



EuS/Ta异质结的极大磁电阻效应

芦佳 甘渝林 颜雷 丁洪

Infinite magnetoresistance of EuS/Ta heterostructure

Lu Jia Gan Yu-Lin Yan Lei Ding Hong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 047401 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201213

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201213>

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

磁电异质结及器件应用

Magnetoelectric heterostructure and device application

物理学报. 2018, 67(15): 157508 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180856>

多铁异质结构中逆磁电耦合效应的研究进展

Progress of converse magnetoelectric coupling effect in multiferroic heterostructures

物理学报. 2018, 67(15): 157513 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181272>

单晶CeB6发射性能及磁电阻各向异性研究

Anisotropy study on thermionic emission and magnetoresistivity of single crystal CeB6

物理学报. 2017, 66(18): 186102 <https://doi.org/10.7498/aps.66.186102>

铁磁/非磁金属异质结中的拓扑霍尔效应

Topological Hall effect in ferromagnetic/non-ferromagnetic metals heterojunctions

物理学报. 2018, 67(13): 131202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180369>

高性能太赫兹发射: 从拓扑绝缘体到拓扑自旋电子

High-performance THz emission: From topological insulator to topological spintronics

物理学报. 2020, 69(20): 200704 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200680>

退火效应增强铁磁异质结太赫兹发射实验及机理

Annealing effect on terahertz emission enhancement from ferromagnetic heterostructures

物理学报. 2020, 69(20): 200702 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200526>

EuS/Ta 异质结的极大磁电阻效应*

芦佳¹⁾ 甘渝林¹⁾ 颜雷^{1)†} 丁洪¹⁾²⁾³⁾

1) (中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家研究中心, 北京 100190)

2) (中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049)

3) (中国科学院大学, 中国科学院拓扑量子计算卓越中心, 北京 100049)

(2020年7月28日收到; 2020年9月29日收到修改稿)

在铁磁/超导异质结中, 铁磁体的交换场通过近邻效应将导致超导体准粒子态密度的塞曼劈裂. 基于该效应, 在外磁场不强的情况下, 通过外加磁场可以有效地调节铁磁/超导界面处的交换作用, 从而实现超导体在正常态和超导态之间转换, 产生极大磁电阻. 本文利用脉冲激光沉积方法制备了 EuS/Ta 异质结并研究了其电磁特性. Ta 在 3.6 K 以下为超导态, EuS 在 20 K 以下为铁磁态. 在 2 K 时, EuS/Ta 异质结中可观测蝴蝶型磁滞回线, 证明在低磁场下 ($< \pm 0.18$ T) 异质结中 EuS 铁磁态和 Ta 超导态共存. 磁输运测试表明, 通过施加外磁场可以有效调节 EuS 的交换场, 随着交换场的增大, 同时也加强了界面处的交换作用, 从而抑制 Ta 的超导态, 实现了 Ta 在超导态和正常态之间的转变, 在 EuS/Ta 异质结中观测到了高达 144000% 的磁电阻. 本文制备的 EuS/Ta 异质结具有极大磁电阻效应, 在自旋电子学器件中有潜在的应用前景.

关键词: 铁磁绝缘体/超导异质结, 交换场, 磁电阻效应**PACS:** 74.45.+c, 73.43.Qt, 75.70.-i, 74.78.-w**DOI:** 10.7498/aps.70.20201213

1 引言

铁磁材料 (ferromagnetic, F) 和超导材料 (superconductor, S) 异质结界面的近邻效应是研究铁磁性和超导性相互作用的有效方法之一, 其丰富的物理性质备受研究者关注. 20 世纪 60 年代, Deutscher 等^[1], Dotsch 等^[2] 和 de Gennes^[3,4] 提出的理论模型揭示了近邻效应的物理机理. 迄今为止, 研究人员对基于铁磁/超导/铁磁的三明治异质结做了大量的理论和实验工作^[5-8]. 一般来说, 如果铁磁材料是金属性的, 自旋极化电流会从铁磁层传输到超导层中, 需要考虑自旋阀效应的影响^[9,10], 超导层和铁磁层界面处的物理机理会非常复杂. 另外, 受反近邻效应的影响, 超导体的超导转变温度

