论文

单自旋过滤隧道结中隧穿时间的研究

曾绍龙, 谢征微*

四川师范大学物理与电子工程学院, 成都 610066

*联系人, E-mail: zzwxie@aliyun.com

收稿日期: 2016-03-06; 接受日期: 2016-04-25; 网络出版日期: 2016-08-09

四川省教育厅自然科学基金重点项目(编号: 13ZA0149)和四川高校科研创新团队建设计划(编号: 12TD008)资助

摘要 基于自由电子近似和Winful的隧穿时间模型, 研究了铁磁金属/非磁绝缘体/自旋过滤层/普通金属(FM/I/SF/NM)单自旋过滤隧道结中自旋相关的居留时间(Dwell Time)和相位时间(Phase Time). 计算结果表明, 和传统的FM/I/FM结构不同, 由于SF层的作用, 在SF层和FM层中分子场处于反平行排列时上下自旋电子的透射率并不相等. 在高能区(入射能量大于势垒高度), 由于自干涉项影响大大减小, 不同自旋方向电子的相位时间和居留时间趋于相同. 在低能区(入射能量小于势垒高度), 自干涉项影响增大, 不同自旋方向电子的相位时间和居留时间会出现差别. 其中非磁绝缘层和自旋过滤层的势垒高度, 自旋过滤层的宽度以及自旋过滤层中分子场的变化, 会导致上自旋电子的相位时间和居留时间出现明显差距. 而对于下自旋电子, 其相位时间和居留时间的不同, 主要由自旋过滤层相应参数的变化决定, 非磁绝缘层势垒高度变化的影响较小.

关键词 自旋过滤, 磁性隧道结, 居留时间, 相位时间, 隧穿时间

PACS: 73.43.Jn, 72.25.Dc, 73.43.Qt

自旋相关电子隧穿现象及相应器件的研究, 是近年来备受关注的的一个重要课题. 其中由两层铁磁金属(FM)电极夹一薄的非磁绝缘层(I)所构成的磁性隧道结, 即FM/I/FM型磁性隧道结, 因其具有较高的隧穿电阻(TMR)和低的功率损耗, 在传感器和磁记录读写器等方面有着重要的应用价值^[1,2], 故对这种磁性隧道结的研究引起了人们的极大关注.

在铁磁金属中, 由于交换劈裂, 费米面处自旋向上与自旋向下的电子态密度不等, 因而自旋向上与自旋向下传导电子数是不等的, 故铁磁金属中传导电流应是自旋极化的. 自旋极化电流对铁磁金属中的自旋

波、磁孤子和畴壁的动力学有着重要的影响^[3-5]. 对于FM/I/FM型隧道结, 由于两FM层较小的自旋极化度, 其TMR提高会受的限制, 同时由于界面等一些复杂的因素影响, 随着外加偏压的增大, 其TMR迅速减小, 而不适合应用在有较大偏压的自旋电子器件中^[2]. 最近利用磁性绝缘体或磁性半导体中自旋过滤效应(SF)的单自旋过滤结和双自旋过滤结的研究结果显示, 该类结不仅可以获得大的TMR, 而且在一个较大的偏压范围内, 其TMR不随偏压的升高而减小, 从而能克服传统隧道结中TMR随偏压升高而迅速单调下降的缺点, 适合高偏压下自旋相关电子器件的要求^[6-15]. 自旋

引用格式: 曾绍龙, 谢征微. 单自旋过滤隧道结中隧穿时间的研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 117501
Zeng S L, Xie Z W. The tunneling time in FM/I/SF/NM spin filter tunnel junctions (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2016, 46: 117501, doi: 10.1360/SSPMA2016-00138

过滤效应指的是如果隧穿电子自旋磁矩与磁性绝缘层的磁化强度方向一致, 其产生隧穿效应的可能性将比其他自旋方向的电子大得多, 反之则小得多. 具有自旋效应的材料一般为铁磁绝缘材料, 如EuO, EuS或NiFe₂O₄^[11-15]等.

