

双自旋过滤隧道结中的隧穿时间

曾绍龙 李玲 谢征微

Tunneling times in double spin-filter junctions

Zeng Shao-Long Li Ling Xie Zheng-Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 227302 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.227302

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.227302>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I22>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

量子点双链中电子自旋极化输运性质

Spin-polarized transport through double quantum-dot-array

物理学报.2012, 61(15): 157201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.157201>

紫外光辐照对 TiO<sub>2</sub> 纳米线电输运性能的影响及磁阻效应研究

Electronic transportation properties and magnetoresistance effects on single TiO<sub>2</sub> nanowire under ultra-violet irradiation

物理学报.2016, 65(9): 097301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.097301>

含 stubs 量子波导系统的电子自旋极化输运性质

Spin-polarized transport in quantum waveguide systems with attached stubs

物理学报.2009, 58(11): 7909-7913 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.58.7909>

化学水浴法制备大面积 CdS 薄膜及其光伏应用

Preparation of large area CdS thin film and its application in photovoltaic cells

物理学报.2009, 58(1): 438-443 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.58.438>

# 双自旋过滤隧道结中的隧穿时间\*

曾绍龙 李玲 谢征微†

(四川师范大学物理与电子工程学院, 成都 610068)

(2016年7月4日收到; 2016年8月21日收到修改稿)

基于自由电子近似和Winful的隧穿时间模型, 研究了普通金属/自旋过滤层/非磁绝缘层/自旋过滤层/普通金属(NM/SF/I/SF/NM)双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). 分别以居留时间和相位时间随入射电子能量、势垒高度和势垒宽度、以及分子场大小的变化情况做了讨论. 计算结果表明: 在低能隧穿区域(入射电子的能量小于势垒高度), 由于自旋相关的自相干项的影响, 不同自旋方向电子的相位时间总是大于居留时间; 在能隧穿区域(入射电子的能量大于势垒高度), 自旋相关的自相干项的影响减小, 不同自旋方向电子的相位时间和居留时间趋于一致. NM/SF/I/SF/NM双自旋过滤隧道结中的居留时间和相位时间基本不受非磁绝缘层势垒高度和宽度变化的影响, 该现象不同于常规的铁磁金属/非磁绝缘层/铁磁金属(FM/I/FM)隧道结. 但当非磁绝缘层势垒高度低于自旋过滤层势垒高度时, 改变非磁绝缘层的势垒高度和宽度会使居留时间和相位时间出现相峰值, 该峰值的出现与不同自旋方向电子的共振隧穿有关. 自旋过滤层的势垒高度的变化对NM/SF/I/SF/NM双自旋过滤隧道结中的居留时间和相位时间影响大, 但宽度变化的影响较小. 自旋过滤层中分子场的变化对不同自旋方向的电子的居留时间和相位时间有明显影响, 且上自旋电子的居留时间和相位时间随分子场的增大而减少, 而下自旋电子的情况刚好相反.

**关键词:** 居留时间, 相位时间, 磁性隧道结, 自旋过滤效应

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

**DOI:** 10.7498/aps.65.227302

## 1 引言

磁性绝缘材料中的自旋过滤现象近年来受到了人们的广泛关注<sup>[1,2]</sup>. 如果在隧道结中将磁性绝缘材料作为隧穿势垒, 由于磁性绝缘材料中的交换相互作用, 在平均场近似下, 当电子的自旋磁矩方向和磁性绝缘层中的分子场方向一致时, 其所面临的势垒高度比相反自旋磁矩方向的电子低. 由于电子的隧穿概率与势垒高度呈指数变化关系, 因而自旋磁矩和分子场方向平行的电子的隧穿概率大, 容易隧穿, 而相反自旋磁矩方向的电子则不易隧穿. 于是在以磁性绝缘材料作为势垒的隧道结

中, 可得到大的自旋极化的隧穿电流, 该现象也被称为自旋过滤现象. 磁性绝缘材料所具有的自旋过滤性质使得其在自旋电子器件的应用方面有着重要的作用, 如在磁性隧道结的研究中, 利用磁性绝缘材料的单自旋和双自旋过滤隧道结的研究结果显示, 在该类结中不仅可以获得大的隧穿磁电阻和自旋极化的隧穿电流, 而且可以克服传统铁磁金属/非磁绝缘层/铁磁金属(FM/I/FM)磁性隧道结中隧穿磁电阻随偏压急剧下降的缺点<sup>[3-13]</sup>. 常用的绝缘磁性材料有EuO, EuS或NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>等<sup>[9-13]</sup>.

在与隧穿现象相关的研究中, 隧穿时间一直是人们所关注的一个重要问题. 该问题的研究除了对

\* 四川省教育厅自然科学基金重点项目(批准号: 13ZA0149, 16ZA0047), 四川高校科研创新团队建设计划资助(批准号: 12TD008)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zwxie@aliyun.com

隧道效应这一量子力学现象具有重要的意义外,也是将来评价基于隧道效应的不同高速自旋电子器件性能的一个重要参数. 自从Condon和Morse提出隧穿过程的灵敏度问题之后<sup>[14]</sup>, 有很多理论方法对隧穿时间进行了探讨如相位延迟方法(phase delay method)<sup>[15]</sup>、居留时间方法(dwell time approach)<sup>[16]</sup>、拉莫尔进动时间法及其推广<sup>[17]</sup>、波包演化方法<sup>[18]</sup>. 最近, Winful 利用变分方法得到了相位时间(phase time)和居留时间(dwell time)的一个普遍关系式等<sup>[19]</sup>. 文献<sup>[20—24]</sup>进一步将其推广到自旋相关的隧穿问题研究上, 并对势垒为绝缘体和半导体的一系列隧道结进行了研究.

本文在上述研究的基础上, 讨论了利用磁性绝缘材料作为自旋过滤势垒的非金属层/自旋过滤层/非磁绝缘层/自旋过滤层/非金属层(NM/SF/I/SF/NM)双自旋过滤结中的居留时间和相位时间, 及其与I层和SF层势垒高度、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器件的应用和相关理论研究中具有重要的意义, 因而本文的研究对上述研究和自旋相关隧穿的理解具有一定的帮助.