会降低. 为了避免以上弊端, 研究者将铁磁金属替换为铁磁绝缘材料 (ferromagnetic insulator, FI), 形成铁磁绝缘体 (FI)/超导 (S)/铁磁绝缘体 (FI) 三明治结构. 在此三明治结构中, 铁磁绝缘体中的电子波函数会在超导体表面几个原子层的范围内衰减, 可以直接研究界面处的近邻效应. 已经有多个团队证实铁磁绝缘体 (例如 EuS 和 EuO) 的交换场作用在相邻的 Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) 超导体中的表面上, 通过 FI/S 界面附近区域的交换作用, 可在 BCS 超导体中产生态密度塞曼劈裂^[11-13]. 态密度劈裂的幅度和交换场成正比, 该交换场在超导体中的渗透深度和超导相干长度相关联, 其大小范围从几个特斯拉到几十个特斯拉. Hao 等^[11] 研究 Au/EuS/Al 隧道结在磁场中的电导率时发现, 施加 0.07 T 的外场可以在 Al 中

* 国家重点研发计划 (批准号: 2016YFA0300600)、中国科学院战略性先导科技专项 (批准号: XDB28000000, XDB07000000) 和北京市科学技术委员会 (批准号: Z191100007219012) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lyan@iphy.ac.cn

产生等效 3.46 T 的交换场. 不需要施加强外磁场, 铁磁绝缘体/超导体异质结在超导临界温度以下的温度区间内就产生可观的超导准粒子态密度劈裂. 因此, 这一现象的发现为自旋电子学器件应用打开了一条新思路.

当超导体插入两个铁磁层中时, 隧道结电阻值受两个磁性层的调制, 当两个磁性层磁矩反平行时, 电阻值为零, 而当磁矩平行时, 电阻值为有限值. 这一现象被 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{In}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 隧道结证实^[14]. 麻省理工的 Li 等^[15] 又在 EuS/Al 双层结构和 $\text{EuS}/\text{Al}/\text{EuS}$ 三明治结构中发现控制界面磁交换场可以控制 Al 在超导态和正常态转变从而产生极大磁电阻效应, 在 1.21 K 时观测到 3000% 的磁电阻率. 然而, Al 暴露在空气中容易氧化形成 AlO_x 绝缘层, 影响其界面特性. 同时, 基于其他 BSC 超导体的 FI/S 异质结构由于制备工艺及界面匹配的问题, 相关研究报道得比较少. 在前人研究基础上, 本文选择性质更稳定的 Ta 作为超导层, EuS 作为铁磁绝缘层, 制备了 EuS/Ta 异质结, 并对该异质结在低温下的输运性质和铁磁性进行了详细的测试分析.

2 实验方法与结果

本文采用脉冲激光沉积方法在 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ SrTiO_3 (STO) 绝缘衬底上沿 (001) 方向依次外延生长 EuS 和 Ta 薄膜, 制备出了如图 1 所示的 Ta/EuS/STO 异质结. 通过在 STO 衬底上安装掩模板, 直接沉积出 $1\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的标准霍尔器件和 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 的方形膜. 其中 EuS 和 Ta 靶材分别由 99.95% 纯度的 EuS 粉末与 99.99% 纯度的 Ta 颗粒用固相烧结法制成. 烧蚀靶材的激光器选用 Nd:YAG 固体激光器, 其输出波长为 355 nm, 脉冲宽度为 10 ns. 聚焦在靶材表面的激光能量密度为 $1\text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$, 激光重复频率为 5 Hz. 本底真空为 $8 \times 10^{-7}\text{ Pa}$, 生长过程中, 将衬底温度升至 550 °C, 先沉积 10 nm 的铁磁绝缘薄膜 EuS, 随后将衬底温度缓慢降至 500 °C, 将 20 nm 的 Ta 薄膜直接沉积在 EuS 薄膜上.

基于四探针法, 利用 Quantum Design 公司的综合物性测试系统对样品的输运性质进行详细的测试分析. 还利用 Quantum Design 公司的超导量子干涉仪测试了样品的磁性.

