

Spin Polarizaion in Magnetic Nanostructure Modulated by Ferromagnetic and Schottky Metal Stripes

Jiahao Zhu, Feixiang Zhao, Hong Chen

Institute of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei
Email: 601159895@qq.com

Received: May 7th, 2016; accepted: May 23rd, 2016; published: May 26th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

With the transfer matrix method, the transport properties of the electron through the 2DEQ modulated by ferromagnetic and Schottky metal stripes have been investigated. The result shows that the transport properties not only depend on the length of the ferromagnetic metal stripes and the position of Schottky metal strips, but also the bias voltage of Schottky metal stripes. The increase of the length of ferromagnetic metal strips and the distance between ferromagnetic metal strips and Schottky metal stripe will decrease the oscillation period of the spin polarized curve and increase the spin polarization in some energy plateau. And big spin-polarized effect can be attained through adjusting these parameters. These properties may contribute to making new tunable spin filter.

Keywords

Magnetic Nanostructure, Electron Transport, Spin Polarization, Schottky Metal Stripe

铁磁条和肖特基金属条调制下的电子自旋极化输运

朱家豪, 赵飞翔, 陈 宏

武汉科技大学理学院, 湖北 武汉

Email: 601159895@qq.com

收稿日期: 2016年5月7日; 录用日期: 2016年5月23日; 发布日期: 2016年5月26日

摘要

利用转移矩阵方法,理论上研究了电子在铁磁条和肖特基金属条共同调制下的磁纳米结构中的输运性质。结果发现电子的输运特性不仅与铁磁条的长度,肖特基金属条的位置,还与肖特基金属条上所加的偏压有较大的关系。增加铁磁条的长度和肖特基金属条与铁磁条的距离会减小电子自旋极化度曲线的震荡周期和加大部分能量区域的自旋极化度。通过调节这些参数达到较为合适的值,可以获得较大的自旋极化效应,这些特性可以有助于制造新型电子自旋过滤器。

关键词

磁纳米结构, 电子输运, 自旋极化, 肖特基金属条

1. 引言

近年来,非均匀磁场调制下二维电子气中的电子输运特性无论在实验上还是在理论上都得到人们广泛的关注[1]-[5]。实验上,利用分子束外延和现代刻蚀技术,在半导体异质结上沉积铁磁条实现了对二维电子气的纳米级磁调制[6]-[8]。理论上,反平行磁垒结构的电子输运已经得到了广泛的研究[9]-[13],其中铁磁条和肖特基金属条共同调制的磁纳米结构也得到了广泛的研究,Zhai等人研究了铁磁条带和肖特基金属条带共同调制下的电子输运特性[12],得到电子的自旋极化率和方形势垒的高度密切相关,Papp等人研究了其周期性结构[13],其自旋极化强度可以用周期数目和肖特基金属条带进行控制,对于两个铁磁条带或两个肖特基金属条带磁纳米结构的电子输运也得到了许多研究[14][15],但是对于肖特基金属条带调制的平行磁纳米结构的电子输运研究较少。

在本文中,平行非等强磁场通过两个铁磁条带分别沉积在半导体异质结的上方和下方得到,再加肖特基金属条带所加偏压的作用,研究发现,电子的传输概率和自旋极化度和肖特基金属条带的位置,所加的偏压以及铁磁条的宽度以及有密切的关系。

2. 理论模型和公式

这里所考虑的系统是xy平面内的二维电子,在z方向受到非均匀磁场的调制。如图1所示,在二维电子气上沉积两个铁磁条和一个肖特基金属条带,a表示2DEQ上下铁磁条右端之间的间距,b表示顶部铁磁条右端和肖特基金属条左端之间的间距,c分别代表肖特基金属条的宽度。其中,对肖特基金属条带外加电压产生电势 $U(x)$,平行非等强磁场可以通过在半导体异质结的上方和下方分别沉积一个铁磁条带得到[16][17]。为了简化, $U(x)$ 和 $B(x)$ 分别可以用 δ 势和方形势垒来代替,而且它们在y轴上是均匀的。在单粒子近似的条件下,电子在二维电子气中运动的哈密顿量可以表示为:

$$H = \frac{1}{2m^*} [p + eA(x)]^2 + U(x) + \frac{eg^*}{2m_0} \frac{\sigma_z \hbar}{2} B_z(x)$$

