

NM/FI/NI/FI/NM 新型双自旋过滤隧道结的 隧穿电导和隧穿磁电阻^{*}

朱 林¹⁾ 陈卫东¹⁾ 谢征微^{1)†} 李伯臧¹⁾²⁾

1) 四川师范大学物理系与电子工程学院, 成都 610066)

2) 中国科学院物理研究所, 北京 100080)

(2006 年 2 月 22 日收到, 2006 年 3 月 27 日收到修改稿)

在 NM/FI/FI/NM 型双自旋过滤隧道结(此处 NM 为非磁金属层, FI 为铁磁绝缘体或半导体层)的基础上, 我们提出一种 NM/FI/NI/FI/NM 新型双自旋过滤隧道结(此处 NI 表示非磁绝缘体或半导体层). 插入 NI 层的目的是为了避开原双自旋过滤隧道结中相邻 FI 层界面处磁的耦合作用所导致的对隧穿磁电阻的不利影响. 在自由电子近似的基础上, 利用转移矩阵方法, 对 NM/FI/NI/FI/NM 新型双自旋过滤隧道结的隧穿电导、隧穿磁电阻与 FI 层及 NI 层厚度的变化关系以及随偏压的变化关系进行了理论研究. 计算结果表明, 在 NM/FI/NI/FI/NM 新型双自旋过滤隧道结中仍可以得到很大的 TMR 值.

关键词: 双自旋过滤隧道结, 隧穿磁电阻, 非磁绝缘(半导)体间隔层

PACC: 7340G, 7570

1. 引 言

近年来发现, 一种由两层铁磁金属(FM)电极夹一薄的非磁绝缘层(NI)所构成的磁性隧道结, 即 FM/NI/FM 型磁性隧道结, 因其具有较高的隧穿磁电阻(TMR)和低的功率损耗, 而在传感器和磁记录读写器等方面有重要的应用价值^[1,2], 故对这种磁性隧道结的研究引起了人们的极大关注.

FM/I/FM 结的 TMR 主要与两个 FM 电极中电子自旋极化度有关, 但 FM 层的较小的自旋极化度, 限制了这些结的 TMR^[3-5]. 如果选择用自旋极化度较大的半金属层代替 FM 层作电极的隧道结, 虽可获得较大的 TMR, 但由于温度和一些复杂的因素比如电荷排列无序和材料表面的一些影响, 电极的半金属性会被破坏, 于是此类结在实际应用中会受到极大的限制^[6]. 最近铁磁绝缘体(FI)存在自旋过滤效应并在自旋极化隧穿试验中被很好的证实^[7]. 在 Al/EuS/Al 隧道结中, 由于铁磁绝缘体材料 EuS 的自旋过滤效应, Moodera 等获得了 85% 的隧穿电流自旋极化度. 这是由于当一个 FI 层比如 EuS 被用作隧穿

势垒时, 其作用相当于一个自旋过滤器(Spin-Filter), 如果隧穿电子自旋磁矩与 FI 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, 从而产生大的自旋极化电流. 由于 FI 的自旋过滤效应, 使得对用 FI 作势垒的单自旋过滤结和双自旋过滤结的 TMR 的研究引起了人们的注意. 利用双带模型和近自由电子近似^[8], Li 等研究了 FM/FI/FM 单自旋过滤结的隧穿电导和隧穿磁电阻^[9], 结果显示隧穿电流的增大和减小在很大程度上与 FM 电极和 FI 层中的磁化强度方向有关. Worledge^[10], Xie^[11]等人在理论上预言在 NM/FI/FI/NM 型双自旋过滤隧道结中可得到很大的 TMR.