## 2 理论模型

图1为NM/SF/I/SF/NM双自旋隧道结模型图, 假定自旋过滤隧道结的横向宽度远小于纵向长度, 这样就可以将该结构视作准一维结构.

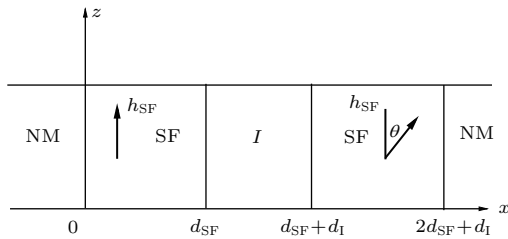


图1 NM/SF/I/SF/NM(普通金属/自旋过滤层/非磁绝缘层/自旋过滤层/普通金属)双自旋过滤隧道结

Fig. 1. NM/SF/I/SF/NM (normal metal/spin-filter layer/nonmagnetic insulator/spin-filter layer/ normal metal) double spin-filter junction.

NM/SF/I/SF/NM双自旋隧道结的哈密顿量可表示为<sup>[25]</sup>

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

$$U(x) = \begin{cases} 0, & 0 < x \\ U_{\text{SF}}, & 0 < x < d_{\text{SF}}, \\ U_{\text{I}}, & d_{\text{SF}} < x < d_{\text{SF}} + d_{\text{I}}, \\ U_{\text{SF}}, & d_{\text{SF}} + d_{\text{I}} < x < 2d_{\text{SF}} + d_{\text{I}}, \\ 0, & 2d_{\text{SF}} + d_{\text{I}} < x, \end{cases} \quad (2)$$

其中 $U_{\text{SF}}$ 和 $d_{\text{SF}}$ 分别为自旋过滤层的势垒高度和势垒宽度;  $U_{\text{I}}$ 和 $d_{\text{I}}$ 分别为普通绝缘层的势垒高度和势垒宽度;  $\sigma_z$ 为泡利矩阵,  $\sigma_z = \pm$ 分别表示 $\uparrow$ 和 $\downarrow$ 的电子(这里的 $\uparrow$ 和 $\downarrow$ 分别表示电子自旋磁矩的方向);  $h(x)$ 是各层中分子场大小.

$$h(x) = \begin{cases} 0, & 0 < x \\ h_{\text{SF}}, & 0 < x < d_{\text{SF}}, \\ 0, & d_{\text{SF}} < x < d_{\text{SF}} + d_{\text{I}}, \\ h_{\text{SF}}, & d_{\text{SF}} + d_{\text{I}} < x < 2d_{\text{SF}} + d_{\text{I}}, \\ 0, & 2d_{\text{SF}} + d_{\text{I}} < x, \end{cases} \quad (3)$$

其中 $h_{\text{SF}}$ 表示自旋过滤层中分子场的大小.

根据(1)式我们可以得到各层中不同自旋方向的电子波函数为

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{NM}\uparrow\downarrow} &= e^{ik_{\uparrow\downarrow}x} + R_{\uparrow\downarrow} e^{-ik_{\uparrow\downarrow}x}, \\ \varphi_{\text{SF}\uparrow\downarrow} &= A_{\uparrow\downarrow} e^{\kappa_{\text{SF}}x} + B_{\uparrow\downarrow} e^{-\kappa_{\text{SF}}x}, \\ \varphi_{\text{I}\uparrow\downarrow} &= A_{\text{I}\uparrow\downarrow} e^{\kappa_{\text{I}}x} + B_{\text{I}\uparrow\downarrow} e^{-\kappa_{\text{I}}x}, \\ \varphi_{\text{SF}\uparrow\downarrow} &= A_{2\uparrow\downarrow} e^{\kappa_{\text{SF}}x} + B_{2\uparrow\downarrow} e^{-\kappa_{\text{SF}}x}, \\ \varphi_{\text{NM}\uparrow\downarrow} &= D_{\uparrow\downarrow} e^{ik_{\uparrow\downarrow}x}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中

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

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

根据波函数在各界面的连续和一阶导连续以及旋量变化关系<sup>[25,26]</sup>,

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

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

可以计算出 $R_{\uparrow\downarrow}$ ,  $D_{\uparrow\downarrow}$ 等各参数.

根据居留时间的定义

$$t_{d\sigma} = \frac{1}{j_\sigma} \int_0^l |\psi_\sigma|^2 dx, \quad (8)$$

其中  $j_\sigma$  为入射流密度

$$j_\sigma = \hbar k/m. \quad (9)$$

相位时间和居留时间的关系为

$$t_{g\sigma} = t_{d\sigma} - \text{Im}(R_\sigma) \frac{\hbar \partial k_\sigma}{k_\sigma \partial E}, \quad (10)$$

其中  $\sigma(=\uparrow, \downarrow)$  分别代表自旋向上和自旋向下入射的电子,  $\text{Im}(R_\sigma) \frac{\hbar \partial k_\sigma}{k_\sigma \partial E}$  为  $\sigma$  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.

### 3 计算结果与讨论

在 NM/SF/I/SF/NM 双自旋过滤隧道结自旋相关隧穿时间的计算中, 电子有效质量近似取为自

由电子的质量  $m = 9.109 \times 10^{-31}$  kg.

#### 3.1 居留时间和相位时间随入射电子能量的变化

图 2 为 NM/SF/I/SF/NM 双自旋过滤隧道结中不同自旋方向的电子的透射率随入射电子能量的变化, 在计算过程中两 SF 层的势垒高度和厚度取值相同. 由图 2 可见, 在两 SF 层中的分子场处于平行排列的情况下, 由于上自旋电子始终面临的是较高的势垒, 而下自旋电子始终面临的是较低的势垒, 所以上下自旋电子的透射率是不同的. 在两 SF 层中的分子场处于反平行排列的情况下, 由于自旋向上和自旋向下的入射电子在隧穿过程中都会面临同样高或低的势垒, 所以在入射能量相同的情况下, 具有同样的透射率.

