

自旋场效应晶体管中隧道磁阻的势垒 相关反转效应*

杨军[†] 章曦 苗仁德

(解放军理工大学理学院, 南京 211101)

(2014年8月1日收到; 2014年8月13日收到修改稿)

考虑自旋场效应晶体管中 Rashba 自旋轨道相互作用和自旋输运量子相干性, 研究了势垒强度对自旋场效应晶体管的自旋相关量子输运的影响. 研究发现, 势垒强度较低时, 隧道结电导随 Rashba 自旋轨道相互作用强度的变化呈现明显的振荡现象, 势垒强度较高时, 电导表现出明显的势垒相关“电导开关”现象. 当势垒强度逐渐增强时, 平行结构电导呈现出单调下降趋势, 而反平行结构电导产生波动, 这种波动导致该隧道磁阻也随势垒强度的变化表现出振荡现象, 且在合适的准一维电子气厚度情况下隧道磁阻值可以产生正负反转, 这个效应将会在基于自旋的电子器件信息的存储上获得应用.

关键词: 自旋场效应管, 开关效应, 量子相干, 隧道磁阻

PACS: 72.10.-d, 72.20.-i, 73.50.Jt

DOI: 10.7498/aps.63.217202

1 引言

近年来, 自旋电子学由于其潜在的应用前景引起了人们的极大兴趣^[1], 磁性隧道结作为自旋电子器件的基本单元也因此成为研究热点. 在磁性隧道结中, 形如 FM/I/A/I/FM 双势垒结构的磁性隧道结由于其物理内容更加丰富而倍受关注. 这里的 FM 代表铁磁, I 代表势垒, A 代表非磁金属 (NM)^[2] 或半导体 (SM)^[3] 或超导体 (SC)^[4] 及铁磁体等. Yang 等^[5] 发现在 NiFe/Al₂O₃/Cu/Co 结构中存在本征的隧道磁阻衰减振荡效应, Song 等^[6] 在 [Pd/Co]/MgO/Co 和 [Pd/Co]/MgO/Co/MgO/[Co/Pd] 结构中发现了高达 15 kOe, (1 Oe = 79.5775 A/m) 的线性磁阻, 该发现有望应用于探测高磁场的磁传感器. 在双层磁性隧道结中, 半导体由于其电子自旋弛豫时间较长和价格低廉等因素使铁磁/绝缘层/半导体/绝缘层/铁磁 (FM/I/SM/I/FM) 结构的磁性隧道结更具应用前景. 在电子器件实用化方面, 1990 年 Dat-

ta 和 Das 首次提出了极富创意的 DATTA-DAS 自旋场效应晶体管引起了人们的极大兴趣^[7], 此结构中源极和漏极都采用磁性材料, 电流调制起源于注入半导体通道的自旋极化电子受到 Rashba 自旋轨道耦合效应的作用引起的自旋进动. Rashba 自旋轨道耦合强度可以通过施加在半导体通道上的门电压来控制, 由此可以调节控制源极和漏极间的自旋电流从而实现晶体管的基本功能. 自旋场效应晶体管相比传统晶体管有更长的相干寿命, 更快的数据处理速度和更低的功率损耗等优势.

根据自旋场效应晶体管铁磁电极的磁化方向不同, 自旋场效应晶体管可以被分为自旋阀几何和自旋晶体管几何, 这两种结构可以简化为铁磁/准一维电子气 (二维电子气)/铁磁的双隧道结, DATTA-DAS 晶体管要真正走向实用需要解决以下问题: 高的自旋注入效率、准一维电子气通道、足够的自旋弛豫时间、门电压的有效控制等. 在实际的结构中, 影响晶体管的因素很多, 如界面散射, 势垒强度, 电场强度和导带匹配等, 所以自旋

* 国家自然科学基金 (批准号: 11304395) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: hfeiau@163.com