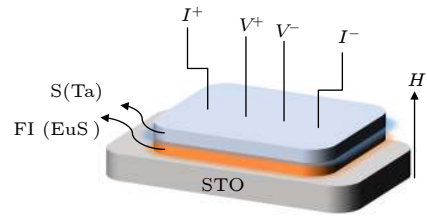


图 1 EuS/Ta 异质结结构以及输运测试示意图

Fig. 1. Schematic diagram of the EuS/Ta heterostructure geometry.

在 EuS/Ta 异质结中, EuS 是典型的铁磁绝缘体^[16], 因此输运结果主要反应 Ta 膜的电磁学响应. EuS/Ta 异质结的电阻随温度变化的曲线如图 2 所示, 从图中可以看出 Ta 薄膜在 4.1 K 时开始超导态转变, 直至 2.3 K 时完全转变为超导态, 表明其超导转变温度 T_c 约为 3.6 K, 低于其块材的 4.5 K^[17,18], 超导薄膜的超导转变温度一般和膜厚以及界面应力有关. 同块材相比, 薄膜的超导转变温度一般随着膜厚的减小而降低^[17].

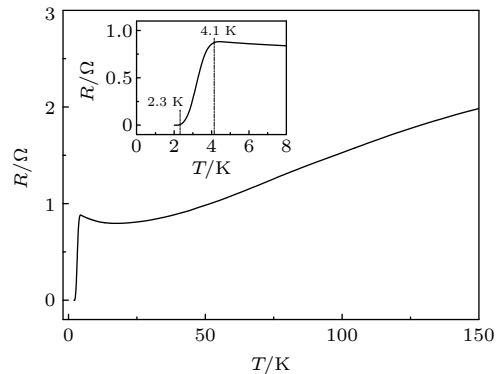


图 2 EuS/Ta 异质结的电阻随温度的变化曲线; 插图为超导转变温度放大图

Fig. 2. Resistance as a function of temperature for EuS/Ta heterostructure. Inset: zoom of R - T curve at low temperature range.

EuS/Ta 异质结的热磁曲线和磁滞回线如图 3 所示. 从图 3(a) 中可以看出, 在 0.01 T 的面内磁场下, 该异质结的居里温度约为 20 K, 稍高于 EuS 块材的居里温度 (16.7 K). Stachow-Wójcik 等^[19] 在 KCl 衬底上生长的 EuS 得到了类似的结果, 证明了 EuS 薄膜居里温度的升高归因于薄膜和衬底之间晶格失配度产生的应力. 另外, 在 3.2 K, 接近 Ta 的超导转变温度处, 该异质结的热磁曲线出现了一个拐点, 说明在异质结中 Ta 处于超导态从而表现出抗磁性. 因此我们推测在 3.2 K 附近, EuS/Ta 异质结中 EuS 的铁磁态和 Ta 的超导态

共存. 将外磁场进一步提高至 1 T, 异质结的热磁曲线只表现出铁磁性. 可能是在高磁场下, Ta 层由超导态转变为正常态, 进而异质结中只有铁磁性被观测到.