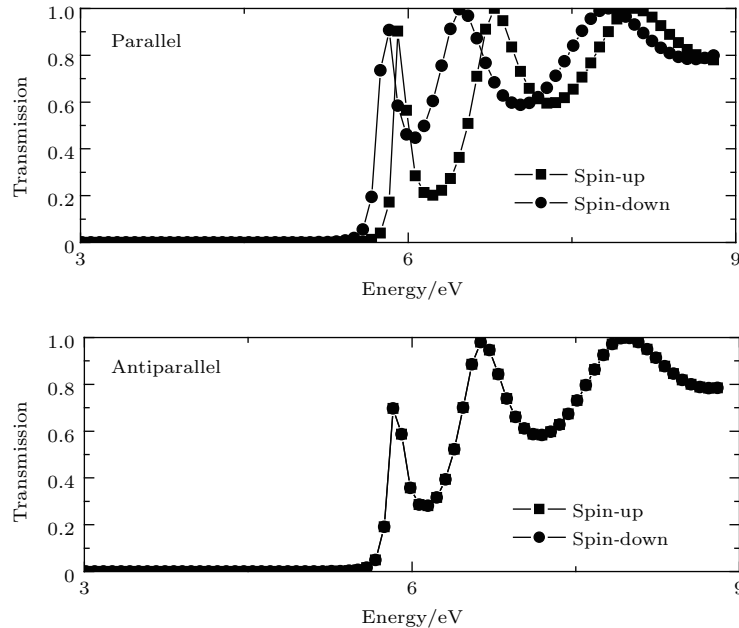


图 2 当两 SF 层中的分子场处于平行或反平行排列时自旋向上或向下电子的透射率随入射电子能量的变化关系. 计算中 I 层和两个 SF 层势垒高度和宽度以及两个 SF 层中的分子场大小分别为  $U_I = U_{SF} = 5.6$  eV,  $d_{SF} = d_I = 1$  nm 和  $h_{SF} = 0.18$  eV

Fig. 2. When the molecular fields in two SF layers are at parallel or at antiparallel configuration, the dependences of transmission for spin-up and spin-down electrons on the incident electronic energies. In the calculation, the barrier heights and widths of the I layer and the two SF layers and the molecular field in the two SF layers are taken as  $U_I = U_{SF} = 5.6$  eV,  $d_I = d_{SF} = 1$  nm and  $h_{SF} = 0.18$  eV respectively.

图 3 为 NM/SF/I/SF/NM 双自旋过滤隧道结中不同自旋方向电子的居留时间和相位时间随入射电子能量的变化. 从图中可以看到, 当入射电子能量接近非磁绝缘层和自旋过滤层势垒高度时, 居留时间和相位时间出现峰值. 其次当入射电子能

量较低时 (低于势垒高度) 即低能区域, 由于自干涉项的影响, 相位时间大于居留时间. 而在高能区域, 自干涉项的影响逐渐减小, 居留时间和相位时间则趋于一致.

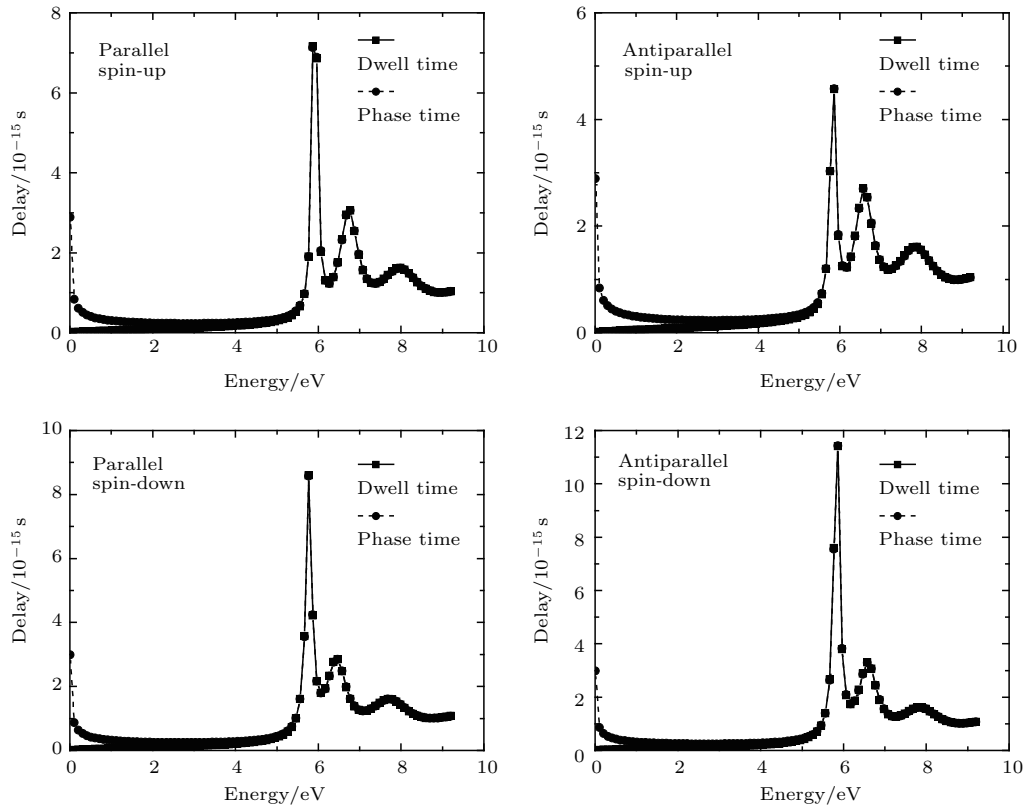


图3 当两SF层中的分子场处于平行或反平行排列时自旋向上和向下电子的隧穿时间随入射电子能量的变化关系. 计算中I层和两个SF层势垒高度和宽度以及SF层中的分子场大小分别取为  $U_I = U_{SF} = 5.6$  eV,  $d_{SF} = d_I = 1$  nm 和  $h_{SF} = 0.18$  eV

Fig. 3. When the molecular fields in two SF layers are at parallel or at antiparallel configuration, the dependences of dwell time and phase time for spin-up and spin-down electrons on the incident energies. In the calculation, the barrier heights and widths of the I layer and the two SF layers and the molecular field in the two SF layer are taken as  $U_I = U_{SF} = 5.6$  eV,  $d_I = d_{SF} = 1$  nm, and  $h_{SF} = 0.18$  eV respectively.

