

文章编号: 1008-1542(2007)03-0194-04

# 铁磁/半导体/铁磁隧道结中的隧穿磁电阻

张红梅

(河北科技大学理学院, 河北石家庄 050018)

**摘要:** 采用相干量子输运理论和传递矩阵方法研究了具有不同自旋指向的极化电子渡越铁磁/半导体/铁磁隧道结的隧穿几率和隧穿磁电阻。研究表明隧穿几率和隧穿磁电阻随半导体长度的改变发生周期性变化, 随 Rashba 自旋轨道耦合强度的改变发生准周期变化, 并且在两铁磁电极中磁矩取向平行时, 选择适当的半导体的长度和 Rashba 自旋轨道耦合强度可以得到较大的隧穿磁电阻。

**关键词:** 隧道结; 隧穿几率; 隧穿磁电阻; 自旋轨道耦合

中图分类号: O485 文献标识码: A

## Tunnel magnetic resistance in ferromagnetic/semiconductor/ ferromagnetic tunnel junctions

ZHANG Hong-mei

(College of Sciences, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050018, China)

**Abstract:** By using the coherent quantum transport theory and transfer matrix method, the transmission coefficient and tunnel magnetic resistance for polarized electrons with different spin orientations through ferromagnetic/semiconductor/ferromagnetic tunnel junctions are investigated. The results indicate that the transmission coefficient and tunnel magnetic resistance changes periodically in accordance with the change of the length of the semiconductor, and changes quasi-periodically with the change of the Rashba spin-orbit effect. A moderate length of the semiconductor and appropriate Rashba spin-orbit effect allow a giant tunnel magnetic resistance with parallel magnetization.

**Key words:** tunnel junctions; transmission coefficient; tunnel magnetic resistance; spin-orbit coupling

近年来,对磁性隧道结中自旋相关输运现象的研究,引起了人们的极大关注<sup>[1-4]</sup>。磁性隧道结中自旋极化电子隧穿输运不仅由隧穿几率来表示,还应该由隧穿磁电阻(TMR)来标度,这是因为隧穿磁电阻可以很好地描述自旋极化电子渡越铁磁/半导体/铁磁等磁性隧道结的自旋极化输运现象。隧道结具有隧穿磁电阻大、磁场灵敏度高以及能耗小的特点,同时由于高的隧道电阻也使其性能更加稳定,因而隧穿磁电阻在计算机的读出磁头、各类传感器和磁电阻型的随机存储器等方面有着特殊且重要的应用。隧穿磁电阻来源于自旋极化电子的隧道效应,故对隧穿磁电阻和磁性隧道结的其他输运特性的研究,有助于了解自旋极化电子的隧穿机制及隧道效应本身。到目前为止,针对铁磁(FM)/半导体(S)/铁磁(FM)三明治隧道结研究报道层出不穷<sup>[5-7]</sup>,笔者旨在对这一问题展开较为深入的探讨,研究与该结构自旋相关的电子隧穿和隧穿磁电阻,在一定程度上,这个效应还没有被很好地研究。

为此,笔者首先从不同区域的薛定谔波动方程(包含自旋自由度)出发,应用相干量子输运理论和传递

收稿日期: 2006-11-13; 修回日期: 2007-05-11; 责任编辑: 王士忠

基金项目: 河北省科技厅指导计划项目(07215116); 河北科技大学校立科研基金资助项目(XL2006048)

作者简介: 张红梅(1972),女,河北滦南人,讲师,硕士,主要从事凝聚态物理及量子输运方面的研究。

矩阵方法, 利用边界条件进行数值计算求解得到: 不同自旋指向电子的隧穿几率与半导体长度及 Rashba 自旋轨道耦合强度的关系; 隧穿磁电阻与半导体长度及 Rashba 自旋轨道耦合强度的关系。结果显示在其他参数(两铁磁电极中磁矩的夹角、Rashba 自旋轨道耦合强度和半导体的长度等)选取合适的情况下, 能得到丰富的物理现象, 尤其能够得到较高的隧穿磁电阻, 实现其在自旋电子器件中的应用。