在自旋极化隧穿研究的另一方面, 自旋相关隧穿时间的研究也引起了人们的广泛关注. 早在1931年, Condon和Morse^[16]提出电子的隧穿特性不仅可以由透射率表示, 还可由粒子隧穿势垒的时间即隧穿时间来标度. 之后, Hartman进一步研究了隧穿时间和粒子的波动性质之间的关系, 指出粒子隧穿势垒的速度比在自由空间中传播更快, 即著名的Hartman效应^[17]. 随着对量子领域内隧穿动力学理论和实验方面广泛和深入的讨论, 人们陆续提出了一系列关于隧穿时间的概念, 如相位时间、居留时间和拉莫尔进动时间等^[18]. 其中相位时间和居留时间被认为是反映电子隧穿性质较好的一个时间而受到人们越来越多的重视. 最近, Winful^[19]利用变分方法得到了相位时间和居留时间的一个普遍关系式. Guo等人^[20-24]在自旋极化电子隧穿多层稀磁半导体结构的研究中, 又将Winful的研究结果推广到了含自旋的情况. 对自旋相关的隧穿时间的研究不仅是衡量自旋相关器件响应的一个重要参量, 同时也为隧穿时间这个基本物理量的研究开辟了新的途径.

本文在前面研究的基础上, 主要讨论了FM/I/SF/NM单自旋过滤结中的居留时间(Dwell Time)和相位时间(Phase Time), 与I层和SF层势垒高度, 以及与SF层的厚度和分子场大小之间的关系. 由于自旋过滤结在自旋电子学的应用和理论研究上具有重要的意义, 因而希望本文的研究对自旋电子器件的设计和生以及自旋相关隧穿的理解具有一定的帮助.

1 FM/I/SF/NM隧道结的理论模型

图1为FM/I/SF/NM单自旋过滤结的结构示意图. 图中FM为铁磁金属, I为非磁绝缘体, SF为自旋过滤层, NM为普通金属. 现考虑一个有效质量为 m 电子从左边FM层中($x < 0$)入射, 通过I/SF势垒区, 隧穿到右边NM层($x > d$).

与整个结构相关的哈密顿量为(假定自旋过滤隧道的横向宽度远小于纵向长度, 这样就可以将该结

图1 FM/I/SF/NM(铁磁金属/非磁绝缘体/自旋过滤层/普通金属)单自旋过滤隧道结

Figure 1 FM/I/SF/NM (Ferromagnetic metal/nonmagnetic insulator/spin-filter layer/normal metal) single spin-filter junction.

构视作准一维结构).

$$H = \frac{-\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + U(x) + \sigma_z h(x), \quad (1)$$

其中

$$U(x) = \begin{cases} 0, & 0 < x < d_1, \\ U_I, & d_1 < x < d_2, \\ U_{SF}, & d_2 < x < d_3, \\ 0, & d_3 < x < d_4, \end{cases} \quad (2)$$

是势垒高度, σ_z 为泡利矩阵, $\sigma_z = \pm$ 分别对应于 $\uparrow\downarrow$ 自旋电子, $h(x)$ 是各层中的分子场大小(自旋量子化轴取为 z 方向, 如图1所示)

$$h(x) = \begin{cases} h_{FM}, & 0 < x < d_1, \\ 0, & d_1 < x < d_2, \\ h_{SF}, & d_2 < x < d_3, \\ 0, & d_3 < x < d_4, \end{cases} \quad (3)$$

其中 h_{FM} 代表磁性层FM中分子场的大小, h_{SF} 表示自旋过滤层SF中的分子场大小.