其中 m^* 与 m_0 分别是电子的有效质量和真实质量, P 是电子动量,根据朗道规范,我们可以知道磁矢势 $A(x) = [0, A_y(x), 0]$, σ_z 代表电子的自旋($\sigma_z = 1/-1$ 分别代表电子自旋向上和自旋向下的本征态量

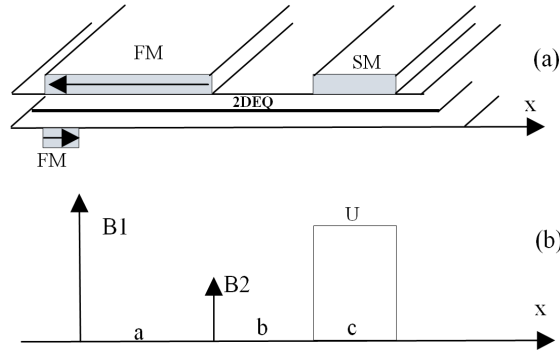


Figure 1. (a) Schematic diagram of the structure; (b) Corresponding to the magnetic field and electric potential barrier profile

图 1. (a)结构示意图; (b)对应的磁场和电势垒剖面图

子数), g^* 是有效朗道 g 因子, 为了方便数值计算, 我们引入无量纲单位: (1) 能量 $E \rightarrow \hbar\omega_c E$, (2) 磁感应强度 $B_z |B_o B_z(x)$, (3) 偏压 $U(x) \rightarrow (\hbar\omega_c/e)U(x)$ (4) 长度 $r |l_{B_o} r$, (5) 磁矢势 $A(x) |B_o l_{B_o} A(x)$ 。其中电子回旋共振频率, 磁长度 $l_{B_o} = \sqrt{\frac{EMBED.Equation.DSMT4}{eB_o}}$, 对于 AsIn 系统 ($m^* = 0.024m_0$, $g^l = 15$), 取特征磁场 $B_o = 0.1\text{ T}$, 计算得到 $l_{B_o} = 813\text{ \AA}$ 。 $E_o = 0.48\text{ meV}$ 。

由于系统在 y 轴是转移不变的, 电子的波函数可以写成: $\psi_l(x, y) = e^{ik_y y} (e^{ik_l x} + \gamma e^{-ik_l x})$, $x < 0$, $\psi_r(x, y) = \tau e^{ik_y y} e^{ik_l x}$, $x > a + b + c$ 。其中 k_y 是电子在 y 轴方向上的波矢 $k_l = \sqrt{2E} |k_y^2$, γ 和 τ 分别代表反射波和透射波的振幅。利用转移矩阵的方法, 我们可以得到电子的传输概率 $T_{\sigma_z}(E, k_y) = \frac{k_x}{k_l} |\tau|^2$, 在得到了电子在不同入射能量的传输概率后, 电子传输的电导可以利用 Landauer-Buttiker 公式求出:

$$G_{\sigma_z}(E_F) = G_0(E_F) \int_{-\pi/2}^{\pi/2} T_{\sigma_z}(E_F, \sqrt{2E_F} \sin(\theta)) \cos(\theta) d\theta$$

其中, $G_0(E_F) = e^2 m^* v_F L_y / (2\hbar^2)$, θ 是入射波矢与 x 轴方向的夹角, E_F 是费米能, v_F 是费米速度。为了评估电子自旋极化效应的强弱, 我们定义自旋极化度: $P_T = (T_{+1} - T_{-1}) / (T_{+1} + T_{-1})$ 或者 $P_G = (G_{+1} - G_{-1}) / (G_{+1} + G_{-1})$ 。其中, T_{+1} 和 T_{-1} 分别是电子自旋向上和自旋向下的传输概率, G_{+1} 和 G_{-1} 分别是电子自旋向上和自旋向下的传输电导。