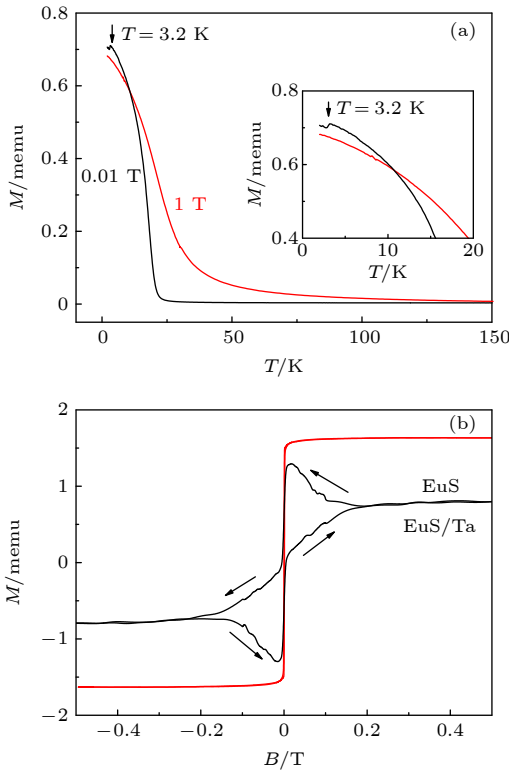


图 3 (a) EuS/Ta 异质结的热磁曲线, 插图是低温区域的放大, 黑色箭头指向热磁曲线的拐点; (b) 2 K 时 EuS/Ta 异质结和 EuS 单层膜的磁滞回线

Fig. 3. (a) Magnetization of temperature dependence of the EuS/Ta heterostructure. Inset: zoom of $M-T$ curve at low temperature, the black arrow marks the kick point of $M-T$ curve with $H = 0.01$ T; (b) magnetic hysteresis loop of the EuS/Ta heterostructure and EuS single layer at 2 K, respectively.

在温度为 2 K 时, 在 EuS/Ta 异质结中观察到不同于铁磁性 EuS 单层膜的磁滞回线^[20,21], 磁滞回线呈蝴蝶状, 如图 3(b) 所示. 异质结的磁化强度在外磁场 0.18 T 以上时呈饱和态, 随着磁场降低而升高, 降至负磁场时突然下降, 形成一个突起. 磁场向负磁场方向增加时, 磁化强度缓慢增加至饱和. 磁场由负磁场向正磁场方向增加时, 磁化强度的变化呈对称趋势. 在 S/FI 结构的界面处因为存在奇频超导态 (odd-frequency superconducting state), 在超导转变温度下引发迈斯纳效应, 从而在界面处诱导出磁化方向随机分布的磁畴构造. 当异质结处于外磁场中, 在铁磁层磁矩和界面磁矩的相互作用

下, 可以观测到不同于单铁磁层的现象^[22–25]. 在低磁场下, Ta 的超导态因界面处的迈斯纳效应出现的抗磁性影响了 EuS 的铁磁性, EuS/Ta 异质结的磁化强度随磁场降低而升高, 说明了异质结中存在一定的抗磁性. 这一现象和图 3(a) 中 EuS/Ta 异质结在低磁场 (0.01 T) 低温 (< 3 K) 区域的磁化强度受 Ta 超导态的抑制相符合. EuS/Ta 异质结的矫顽场为 5 mT, 比 EuS 的单层膜的矫顽场增大了约十倍, 推测 EuS/Ta 异质结矫顽力的增加是受磁晶各向异性和应力^[26]的影响, 还有一种原因是相对于 EuS 的磁矩偏转对应的矫顽场, 界面处磁矩随外场偏转对应的矫顽场更大^[24].

对比在同样条件下生长的 EuS 单层膜饱和磁化强度, 在外磁场 0.18 T 以上可以发现 EuS/Ta 异质结的饱和磁化强度下降了近 57% (见图 3(b)), 在 V/Pd_{1-x}Fe_x 和 Fe/Nb 结构中也观测到^[27,28]类似的结果. 这种异常的下降是因为在超导转变温度以下, 由于反近邻效应, 界面处的超导态中的传导电子通过交换作用, 可以影响 EuS 内部的 Eu²⁺ 离子的磁有序从而使磁矩的取向发生改变. 磁化强度的改变不仅仅源于铁磁层的磁性离子磁矩改变, 同时和超导层内部的自由电子有一定关系, 受磁近邻效应的影响, 非磁性金属内可以观测到典型的铁磁特性, 从而导致 Ta 超导层内的配对电子会沿着磁性离子磁化方向的相反方向进行极化^[29–31]. 综合上面所述的两种因素, 超导的抗磁性通过界面的交换作用最终导致了 EuS/Ta 异质结中铁磁 EuS 层饱和磁化强度降低.