### 3.2 居留时间和相位时间随势垒高度的变化

隧道结的势垒高度和宽度对隧穿电子的输运特性有着重要的影响, 接下来我们对双自旋过滤隧道结中隧穿时间随势垒高度和宽度的变化做了相应的计算. 在计算中, 由于参加隧穿运输的电子一般是费米能附近的电子, 所以我们取入射电子的能量为 2.5 eV. 首先, 我们计算了双自旋过滤隧道结中居留时间和相位时间随非磁绝缘层和SF层势垒高度的变化.

图4为当电子的入射能量为 2.5 eV 时, NM/SF/I/SF/NM 隧道结中上下自旋电子的隧穿时间随非磁绝缘层势垒  $U_I$  高度的变化. 从图中可以看到双自旋过滤隧道结中的居留时间和相位时间基本不受非磁绝缘层高度变化的影响, 但当  $U_I$  的值接近于 2 eV 时, 居留时间和相位时间会出现一个峰

值. 这个峰值的出现和自旋相关电子的共振隧穿有关, 当非磁绝缘层势垒高度  $U_I$  的值小于两个自旋过滤层的势垒高度时, 会在两个自旋过滤层中间出现一个势阱区域, 从而导致自旋相关电子的共振隧穿, 由于共振隧穿现象和势阱中的束缚态相关, 所以导致居留时间和相位时间出现峰值.

图5是自旋向上或向下的电子的居留时间和相位时间随自旋过滤层势垒高度  $U_{SF}$  的变化. 不同于图4电子的居留时间和相位时间随非磁绝缘层势垒高度变化的关系, 自旋过滤层高度对电子隧穿时间有明显的影 响. 当自旋过滤层势垒高度低于入射能量的区域, 居留时间和相位时间随绝缘层高度的增加而增加, 在接近入射能量时, 出现峰值. 在自旋过滤层势垒高度大于电子入射能量的区域, 居留时间和相位时间则随自旋过滤层高度的增加而减小. 同时居留时间和相位时间的差别越来越大, 说明此时自干涉项的作用在相应地增大.

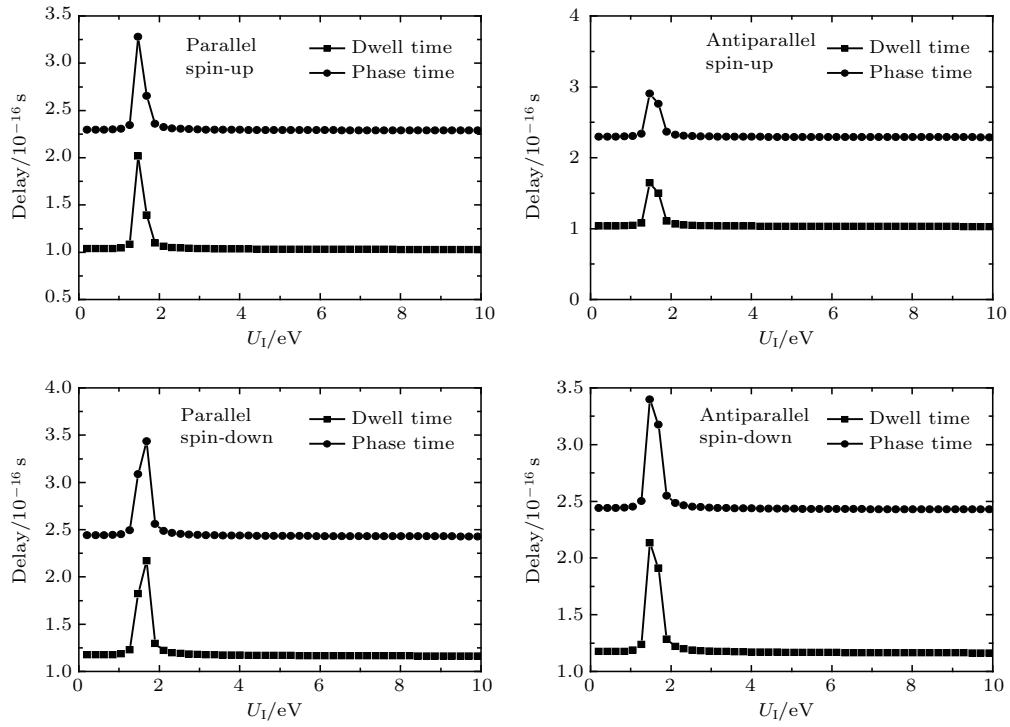


图4 当两SF层中的分子场处于平行或反平行排列时双自旋过滤隧道结中自旋向上和自旋向下电子的隧穿时间和I层势垒高度的关系 计算中电子入射能量  $E = 2.5$  eV, SF层势垒高度  $U_{SF} = 5.6$  eV, I层势垒宽度和自旋过滤层势垒宽度为  $d_{SF} = d_I = 1$  nm  
 Fig. 4. When the molecular fields in two SF layers are at parallel or at antiparallel configuration, the dependences of dwell time and phase time for spin-up and spin-down electrons on the barrier heights of I layer in double spin-filter junction. In the calculation, the incident electronic energy is taken as  $E = 2.5$  eV, the barrier height of SF layer is taken as  $U_{SF} = 5.6$  eV, the widths of I and SF barrier layers are taken as  $d_{SF} = d_I = 1$  nm.