3. 数值结果和讨论

3.1. 肖特基金属条位置和铁磁条金属长度对于电子传输概率和自旋极化的影响。

这里是运用 Matlab 软件模拟数据。首先, 图 2(a) 给出了当 $B_1 = 4$, $B_2 = 2$; $U = 2$, $k_y = -2$ 时, 不同 b 值(分别为 $b = 1, 2, 3$) 传输概率和自旋极化度 (P_T) 随入射电子能量的数值计算结果图。从图中可以看出, 自旋向上和自旋向下的电子的传输概率曲线明显有较大的差异。自旋向下的电子的传输概率的震荡相对于自旋向上更为剧烈, 且在传输概率曲线的极值附近, 两者的差别较大, 此时自旋极化度会出现极值。对于自旋极化度 P_T 曲线, 大约在入射能量 $E < 8$ 和 $E > 12$ 时, 不同的 b 值具有相同的自旋极化度。在 E 较小时, 会出现 P_T 接近, 而且随着入射能量的增加, 所有 b 值的自旋极化曲线的峰值将被逐渐削弱直至为 0。同时, 我们发现随着肖特基金属条带的右移, 自旋极化曲线的峰值向低能量区域移动, 且其传输曲线和自旋极化曲线的震荡都越来越剧烈。根据 P_T 随 b 的变化, 我们可以在一定的入射能量 E 下, 为

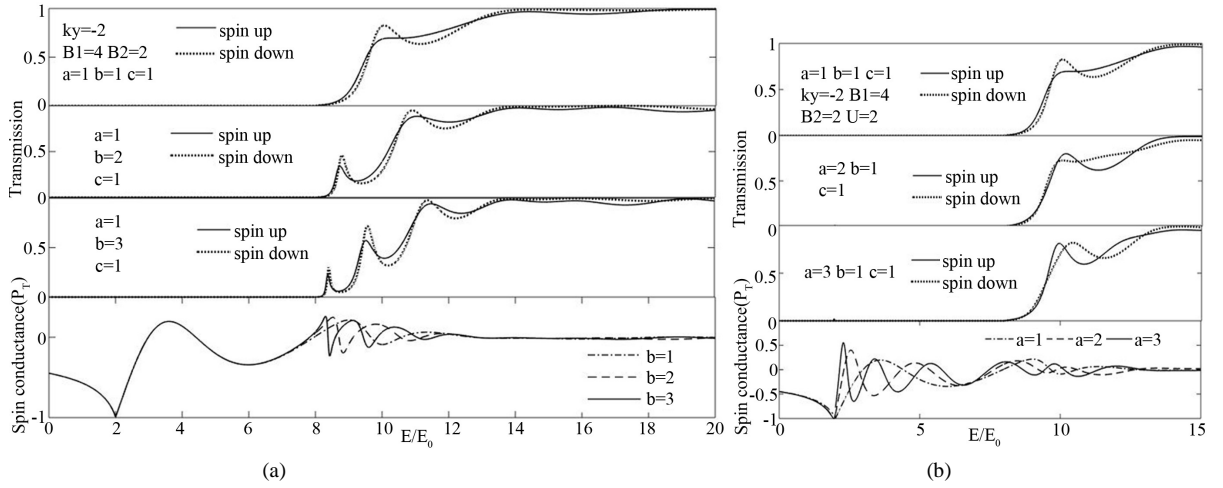


Figure 2. (a) of different b transmission probability and spin polarization P_T degree (a) $b = 1$, (b) $b = 2$, (c) $b = 3$, in which the structural parameters of $B_1 = 4, B_2 = 2, U = 2, k_y = -2$ (b) of different a transmission probability and spin polarization P_T degree (a) $a = 1$, (b) $a = 2$, (c) $a = 3$, in which the structural parameters of $B_1 = 4, B_2 = 2, U = 2, k_y = -2$
图 2. (a)不同的 b 的传输概率和自旋极化度 P_T (a) $b = 1$, (b) $b = 2$, (c) $b = 3$, 其中结构参 $B_1 = 4, B_2 = 2, U = 2, k_y = -2$ (b) 不同的 a 的传输概率和自旋极化度 P_T (a) $a = 1$, (b) $a = 2$, (c) $a = 3$, 其中结构参 $B_1 = 4, B_2 = 2, U = 2, k_y = -2$