但对于 NM/FI/FI/NM 型双自旋过滤隧道结, 由于两个不同矫顽力的 FI 层紧密靠在一起, 与 FePt 合金薄膜中近邻软磁相晶粒和硬磁相晶粒间有较强的铁磁交换作用^[12]类似, 界面处两层 FI 间的磁矩可能有很强的交换耦合作用, 在实际应用中这种作用会导致 TMR 的下降并影响双自旋过滤隧道结的灵敏度. 在本文中, 我们对 NM/FI/FI/NM 型磁性隧道结做了改进, 在两个 FI 层间插入一层非磁绝缘(半导)体

^{*} 教育部科学研究重点项目(批准号: 20040422)和四川省教育厅重点项目(2003A076)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: zzwxie@yahoo.com.cn

NI 构成一种新型的双自旋过滤隧道结 NM/FI/Ni/FI/NM,以期避免原双自旋过滤隧道结中存在的上述问题.下面我们将就插入的 NI 层厚度和 FI 的厚度对新型双自旋过滤隧道结中 TMR 的影响以及新型双自旋过滤隧道结中 TMR 与偏压的变化关系进行理论研究.

2. 理论模型

NM/FI/Ni/FI/NM 新型双自旋过滤隧道结中,两个 FI 层可设计成具有不同的矫顽力,其中矫顽力大

的一层提供钉扎势垒,磁化方向不易改变,称为钉扎层;另一层矫顽力小,磁化方向容易改变,称为自由层.由于两个 FI 层被非磁绝缘层 NI 分隔开,通过外加磁场的调节,可以很容易的使两个 FI 层的磁化强度方向处于平行或反平行的状态.在平均场近似下,FI 中的局域磁矩对隧穿电子提供一个有效磁场(分子场)^[13,14],使 FI 层的势垒高度由于 Zeeman 作用而发生劈裂.基于 Slonczewski 近自由电子模型^[8,15],我们用梯形势垒模拟有偏压时的绝缘层势垒,如图 1 所示.同时,为了方便,假定两个 FI 层除矫顽力不同及厚度可能相异外,其他方面的性质相同.最外面的

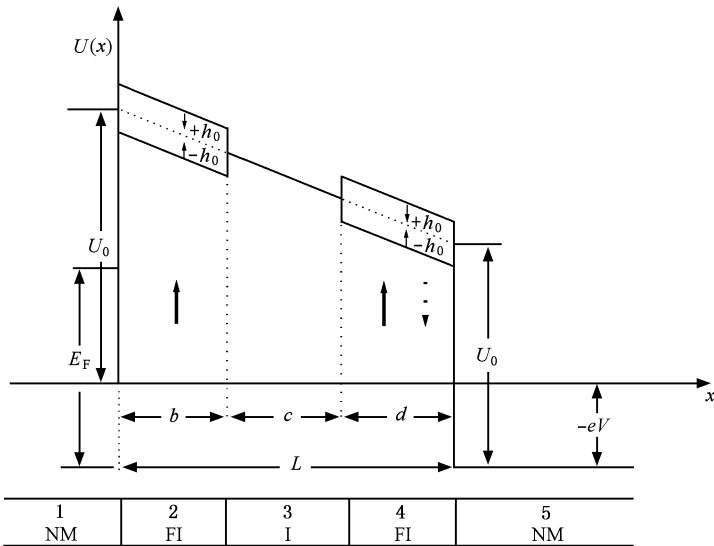


图 1 NM/FI/Ni/FI/NM 新型双自旋过滤隧道结在有限偏压 V 下的势垒模型 E_F 为非磁电极 NM 的费米能级, h_0 为分子场大小, U_0 为无偏压时的势垒高度,势垒总宽度为 L (长粗箭头表示 FI 层中的磁化强度方向,短细箭头表示隧穿电子的自旋磁矩方向)

两层 NM 电极由相同材料制成,视为半无限厚.

有限偏压下,新双自旋过滤隧道结中单电子在 x 方向的哈密顿量可写成如下形式:

$$H_x=-\frac{\hbar^2}{2m_j^*}\frac{d^2}{dx^2}+U_j(x)+V_j^s(x),$$

$$j=1\ 2\ 3\ 4\ 5,\tag{1}$$

其中 m_j^* 是在第 j 层中电子的有效质量, \hbar 为 Plank 常数.