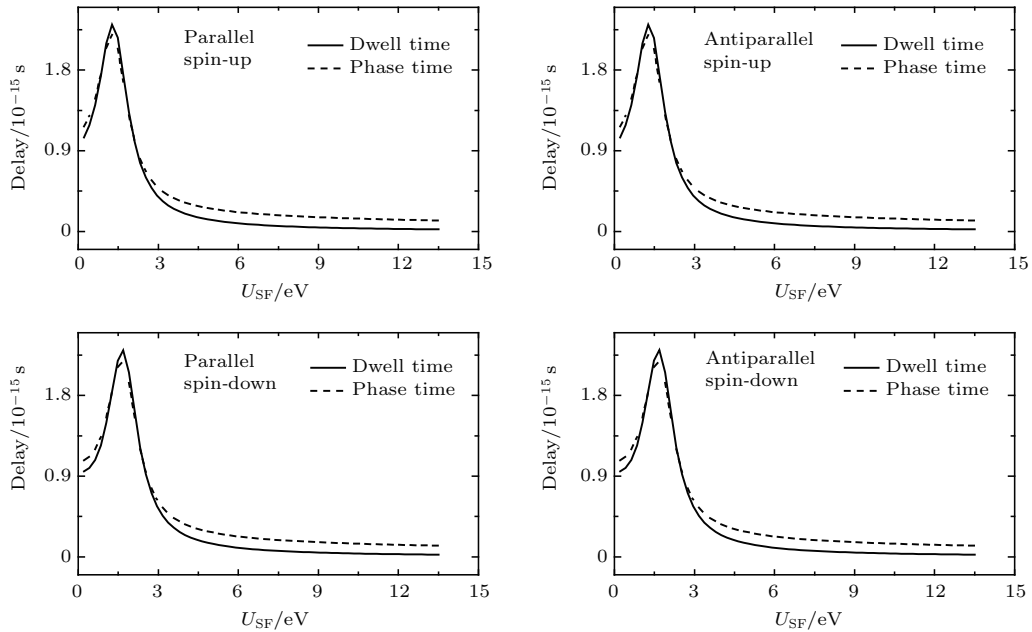


图5 当两SF层中的分子场处于平行或反平行排列时双自旋过滤隧道结中自旋向上和自旋向下电子的隧穿时间随SF层势垒高度的变化关系(两个SF层的势垒高度和势垒宽度取值完全相同) 计算中电子入射能量  $E = 2.5$  eV, I层势垒高度  $U_I = 5.6$  eV, I层势垒宽度等于SF层势垒宽度  $d_{SF} = d_I = 1$  nm  
 Fig. 5. When the molecular fields in two SF layers are at parallel or antiparallel configuration, the dependences of dwell time and phase time for spin-up and spin-down electrons on the barrier height of SF layer in double spin-filter junction (We take the barrier heights of the two spin-filter layers are same). In the calculation, the incident electronic energy is taken as  $E = 2.5$  eV, the barrier height of I layer is taken as  $U_I = 5.6$  eV, the widths of I layer and SF layer are taken as equal as  $d_{SF} = d_I = 1$  nm.

### 3.3 居留时间和相位时间随势垒宽度以及分子场大小的变化

图6是NM/SF/I/SF/NM隧道结中的隧穿时间和绝缘层I宽度变化的关系. 从图中可以看出, 当电子入射能量小于非磁绝缘层势垒高度时, 居留时间和相位时间几乎不随非磁绝缘层宽度而变化. 图7(a)是当非磁绝缘层势垒高度为2 eV时NM/SF/I/SF/NM隧道结中的隧穿时间随非磁绝缘层宽度的变化. 由于自旋过滤层的势垒高度大于非磁绝缘层势垒高度, 当非磁绝缘层势垒高度低于入射电子能量2.5 eV时, 对入射电子而言, 非磁绝缘层势垒相当于一个势阱, 所以随着非磁绝缘层

势垒宽度的变化, 无论是居留时间还是相位时间都出现了一个峰值. 从图7(b)可以看出, 该峰值所对应的非磁势垒宽度处, 上下自旋电子的透射率也会出现相应的峰值, 说明隧穿时间的峰值和共振隧穿相关.

图8是双自旋过滤隧道结中隧穿时间和SF层宽度的关系, 从图中可以看到, 双自旋过滤隧道结中的隧穿时间也几乎不随SF层的宽度变化而变化.

图9是双自旋过滤隧道结中居留时间和相位时间随SF层中分子场大小的变化. 从图中可以看到, 对于上自旋电子, 其居留时间和相位时间随SF层中的分子场的增大而减小, 而对于下自旋电子则与上自旋电子的情况相反.

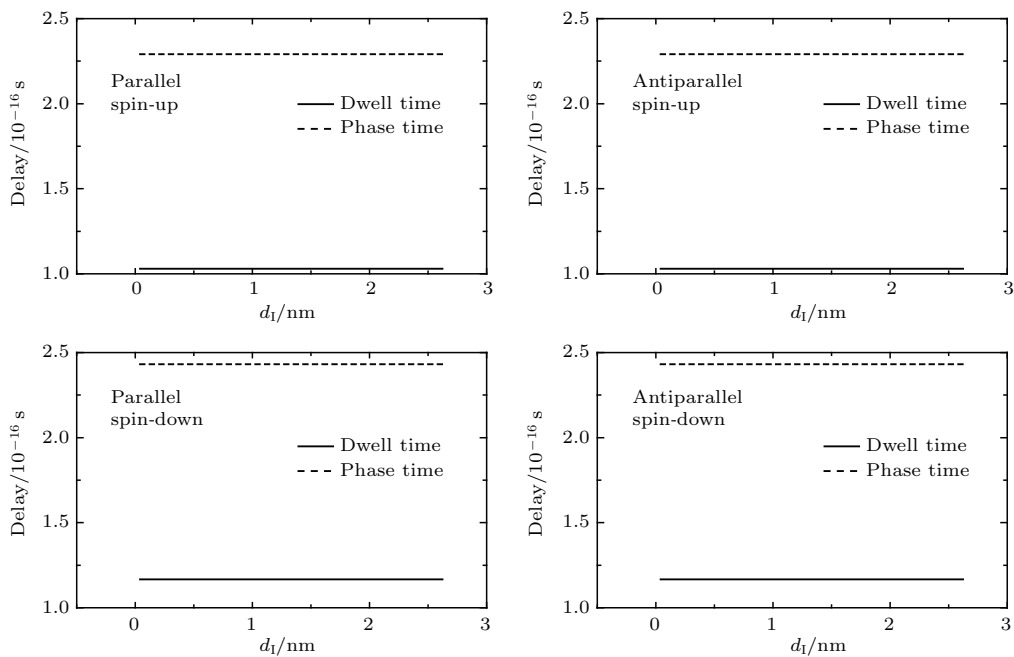


图6 当两SF层中的分子场处于平行或反平行排列时双自旋过滤隧道结中自旋向上和自旋向下电子的隧穿时间随I层势垒宽度的变化. 计算中电子入射能量  $E = 2.5$  eV, I层和SF层势垒高度  $U_I = U_{SF} = 5.6$  eV, 两SF层势垒宽度取为一样  $d_{SF} = 1$  nm

Fig. 6. When the molecular fields in two SF layers are at parallel or at antiparallel configuration, the dependences of dwell time and phase time for spin-up and spin-down electrons on the widths of I layer in double spin-filter junction. In the calculation, the incident electronic energy is taken as  $E = 2.5$  eV, the barrier heights of SF and I layer are taken as equal as  $U_I = U_{SF} = 5.6$  eV, the widths of two SF layers are taken as equal as  $d_{SF} = 1$  nm.