肖特基金属条选择合适的位置，来提高自旋极化度。

然后，我们研究铁磁条在不同的长度下电子的传输概率和自旋极化度 P_T 。如图2(b)所示，此时， $B_1 = 4, B_2 = 2, U = 2, k_y = -2$ ，随着 a (a 值分别为 $a = 1, 2, 3$)的增加，自旋向上和自旋向下的传输概率曲线峰值分别向低能量和高能量移动，自旋极化曲线峰也逐渐向低能量区域移动，且同样会使传输曲线和自旋极化曲线的震荡越来越剧烈。可见，肖特基金属条的位置和铁磁条的长度对电子运输的影响具有一定的相似之处。

3.2. 肖特基金属条所加偏压对电导和自旋极化的影响

前面，我们研究了肖特基金属条位置和铁磁条金属长度对于电子传输概率和自旋极化的影响，为了了解不同偏压 U 对电子运输的影响，我们画出了 $U = 0, \pm 8$ 时的电导及 P_G 随费米能量的变化曲线，如图3所示。从图中可以看出，对于不同的 U ，其电导值具有较大的区别，和肖特基金属条调制下的反平行结构的电子运输有相似的结果[12]。 $U = 0$ 时的电导最大， $U = -8$ 时也有较大的电导， $U = 8$ 时的电导较小。可见， U 的存在都降低了电子的电导，只是 U 取正时电导大幅度降低，而 U 取负值时电导降低较小。在 $P_G | E$ 图中，可以很明显的看到大约在 $E_F < 4$ 时，不同 U 值具有相同且变化较为剧烈的自旋极化度 P_G ，而且对于 $U = 0, \pm 8$ ，其 P_G 随 E_F 均做周期逐渐增加的震荡衰减变化。可以很明显的看到， $U = 8$ 时的电导较小，但它具有较大的自旋极化度，反之， $U = 0$ 具有较大的电导，但在 $E_F > 5$ 时，其自旋极化度 P_G 却趋于 0，可见选择合适的偏压对于提高自旋极化度具有较大的影响。

前面，我们仅仅讨论了 $U = 0, \pm 8$ 时的电子运输特性，为了进一步了解肖特金属条所加偏压对于电子运输的影响，如图4所示，我们给出了 $E_F = 12, 16, 20$ 时，不同 U 下电导和自旋极化图。从图中，我们可以明显看出随着偏压 U 的增加，电导首先缓慢增加，到时，电导有最大值，时，电导快速减小到 0。对于不同的 E_F ，我们可以很明显的看出，随着 E_F 的增加， G 不断增加，和前面图3相符合，而且 E_F 的增加会增加偏压的临界值 U_c (G 为 0 时所对应的 U 值)。对于 P_G 图，我们可以看出，对于 $E_F = 12, 16, 20$ ，在 U 大约小于 6 时，其自旋极化均趋于 0，随着 U 的增加，大多均有增加而趋于稳定的趋势。而且我们可以发现，在 $U < U_c$ 时，自旋极化曲线均会出现一个或多个极值，此时 G 并不趋于 0。根据该模型受偏压调制的数值计算结果，在实际应用中可以选择合适的偏压，制备新型自旋电子器件。