为了深入探索 EuS 铁磁态和 Ta 超导态的交换相互作用, 进一步研究了 2 K 下 EuS/Ta 异质结在磁场中的磁电阻效应和霍尔效应 (见图 4). 从图 4 中可以看出, 当磁场从最大值开始下降时, 纵向电阻先线性下降, 到达一临界场后急剧下降到接近零, 同时在一定磁场范围内电阻表现为一个极小值; 同样地, 电阻急剧上升行为出现在磁场继续向负值增加的过程中, 电阻随磁场的急剧变化出现清晰的回滞现象. 这种电阻急剧变化的原因是当磁场降至一定值附近, 类似接近场开关的值, EuS 内的磁畴大小会接近甚至小于 Ta 的超导相干长度 (ξ_s), EuS/Ta 界面的交换作用变弱或者消失, Ta 层内电子感受到的交换场也变弱, 配对电子受到的抑制

效果降低,从而使 Ta 从正常态变为超导态, EuS/Ta 异质结电阻值也变为极小. 当磁场增大时, EuS/Ta 界面处交换作用变强, Ta 层内电子感应的交换场随之变强, Ta 超导态的电子配对受到破坏,使 Ta 从超导态恢复为正常态, EuS/Ta 异质结也变为金属性. 磁电阻曲线中 Ta 的零电阻区域形成了一个平台,对应的 Ta 超导态和正常态切换的磁场值远大于 EuS 的矫顽力场,约为 0.54 T,电阻回滞对应的磁场值约为 0.11 T. 因此可以通过外磁场的大小控制 Ta 在超导态和正常态变化从而改变电阻值,实现极大磁电阻效应. 通常磁电阻定义为 $MR = \left[\frac{R(B) - R_{\min}}{R_{\min}} \right] \times 100\%$, 因为超导态的电阻为 0, 利用转变磁场时的最小电阻值为 R_{\min} 计算磁电阻, $R(B)$ 对应转变后不同磁场的电阻值; 可以看到当外场为 1 T 时, MR 可达到 144000%, 相对于 EuS/Al 结构^[15] 提高了两个数量级. 在高磁场区 (> 1 T), 磁阻值随磁场增大而线性增大.

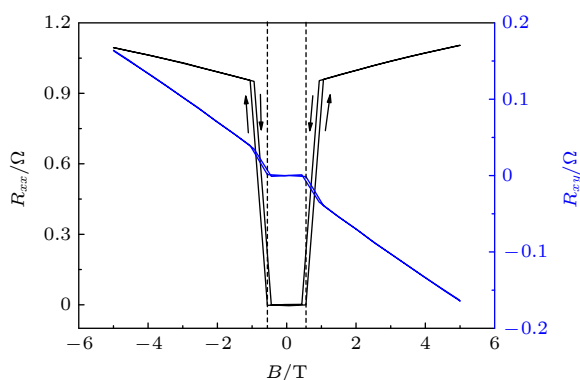


图 4 EuS/Ta 异质结的在 2 K 时的磁电阻和霍尔效应
Fig. 4. MR and Hall effect as a function of field of EuS/Ta heterostructure at 2 K.

通过分析图 4 中的霍尔效应发现, 当 Ta 处于超导态时, 霍尔电阻为 0. 随着磁场的增加, 超导态在 0.54 T 后迅速受到抑制. 当磁场高于 0.54 T 时, 在霍尔电阻中观测到明显的回滞现象, 这可归因于 Ta 薄膜中靠近铁磁薄膜 EuS 的界面附近电子在磁近邻作用下发生了自旋极化后产生的反常霍尔效应. 在磁场增大到 1 T 后, 反常霍尔电阻达到饱和, 呈现出线性的变化, 此现象来源于常规霍尔效应. 该界面处的反常霍尔效应进一步证实了 S/FI 异质结中普遍存在磁近邻效应^[31]. 该反常霍尔效应中出现的回滞现象与磁电阻曲线中超导态与正

常态转变产生的回滞相对应, 体现了该体系中超导和铁磁性的相互作用.