## 4 结 论

基于自由电子近似和Winful关于隧穿时间的理论, 研究了NM/SF/I/SF/NM双自旋过滤隧道结中不同自旋方向电子的居留时间和相位时间. 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; 但当入射电子能量小于势垒高度即在低能隧穿区域时, 由于自旋相关的自相干项的影响, 不同自旋方向的入射电子的相位时间总是大于居留时间. 不同于常规的FM/I/FM隧道结, NM/SF/I/SF/NM隧道结的居留时间和相位时间基本不受非磁绝缘层的高度和宽度的影响, 但当非磁绝缘层的势垒高度低于自旋过滤层势垒高度的情况下, 改变非磁绝缘层的势垒

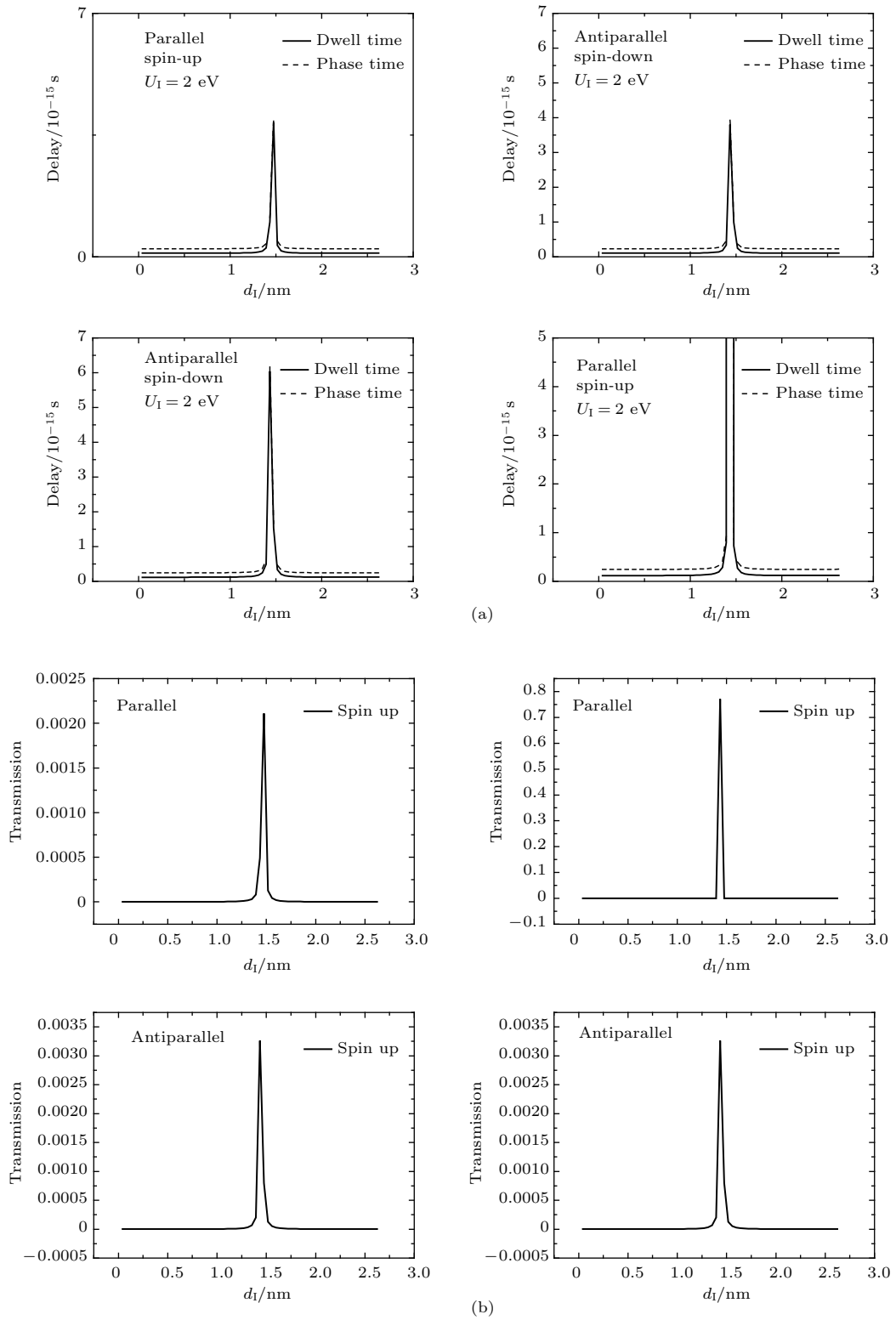


图7 当两SF层中的分子场处于平行或反平行排列时双自旋过滤隧道结中自旋向上和自旋向下电子的隧穿时间和透射率随I层势垒宽度的变化 计算中电子入射能量  $E = 2.5$  eV, I层势垒高度  $U_I = 2$  eV, 两SF层势垒高度相等  $U_{SF} = 5.6$  eV, SF层势垒宽度  $d_{SF} = 1$  nm

Fig. 7. When the molecular fields in two SF layers are at parallel or at antiparallel configuration, the dependences of dwell time and phase time for spin-up and spin-down electrons on the barrier width of I layer in double spin-filter junctions. In the calculation, the incident energies of electrons are taken as  $E = 2.5$  eV, the barrier height of I layer is taken as  $U_I = 2$  eV the barrier heights and widths of two SF layers are taken as equal as  $U_{SF} = 5.6$  eV,  $d_{SF} = 1$  nm respectively.



