

文章编号:1008-1542(2010)06-0512-05

双势垒异质结构中自旋相关的散粒噪声

刘 德^{1,2}, 张红梅³, 王博瑜¹

(1. 河北师范大学物理科学与信息工程学院, 河北石家庄 050016; 2. 河北省新型薄膜材料实验室, 河北石家庄 050016; 3. 河北科技大学理学院, 河北石家庄 050018)

摘 要:利用 Landauer-Büttiker 散射理论和传递矩阵方法研究了两端具有铁磁接触的双势垒异质结构(F/DB/F)中自旋相关的散粒噪声。计算结果表明:电流和散粒噪声随阱宽的增加发生周期性的振荡,随着垒厚的增加产生了明显的相位差,与自旋向上电子相比,垒厚对自旋向下电子的电流和散粒噪声影响更大。Rashba 自旋轨道耦合强度的增加加大了电流和散粒噪声的振荡频率。偏压的增加减小了电流和散粒噪声的振荡频率,增大了电流和散粒噪声的峰谷比和峰值。电流和散粒噪声随自旋轨道耦合强度和偏压的变化强烈依赖于两铁磁电极中磁化方向的夹角。

关键词:双势垒异质结构; Rashba 自旋轨道耦合; 自旋相关的散粒噪声; 自旋相关的电流

中图分类号:O471.1

文献标志码:A

Spin-dependent shot noise in double-barrier heterostructures

LIU De^{1,2}, ZHANG Hong-mei³, WANG Bo-yu¹

(1. College of Physics and Information Engineering, Hebei Normal University, Shijiazhuang Hebei 050016, China; 2. Hebei Advanced Thin Films Laboratory, Shijiazhuang Hebei 050016, China; 3. College of Sciences, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050018, China)

Abstract: On the basis of the Landauer-Büttiker scattering formalism and transfer matrix method, we investigate the spin-dependent shot noise properties of electrons tunneling through AlGaAs/GaAs double-barrier heterostructures (DB) sandwiched between two ferromagnets (F) with different relative magnetization direction in the presence of the Rashba spin-orbit interaction and an electric field. The results indicate that the current and shot noise are periodic function of the well width. The phasic difference of the current and shot noise with different spin orientations markedly increase as the barrier thickness increases. As compared with the spin-up electron, the variation of barrier thickness has a higher effect on the current and shot noise of spin-down electron. The oscillation frequencies of the current and shot noise increase with the increase of the Rashba spin-orbit coupling strength. As the external bias voltage increases, the oscillation frequencies of the current and shot noise decrease, and the peak-to-valley ratio and peaks of the current and shot noise increase. The variation of the current and shot noise with increasing spin-orbit coupling strength as well as with increasing bias voltage is strongly dependent on the relative orientation of the two magnetizations in the left and right ferromagnets.

Key words: double-barrier heterostructures; Rashba spin-orbit coupling; spin-dependent shot noise; spin-dependent current

随着自旋电子学的迅速发展,半导体微结构中自旋相关电子输运现象的研究成为近年来理论和实验研

收稿日期:2010-05-13;责任编辑:王士忠

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10674040,10974043);河北师范大学博士基金资助项目(L2009B02);河北科技大学科研基金资助项目(XL200825)

作者简介:刘 德(1971-),男,河北尚义人,讲师,博士,主要从事半导体自旋输运方面的研究。

通讯作者:张红梅副教授, E-mail: zhanghmemail@sohu.com

究的热点^[1-4]。同时,噪声测量成为研究自旋相关输运性质的重要手段。SAURET 等人从理论上提出了利用自旋相关的散粒噪声测量自旋弛豫时间的可能性^[5]。LAMACRAFT 研究了半导体量子点中自旋轨道耦合、磁性杂质和外磁场对散粒噪声的影响,提出可以通过测量噪声得到开放介观系统中的自旋弛豫时间^[6]。NAGAEV 等分析了自旋电子器件中由于自旋轨道耦合和磁性杂质引起的自旋翻转散射对散粒噪声的影响^[7]。EGUES 等人发现自旋极化电流的散粒噪声由于 Rashba 自旋轨道耦合效应的影响而产生明显的振荡,并用于测量 Rashba 自旋轨道耦合常数和区分量子单态和三重态^[8]。ZHANG Ying-tao 等研究了不施加偏压时铁磁金属/半导体/铁磁金属(F/S/F) 三明治异质结构中的散粒噪声^[9]。