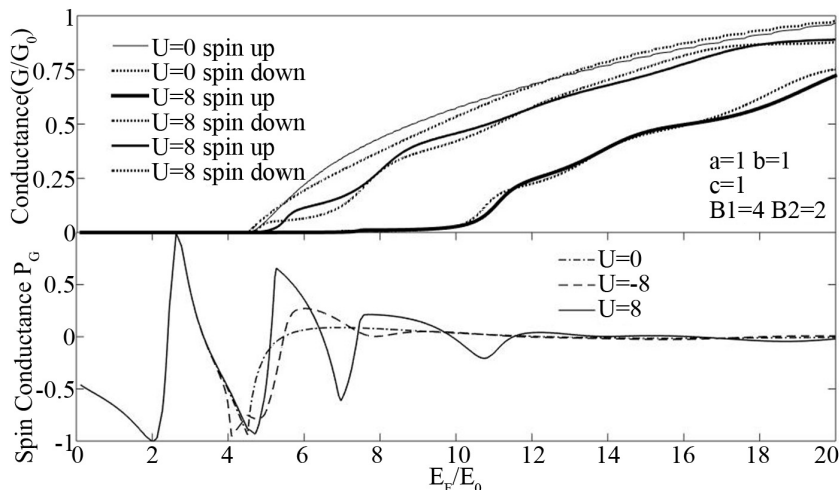


Figure 3. $U = \pm 8, 0$, the conductance and spin polarization changes P_G with E_F the change, in which the structural parameters of $b = 1, c = 1, B_1 = 4, B_2 = 2, a = 1$
图 3. $U = \pm 8, 0$ 时的电导及其自旋极化 P_G 随 E_F 的变化, 其中结构参数 $a = 1, b = 1, c = 1, B_1 = 4, B_2 = 2$

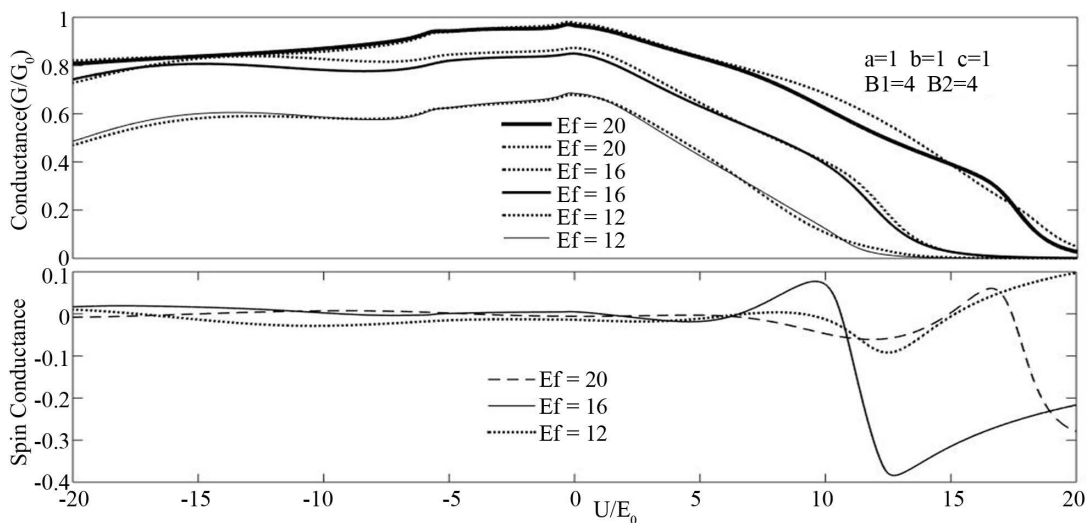


Figure 4. $E_f = 12|16|20 \parallel P_G \parallel U \parallel a = 1, b = 1, c = 1$
图 4. $E_f = 12|16|20 \parallel P_G \parallel U \parallel a = 1, b = 1, c = 1$

4. 总结

本文研究了电子在平行非等强磁场和肖特基金属条共同调制下二维电子气的弹道输运。并得出了电子的传输概率和自旋极化度不仅与铁磁条的宽度，肖特基金属条的位置有关，还与肖特基金属条上所加的偏压有关。相对于电子在反平行磁场和肖特基金属条共同调制下的二维电子气的弹道输运，本文的磁纳米结构具有相似的偏压调制特性，但入射能量阈值和结构参数调制规律有一定的差别；相对于平行非等强磁纳米结构的弹道输运，本文的传输概率和传输电导具有较大的震荡，而且部分区域具有接近 100% 的自旋极化度。利用这些特性，可以制造出基于此类结构的自旋电子学器件。

参考文献 (References)