场效应晶体管到目前为止还未真正走向实用. Liu等^[8]利用第一性原理计算预言在一纳米厚度二维的LaOBiS₂中将会有显著的自旋轨道耦合效应, 可以作为自旋场效应晶体管的二维候选材料. 王等^[9]研究了对称双势垒量子阱中自旋极化输运的时间特性, 他们认为 Dresselhaus 自旋轨道耦合效应使自旋简并消除, 导致自旋向上和自旋向下电子的透射峰发生了自旋劈裂, 不同自旋取向的电子构建时间和隧穿寿命不同. 实际的器件都是在一定的偏压下运行, 胡梁宾等^[10]就发现在有限偏压下自旋场效应晶体管中自旋极化进动态同时受门电压和偏压共同影响, 他们还对二维自旋轨道耦合电子气中持续自旋螺旋态的稳定性进行了研究, 得出了与实验比较符合的结果. 李等^[11]通过把本征方程投影到导带的子空间方法, 得出了 AlGaN/GaN 体系中可以通过栅压来调节自旋轨道耦合系数, 且子带间的自旋轨道耦合系数与 Rashba 自旋轨道耦合系数基本处于同一数量级. 此外, 如何控制自旋及延长体系中的自旋极化弛豫时间也是一个重要问题^[12-17]. 本文采用自旋晶体管几何来研究自旋场效应晶体管中势垒对平行结构、反平行结构电导及隧道磁阻的影响. 研究发现两种结构的电导随外加电场控制的自旋轨道耦合强度的变化在低势垒强度时呈现出量子振荡效应, 而在高势垒强度时则表现出良好的电导“开关效应”. 隧道磁阻随势垒强度的变化也呈现出振荡效应, 且在势垒和半导体厚度合适的情况下, 隧道电阻随着势垒强度的变化发生正负反转, 这个效应在基于自旋的电子器件信息存储中将会有一定的应用前景.

2 模型结构

为简化模型, 抓住问题本质, 我们研究准一维 DATTA-DAS 模型结构, 如图 1 所示, 模型左右两边为作为源和漏的铁磁电极 FM₁ 和 FM₂, 中间层为

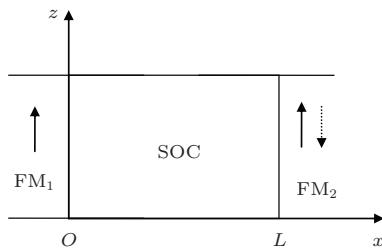


图 1 自旋场效应晶体管结构示意图

准一维电子气, 此部分产生自旋轨道耦合效应(图中简记为 SOC), 假定准一维电子气的横向限制势阱的宽度足够小, 也就是说 $W \ll \hbar^2/\alpha_R m^*$, 所以可以不考虑子带间的混合叠加效应, 具有界面 δ 型势垒, 在单带有效质量近似条件下, 体系的哈密顿量为^[18-20]

$$\begin{aligned} \hat{H} = & \frac{1}{2} \hat{p}_x \frac{1}{m^*(x)} \hat{p}_x \mathbf{I} + h_0 [\mathbf{M}_L \theta(-x) \\ & + \mathbf{M}_L \theta(x-L)] \cdot \boldsymbol{\sigma} + \delta E_C \theta(L-x) \mathbf{I} \\ & - \frac{1}{2\hbar} \sigma_y [\hat{p}_x \alpha_R(x) + \alpha_R(x) \hat{p}_x] \\ & + U[\delta(x) + \delta(x-L)] \mathbf{I}. \end{aligned} \quad (1)$$

这里 \hat{p}_x 为动量算符, \mathbf{I} 为单位矩阵, $m^*(x)$ 为有效质量, h_0 为交换劈裂能, $\boldsymbol{\sigma}$ 为泡利矩阵, \mathbf{M} 为磁化方向单位矢量, $\alpha_R(x)$ 为自旋轨道耦合参数, 大小可以由外电场控制, δE_C 为各导带间的不匹配项, U 为 δ 型势垒高度. 假定 z 轴为量子化轴, 考虑电子从铁磁电极由左向右入射, 则左边铁磁电极 FM₁ 本征波函数可以写成自旋波函数二分形式^[21]:

$$\begin{aligned} \Psi_L(x) = & \sqrt{\frac{m_f^*}{\hbar k_{\uparrow}}} e^{ik_{\uparrow}x} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + R_{\uparrow} e^{-ik_{\uparrow}x} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \\ & + R_{\downarrow} e^{-ik_{\downarrow}x} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $k_{\uparrow(\downarrow)} = \sqrt{(2m_f^*/\hbar^2)(E_F \mp h_0)}$ 是自旋向上(下)费米波矢, R_{\uparrow} , R_{\downarrow} 为相应的反射系数, m_f^* 为铁磁电极电子有效质量, 右边铁磁电极 FM₂ 中只有透射波:

$$\Psi_R(x) = C_{\uparrow} e^{ik_{\uparrow}x} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + C_{\downarrow} e^{-ik_{\downarrow}x} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