笔者在 F/S/F 异质结构的基础上,在铁磁金属和半导体之间增加另一种半导体材料作为势垒,即将中间的半导体(S) 层替换为垒层非常薄(纳米量级)的半导体双势垒异质结构(DB),构成一个 F/DB/F 双势垒异质结构,利用量子相干输运理论和 Landauer-Büttiker 散射公式,计算了自旋相关电流和散粒噪声,发现自旋取向不同的电子产生散粒噪声的特性有所不同,散粒噪声的性质还受到半导体长度、Rashba 自旋轨道耦合作用、外加偏压和两铁磁体磁矩夹角的影响。

1 理论模型与计算公式

考虑电场作用下的 F/DB/F 双势垒异质结构,如图 1 所示。其中, b 代表垒层厚度, d 代表阱的宽度。对于铁磁电极,类似 Stoner-Wohlfarth 的磁化模型^[10],不同自旋指向电子的能级差用交换劈裂能 Δ 表示,两铁磁电极的磁矩 m_L 和 m_R 的夹角为 θ 。考虑电子与空间相关的有效质量和外加电场的作用,在单带有效质量近似下,自旋极化电子在铁磁体区域和半导体多层区域的 Hamiltonian 可以分别表示为^[11-12]

$$\hat{H}_f = \frac{1}{2} \hat{p}_x \frac{1}{m_f^*} \hat{p}_x + \frac{1}{2} \Delta \sigma_z - V(x), \quad (1)$$

$$\hat{H}_{sj} = \frac{1}{2} \hat{p}_x \frac{1}{m_{sj}^*} \hat{p}_x + \frac{1}{2\hbar} \sigma_z (\hat{p}_x \alpha_R + \alpha_R \hat{p}_x) + \delta E_{cj} - V(x). \quad (2)$$

式中: m_f^* 和 m_{sj}^* 分别表示铁磁电极和半导体层 j 中电子的有效质量; \hat{p}_x 为电子的动量算符; σ_z 为 Pauli 自旋算符; \hbar 为约化 Planck 常数; δE_{cj} 为半导体多层中第 j 层半导体与铁磁电极之间的导带差; α_R 表示 Rashba 自旋轨道耦合参数^[13-14]; $V(x)$ 表示有限偏置电压导致的径向电场势,即 $V(x) = eV_0 \theta(x-d-2b) + eV_0 [x/(d+2b)] \theta(x) \theta(d+2b-x)$, 这里 e 为电子电量, V_0 为应用偏置电压的量值, $\theta(x)$ 为 Heaviside 函数。

在铁磁区域 ($x < 0$ 和 $x > d+2b$) 中电子的本征波函数可以写为

$$\psi_{\sigma}^{fv}(x) = A_{v\sigma} \exp(ik_{fv}^{\sigma} x) + B_{v\sigma} \exp(-ik_{fv}^{\sigma} x). \quad (3)$$

式中: $v = L; R$ 表示左右两边的铁磁层; $\sigma = \uparrow, \downarrow$, 表示分裂能带结构不同的自旋状态; $k_{fv}^{\sigma} = \sqrt{m_f^* (2E_f - \lambda_{\sigma} \Delta) / \hbar^2}$ 为 v 铁磁体中处于自旋态 σ 时的 Fermi 波矢,且 $\lambda_{\uparrow, \downarrow} = \pm 1$ 。