3 结 论

采用脉冲激光沉积方法制备了 EuS/Ta 异质结, 通过电输运和磁性测试研究了 EuS 薄膜铁磁态和 Ta 薄膜超导态在界面处的交换作用. 实验表明, 通过控制外磁场, 可以调节 EuS/Ta 界面处的交换作用, 基于磁近邻效应, 实现 Ta 膜中超导态与正常态的转变, 从而产生了极大磁电阻. 该异质结的电阻急剧变化, 在外场为 1 T 时, 其磁电阻值高达 144000%, 远高于文献中报道的结果. 实验结果表明 EuS/Ta 异质结在新型自旋电子学中逻辑器件和存储器件中有潜在应用价值, 具有重要的实验意义和应用前景.

参考文献

- [1] Deutscher G, de Gennes P G 1969 *Superconductivity* (Vols. 1 and 2) (New York: Marcel Dekker, Inc.) pp1005–1034
- [2] Dotsch H, Bahlmann N, Zhuromskyy O, Hammer M, Wilkens L, Gerhardt R, Hertel P, Popkov A F 2005 *J. Opt. Soc. Am. B: Opt. Phys.* **22** 240
- [3] de Gennes P G 1964 *Rev. Mod. Phys.* **36** 225
- [4] de Gennes P G 1966 *Phys. Lett.* **23** 10
- [5] Buzdin A I 2005 *Rev. Mod. Phys.* **77** 935
- [6] Bergeret F S, Volkov A F, Efetov K B 2005 *Rev. Mod. Phys.* **77** 1321
- [7] Li X W 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2313 (in Chinese) [李晓薇 2005 物理学报 **54** 2313]
- [8] Jin X, Dong Z C, Liang Z P, Zhong C G 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 047401 (in Chinese) [金霞, 董正超, 梁志鹏, 仲崇贵 2013 物理学报 **62** 047401]
- [9] Gu J Y, You C Y, Jiang J S, Pearson J, Bazaliy Y B, Bader S D 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 267001
- [10] Rusanov A Y, Habraken S, Aarts J 2006 *Phys. Rev. B* **73** 060505
- [11] Hao X, Moodera J S, Meservey R 1990 *Phys. Rev. B* **42** 8235
- [12] Moodera J S, Hao X, Gibson G A, Meservey R 1988 *Phys. Rev. Lett.* **61** 637
- [13] Tedrow P M, Tkaczyk J E, Kumar A 1986 *Phys. Rev. Lett.* **56** 1746
- [14] Hauser J J 1969 *Phys. Rev. Lett.* **23** 374
- [15] Li B, Roschewsky N, Assaf B A, Eich M, Epstein-Martin M, Heiman D, Munzenberg M, Moodera J S 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 097001
- [16] Yang Q I, Zhao J, Zhang L, Dolev M, Fried A D, Marshall A F, Risbud S H, Kapitulnik A 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 082402
- [17] Zhang X, Shi X 2020 *J. Supercond. Novel. Magn.* **33** 217
- [18] Zhang Y H 2009 *Superconducting Physics* (University of Science and Technology of China Press) p7 (in Chinese) [张裕

- 恒 2009 超导物理 (中国科学技术大学出版社) 第7页]
- [19] Stachow-Wójcik A, Story T, Dobrowolski W, Arciszewska M, Gałązka R R, Kreijveld M W, Swüste C H W, Swagten H J M, de Jonge W J M, Twardowski A, Sipatov A Y 1999 *Phys. Rev. B* **60** 15220
- [20] Smits C J P, Filip A T, Kohlhepp J T, Swagten H J M, Koopmans B, and de Jonge W J M 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 7405
- [21] Miao G X, Moodera J S 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 182504
- [22] Di Bernardo A, Diesch S, Gu Y, Linder J, Divitini G, Ducati C, Scheer E, Blamire M G, Robinson J W A 2015 *Nat. Commun.* **6** 9053
- [23] Di Bernardo A, Salman Z, Wang X L, Amado M, Egilmez M, Flokstra M G, Suter A, Lee S L, Zhao J H, Prokscha T, Morenzoni E, Blamire M G, Linder J, Robinson J W A 2015 *Phys. Rev. X* **5** 041021
- [24] Diesch S, Machon P, Wolz M, Surgers C, Beckmann D, Belzig W, Scheer E 2018 *Nat. Commun.* **9** 5248
- [25] Strambini E, Golovach V N, De Simoni G, Moodera J S, Bergeret F S, Giazotto F 2017 *Phys. Rev. Mater.* **1** 054402
- [26] Guo Z Z, Hu X B 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 057501 (in Chinese) [郭子政, 胡旭波 2013 物理学报 **62** 057501]
- [27] Garifullin I A, Tikhonov D A, Garif'yanov N N, Fattakhov M Z, Theis-Bröhl K, Westerholt K, Zabel H 2002 *Appl. Magn. Reson.* **22** 439
- [28] Mülhge T, Garif'yanov N N, Goryunov Y V, Theis-Bröhl K, Westerholt K, Garifullin I A, Zabel H 1998 *Physica C* **296** 325
- [29] Bergeret F S, Volkov A F, Efetov K B 2001 *Phys. Rev. B* **64** 134506
- [30] Lu Y M, Choi Y, Ortega C M, Cheng X M, Cai J W, Huang S Y, Sun L, Chien C L 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 147207
- [31] Huang S Y, Fan X, Qu D, Chen Y P, Wang W G, Wu J, Chen T Y, Xiao J Q, Chien C L 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 107204