由(1)式, 我们可以得到各层中的波函数分别为

$$\begin{aligned} \psi_{FM\uparrow\downarrow} &= e^{ik_{FM\uparrow\downarrow}x} + R_{\uparrow\downarrow} e^{-ik_{FM\uparrow\downarrow}x}, \quad (x < 0), \\ \varphi_{I\uparrow\downarrow} &= A_{\uparrow\downarrow} e^{k_I x} + B_{\uparrow\downarrow} e^{-k_I x}, \quad (d_1 < x < d_2), \\ \varphi_{SF\uparrow\downarrow} &= A_{1\uparrow\downarrow} e^{k_{1\uparrow\downarrow}x} + B_{1\uparrow\downarrow} e^{-k_{1\uparrow\downarrow}x}, \quad (d_2 < x < d_3), \\ \varphi_{NM\uparrow\downarrow} &= D_{\uparrow\downarrow} e^{ik_{NM\uparrow\downarrow}x}, \quad (x > d_4), \end{aligned} \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned}
 k_{\text{FM}\uparrow\downarrow} &= \frac{\sqrt{2m(E \mp h_{\text{FM}})}}{\hbar}, \\
 \kappa_{\uparrow\downarrow} &= \frac{\sqrt{2m(V - E \pm h_{\text{SF}})}}{\hbar}, \\
 \kappa_{\text{I}} &= \frac{\sqrt{2m(V - E)}}{\hbar}, \\
 k_{\text{NM}} &= \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar},
 \end{aligned}
 \quad (5)$$

$R_{\uparrow\downarrow}$ 和 $D_{\uparrow\downarrow}$ 分别为自旋向上和向下电子的反射系数.

根据各个界面处波函数和一阶导数连续以及旋量变化关系^[25]

$$\begin{pmatrix} \varphi_{\text{I}\uparrow} \\ \varphi_{\text{I}\downarrow} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\frac{\theta}{2} & \sin\frac{\theta}{2} \\ -\sin\frac{\theta}{2} & \cos\frac{\theta}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi_{\text{SF}\uparrow} \\ \varphi_{\text{SF}\downarrow} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial \varphi_{\text{I}\uparrow}}{\partial x} \\ \frac{\partial \varphi_{\text{I}\downarrow}}{\partial x} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\frac{\theta}{2} & \sin\frac{\theta}{2} \\ -\sin\frac{\theta}{2} & \cos\frac{\theta}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial \varphi_{\text{SF}\uparrow}}{\partial x} \\ \frac{\partial \varphi_{\text{SF}\downarrow}}{\partial x} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

我们可以计算出各层波函数中的相关系数 $R_{\uparrow\downarrow}$, $A_{\uparrow\downarrow}$, $B_{\uparrow\downarrow}$, $A_{\text{I}\uparrow\downarrow}$, $B_{\text{I}\uparrow\downarrow}$, $D_{\uparrow\downarrow}$. 然后根据居留时间的定义

$$t_{d\sigma} = \frac{\int_0^l |\psi_\sigma|^2 dx}{j_\sigma}, \quad (8)$$

其中 $j_\sigma = \hbar k_\sigma / m$, 以及居留时间和相位时间的关系

$$t_{g_\sigma} = t_{d\sigma} - \text{Im} \left(R_\sigma \right) \frac{\hbar \partial k_\sigma}{k_\sigma \partial E}. \quad (9)$$

可计算出 σ ($=\uparrow, \downarrow$) 电子的居留时间和相位时间. 其中的 $\text{Im}(R_\sigma) \hbar \partial k_\sigma / k_\sigma \partial E$ 为 σ 电子的自旋相关的自相干时间, 它和势垒处入射波与反射波干涉有关^[18-20].

2 结果和讨论

在FM/I/SF/NM隧道结隧穿时间的计算过程中, 电子的有效质量近似取为自由电子质量 $m=9.109 \times 10^{-31}$ kg, FM层的分子场 $h_{\text{FM}}=1.92$ eV, SF层中分子场 $h_{\text{SF}}=0.18$ eV^[6-11]. 图2为FM/I/SF/NM隧道结中, 当FM层和SF层中分子场方向处于平行和反平行排列即($\theta = 0$ 和 π)时, 自旋向上和自旋向下的电子的透射率与入射能量的关系. 在计算中我们取非磁绝缘层和自旋过滤层的宽度 $d_{\text{I}}=d_{\text{SF}}=1$ nm, 非磁绝缘层和自旋过滤层的势垒高度

图2 当SF层和FM层中分子场处于平行或反平行排列时, 上下自旋电子的透射率与入射能量的关系. 计算中, 两势垒层的高度 $U_{\text{I}}=U_{\text{SF}}=3$ eV, 两势垒层宽度 $d_{\text{I}}=d_{\text{SF}}=1$ nm

Figure 2 When the molecular fields in the SF and FM layers are at parallel or antiparallel configuration, the dependences of transmission for spin-up and spin-down electrons on the incident energy. In the calculation, the potential heights of two barrier layers are taken as $U_{\text{I}}=U_{\text{SF}}=3$ eV, the widths of two barrier layers are taken as $d_{\text{I}}=d_{\text{SF}}=1$ nm.