### 1 理论模型与计算公式

考虑一由铁磁/半导体/铁磁(FM/S/FM)构成的隧道结, 其结构如图 1 所示。图中  $\theta$  表示左、右两铁磁电极中磁矩的夹角, 在长度为  $d$  的半导体区域上施加栅压可以实现自旋轨道耦合的 Rashba 效应, 并且耦合强度受外场调节。假定整个结构的宽度  $w$  很小( $w \ll \hbar^2 / (\alpha_R m^*)$ ),  $\hbar$  是普朗克常量,  $\alpha_R$  是自旋轨道耦合的 Rashba 常数,  $m^*$  是电子的有效质量), 这样带和带之间的耦合就可以忽略, 于是该结构可以视为准一维线结构。

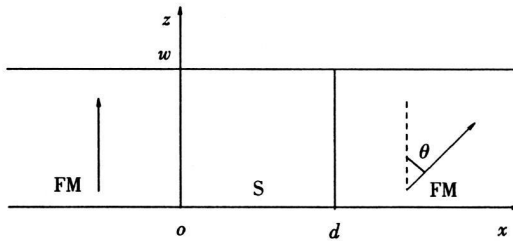


图 1 铁磁/半导体/铁磁隧道结示意图

Fig. 1 Schematic diagram of FM/S/FM tunnel junctions

根据研究人员提出的一维对称的 Rashba 模型<sup>[8,9]</sup>, 铁磁体和半导体区域的 Hamiltonian 可以分别写为

$$H_t = \frac{1}{2} \hat{p}_x \frac{1}{m_t^*} \hat{p}_x + \frac{1}{2} \Delta \sigma_z, \tag{1}$$

$$H_s = \frac{1}{2} \hat{p}_x \frac{1}{m_s^*} \hat{p}_x + \frac{1}{2\hbar} \sigma_z (\hat{p}_x \alpha_R + \alpha_R \hat{p}_x) + \delta E_c. \tag{2}$$

其中:  $m_t^*$  和  $m_s^*$  分别是电子在铁磁体和半导体中的有效质量;  $\Delta$  表示铁磁电极中不同自旋指向电子的交换劈裂能;  $\sigma_z$  表示 Pauli 矩阵;  $\delta E_c$  是铁磁体与半导体之间的导带差。

由于式(1)和式(2)中的 Hamiltonian 是对角化的, 所以可以把整个 FM/S/FM 隧道结的波函数写为  $|\psi\rangle = (\psi(x), 0), |\psi\rangle = (0, \psi(x))$ 。于是, 左右两侧铁磁体中电子的本征波函数可以写为

$$\psi_{\nu}^{\sigma}(x) = A_{\nu} \exp(ik_{\nu}^{\sigma} x) + B_{\nu} \exp(ik_{\nu}^{\sigma} x). \tag{3}$$

其中:  $A_{\nu}, B_{\nu}$  分别为待定系数;  $\nu = L, R$  表示左右两边不同的铁磁体;  $\sigma = \uparrow, \downarrow$  表示分裂能带结构不同的自旋状态, 自旋量子化方向沿着  $z$  轴正方向;  $k_{\nu}^{\sigma} = \sqrt{\frac{2m_t^*}{\hbar^2} (E - \frac{1}{2} \lambda_{\nu} \Delta)}$  为  $\nu$  铁磁体处于自旋态  $\sigma$  态时的 Fermi 波矢,  $\lambda_{\nu} = \pm 1, E$  为 Fermi 能级。

而半导体中电子的本征波函数有 2 个, 且分别为

$$\psi^{\sigma}(x) = C e^{ik_s^{\sigma} x} + D e^{-ik_s^{\sigma} x}, \tag{4}$$

$$\psi^{\sigma}(x) = C e^{ik_s^{\sigma} x} + D e^{-ik_s^{\sigma} x}. \tag{5}$$

其中:  $C_{\sigma}, D_{\sigma}$  ( $\sigma = \uparrow, \downarrow$ ) 分别为待定系数;  $k_s^{\sigma} = \sqrt{\frac{2m_s^*}{\hbar^2} (E - \delta E_c) + k_R^2 - \lambda k_R}$  为半导体中自旋态为  $\sigma$  的 Fermi 波矢, 且入射波的波矢和反射波的波矢绝对值相差  $2k_R$ , 而  $k_R = m_s^* \alpha_R(x) / \hbar^2$  为半导体中 Rashba 波矢。