C_{\uparrow} , C_{\downarrow} 为相应的透射系数, 中间半导体 SM 区域的哈密顿量 \hat{H}_S 为

$$\hat{H}_S = \frac{\hat{p}^2}{2m_s^*} \mathbf{I} + \frac{\alpha_R}{\hbar} (\sigma_x k_y - \sigma_y k_x) + \delta E_C \mathbf{I}, \quad (4)$$

\mathbf{I} 为单位矩阵, m_s^* 为准一维电子气中电子有效质量, 考虑到是准一维电子气, y 方向动量 $k_y = 0$, (4) 式可简化为

$$\hat{H}_S = \frac{\hat{p}^2}{2m_s^*} \mathbf{I} - \frac{\alpha_R}{\hbar} \sigma_y \hat{p}_x + \delta E_C \mathbf{I}. \quad (5)$$

相应的波函数可以写为

$$\Psi_s(x) = \psi_+^s \begin{pmatrix} i \\ -1 \end{pmatrix} + \psi_-^s \begin{pmatrix} i \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$\psi_{\pm}^s(x) = A_{\pm} e^{ik_{\pm}^s x} + B_{\pm} e^{-ik_{\pm}^s x}, \quad (7)$$

$k_{\pm}^s = k \pm k_R$, $k = \sqrt{(2m_s^*/\hbar^2)(E_F - \delta E_C) + k_R^2}$ 为平均费米波数, $k_R = \alpha_R m_s^*/\hbar^2$ 是 Rashba 波数.

由 (1)–(7) 式结合边界条件即可求得透射和反射系数, 再根据 Landauer-Buttiker 公式 [21–23], 可以得出电导为

$$G_{\sigma}^{P(AP)} = \frac{e^2}{h} T_{\sigma}^{P(AP)}, \quad \sigma = \uparrow, \downarrow, \quad (8)$$

隧道磁阻定义为

$$\text{TMR} = \frac{G^P - G^{AP}}{G^{AP}}, \quad (9)$$

其中 $G^P = G_{\uparrow}^P + G_{\downarrow}^P$, $G^{AP} = G_{\uparrow}^{AP} + G_{\downarrow}^{AP}$.

3 结果分析与讨论

对上述得到的解析结果进行数值计算, 计算过程中假定 $m_s^* = 0.036m_e$, $m_f^* = m_e$, m_e 为自由电子质量, 铁磁交换劈裂能 $h_0 = 1.73$ eV, 费米能 $E_F = 2.47$ eV, $\delta E_C = 2.4$ eV [24], δ 势垒强度用无量纲参数 $z = 2m_f^*U/k_F\hbar^2$ 表示.

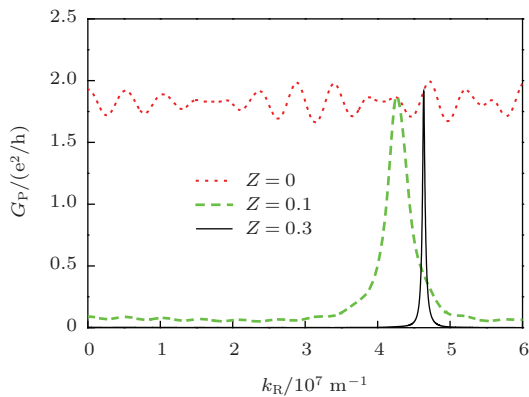


图2 (网刊彩色) 不同势垒强度下平行结构电导 G_P 随自旋轨道耦合强度 k_R 的变化关系图

图2给出的是平行结构的电导随自旋轨道耦合强度的变化关系, 中间层电子气的厚度 $L = 0.6 \mu\text{m}$, 从图中可以看出, 当势垒强度为零时, G_P 呈现出明显的非周期振荡效应, 原因是虽然势垒强度为零, 但是因为隧道结界面处存由于导带不匹配等造成的界面散射导致隧道结中存在相干输运, 而且准一维电子气中存在自旋轨道耦合效应引起 Rashba 自旋进动和自旋干涉效应, 这两个效应导致了电导的振荡. 但当势垒强度增大时, 振荡周期变大, 振荡峰值变得越来越尖锐, 当 $z = 0.3$