取成一样, 即 $U_{\text{I}}=U_{\text{SF}}=3$ eV.

从图2中可以看出, 和传统的FM/I/FM结构不同, 由于SF层的作用, 在SF层和FM层中分子场处于反平行排列时上下自旋电子的透射率并不相等.

图3是当FM层中的分子场与SF层中的分子场处于平行或反平行排列时自旋向上和向下的电子的居留时间和相位时间随入射能量变化的关系. 从图中可以看出上自旋和下自旋电子的两种隧穿时间的峰值所对应的入射电子能量都很接近于势垒高度3 eV, 相对于该入射能量上下自旋电子的透射率也接近第一次到达的峰值. 当电子入射能量低于势垒高度时(入射能量小于2.2 eV, 即低能区), 不论是FM层与SF层中的分子场是平行还是反平行排列, 上自旋电子的相位时间都远大于居留时间. 而下自旋电子在该区域的相位时间和居留时间则相差不大. 这说明在低能区, 自干涉项对于上自旋电子的影响大于下自旋电子, 从而使得上自旋电子的居留时间和相位时间差别比下自旋电子大. 而当入射电子能量大于势垒高度时, 自干涉项影响大大减小, 这时不论上自旋还是下自旋电子的居留时间和相位时间均逐渐趋于一致.

图4是上自旋和下自旋电子居留时间和相位时间

图 3 当SF层和FM层分子场处于平行或反平行排列时, FM/I/SF/NM隧道结中自旋向上和自旋向下电子的居留时间和相位时间与入射能量的关系, 计算中两势垒层的高度 $U_l=U_{sf}=3$ eV, 两势垒层宽度 $d_l=d_{sf}=1$ nm

Figure 3 When the molecular fields in the SF and FM layers are at parallel or antiparallel configuration, the dependences of dwell time and phase time for spin-up and spin-down electrons on the incident energy in FM/I/SF/NM junction. In the calculation, the potential heights of two barrier layers are taken as $U_l=U_{sf}=3$ eV, the widths of two barrier layers are taken as $d_l=d_{sf}=1$ nm.

图 4 当SF层和FM层分子场处于平行或反平行排列时, FM/I/SF/NM隧道结中自旋向上和自旋向下电子的居留时间和相位时间与I/SF层势垒高度的关系, 计算中电子入射能量为2.5 eV, 两势垒层的高度 $U_l=U_{sf}=3$ eV, 两势垒层宽度 $d_l=d_{sf}=1$ nm

Figure 4 When the molecular fields in the SF and FM layers are at parallel or antiparallel configuration, the dependences of dwell time and phase time for spin-up and spin-down electrons on the incident energy in FM/I/SF/NM junction. In the calculation, the incident energies of electrons are taken as 2.5 eV, the potential heights of two barrier layers are taken as $U_l=U_{sf}=3$ eV, the widths of two barrier layers are taken as $d_l=d_{sf}=1$ nm.

随I层和SF层势垒高度变化的关系, 计算中我们取 $U_I=U_{SF}$, 两势垒层的宽度 $d_I=d_{SF}=1$ nm. 由于参加输运的电子能量一般位于费米能附近, 我们取入射电子能量取为2.5 eV(该能量位于一般铁磁金属费米能附近). 由图可见, 随着两绝缘层势垒高度的增加, 对于上自旋电子, 其相位时间和居留时间的差距逐渐增大, 当势垒高度增大到一定程度后, 该差距保持不变. 对于下自旋电子, 其相位时间和居留时间的差距则始终较小. 这说明整个隧穿区域的势垒高度的变化对上自旋电子自相干项的影响要大于对下电子的影响.