通过  $x = 0, x = d$  边界处波函数及其流的连续性条件, 利用传递矩阵方法, 很容易得到不同自旋指向的极化电子跨越 FM/S/FM 隧道结的隧穿几率。用  $T_{\sigma}$  表示  $\sigma$  自旋电子的隧穿几率, 对于入射电子自旋为  $\uparrow$  的

隧穿几率为

$$T = \frac{k_{f_R}}{k_{f_L}} |A|^2 + \frac{k_{f_R}}{k_{f_L}} |A'|^2, \quad (6)$$

对于入射电子自旋为 的隧穿几率为

$$T = \frac{k_{f_R}}{k_{f_L}} |A'|^2 + \frac{k_{f_R}}{k_{f_L}} |A|^2. \quad (7)$$

其中:

$$A = \frac{A_R}{A_L}, A' = \frac{A_R}{A_L}; A' = \frac{A_R}{A_L}, A = \frac{A_R}{A_L}.$$

得到隧穿几率后, 就可以利用 Landauer-Büttiker 公式算出 FM/S/FM 隧道结的导电<sup>[10,11]</sup>:

$$G_{\sigma}(\theta) = \frac{e^2}{h} T_{\sigma}(\theta), \quad (8)$$

于是可得 FM/S/FM 隧道结的隧穿磁电阻的大小<sup>[12]</sup>:

$$TMR(\theta) = \frac{[G_{\uparrow}(\theta) + G_{\downarrow}(\theta)] - [G_{\uparrow}(\pi) + G_{\downarrow}(\pi)]}{G_{\uparrow}(\pi) + G_{\downarrow}(\pi)}. \quad (9)$$

## 2 计算结果与讨论

在计算中, 取中间的半导体材料为  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ ,  $m_s^* = 0.092m_e$  ( $\text{GaAs}$  中电子的有效质量  $m_0^* = 0.067m_e$ ,  $m_e$  为自由电子质量),  $m^* = m_e$ ; Fermi 能级  $E = 2.47 \text{ eV}$ , 铁磁体与半导体之间的导带差  $\delta E_c = 2.35 \text{ eV}$ , 铁磁体中的交换劈裂能  $\Delta = 3.46 \text{ eV}$ . 同时将  $\text{GaAs}$  中的 Rashba 波矢记为  $k_{R0}$ , 且  $k_{R0} = m_0^* \alpha_R / \hbar$ . 这样 Rashba 自旋轨道耦合强度就可以表示为  $k_{R0}/k_0$ , 其中  $k_0 = 1.0 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ .

下面具体计算隧穿几率随半导体长度及 Rashba 自旋轨道耦合强度的变化关系. 图 2 给出了隧穿几率随半导体长度  $d$  的变化, Rashba 波矢  $k_{R0} = 4k_0$ , 从 (a) 到 (e),  $\theta = 0, \pi/3, \pi/2, 2\pi/3$  和  $\pi$ , 实线、短划线分别对应上、下自旋电子的隧穿几率. 由图中可以看出, 自旋向上和自旋向下的电子隧穿几率随半导体长度的增加表现出有规律的周期振荡. 当两磁矩取向平行 ( $\theta = 0$ ) 时, 上、下自旋电子的隧穿几率具有相同的相位; 随着角度的增加, 隧穿几率的振幅减小; 当角度  $\theta = \pi/2$  时, 上、下自旋电子的隧穿几率的相位相反; 当角度为  $2\pi/3$ , 振幅开始回升, 相位移动了  $\pi/2$ , 与平行时不同, 上自旋电子的振幅大于下自旋电子; 当角度为  $\pi$  时, 2 种自旋态电子的隧穿几率曲线重合, 2 种自旋态电子的输运性质完全相同. 出现这一现象的主要原因是在半导体中自旋轨道耦合可以看作是与自旋相关的作用势, 波函数所具有的 Aharonov-Bohm 相随自旋注入的变化而改变符号.