时, 电导随自旋轨道耦合强度的变化出现了从零到一定电导值的突变, 也就是说在高势垒强度下电导随自旋轨道耦合强度的变化该器件出现导通和关闭的电导“开关效应”, 这个效应实际器件中将可以作为电导开关器件来使用, 也可以作为逻辑电路使用. 出现这种现象的原因是当势垒强度增强时, 电子在两个势垒间的反射增强, 势阱中发生了量子相干输运, 当参数合适时发生完全透射, 产生“开关效应”.

为进一步理解电导受势垒强度的影响, 我们给出了在不同中间层厚度 L 的情况下反平行结构的电导 G_{AP} 随自旋轨道耦合强度的变化关系, 如图3所示, 图中的势垒强度取为 $z = 0.3$, 从图中可以看出, 在该势垒强度下, 不同的 L 其反平行结构电导都表现出了强烈的共振透射, L 越大, 共振透射峰越多, 在实际应用中可以通过调节外电场控制自旋轨道耦合强度来实现对电导的调控, 实现晶体管的功能.

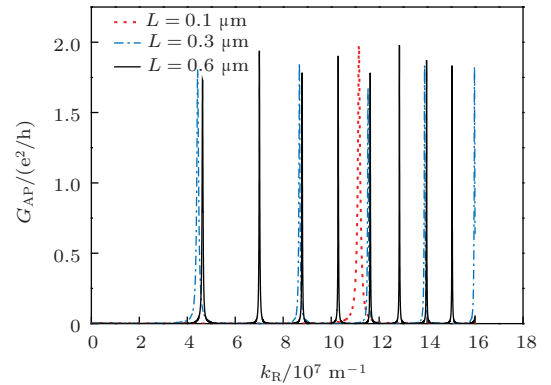


图3 (网刊彩色) 不同准一维电子气厚度下反平行结构电导 G_{AP} 随自旋轨道耦合强度 k_R 的变化关系图

图4给出了平行结构电导 G_P 和反平行结构电导 G_{AP} 随势垒强度的变化关系, 其中 $L = 0.6 \mu\text{m}$, 从图中可以看出在平行结构时, 电导随势垒强度的增加基本呈现单调下降趋势, 根据量子隧穿理论, 势垒强度的大小对隧穿电子的透射率反应敏感, 透射率随势垒的增加呈指数关系降低, 导致电导下降, 在势垒强度 $z = 0.1$ 时电导基本降为零, 但是对于反平行结构, 我们发现在电导随势垒强度的增加没有表现单调下降, 而是出现波动, $z = 0.05$ 左右产生明显的波峰, 这说明对此结构中的电导是受多方面影响, 如界面散射、相干输运、势垒强度、外加电场强度和导带匹配等, 这些效应的综合叠加导致了电导发生波动.