Infinite magnetoresistance of EuS/Ta heterostructure*

Lu Jia¹⁾ Gan Yu-Lin¹⁾ Yan Lei^{1)†} Ding Hong¹⁾²⁾³⁾

1) (*Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3) (*CAS Center for Excellence in Topological Quantum Computation, University of
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 28 July 2020; revised manuscript received 29 September 2020)

Abstract

Based on the proximity effect, the exchange interaction at the interface between a ferromagnetic insulator (FI) and a superconductor (S) could enhance the Zeeman splitting of the superconducting quasiparticle density of states. The superconducting electrons feel the exchange field on the surface of the S layer. Therefore, tuning the internal exchange field at the FI/S interface could switch the superconductor from a superconducting state to a normal state, leading to an infinite magnetoresistance in FI/S heterostructure. Here in this work, we fabricate the EuS/Ta heterojunction by the pulsed laser deposition, and perform the magnetotransport measurements. In the EuS/Ta heterojunction, Ta film as a typical BSC supercenter exhibits the superconducting transition under 3.6 K, and the EuS film is ferromagnetic under 20 K. The magnetization of EuS is suppressed by superconductivity of Ta at 0.01 T below 3 K. In addition, the butterfly-type hysteresis loop is observed at 2 K. And the decrease of the saturation magnetization of EuS/Ta heterostructure is observed by comparing with the EuS single layer. It is caused by a reconstruction of homogeneous ferromagnetic order in the EuS ferromagnetic layer due to the proximity effect with the Ta superconducting layer. The above measurement results show that the competition between the ferromagnetism of EuS film and superconductivity of Ta film below T_c of Ta film. If the exchange field of the FI is sufficiently strong, it tries to align the spins of the electrons of a Cooper pair in S layer parallel to each other, thus destroying the superconductivity. Meanwhile, the superconductivity in S layer will be recovered when the exchange field of the FI is weak. The resistance at a specific value of the magnetic field (1 T) steeply drops to zero, and clear hysteresis behavior is observed in EuS/Ta heterostructure, resulting in an infinite magnetoresistance up to 144000%, by tuning the internal exchange field at EuS/Ta interface. Meanwhile, the anomalous Hall effect with hysteresis behavior is observed at 2 K, indicating that the electron in Ta film is spin polarized due to the magnetic proximity effect near the EuS/Ta interface. Our results show that the EuS/Ta heterostructure with infinite magnetoresistance could be a good candidate for spintronic devices.

Keywords: ferromagnetic insulator/superconductor heterostructure, exchange field, magnetoresistance

PACS: 74.45.+c, 73.43.Qt, 75.70.-i, 74.78.-w

DOI: 10.7498/aps.70.20201213

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2016YFA0300600), the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences, China (Grant Nos. XDB28000000, XDB07000000), and the Beijing Municipal Science & Technology Commission, China (Grant No. Z191100007219012).

† Corresponding author. E-mail: lyan@iphy.ac.cn