图 3 给出了隧穿几率随 Rashba 自旋轨道耦合强度  $k_{R0}/k_0$  的变化关系, 取半导体长度  $d = 1.0 \mu\text{m}$ , 从 (a) 到 (e),  $\theta$  等于  $0, \pi/3, \pi/2, 2\pi/3$  和  $\pi$ , 实线、短划线分别对应上、下自旋电子. 从图中可以看出, 除  $\theta = \pi$  外, 仅当 Rashba 波矢  $k_{R0}$  等于  $3.43k_0, 5.46k_0, 6.93k_0$  和  $8.14k_0$  时, 2 种自旋电子的隧穿几率才相等, 并且这些数值的间距随自旋轨道耦合强度的增加而减小. 在  $\theta = \pi/2$  时, 上、下自旋电子的隧穿几率的相位相反, 而其他 4 种情况中上、下自旋电子的隧穿几率的相位相同, 只是振幅大小不同.

现在数值计算隧穿磁电阻随半导体长度及 Rashba 自旋轨道耦合强度的变化关系. 图 4 给出了不同角度下隧穿磁电阻随半导体长度的变化关系, 取 Rashba 波矢  $k_{R0} = 4k_0$ . 由图中可以看出, 不同角度下的隧穿磁电阻随半导体长度的增加作同周期的简谐振荡, 相邻波峰、波谷之间的距离均相等, 且振幅随角度的增加越来越小. 当角度  $\theta = 0$  时, 隧穿磁电阻的峰值可以达到  $20.1\%$ , 而  $\theta = \pi$  时隧穿磁电阻恒为 0.

图 5 给出了不同角度下隧穿磁电阻随 Rashba 自旋轨道耦合强度  $k_{R0}/k_0$  的变化关系, 取半导体长度  $d = 1.0 \mu\text{m}$ . 由图中可以看出不同角度下隧穿磁电阻随  $k_{R0}/k_0$  的增加具有相同的准周期振荡规律, 相邻波峰之间的距离逐渐减小, 隧穿磁电阻的峰值随角度的增加越来越小, 而且在 Rashba 波矢取某些值时, 隧穿磁电阻值的符号也从正变成了负. 同时还发现当角度  $\theta = 0$ , Rashba 波矢取为  $3.43k_0, 5.46k_0, 6.93k_0$  和  $8.14k_0$  时隧穿磁电阻的峰值可以达到  $20.1\%$ , 而  $\theta = \pi$  时隧穿磁电阻恒为 0. 出现这些现象的原因在于: 随着角度的增加, 交换劈裂能抑制了电子在隧道结中的隧穿, 增强了量子自旋阀效应.

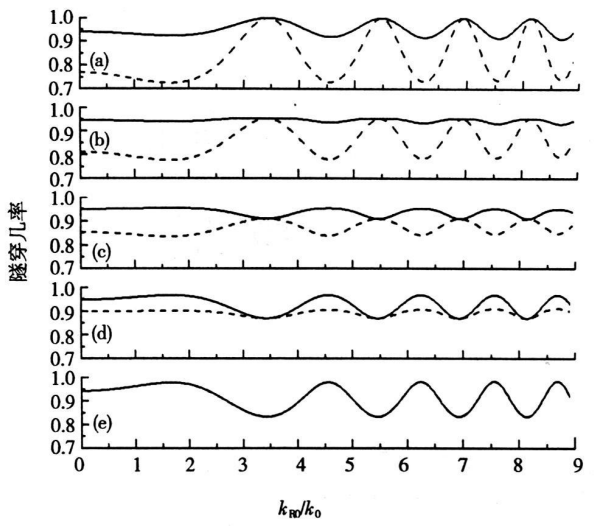
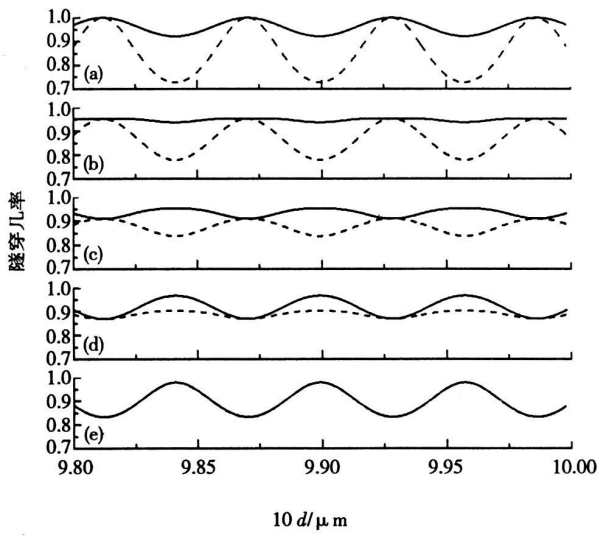