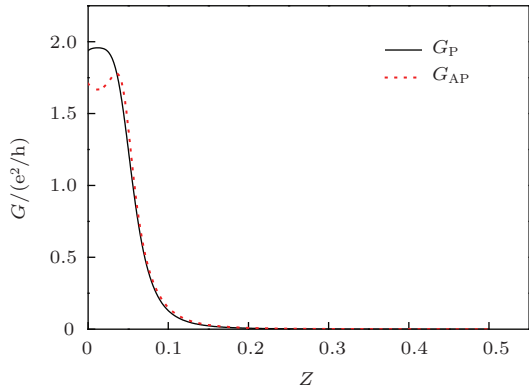


图4 (网刊彩色) 电导随势垒强度的变化关系图

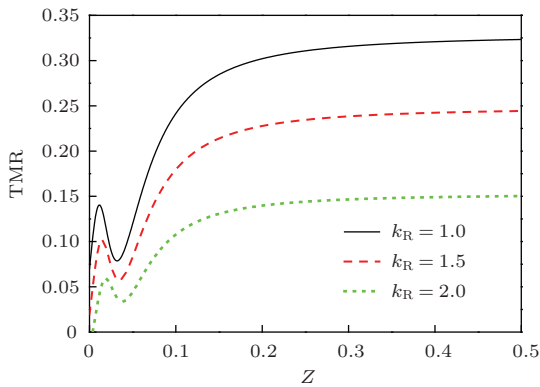


图5 (网刊彩色) 不同自旋轨道耦合强度下隧道磁阻随势垒强度的变化关系图

铁磁极两种结构的电导不同直接导致了隧道磁阻的变化,如图5所示,该图给出了隧道磁阻与势垒强度的变化关系,可以看出,因为平行结构和反平行结构电导的变化导致了隧道磁阻随势垒强度的变化,隧道磁阻也呈现出明显的波动行为,随着势垒强度的增加最后趋向一个正值,但是在不同的自旋轨道耦合强度下,隧道磁阻的值不同,在图示参数下,自旋轨道耦合强度越大,两种结构的电导差值越小,隧道磁阻的值也越小.为了研究中间层准一维电子气的厚度对隧道磁阻的影响,我们给出了不同的 L 下隧道电.阻随势垒强度的变化关系,从图6中可以看出,不同的 L 时隧道磁阻随势垒强度的变化都发生波动,但是当 $L = 0.1 \mu\text{m}$ 时,隧道磁阻为负,随势垒强度的增加出现波动最后趋向一个负稳定值,表现出负的隧道磁阻效应.当 $L = 0.6 \mu\text{m}$ 时,隧道磁阻随势垒强度的增加同样表现出波动行为最后趋向一个正值,表现出正的隧道磁阻效应.令人感兴趣的是当 $L = 0.3 \mu\text{m}$ 时,隧道磁阻随势垒强度变化发生了从正到负的反转,而隧道磁阻的正负反转可以对应于磁性电子器件中信

息的存储,在逻辑电路中也将会有应用,所以这个效应在在基于自旋的电子器件中将有很好应用.

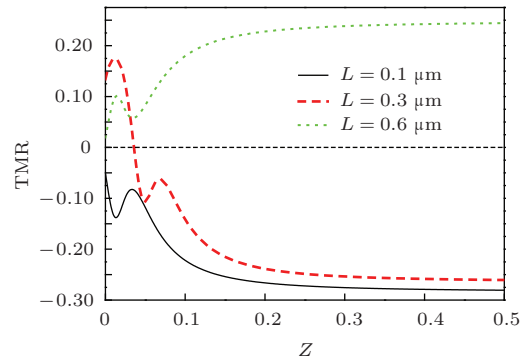


图6 (网刊彩色) 不同准一维电子气厚度下隧道磁阻随势垒强度的变化关系图

4 结 论

本文研究了势垒对自旋场效应晶体管自旋相关运输的影响,研究发现,高势垒强度时,电导随自旋轨道耦合强度的变化产生明显的势垒相关电导开关效应,且平行结构电导随势垒强度的增加呈现单调快速下降的趋势,反平行结构电导随势垒强度的增加出现波动,产生明显的波峰,这种波动导致磁性隧道结的隧道磁阻随势垒强度的变化出现波动.研究发现,当对不同的中间层准一维电子气的厚度,分别出现正、负隧道磁阻效应,且隧道磁阻随势垒强度的变化产生波动,当中间层准一维电子气的厚度合适时,隧道磁阻随势垒强度的变化发生正、负反转,这个效应将会在基于自旋的电子器件信息的存储获得应用.