有限偏压下,各层中势能 $U_j(x)$ 为

$$U_j(x)=\begin{cases}0&x<0,\\U_0-\frac{eVx}{L},&0<x<b,\\(U_0-\frac{eVb}{L})-\frac{eV(x-b)}{L},&b<x<b+c,\\(U_0-\frac{eV(b+c)}{L})-\frac{eV(x-(b+c))}{L},&b+c<x<L,\\-eV,&x>L,\end{cases}\tag{2}$$

其中 b, c, d 分别是钉扎 FI 层、间隔 NI 层和自由 FI 层的厚度, 三层总厚度为 $L = b + c + d$. e 为自由电子电荷, V 为加于结上的偏压. $V_j^\sigma(x) = -h_j(x) \cdot \sigma$ 是 Zeeman 能项, $h_j(x)$ 是分子场, 其大小满足

$$h_j(x) = \begin{cases} 0, & x < 0, \\ h_L, & 0 < x < b, \\ 0, & b < x < b + c, \\ h_R, & b + c < x < L, \\ 0, & x > L. \end{cases} \quad (3)$$

其中为了方便, 假设左区域的分子场 h_L 和右区域的分子场 h_R 大小相等, 即 $h_L = h_R = h_0 = \text{const}$, σ 是 Pauli 矩阵. 此外, 仍然是为了简单, 我们假定在零偏压下, NI 和 FI 中有相同的势垒高度 U_0 .

在偏压为零 ($V = 0$) 时, 解 Schrödinger 方程得波函数的一般形式为

$$\Psi_{js}(x) = A_{js} e^{ik_{js}x} + B_{js} e^{-ik_{js}x},$$
$$j = 1, 2, 3, 4, 5, \quad (4)$$

系数 A_{js} 和 B_{js} 由边界连续条件和波矢 $k_{js} = \sqrt{2m_j^*(E_x - U_0 - V_j^\sigma)}/\hbar$ 求出. 其中 E_x 为输入电子在 x 方向的能量.

在有限偏压下 ($V \neq 0$), 解 Schrödinger 方程可利用 WKB 近似或 Airy 函数(对于梯形势垒)方法^[16]. 在这里, 我们采用另外一种方法. 首先将各势垒区域分割为许多相邻的薄势垒区域, 这些薄势垒可近似为小矩形势垒(见图 2), 然后利用自旋相关波函数及其对 x 的一阶微商在不同薄势垒区域交界