在半导体层 j 区域,由于电场势是 x 的函数,本征波函数不能写成平面波的展开形式。为此,将半导体层 j 分割成许多相邻接的非常薄的窄层,考虑半导体层 j 中 Rashba 色散分裂,可得半导体层 j 中自旋相关的波函数为

$$\Psi_{\uparrow j}(x) = C_{\uparrow j} \exp(ik_{sj}^{\uparrow}(x)x) + D_{\uparrow j} \exp(-ik_{sj}^{\downarrow}(x)x), \quad (4)$$

$$\Psi_{\downarrow j}(x) = C_{\downarrow j} \exp(ik_{sj}^{\downarrow}(x)x) + D_{\downarrow j} \exp(-ik_{sj}^{\uparrow}(x)x), \quad (5)$$

其中 $k_{sj}^{\sigma}(x)$ 表示半导体层 j 区域 x 处 σ 态的自旋轨道劈裂带的 Fermi 波矢,并满足

$$E_{sj}^{\sigma} = \frac{\hbar^2}{2m_{sj}^*} \{ (k_{sj}^{\sigma})^2 + [(k_{sj}^{\sigma})' x]^2 + 2k_{sj}^{\sigma} (k_{sj}^{\sigma})' x + 2i(k_{sj}^{\sigma})' + i(k_{sj}^{\sigma})'' x + \lambda_{\sigma} \alpha_R [k_{sj}^{\sigma} + (k_{sj}^{\sigma})' x] + \delta E_{cj} - V(x) \}, \quad (6)$$

其中 $(k_{sj}^{\sigma})'$ 和 $(k_{sj}^{\sigma})''$ 分别表示波矢 $k_{sj}^{\sigma}(x)$ 相对于 x 的一阶和二阶导数。考虑边界处不同自旋方向波函数的连续性、几率流守恒和旋量的坐标变换关系,利用传递矩阵方法^[15] 可数值求解得到自旋相关的隧穿几率。

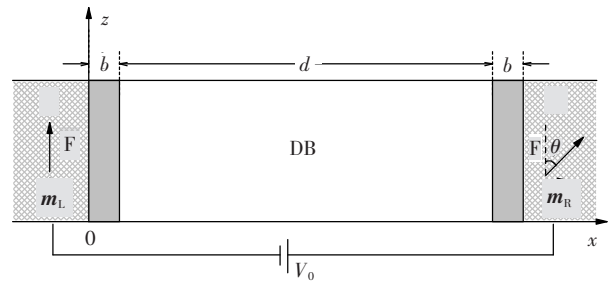


图1 电场下 F/DB/F 异质结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the F/DB/F heterostructures with an external electric field

将自旋引入 Landauer-Büttiker 散射矩阵理论^[16], 利用单电子近似可得到绝对温度为零度和偏压较小的情况下 Landauer-Büttiker 型自旋相关的电流为

$$I_{\sigma} = \frac{e^2}{h} V_0 \sum_n T_{n\sigma}(E_f). \quad (7)$$

式中: $T_{n\sigma}(E)$ 表示能量为费米(Fermi) 能量 E_f 的第 n 个传输通道的自旋相关的隧穿几率; h 为 Planck 常数。在绝对温度为零度的情况下, 零频率自旋相关的噪声功率谱为

$$S_{\sigma} = 2 \frac{e^3}{h} V_0 \sum_n T_{n\sigma}(1 - T_{n\sigma}). \quad (8)$$

2 计算结果与讨论

利用材料 GaAs 和 $\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}$ 分别形成势阱和势垒, 其内相应电子的有效质量分别为 $m_w^* = 0.067m_e$ 和 $m_b^* = 0.074m_e$ (m_e 为自由电子质量)^[17]; $m_f^* = m_e$, $E_f = 2.47 \text{ eV}$, $\Delta = 3.46 \text{ eV}$, GaAs 和铁磁体间的导带差 $\delta E_{c_j} = 2.38 \text{ eV}$, 同时将 GaAs 中的 Rashba 波矢记为 k_R , 且 $k_R = m_w^* \alpha_R / \hbar^2$, Rashba 自旋轨道耦合强度表示为 k_R/k_0 , 其中 $k_0 = 1.0 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ 。

