

基于磁性绝缘体的磁子阀效应

吴昊^{1,2} 韩秀峰^{1,2,*}

(1 中国科学院物理研究所 北京 100190)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

2018-03-12收到

* email: xfhan@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20180405

晶体管是现代半导体器件的基石，计算机芯片通过晶体管来控制其中的电子流动。为了进一步提高计算机的存储密度与运算速度，人们迫切需要发展更小尺寸的晶体管单元。如今微电子技术已经跨入 10 nm 的制程工艺，由于面临原子极限和量子效应等物理瓶颈，继续向下推进新的制程节点变得越来越困难。为了继续提高半导体器件的性能，研究人员正在努力寻求新的替代方案。

面向后摩尔时代的信息存储与逻辑运算需求，自旋电子器件(Spintronic Device)为开发下一代具有更小单元尺寸、非易失性、低功耗和高速度的微电子器件提供了具有广阔发展前景的研究方向^[1]。其中，自旋阀(Spin Valve)是各类自旋电子器件的核心单元，通常包括两层铁磁金属和非磁中间层构成的三明治核心结构(FM1/NM/FM2)，由于自旋极化电子在两铁磁层间输运，从而使器件的电阻受到两铁磁层相对取向的调制。基于自旋阀结构的室温巨磁电阻(GMR, 1988年)^[2, 3]和室温隧穿磁电阻(TMR, 1995年)^[4, 5]器件，已经广泛应用于磁性硬盘、磁性随机存储器 and 磁性传感器等高密度信息存储与传感器件中，法国 A. Fert 和德国 P. Grünberg 两位科学家也因为巨磁电阻(GMR)效应的发现获得了2007年诺贝尔物理学奖。

磁子(Magnon)是自旋波(Spin Wave)量子化的准粒子，它可以将单个自旋翻转的角动量以波动的形式传递到整个磁性体系中，因此可以进行长距离、高效率的自旋信息的传播，在最好的材料中传播长度可以达到大约 1 cm，而且不会有显著的能量衰减和热耗散，这是在传统基于电子的自旋器件中无法实现的^[6, 7]，因此进一步发展基于磁子自旋的器件与电路已经引起了研究人员的广泛

关注。最近，德国的一个研究小组通过模型初步模拟了如何在集成振幅回路中使这些磁子形成电流，且只在二维尺度上与元件连接^[8]。为了实现基于磁子自旋的逻辑、存储与各种电路器件，正如半导体器件中的晶体管以及自旋电子器件中的自旋阀，人们迫切需要开发磁子阀(Magnon Valve)这种基本核心单元来实现磁子自旋信息的存储和操控等各种器件功能特性。

为了解决这一问题，2012—2016年期间我们经过一系列的样品制备条件摸索和优化，克服了以往YIG只能通过分子束外延或者脉冲激光沉积在GGG衬底上外延制备的限制，采用可用于大规模工业生产的磁控溅射技术在Si—SiO₂衬底上开发出了基于磁性绝缘体YIG的磁子自旋器件，其核心单元为Pt/YIG/Pt三明治结构，并在该结构中观测到了由亚利桑那大学张曙丰教授团队理论预测的磁子拖拽效应^[9]。通过Pt中电流产生的自旋霍尔效应来激发YIG中的磁子流，YIG中的磁子流传递到另一Pt层中，进而通过其中的逆自旋霍尔效应来进行探测，并且发现磁子流的大小受到YIG磁矩方向的调制。这个研究进展实现了全电学方法的磁子自旋信息的激发与探测，证实了磁性绝缘体可以作为磁子流(Magnon Current)和磁子自旋信息的传输通道，并且可以通过YIG的磁矩来操控磁子自旋信息的开关状态，该项工作以快讯的方式发表在*Physical Review B*杂志上^[10]。

最近，我们采用YIG作为磁性电极、Au作为中间层，在国际上率先设计和优化制备出了YIG/Au/YIG磁子阀结构，通过两层YIG来产生磁子流，并且通过精细调节其晶体结构来实现独立控制两层YIG的磁矩，从而实现平行态和反平行态的磁化状态。通过采用局域电流加热的方法产生