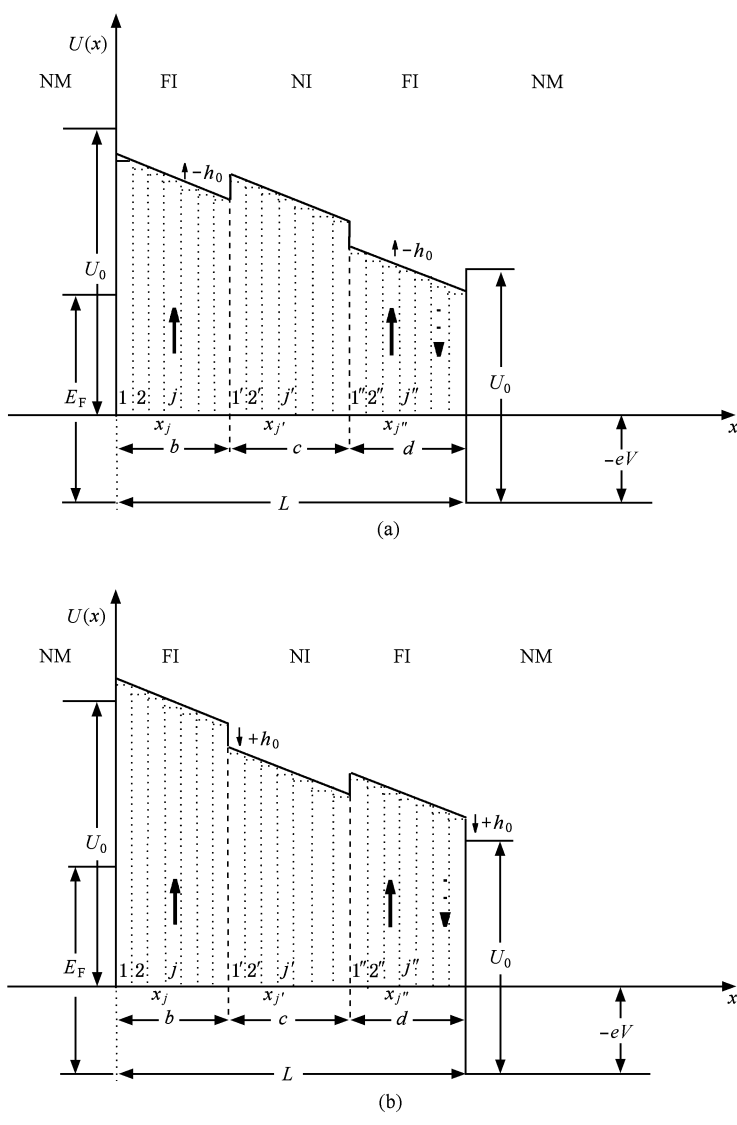


图2 将 NM/FI/NI/FI/NM 新型双自旋过滤隧道结在有限偏压 V 下的势垒分割成等宽的薄势垒 (a) 为自旋向上电子隧穿时的势垒模型, (b) 为自旋向下电子隧穿时的势垒模型 (钉扎 FI 层、间隔 NI 层和自由 FI 层的势垒分别被分割成等宽的 N 个、 N' 个、 N'' 个薄势垒), 每块薄势垒近似为矩形势垒

处的连续性条件及自旋相关波函数的旋量变化关系,得到关于入射系数和透射系数的转移矩阵.利用此转移矩阵,可进一步得到自旋相关的隧穿系数,隧穿电流和隧穿电导.该方法的优点是可处理复杂结构的磁性隧道结以及具有任意势垒形状时的自旋相关输运问题,在数值求解上也更为方便^[11,17].

对于磁性隧道结,单位面积的隧穿电流的计算公式为^[10,18]

$$J_{\alpha}(\theta) = \frac{em}{4\pi^2 \hbar^3} \int_0^{E_F} (E_F - E) T_{\alpha}(\theta) dE, \quad eV > E_F, \tag{5}$$

$$J_{\alpha}(\theta) = \frac{em}{4\pi^2 \hbar^3} \left[eV \int_0^{E_F - eV} T_{\alpha}(\theta) dE + \int_{E_F - eV}^{E_F} (E_F - E) T_{\alpha}(\theta) dE \right], \quad eV < E_F, \tag{6}$$

通过磁性隧道结单位面积的总电流为

$$J(\theta) = J_{\uparrow}(\theta) + J_{\downarrow}(\theta), \tag{7}$$

相应的平均电导为

$$\alpha(\theta) = \frac{J(\theta)}{V}, \tag{8}$$

隧穿磁电阻为

$$\text{TMR}(\theta) = \frac{\alpha(\theta = 0) - \alpha(\theta)}{\alpha(\theta = 0)}. \tag{9}$$