图 2 隧穿几率随半导体长度的变化

Fig. 2 Transmission coefficient against the length of semiconductor

图 3 隧穿几率随着自旋轨道耦合强度的变化

Fig. 3 Transmission coefficient against the spin-orbit effect

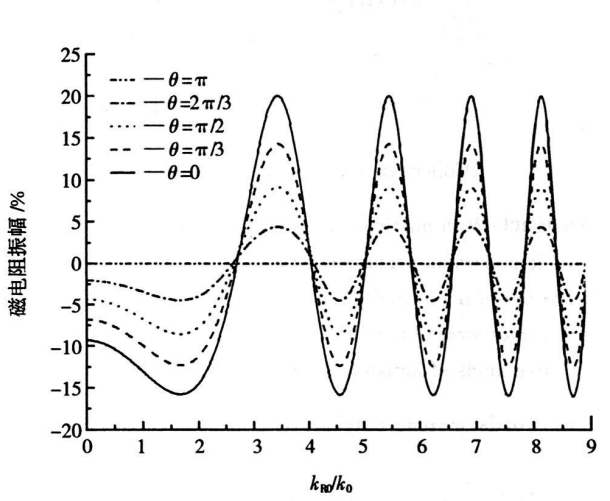
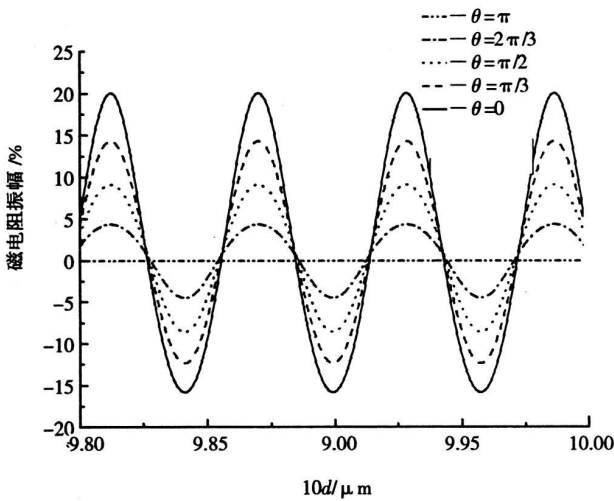


图 4 隧穿磁电阻随半导体长度的变化

Fig. 4 Tunnel magnetic resistance against the length of semiconductor

图 5 隧穿磁电阻随着自旋轨道耦合强度的变化

Fig. 5 Tunnel magnetic resistance against the spin-orbit effect

### 3 结 论

采用相干量子输运理论和传递矩阵方法,研究了铁磁/半导体/铁磁隧道结中自旋不同指向的自旋极化电子的隧穿几率和隧穿磁电阻随半导体长度及 Rashba 自旋轨道耦合强度的变化关系。通过计算发现,两铁磁电极中磁矩的夹角  $\theta$  取不同值时,自旋不同指向的极化电子的隧穿几率和隧穿磁电阻随半导体长度的变化发生周期性变化、随 Rashba 自旋轨道耦合强度  $k_{R0}/k_0$  的变化发生准周期变化。可见,选择适当的角度  $\theta$ , Rashba 自旋轨道耦合强度和半导体长度,将会得到较大的隧穿磁电阻,从而实现隧穿磁电阻的调制,促进磁性隧道结的开发与应用。

(下转第 217 页)