图 2 和图 3 分别给出了不同势垒宽度 b 下自旋相关电流 I 和散粒噪声 s 随阱宽 d 的变化关系, 偏压 $V_0 = 10 \text{ mV}$, Rashba 波矢 $k_R = 3.0k_0$, $\theta = 0$ 。从图 2、图 3 中可以看出, 不同自旋指向电子的电流和散粒噪声随阱宽的增加作周期性振荡, 随垒厚的增加发生了重大的自旋劈裂, 即自旋向上电子的电流和散粒噪声向阱宽增大的方向移动, 自旋向下电子的电流和散粒噪声向阱宽减小的方向移动, 且移动幅度较自旋向上的移动幅度要大得多, 从而不同自旋指向电子的电流和散粒噪声均产生了越来越明显的相位差。由于自旋轨道耦合效应, 自旋向下电子电流和散粒噪声的振幅远大于自旋向上电子电流和散粒噪声的振幅。同时, 不同自旋指向电子电流峰值、散粒噪声谷值和它们的振荡周期不随垒厚的变化而改变, 但峰谷比随垒厚增加而增大, 且自旋向下电子电流和散粒噪声的峰谷比的增大程度较自旋向上电子的更加明显, 自旋向下电子散粒噪声峰值出现了劈裂现象, 原来的单峰变成了双峰结构。这些现象表明: 与自旋向上电子相比, 垒厚对自旋向下电子的电流和散粒噪声的影响更大。