图5是自旋向上或向下的电子的居留时间和相位时间随SF层势垒高度变化的关系, 计算中I层势垒高度固定为3 eV. 图6是SF层势垒高度固定为3 eV时, 不同自旋方向电子的居留时间和相位时间随I层势垒高度变化的关系. 与图4一样, 计算中入射电子能量取为2.5 eV. 图5和6反映了不对称势垒的情况下, 自旋相关隧穿时间随隧穿区域势垒高度变化的关系. 从两图的计算结果可以看到对于不对称势垒的情况, SF层势垒

高度变化, 使得无论是上自旋电子还是下自旋电子的相位时间和居留时间的差距都明显增大. 而I层势垒高度的变化, 会导致上自旋电子相位时间和居留时间的明显差距, 但对下自旋电子的相位时间和居留时间则不会导致明显差距. 这说明在FM/I/SF/NM自旋过滤结中, SF自旋过滤层势垒高度的变化对上下自旋电子自相干项的影响大, 而I层势垒高度的变化主要影响上自旋电子的自相干项.

图7和8为居留时间和相位时间随SF层厚度和SF层中分子场的变化, 从图7和8中, 可以看到随着SF层厚度和分子场的变化, 会导致上下自旋电子相位时间和居留时间的明显差距, 该差距随着SF层厚度和分子场的变化逐渐趋于不变.

3 结论

基于自由电子近似和winful关于隧穿时间的理论, 研究FM/I/SF/NM隧道结中不同自旋方向电子的居留

图 5 当SF层和FM层分子场处于平行或反平行排列时, FM/I/SF/NM隧道结中自旋向上和自旋向下电子的居留时间和相位时间与自旋过滤层SF势垒高度的关系, 计算中电子入射能量为2.5 eV, 绝缘层I势垒高度固定为3 eV, 两势垒层宽度 $d_I=d_{SF}=1$ nm
Figure 5 When the molecular fields in the SF and FM layers are at parallel or antiparallel configuration, the dependences of dwell time and phase time for spin-up and spin-down electrons on the barrier height of SF layer, in FM/I/SF/NM junction. In the calculation, the incident energies of electrons are taken as 2.5 eV, the barrier heights of insulator layer are fixed to 3 eV, the widths of two barrier layers are taken as $d_I=d_{SF}=1$ nm.

图6 当SF层和FM层分子场处于平行或反平行排列时, FM/I/SF/NM隧道结中自旋向上和自旋向下电子的居留时间和相位时间与I层势垒高度的关系, 计算中电子入射能量为2.5 eV, 自旋过滤层势垒高度固定为3 eV, 两势垒层宽度 $d_I=d_{SF}=1$ nm.

Figure 6 When the molecular fields in the SF and FM layers are at parallel or antiparallel configuration, the dependences of dwell time and phase time for spin-up and spin-down electrons on the barrier height of I layer in FM/I/SF/NM junction. In the calculation, the incident energies of electrons are taken as 2.5 eV, the barrier heights of spin filter layer are fixed to 3 eV, the widths of two barrier layers are taken as $d_I=d_{SF}=1$ nm.

图7 当SF层和FM层分子场处于平行或反平行排列时, FM/I/SF/NM隧道结中自旋向上和自旋向下电子的居留时间和相位时间与自旋过滤层(SF)势垒厚度的关系, 计算中电子入射能量为2.5 eV, 绝缘层(I)势垒厚度固定为1 nm, 绝缘层(I)和自旋过滤层(SF)的势垒高度固定为3 eV

Figure 7 When the molecular fields in the SF and FM layers are at parallel or antiparallel configuration, the dependences of dwell time and phase time for spin-up and spin-down electrons on the barrier width of spin filter layer in FM/I/SF/NM junction. In the calculation, the incident energies of electrons are taken as 2.5 eV, the widths of insulator layer are fixed to 1 nm and the barrier heights of insulator and spin filter layers are fixed to 3 eV.