霉素为4.38%，三者平均值约为4.63%。

表1 回收率的测定

Tab.1 Measures of recovery

实验组号	种类	加入量/( $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ )	回收率/%
1	四环素	1.5	101.3
	金霉素	1.5	95.3
	土霉素	2.0	99.8
2	四环素	1.5	96.7
	金霉素	1.5	100.7
	土霉素	2.0	95.6
3	四环素	1.5	94.7
	金霉素	1.5	97.3
	土霉素	2.0	100.1

### 3 结 语

通过用高氯酸溶液沉淀蛋白质、超声波提取样品的前处理方法,采用高效液相色谱和外标法,成功地进行了人工饲养淡水鱼体内的四环素、金霉素、土霉素等残留物的定量检测。该方法测定灵敏度高,稳定性好,简便易行。

### 参考文献:

- [1] 李兆新,冷凯良,李健,等.我国渔药质量状况及水产品中渔药残留监控[J].海洋水产研究,2002,22(2):76-80.
- [2] 原现瑞,王玉春,田宝勇,等.毛细管气相色谱法测定无公害柿子中菊酯类农药的残留量[J].河北科技大学学报,2005,26(4):272-274
- [3] 张亚莉,习立鹏,阎正.毛细管气相色谱法测定白芍中有机氯农药的含量[J].河北科技大学学报,2005,26(4):275-276
- [4] 王晓辉,金静,任洪强,等.水质生物毒性检测方法研究进展[J].河北工业科技,2007,24(1):58-62
- [5] 罗晓燕,林玉娜,刘莉治.高效液相色谱法同时测定动物组织中四种抗生素残留量的研究[J].中国卫生检验杂志,2004,14(4):443-444.

(上接第197页)

### 参考文献:

- [1] ALVORADO S F. Tunneling potential barrier dependence of electron spin polarization[J]. Phys Rev Lett, 1995, 75(3): 513-516.
- [2] DATTA S, DAS B. Electronic analog of electro-optic modulator[J]. Appl Phys Lett, 1990, 56(7): 665-667.
- [3] MIRELES F, KIRCZENOW G. From classical to quantum spintronics: Theory of coherent spin injection and spin valve phenomena[J]. Europhys Lett, 2002, 59(1): 107-113.
- [4] GUO Yong, YU Xiaowei, LI Yuxian. Spin filtering and spin-polarization reversal in multilayered ferromagnetic metal/semiconductor heterostructures[J]. J Appl Phys, 2005, 98(5): 1-7.
- [5] MIRELES F, KIRCZENOW G. Coherent spin-valve phenomena and electrical spin injection in ferromagnetic/semiconductor/ferromagnetic junctions[J]. Phys Rev B, 2002, 66(21): 1-13.
- [6] BRATKOVSKY A M, OSIPOV V V. High-Frequency Spin-Valve Effect in a ferromagnet-semiconductor-ferromagnet structure based on precession of the injected spins[J]. Phys Rev Lett, 2004, 92(9): 1-4.
- [7] LI Yuxian, GUO Yong, LI Bozang. Rashba spin-orbit effect on electronic transport in ferromagnetic/semiconductor/ferromagnetic nanostructures under an applied electric field[J]. Phys Rev B, 2005, 71(1): 1-4.
- [8] HU C M, MATSUYAMA T. Spin injection across a heterojunction: A ballistic picture[J]. Phys Rev Lett, 2001, 87(6): 1-4.
- [9] WU Han-chun, GUO Yong, CHEN Xin-yi, et al. Rashba spin-orbit effect on traversal time in ferromagnetic/semiconductor/ferromagnetic heterojunction[J]. J Appl Phys, 2003, 93(9): 5 316-5 320.
- [10] BÜTTIKER M. Capacitance, admittance and rectification properties of small conductors[J]. J Phys: Condens Matter, 1993, 5(50): 9 361-9 378.
- [11] CHRISTEN T, BÜTTIKER M. Low frequency admittance of a quantum point contact[J]. Phys Rev Lett, 1996, 77(1): 143-146.
- [12] JULLIERE M. Tunneling between ferromagnetic films[J]. Phys Lett A, 1975, 54(3): 225-226.