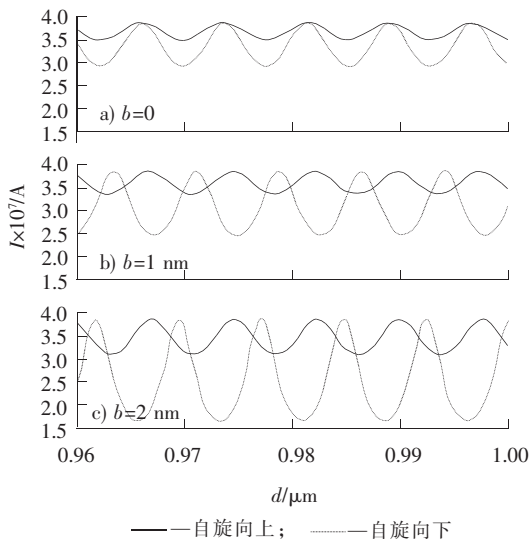


图 2 电流随势阱宽度的变化

Fig. 2 Spin-dependent current as function of well-width

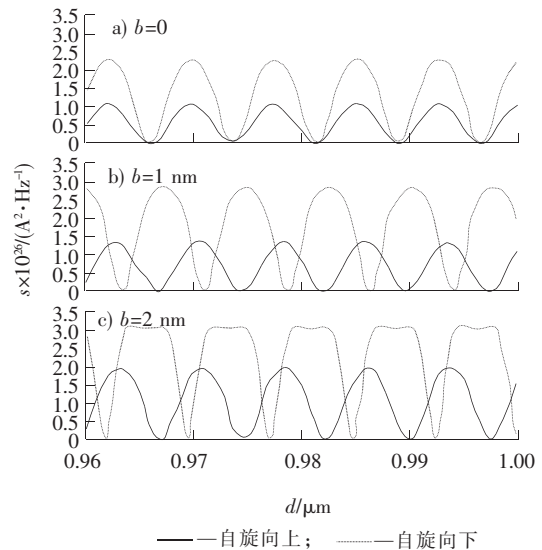


图 3 散粒噪声随势阱宽度的变化

Fig. 3 Spin-dependent shot noise as function of well-width

图 4 和图 5 分别给出了自旋相关电流 I 和散粒噪声 s 随 Rashba 自旋轨道耦合强度 k_R/k_0 的变化关系, 偏压 $V_0 = 10 \text{ mV}$, 阱的宽度 $d = 1.0 \mu\text{m}$, 垒层厚度 $b = 1 \text{ nm}$ 。从图 4、图 5 中可以看出, 随着 Rashba 自旋轨道耦合强度的增加, 不同自旋指向电子的电流和散粒噪声发生振荡频率增大的准周期性振荡。在 $\theta = 0$ 时, 随着 Rashba 自旋轨道耦合强度的增加, 自旋向上电子电流和散粒噪声的峰谷比增加, 自旋向下电子电流和散

粒噪声的峰谷比减小。在 $\theta = \pi$ 时,随着自旋轨道耦合强度的增加,不同自旋指向电子的电流和散粒噪声之间的差异随自旋轨道耦合强度的增加而减小。造成这种现象的原因在于,随着自旋轨道耦合强度的增加,偏压所产生的不对称效应减弱,结构势的对称效应相对加强,从而导致不同自旋电子电流或散粒噪声的差异明显减小。另外,与 $\theta = 0$ 的情况相比,自旋向上电子的电流和散粒噪声向自旋轨道耦合强度增大的方向移动,自旋向下电子电流和散粒噪声向自旋轨道耦合强度减小的方向移动。

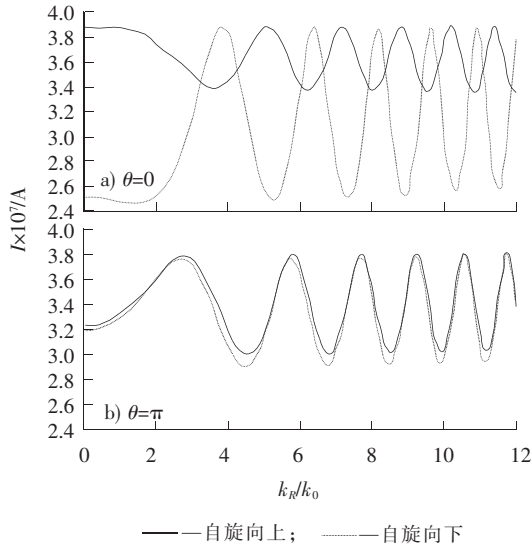


图 4 电流随自旋轨道耦合强度的变化
Fig. 4 Spin-dependent current as function of spin-orbit coupling strength

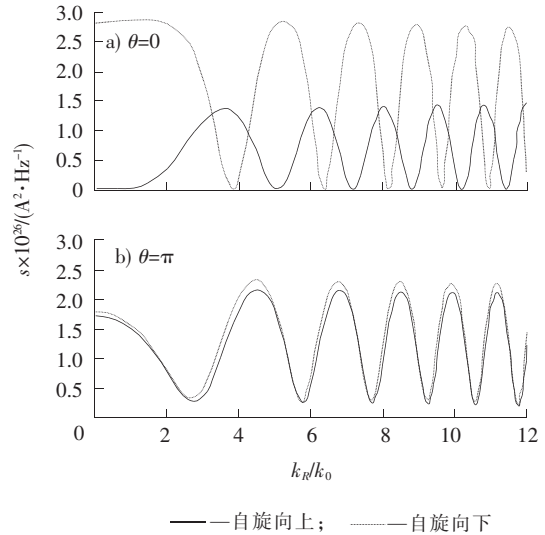


图 5 散粒噪声随自旋轨道耦合强度的变化
Fig. 5 Spin-dependent shot noise as function of spin-orbit coupling strength