图 8 当SF层和FM层分子场处于平行或反平行排列时, FM/I/SF/NM隧道结中自旋向上和自旋向下电子的居留时间和相位时间与自旋过滤层(SF)中分子场大小的关系. 计算中, 两势垒层的高度 $U_I=U_{SF}=3$ eV, 势垒宽度 $d_I=d_{SF}=1$ nm, 入射电子能量为2.5 eV
Figure 8 When the molecular fields in the SF and FM layers are at parallel or antiparallel configuration, the dependences of dwell time and phase time for spin-up and spin-down electrons on the molecular field of spin filter layer in FM/I/SF/NM junction. In the calculation, the incident energies of electrons are taken as 2.5 eV, the barrier heights of insulator and spin filter layers are fixed to $U_I=U_{SF}=3$ eV and the widths of insulator layer are fixed to $d_I=d_{SF}=1$ nm.

时间和相位时间. 计算结果表明, 当入射电子能量大于势垒高度时, 随着入射电子能量的增加, 不同自旋方向电子的居留时间和相位时间逐渐趋于一致. 但在低能隧穿区域, 由于自相干项的影响, 不同自旋方向的入射电子的相位时间总是大于居留时间. 其中, 对于上自旋电子, 其相位时间和居留时间的差距明显, 并且这种差距随I层的势垒高度, SF层的势垒高度, 厚

度和分子场的增大而增大到趋于不变. 对于下自旋电子, 相位时间和居留时间的差距不明显. 但对于不对称势垒, 下自旋电子的相位时间和居留时间的差距会随SF层的厚度, 高度和分子场的增大而变得明显. 这说明自旋过滤层对FM/I/SF/NM隧道结中不同自旋方向的电子的自相干项的影响较大, 从而对自旋相关的隧穿时间影响大.

参考文献

- 1 Moodera J S, Santos T S, Nagahama T. The phenomena of spin-filter tunnelling. *J Phys-Condens Matter*, 2007, 19: 165202
- 2 Meservey R, Tedrow P M. Spin-polarized electron tunneling. *Phys Rep*, 1994, 238: 173–243
- 3 Li Z D, Li Q Y, Li L, et al. Soliton solution for the spin current in a ferromagnetic nanowire. *Phys Rev E*, 2007, 76: 026605. arXiv: 0708.3120
- 4 He P B, Liu W M. Nonlinear magnetization dynamics in a ferromagnetic nanowire with spin current. *Phys Rev B*, 2005, 72: 064410
- 5 Liu W M, Zhang W S, Pu F C, et al. Nonlinear magnetization dynamics of the classical ferromagnet with two single-ion anisotropies in an external magnetic field. *Phys Rev B*, 1999, 60: 12893–12911
- 6 Saffarzadeh A. Spin-filter magnetoresistance in magnetic barrier junctions. *J Magn Magn Mater*, 2004, 269: 327–332
- 7 Nagahama T, Santos T S, Moodera J S. Enhanced magnetotransport at high bias in quasimagnetic tunnel junctions with EuS spin-filter barriers. *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 016602