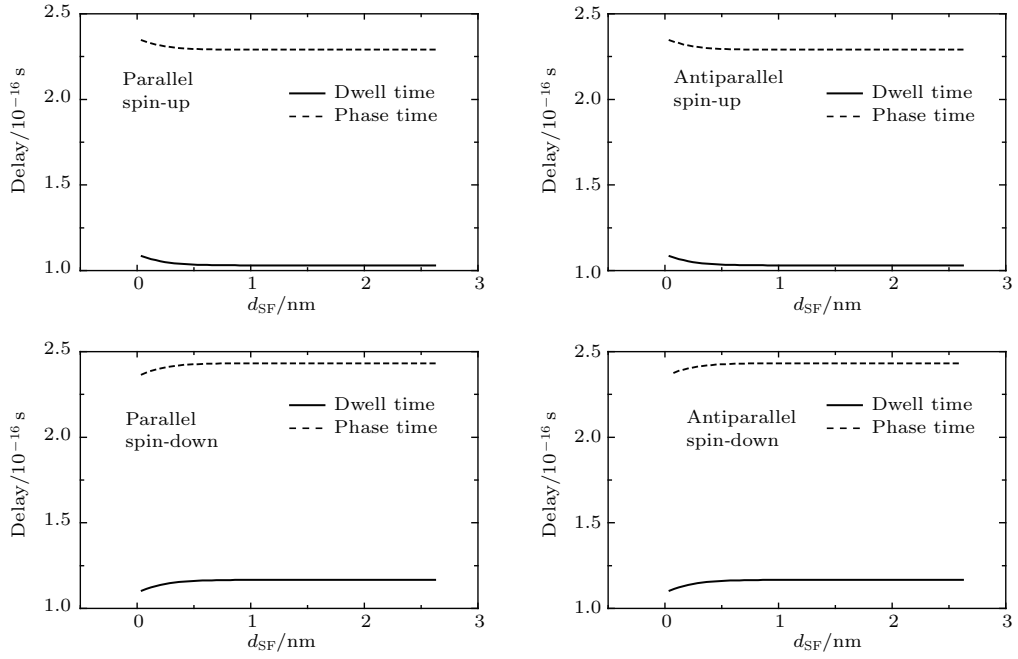


图8 当两SF层中的分子场处于平行或反平行排列时双自旋过滤隧道结中自旋向上和自旋向下电子的隧穿时间随SF层势垒宽度的变化(两个SF层的势垒高度和势垒宽度取值完全相同) 计算中电子入射能量  $E = 2.5$  eV, SF层势垒高度和I层势垒高度取为相等  $U_I = U_{SF} = 5.6$  eV, I层势垒宽度  $d_I = 1$  nm

Fig. 8. When the molecular fields in two SF layers are at parallel or at anti-parallel configuration, the dependences of dwell time and phase time for spin-up and spin-down electrons on the barrier width of SF layer in double spin-filter junctions (we take the barrier widths and heights of two SF layers are equal). In the calculation, the incident energies of electrons are taken as  $E = 2.5$  eV, the barrier height of SF layer and I layer are taken as equal as  $U_I = U_{SF} = 5.6$  eV, the barrier width of I layer is taken as  $d_I = 1$  nm.

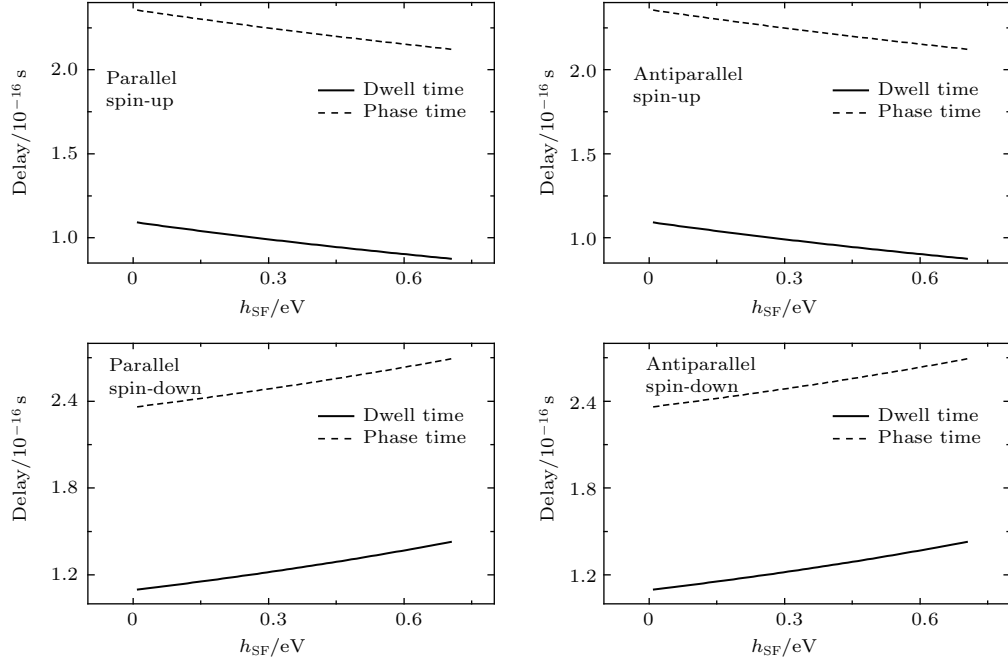


图9 当两SF层中的分子场处于平行或反平行排列时双自旋过滤隧道结中自旋向上和自旋向下电子的隧穿时间随SF层中分子场大小的变化(两个SF层的势垒高度和势垒宽度完全相同), 计算中电子入射能量  $E = 2.5$  eV, SF层和I层势垒高度和宽度相等, 分别为  $U_I = U_{SF} = 5.6$  eV,  $d_{SF} = d_I = 1$  nm

Fig. 9. When the molecular fields in two SF layers are at parallel or at antiparallel configuration, the dependences of dwell time and phase time for spin-up and spin-down electrons on the molecular field of spin filter layers in double spin-filter junctions. In the calculation, the incident energies of electrons are taken as  $E = 2.5$  eV, the barrier heights and width of I layer and two SF layers are take as equal as  $U_I = U_{SF} = 5.6$  eV and  $d_I = d_{SF} = 1$  nm respectively.