为了揭示电场下 F/DB/F 异质结构中的伏安特性和散粒噪声行为,图 6 和图 7 分别给出了自旋相关电流 I 和散粒噪声 s 随偏压 V_0 的变化关系,Rashba 波矢 $k_R = 3.0k_0$,阱的宽度 $d = 1.0 \mu\text{m}$,垒层厚度 $b = 1 \text{ nm}$ 。从图 6、图 7 中可以看出:随着偏压的增加,不同自旋指向电子的电流和散粒噪声发生振荡频率减小、峰谷比和峰值增大的准周期性振荡。在 $\theta = 0$ 时,自旋向下电子电流和散粒噪声的峰谷比随偏压的增加程度大于自旋向上电子电流和散粒噪声的峰谷比的增加程度。在 $\theta = \pi$ 时,自旋向下电子电流和散粒噪声峰谷比随偏压的增大程度略大于自旋向上电子电流和散粒噪声峰谷比的增加程度。与 $\theta = 0$ 的情况相比,自旋向上电子电流和散粒噪声的峰谷比明显增大,并向偏压增大的方向移动;自旋向下电子电流和散粒噪声的峰谷比明显减小,并向偏压减小的方向移动。造成这些现象的原因在于,随着偏压的增加,偏压所产生的不对称效应加强,

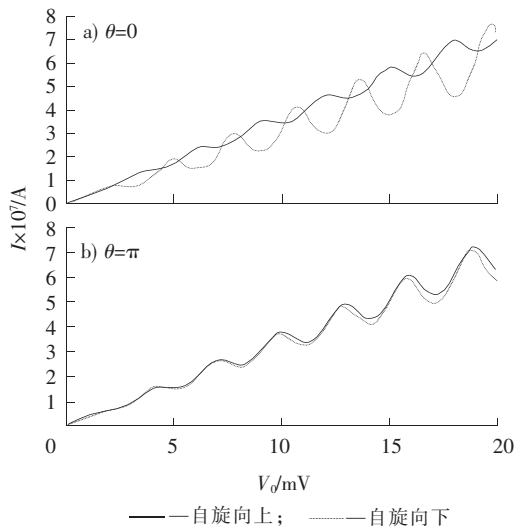


图 6 电流随偏压的变化
Fig. 6 Spin-dependent current as function of bias voltage

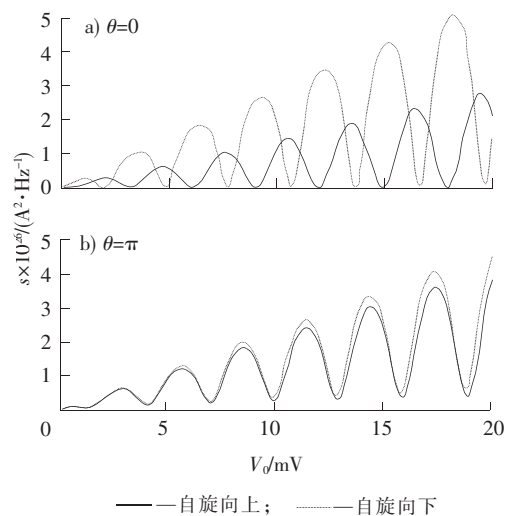


图 7 散粒噪声随偏压的变化
Fig. 7 Spin-dependent shot noise as function of bias voltage

结构势的对称效应相对减弱。

3 结 论

利用量子相干输运理论和 Landauer-Büttiker 散射理论计算发现,F/DB/F 异质结构的电流和散粒噪声随着阱宽的增加作周期性振荡,随着垒厚的增加发生了重大的自旋劈裂,产生了明显的相位差。随 Rashba 自旋轨道耦合强度的增加发生振荡频率增大的准周期性振荡,与 $\theta = 0$ 的情况相比, $\theta = \pi$ 时自旋向上电子的电流和散粒噪声向自旋轨道耦合强度增大的方向移动,自旋向下电子电流和散粒噪声向自旋轨道耦合强度减小的方向移动。随偏压的增加发生振荡频率减小、峰谷比和峰值增大的准周期性振荡,与 $\theta = 0$ 的情况相比, $\theta = \pi$ 时自旋向上电子电流和散粒噪声的峰谷比明显增大,并向偏压增大的方向移动,自旋向下电子电流和散粒噪声的峰谷比明显减小,并向偏压减小的方向移动。与自旋向上电子的电流和散粒噪声相比,垒厚对自旋向下电子的电流和散粒噪声的影响更大。