- 8 Jin D, Ren Y, Li Z, et al. Spin-filter tunneling magnetoresistance in a magnetic tunnel junction. *Phys Rev B*, 2006, 73: 012414
- 9 Li Y, Li B Z, Zhang W S, et al. Tunneling conductance and magnetoresistance of ferromagnet/ferromagnetic insulator (semiconductor)/ferromagnet junctions. *Phys Rev B*, 1998, 57: 1079–1084
- 10 Worledge D C, Geballe T H. Magnetoresistive double spin filter tunnel junction. *J Appl Phys*, 2000, 88: 5277
- 11 Miao G X, Müller M, Moodera J S. Magnetoresistance in double spin filter tunnel junctions with nonmagnetic electrodes and its unconventional bias dependence. *Phys Rev Lett*, 2009, 102: 076601
- 12 Miao G X, Chang J, Assaf B A, et al. Spin regulation in composite spin-filter barrier devices. *Nat Commun*, 2014, 5: 3682
- 13 Miao G X, Moodera J S. Magnetic tunnel junctions with MgO-EuO composite tunnel barriers. *Phys Rev B*, 2012, 85: 144424
- 14 Lüders U, Bibes M, Fusil S, et al. Bias dependence of tunnel magnetoresistance in spin filtering tunnel junctions: Experiment and theory. *Phys Rev B*, 2007, 76: 134412
- 15 Lüders U, Barthélémy A, Bibes M, et al. NiFe₂O₄: A versatile spinel material brings new opportunities for spintronics. *Adv Mater*, 2006, 18: 1733–1736
- 16 Condon E U, Morse P M. Quantum mechanics of collision processes I. Scattering of particles in a definite force field. *Rev Mod Phys*, 1931, 3: 43–88
- 17 Hartman T E. Tunneling of a wave packet. *J Appl Phys*, 1962, 33: 3427–3433
- 18 Landauer R, Martin T. Barrier interaction time in tunneling. *Rev Mod Phys*, 1994, 66: 217–228
- 19 Winful H G. Delay time and the hartman effect in quantum tunneling. *Phys Rev Lett*, 2003, 91: 260401
- 20 Guo Y, Shang C E, Chen X Y. Spin-dependent delay time and the Hartman effect in tunneling through diluted-magnetic-semiconductor/semiconductor heterostructures. *Phys Rev B*, 2005, 72: 045356
- 21 Wang B, Guo Y, Gu B L. Tunneling time of spin-polarized electrons in ferromagnet/insulator (semiconductor) double junctions under an applied electric field. *J Appl Phys*, 2002, 91: 1318
- 22 Wu H C, Guo Y, Chen X Y, et al. Rashba spin-orbit effect on traversal time in ferromagnetic/semiconductor/ferromagnetic heterojunction. *J Appl Phys*, 2003, 93: 5316
- 23 Zhang Y T, Li Y C. Rashba spin-orbit effect on spin-tunneling time in a ferromagnetic/semiconductor/ferromagnetic heterojunction with a tunnel barrier. *J Appl Phys*, 2006, 99: 013907
- 24 Du J, Zhang P, Liu J H, et al. Spin-tunneling time and transport in a ferromagnetic/semiconductor/ferromagnetic heterojunction with a δ tunnel barrier (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2008, 57: 7221–7227 [杜坚, 张鹏, 刘继红, 等. 含 δ 势垒的铁磁/半导体/铁磁异质结中的自旋输运和渡越时间. *物理学报*, 2008, 57: 7221–7227]
- 25 Slonczewski J C. Conductance and exchange coupling of two ferromagnets separated by a tunneling barrier. *Phys Rev B*, 1989, 39: 6995–7002

The tunneling time in FM/I/SF/NM spin filter tunnel junctions

ZENG ShaoLong & XIE ZhengWei*

College of Physics and Electronic Engineering, Sichuan Normal University, Chengdu 610066, China

Based on the free electronic model and the Winful's tunneling time theory, the spin dependent dwell time and the phase time in ferromagnetic metal/nonferromagnetic metal/spin filter layer/normal metal single spin filter tunneling junctions (FM/I/SF/NM) are investigated. The results show that, different from the traditional FM/I/FM structures, the transmission coefficients for up and down spin electrons are not equal due to the effects of the SF layer when the molecular fields in FM and SF layers are at antiparallel arrangement. With the higher incident electronic energies (the incident energies are higher than the barrier height), as the decreasing influences of the self-interference delay, the phase times and the dwell times tend to same for different spin orientations electrons. But with the lower incident electronic energies (the incident energies are smaller than the barrier height), as the increasing influences of the self-interference delay, the differences between the phase times and the dwell times appear for different spin orientations electrons. And, the barrier heights of the I and SF layers, and the widths and the molecular fields of spin filter barrier can induce large differences between the phase times and the dwell times for spin-up electrons. But for the spin-down electrons, the differences between the phase times and the dwell times are induced mainly by the changes of parameters of the SF layer and tinily by the varies of barrier heights of the I layer.

spin filter, magnetic tunneling junction, dwell time, phase time, tunneling time

PACS: 73.43.Jn, 72.25.Dc, 73.43.Qt

doi: 10.1360/SSPMA2016-00138