高度和宽度会导致电子的共振隧穿,从而使居留时间和相位时间出现相应的峰值. 与非磁绝缘层势垒高度和宽度对隧穿时间的影响不同,自旋过滤层的势垒高度的变化对隧穿时间有大的影响,不同自旋方向的隧穿电子的居留时间和相位时间随着自旋过滤层势垒高度的增加而增加,然后开始下降. 但自旋过滤层势垒宽度的变化对隧穿时间的影响较小. 自旋过滤层中分子场的变化对不同自旋方向的电子的居留时间和相位时间有明显影响,且上自旋电子的居留时间和相位时间随分子场的增大而减少,而下自旋电子的情况刚好相反. 上述结果对将来的自旋电子器件的研究有一定的参考价值.

### 参考文献

- [1] Moodera J S, Santos T S, Nagahama T 2007 *J. Phys.: Condens. Matter* **19** 165202
- [2] Meservey R, Tedrow P M 1994 *Phys. Rep.* **238** 173
- [3] Saffarzadeh A 2004 *J. Magn. Magn. Mater.* **269** 327
- [4] Nagahana T, Santos T S, Moodera J S 2009 *Phys. Rev. Lett.* **99** 016602
- [5] Jin D F, Ren Y, Li Z Z, Xiao M W, Jin G J, Hu A 2006 *Phys. Rev. B* **73** 012414
- [6] He P B, Liu W M 2005 *Phys. Rev. B* **72** 064410
- [7] Li Y, Li B Z, Zhang W S, Dai D S 1998 *Phys. Rev. B* **57** 1079
- [8] Worledge D C, Geballe T H 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 5277
- [9] Miao G X, Müller M, Moodera J S 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 076601
- [10] Miao G X, Chang J Y, Assaf Badih A, Donald H 2014 *Nat. Comms.* **5** 3682
- [11] Miao G X, Moodera J S 2012 *Phys. Rev. B* **85** 144424
- [12] Lüders U, Bibes M, Fusil S, Bouzehouane K, Jacquet E, Sommers C B, Contour J P, Bobo J F, Barthélémy A, Fert A, Levy P M 2007 *Phys. Rev. B* **76** 134412
- [13] Lüders U, Barthélémy A, Bibes M, Bouzehouane K, Fusil S, Jacquet E, Contour J P, Bobo J F, Fontcuberta J, Fert A 2006 *Adv. Mat.* **18** 1733
- [14] Condon E U, Morse P M 1931 *Rev. Mod. Phys.* **3** 43
- [15] Wigner E P 1955 *Phys. Rev.* **98** 145
- [16] Smith F T 1960 *Phys. Rev.* **118** 349
- [17] Büttiker M 1983 *Phys. Rev. B* **27** 6178
- [18] Büttiker M, Landauer R 1982 *Phys. Rev. Lett.* **49** 1739
- [19] Landauer R, Martin Th 1994 *Rev. Mod. Phys.* **66** 217
- [20] Winful H G 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 260401
- [21] Guo Y, Shang C E, Chen X Y 2005 *Phys. Rev. B* **72** 045356
- [22] Wang B, Guo Y, Gu B L 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 1318
- [23] Wu H C, Guo Y, Chen X Y, Gu B L 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 5316
- [24] Zhang Y T, Li Y C 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 013907
- [25] Du J, Zhang P, Liu J H, Li J L, Li Y X 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7221 (in Chinese) [杜坚, 张鹏, 刘继红, 李金亮, 李玉现 2008 物理学报 **57** 7221]
- [26] Slonczewski J C 1989 *Phys. Rev. B* **39** 6995

# Tunneling times in double spin-filter junctions\*

Zeng Shao-Long Li Ling Xie Zheng-Wei<sup>†</sup>

(College of Physics and Electronic Engineering, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China)

( Received 4 July 2016; revised manuscript received 21 August 2016 )

## Abstract

Based on the free electronic model and Winful's theory about tunneling times, the dwell times and the phase times in NM/SF/I/SF/NM double spin filter junctions are investigated, where the NM denotes the normal metal, SF the insulator barrier with spin filter effects and I the nonmagnetic insulator barrier. There are three different cases which are analyzed in detail: 1) the dependences of dwell time and phase time on the energy of the incident electron; 2) the dependences of dwell time and phase time on the heights of the barrier; 3) the dependences of dwell time and phase time on the width of the barrier and the molecular field in the spin filter layer. The numerical results show that for the first case, when the electrons have low incident energy (smaller than the barrier height), as the influence of the spin-dependent self-interference term, the phase times are always larger than the dwell times for electrons with different spin orientations. But when the electrons have high incident energy (higher than the barrier heights), the influence of the self-interference term disappears and the differences between the phase time and dwell time for electrons with different spin orientations disappear also. For case 2, the numerical results show that the variation of nonmagnetic insulator barrier height has little influence on the dwell time and phase time in NM/SF/I/SF/NM double spin filter junctions. But when the nonmagnetic insulator barrier height is lower than the barrier height of spin filter layer, the quantum well will appear and the resonant tunneling can be induced to lead to the peaks in the dependences of dwell and phase times on the insulator barrier height. The variation of spin-filter barrier height has obvious influence on the dwell time and phase time in NM/SF/I/SF/NM double spin filter junction. With increasing the height of spin-filter barrier, the dwell times and phase time both first increase and then decrease. For case 3, the influences of the widths of the nonmagnetic insulator barrier layer and spin filter layer on the dwell time and phase time are little. But when the barrier height of nonmagnetic insulator barrier is lower than that of spin-filter layer, the variation of width of insulator barrier can lead to the resonant tunneling and the peaks in dwell and phase times. Unlike the influence of width of barrier, the influences of molecular field in the spin filter layer on the dwell time and phase time are obvious. For the up-spin electrons, dwell time and phase time decrease with increasing the molecular fields, which is contrary to the scenario for the down-spin electrons.

**Keywords:** dwell time, phase time, magnetic tunneling junction, spin filter effect

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

**DOI:** 10.7498/aps.65.227302

---

\* Project supported by the Sichuan Province Education Department Key Natural Science Fund, China (Grant Nos: 13ZA0149, 16ZA0047), and Construction Plan for Scientific Research Innovation Team of Universities in Sichuan Province, China (Grant No. 12TD008).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [zzwxie@aliyun.com](mailto:zzwxie@aliyun.com)