参考文献:

- [1] ŽUTIĆ I, FABIAN J, DAS SARMA S. Spintronics: Fundamentals and applications[J]. Rev Mod Phys, 2004, 76(2): 323-410.
- [2] SARKAR A, BHATTACHARYA T K. A nonmagnetic spintronic adder[J]. J Appl Phys, 2007, 101(3): 6 108-6110.
- [3] JIANG K M, YANG J, ZHANG R, et al. Ballistic transport properties in spin field-effect transistors[J]. J Appl Phys, 2008, 104(5): 3 722-3 727.
- [4] 张红梅. 铁磁 / 半导体 / 铁磁隧道结中的隧穿磁电阻[J]. 河北科技大学学报 (Journal of Hebei University of Science and Technology), 2007, 28(3): 194-217.
- [5] SAURET O, FEINBERG D. Spin-current shot noise as a probe of interactions in mesoscopic systems[J]. Phys Rev Lett, 2004, 92(10): 6 601-6 604.
- [6] LAMACRAFT A. Shot noise of spin-polarized electrons[J]. Phys Rev B, 2004, 69(8): 1 301-1 304.
- [7] NAGAEV K E, GLAZMAN L I. Current fluctuations in a spin filter with paramagnetic impurities[J]. Phys Rev B, 2006, 73(5): 4 423-4 428.
- [8] EGUES J C, BURKARD G, SARAGA D S, et al. Shot noise and spin-orbit coherent control of entangled and spin-polarized electrons[J]. Phys Rev B, 2005, 72(23): 5 326-5 332.
- [9] ZHANG Ying-tao, GUO Yong, LI You-cheng. Rashba spin-orbit effect on shot noise in ferromagnetic/semiconductor/ferromagnetic heterojunctions[J]. Phys Status Solidi B, 2005, 242(14): 2 960-2 966.
- [10] JOHNSON M. Theory of spin-dependent transport in ferromagnet-semiconductor heterostructures[J]. Phys Rev B, 1998, 58(15): 9 635-9 638.
- [11] HU C M, MATSUYAMA T. Spin injection across a heterojunction: A ballistic picture[J]. Phys Rev Lett, 2001, 87(6): 6 803-6 806.
- [12] MIRELES F, KIRCZENOW G. Coherent spin-valve phenomena and electrical spin injection in ferromagnetic/semiconductor/ferromagnetic junctions[J]. Phys Rev B, 2002, 66(21): 4 415-4 428.
- [13] GVOZDIĆ D M, EKENBERG U. Efficient switching of Rashba spin splitting in wide modulation-doped quantum wells[J]. Appl Phys Lett, 2007, 90(5): 3 105-3 107.
- [14] 白志明, 张洪昌, 王雅茹, 等. 自洽平均值近似方法用于碱金属原子精细结构的研究[J]. 河北科技大学学报 (Journal of Hebei University of Science and Technology), 2010, 31(1): 1-8.
- [15] 张红梅, 刘 德. 传递矩阵方法与矩形势垒的量子隧穿[J]. 河北科技大学学报 (Journal of Hebei University of Science and Technology), 2006, 27(3): 196-213.
- [16] BLANTER Y M, BÜTTIKER M. Shot noise in mesoscopic conductors[J]. Phys Rep, 2000, 336(1/2): 1-16.
- [17] QI Xiang-hong, KONG Xiao-jun, LIU Jian-jun. Effect of a spatially dependent effective mass on the hydrogenic impurity binding energy in a finite parabolic quantum well[J]. Phys Rev B, 1998, 58(16): 10 578-10 582.

恭祝各位作者、审者、读者

新年快乐!