品的高分辨透射电镜图(真实厚度大于实验设计的厚度值)

#### 4 自旋翻转散射效应

为了进行自旋翻转散射效应研究,首要条件是这种结构的磁电输运特性是自旋极化的,而实验上最直观是测量样品的电阻与磁场的变化依赖关系.我们在室温和低温下对单势垒隧道结和双势垒隧道结样品的磁电输运特性进行了测量,对于 CoFe (CoFeB) - SMTJ 样品,观测到了室温下和 4.2 K 下的磁电阻比值(TMR)分别为 41.2% (58.5%) 和 56.3% (95.4%);而对于 CoFe (CoFeB) - DMTJ 样品,由于中间层是非磁性层,其 TMR 值相对来说要小一些,室温下 TMR 仅为 0.15% (0.58%), 4.2 K 下为 1.4% (2.32%), 这里没有给出具体曲线. 以上实验结果表明,样品的磁电输运特性是自旋极化的,为进一步研究自旋散射提供了前提保障.

我们考察了自旋翻转散射效应的偏压和温度特性,从这两种特性,我们可以得出中间 Cu 中的电子平均自由程和自旋翻转散射长度等自旋散射信息,以及中间层的态密度和量子阱信息. 图 2 给出了根据 (1) 式推导出的  $\gamma G_s$  与外加偏压的依赖关系曲线,其依赖关系为非线性的,这种特性可能起源于 Cu 的态密度. 同时,自旋散射效应在外加偏压  $V = \pm 0.14V$  时达最大,此时样品的 TMR 值也急剧减小(如插图所示),可能与量子阱有关<sup>[16]</sup>,而不是常规单势垒隧道结中的磁激子和声子作用<sup>[17,18]</sup>. 实验结果和理论一致,拟合计算可得电子平均自由程为

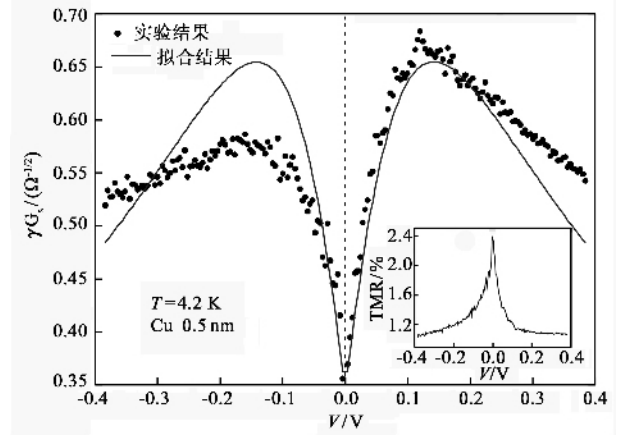


图2 4.2 K 下  $\gamma G_s$  随外加偏压的依赖关系, 插图为 TMR 值与偏压的关系曲线

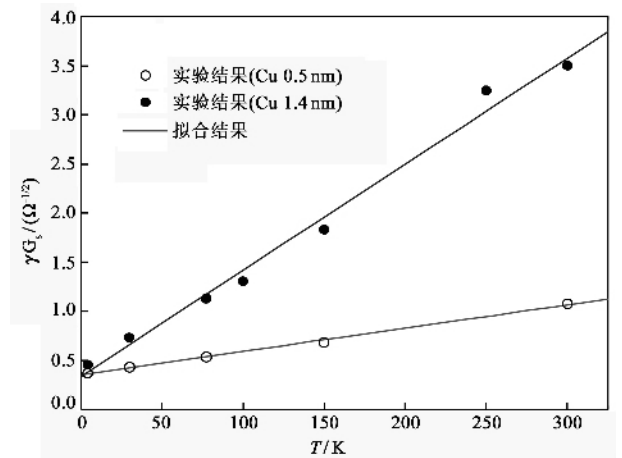


图3 样品的  $\gamma G_s$  随温度的依赖关系

70 nm.

图 3 给出了样品的  $\gamma G_s$  与温度的依赖关系, 如图所示, CoFe 和 CoFeB 样品的  $\gamma G_s$  与温度之间有很好的线性依赖关系, 两个样品的斜率比值为 3, 与中间 Cu 层的厚度成反比. 这种厚度依赖关系表明, 自旋翻转散射与电子 - 声子相互作用有关. 我们使用 (3) 式来评估自旋翻转散射长度, 以  $\gamma N v_F / \Delta \mu$  为拟合参数, 以  $l_{sf}(300K) = 350 \text{ nm}$ <sup>[9]</sup> 作为初始条件, 获得 Cu = 0.5 nm 样品的  $l_{sf}(4.2K) = 1 \mu\text{m}$ , 获得 Cu = 1.4 nm 样品的  $l_{sf}(4.2K) = 2.6 \mu\text{m}$ . 这些结果与早期文献报道一致.

值得注意的是本方法涉及两种隧道结(单势垒隧道结和双势垒隧道结)的比较, 因此对势垒厚度和界面质量的控制是减小误差的关键.