- [1] 秦建华, 郭永, 陈信义, 等. 磁电垒结构中自旋极化输运性质的研究[J]. 物理学报, 2003, 52(10): 2569-2575.
- [2] Žutić, I., Fabian, J. and Sarma, S.D. (2004) Spintronics: Fundamentals and Applications. *Reviews of Modern Physics*, **76**, 323. <http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.76.323>
- [3] Majumdar, A. (1996) Effects of Intrinsic Spin on Electronic Transport through Magnetic Barriers. *Physical Review B*, **54**, 11911-11913. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.54.11911>
- [4] Papp, G. and Peeters, F.M. (2001) Spin Filtering in a Magnetic-Electric Barrier Structure. *Applied Physics Letters*, **78**, 2184-2186. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1360224>
- [5] Xu, H.Z. and Okada, Y. (2001) Does a Magnetic Barrier or a Magnetic-Electric Barrier Structure Possess Any Spin Polarization and Spin Filtering under Zero Bias? *Applied Physics Letters*, **79**, 3119-3121. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1416167>
- [6] Ye, P.D., Weiss, D., Gerhardt, R.R., *et al.* (1995) Electrons in a Periodic Magnetic Field Induced by a Regular Array of Micromagnets. *Physical Review Letters*, **74**, 3013-3016. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.74.3013>
- [7] Bae, J.U., Lin, T.Y., Yoon, Y., *et al.* (2008) Large Tunneling Magnetoresistance in a Field-Effect Transistor with a Nanoscale Ferromagnetic Gate. *Applied Physics Letters*, **92**, 253101. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2951901>
- [8] Monzon, F.G., Johnson, M. and Roukes, M.L. (1997) Strong Hall Voltage Modulation in Hybrid Ferromagnet/Semiconductor Microstructures. *Applied Physics Letters*, **71**, 3087-3089. <http://dx.doi.org/10.1063/1.120254>
- [9] Lu, J.D. and Liu, H.Y. (2011) Spin Polarization in a Two Dimensional Electron Gas Modulated by Ferromagnetic and Schottky Metal Stripes. *Microelectronics Reliability*, **51**, 1123-1126. <http://dx.doi.org/10.1016/j.microrel.2011.02.008>
- [10] Lu, J.D. (2010) Influence of the Periodic δ -Doping on the Electron Transport in a Magnetically Modulated Two-Dimensional Electron Gas. *Physica E Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, **8**, 2151-2155. <http://dx.doi.org/10.1016/j.physe.2010.04.015>
- [11] Lu, J.D., Liu, H.Y., Li, Y.B., *et al.* (2011) Electron Transport in a Nanostructure Periodically Modulated by Ferromagnetic and Schottky Metal Stripes. *Modern Physics Letters B*, **25**, 1529-1536. <http://dx.doi.org/10.1142/S0217984911026917>
- [12] Zhai, F., Xu, H.Q. and Guo, Y. (2004) Tunable Spin Polarization in a Two-Dimensional Electron Gas Modulated by a Ferromagnetic Metal Stripe and a Schottky Metal Stripe. *Physical Review B Condensed Matter*, **70**, 5308. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.70.085308>
- [13] Papp, G., Vasilopoulos, P. and Peeters, F.M. (2005) Spin Polarization in a Two-Dimensional Electron Gas Modulated Periodically by Ferromagnetic and Schottky Metal Stripes. *Physical Review B*, **72**, 115315. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.72.115315>
- [14] Lu, M.W. and Zhou, S.M. (2010) A Bias-Tunable Electron-Spin Filter Based on a Hybrid Ferromagnetic-Schottky-Metal and Semiconductor Nanostructure. *Physics Letters A*, **374**, 4349-4353. <http://dx.doi.org/10.1016/j.physleta.2010.08.056>
- [15] Xu, H.Q. and Yan, Q.Q. (2008) Electric Tunable of Electron Spin Polarization in Hybrid Magnetic-Electric Barrier Structures. *Physics Letters A*, **372**, 6216-6220. <http://dx.doi.org/10.1016/j.physleta.2008.08.042>
- [16] Lu, M.W. and Yang, G.J. (2007) Magnetoresistance Effect in a Both Magnetically and Electrically Modulated Nanostructure. *Physics Letters A*, **362**, 489-493. <http://dx.doi.org/10.1016/j.physleta.2006.10.058>
- [17] Papp, G. and Peeters, F.M. (2001) Spin Filtering in a Magnetic-Electric Barrier Structure. *Applied Physics Letters*, **78**, 2184-2186. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1360224>