参考文献

- [1] Moodera J S, Kinder L R, Wong T M, Meservey R 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 3273
- [2] Mathon J, Umerski A 1999 *Phys. Rev. B* **60** 1117
- [3] Zhu L, Chen W D, Xie Z W, Li B Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5499
- [4] Mattana R, George J M, Jaffres H, Nguyen Van Dau F, Fert A, Lepine B, Guivare'h A, Jezequel G 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 166601
- [5] Yang J, Wang J, Zheng Z M, Xing D Y, Chang C R 2005 *Phys. Rev. B* **71** 214434
- [6] Song C, Wang Y Y, Li X J, Wang G Y, Pan F 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 062404
- [7] Datta S, Das B 1990 *Appl. Phys. Lett.* **56** 665
- [8] Liu Q H, Guo Y Z, Freeman A J 2013 *Nano Letters* **13** 5264

- [9] Wang R Q, Gong J, Wu J Y, Chen J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 087303 (in Chinese) [王瑞琴, 宫箭, 武建英, 陈军 2013 物理学报 **62** 087303]
- [10] Zhang L, Li H W, Hu L B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 177203 (in Chinese) [张磊, 李辉武, 胡梁斌 2012 物理学报 **61** 177203]
- [11] Li M, Zhang R, Liu B, Fu D Y, Zhao C Z, Xie Z L, Xiu X Q, Zheng Y D 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 027103 (in Chinese) [李明, 张荣, 刘斌, 付德硕, 赵传阵, 谢自力, 修向前, 郑有焘 2012 物理学报 **61** 027103]
- [12] Wu M M, Jiang J H, Weng M Q 2010 *Physics Reports* **493** 61
- [13] Žutic I, Fabian J, Sarma S D 2004 *Rev. Mod. Phys.* **76** 323
- [14] Awschalom D, Flatte M E 2007 *Nature Physics* **3** 153
- [15] Hong X K, Yang X F, Feng J F, Liu Y S 2013 *Chin. Phys. B* **22** 057306
- [16] Xia J B, Ge W K, Chang K 2008 *Semiconductor spintronics* (Beijing: Science Press) (in Chinese) p216-248 [夏建白, 葛惟昆, 常凯 2008 半导体自旋电子学 (北京: 科学出版社) 第 216—248 页]
- [17] Wang J W, Li S S, Xia J B 2006 *Progress in Physics* **26** 228 (in Chinese) [王建伟, 李树深, 夏建白 2006 物理学进展 **26** 228]
- [18] Hu C M, Matsuyama T 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 066803
- [19] Matsuyama T, Hu C M, Grundler D, Meier G, Merkt U 2002 *Phys. Rev. B* **65** 155322
- [20] Li Y X, Guo Y, Li B Z 2005 *Phys. Rev. B* **71** 012406
- [21] Slonczewski J C 1989 *Phys. Rev. B* **39** 6995
- [22] Buttiker M 1993 *J. Phys.: Condens. Matter* **5** 9361
- [23] Christen T, Buttiker M 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 143
- [24] Li Y X, Guo Y, Li B Z 2005 *Phys. Rev. B* **71** 012406

Barrier-dependent tunneling magnetoresistance reversal effect in spin field effect transistors*

Yang Jun[†] Zhang Xi Miao Ren-De

(Institute of Sciences, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

(Received 1 August 2014; revised manuscript received 13 August 2014)

Abstract

Considering Rashba spin orbit interaction and spin quantum transport in the spin field effect transistor, we study the influence of the barrier strength on the spin coherence transport in spin field effect transistors. It is found that when the barrier strength is weak, the tunneling junction conductance exhibits oscillatory phenomenon obviously with increasing Rashba spin orbit interaction strength. The conductance exhibits barrier-dependent “conductive switching effect” as the barrier strength increases. When the barrier strength gradually increases, parallel conductance exhibits a monotonically decreasing trend, while the anti-parallel conductance fluctuates, and such a fluctuation leading to the tunneling magnetoresistance also exhibits oscillatory phenomenon with the variation of barrier strength. For a suitable thickness of quasi one-dimensional electron gas, the tunneling magnetoresistance value can produce positive and negative inversion, and the effect will shed light on the application of spin information storage electronic device.

Keywords: spin field effect transistor, switching effect, coherence quantum tunneling, tunneling magnetoresistance

PACS: 72.10.-d, 72.20.-i, 73.50.Jt

DOI: 10.7498/aps.63.217202

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No 11304395).

† Corresponding author. E-mail: hfeiau@163.com