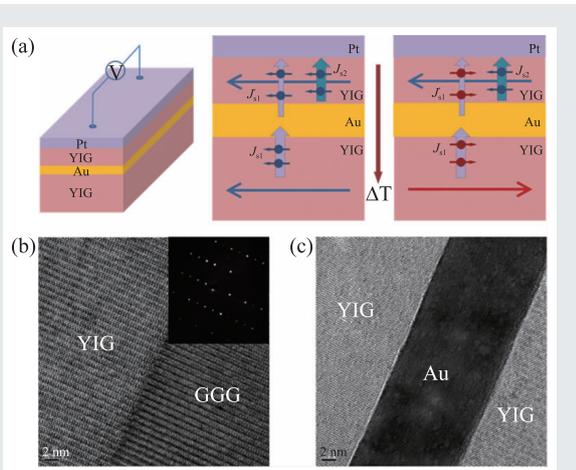


图1 (a)磁子阀结构、原理和测量示意图；(b)–(c)GGG/YIG和YIG/Au/YIG区域的透射电镜照片

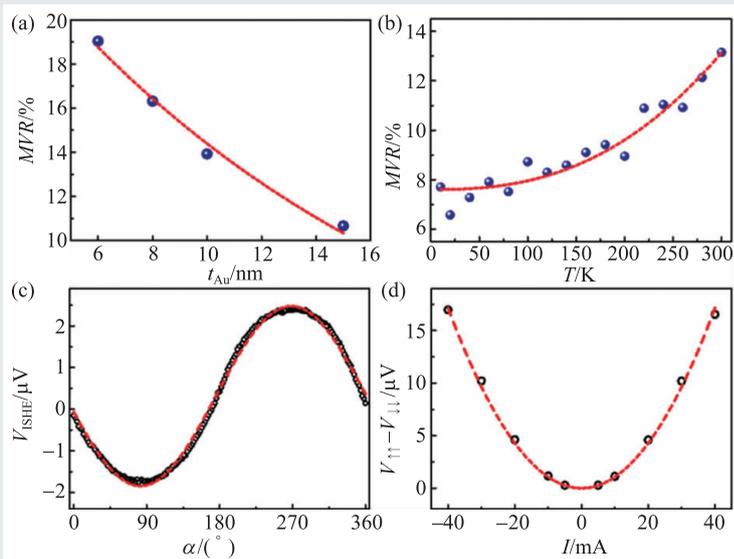


图2 (a)–(b)磁子阀比值随中间Au层厚度和温度的依赖关系；(c)–(d)探测端逆自旋霍尔电压随YIG磁化方向和加热电流的依赖关系

沿薄膜厚度方向的温度梯度，YIG中由温度梯度产生的自旋塞贝克效应可以激发其中的磁子流^[11, 12]，经由另一层Pt中的逆自旋霍尔效应来测量通过该磁子阀的磁子流的大小(图1)，进而发现其中的磁子阀效应——即两层YIG的相对磁化取向可以控制通过该磁子阀的磁子流大小，室温下平行态和反平行态的相对磁子阀比值(Magnon Valve Ratio, MVR)可以达到19%(图2)。并且进一步揭示了磁子阀比值的大小主要取决于磁性绝缘体/金属界面的磁子—电子自旋的转换效率，该转换效率的温度依赖关系与理论计算的结果相一致^[13]；通过磁子阀比值与Au厚度的依赖关系的拟合，得出Au的自旋扩散长度为15.1 nm，与自旋泵浦方法获得的结果相一致^[14]。该项研究进展作为编辑推荐(Editor's Suggestion)和物理特色(Featured in Physics)文章已发表在*Physical Review Letters*杂志上^[15]；美国物理学会的*Physics*杂志同期也进行了亮点评论和报道^[16]。该项研究工作制备出的这种YIG/Au/YIG，即新型磁性绝缘体/中间层/磁性绝缘体(MI1/NM/MI2)磁子阀结构，其本身即是自旋信息传递和逻辑运算的一种基本磁子型核心单元器件，也是未来研发基于磁子流的电路、逻辑、存储、晶体管和开关等各类磁子型器件(Magnon Device)的材料与物理基础。

参考文献

- [1] Wolf S A, Awschalom D D, Buhrman R A *et al.* *Science*, 2001, 294:1488
- [2] Baibich M N, Broto J M, Fert A *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1988, 61: 2472
- [3] Binasch G, Grunberg P, Saurenbach F *et al.* *Phys. Rev. B*, 1989, 39:4828
- [4] Miyazaki T, Tezuka N. *J. Magn. Magn. Mater.*, 1995, 139:L231
- [5] Moodera J S, Kinder L R, Wong T M *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1995, 74:3273
- [6] Chumak A V, Vasyuchka V I, Serga A A *et al.* *Nat. Phys.*, 2015, 11:453
- [7] Lenk B, Ulrichs H, Garbs F *et al.* *Phys. Rep.*, 2011, 507:107
- [8] Wang Q, Pirro P, Verba R *et al.* *Sci. Adv.*, 2018, 4:1701517
- [9] Zhang S S L, Zhang S. *Phys. Rev. Lett.*, 2012, 109:096603
- [10] Wu H, Wan C H, Han X F *et al.* *Phys. Rev. B*, 2016, 93:060403
- [11] Uchida K, Xiao J, Adachi H *et al.* *Nat. Mater.*, 2010, 9:894
- [12] Wu H, Han X F *et al.* *J. Magn. Magn. Mater.*, 2017, 441:149
- [13] Zhang S S L, Zhang S. *Phys. Rev. B*, 2012, 86:214424
- [14] Brangham J T, Meng K, Yang A S *et al.* *Phys. Rev. B*, 2016, 94: 054418
- [15] Wu H, Han X F *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2018, 120:0970205
- [16] Wright K. *Physics*, 2018, 11:23