3. 计算结果及讨论

3.1. 不同偏压下,TMR 及电导 G_P/G_{AP} 与钉扎层厚度 b 及非磁绝缘层厚度 c 的关系

利用(5)–(9)式,对 NM/FI/NI/FI/NM 型双自旋过滤隧道结在 $T = 0\text{K}$ 时的 TMR 与铁磁绝缘(半导)层厚度 b 和 d ,与非磁绝缘(半导)层厚度 c 的关系进行了计算.在计算中,作为电极的非金属层中的费米能取为 $E_F = 7.0\text{eV}$,铁磁绝缘(半导)层中的分子场大小取为 $h_0 = 0.18\text{eV}$,FI 和 NI 中的势垒的平均高度都取为 $U_0 = 0.7\text{eV}$,并且保持 E_F , h_0 和 U_0 不变.为了简单,我们只计算 $\theta = \pi$ 的情况,并将 $\text{TMR}(\pi)$ 简记为 TMR,并将 $\alpha(0)$ 和 $\alpha(\pi)$ 分别简记为 G_P 和 G_{AP} ,则 $\text{TMR} = (G_P - G_{AP})/G_P$.电子在各层中的有效质量视为 $m_1^* = m_2^* = m_3^* = m_4^* = m_5^* = m_e$ (自由电子质量),计算中保持三个绝缘(半导)层的总厚度 $L = b + c + d$ 为 3nm 不变.

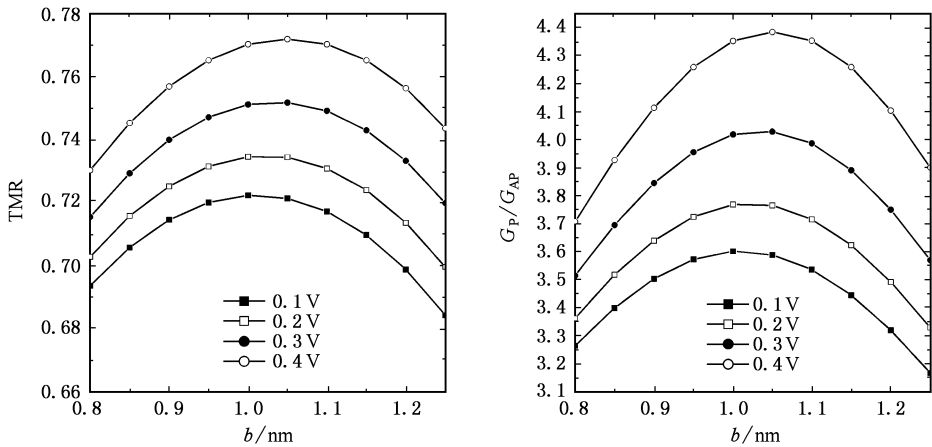


图 3 TMR 及平行电导(G_P)和反平行电导(G_{AP})的比值随钉扎层厚度 b ($c = 1\text{nm}$, $L = b + c + d$ 保持为 3nm)的变化.小方框内的值为偏压大小

图 3 为不同偏压下,TMR 及平行电导(G_P)和反平行电导(G_{AP})的比值随钉扎层厚度 b 的变化.从图 3 可以看到,两个铁磁绝缘层的厚度的相对大小对 TMR 有较大的影响.在偏压很小的情况下,当钉扎层和自由层厚度相差不大时,TMR 的值最大.这是由于两边铁磁绝缘层对称时,平行电导 G_P 较小,反平行电导 G_{AP} 较大;而两边铁磁绝缘层不对称时,

平行电导 G_P 较大,反平行电导 G_{AP} 较小.但随着偏压的增大,与 TMR 最大值对应的钉扎层的厚度也略有增大.通过计算得知,偏压为 0.1V , 0.2V , 0.3V 和 0.4V 时,相应于 TMR 最大值处的钉扎层厚度分别为 1.01nm , 1.02nm , 1.04nm 和 1.05nm .但总的趋势表明,当两个磁性绝缘层的厚度相差较小时,得到 TMR 的值较大.由(9)式知 $\text{TMR} = 1 - 1/(G_P/G_{AP})$,故

TMR 和 G_P/G_{AP} 的变化趋势是一致的 ,正如图 3 中所表明的那样.

图 4 为 FI 层厚度固定不变时 ,TMR 及平行电导 (G_P) 和反平行电导 (G_{AP}) 的比值随非磁绝缘层 NI 厚度的变化.从图 4 (a) 和 (b) 都可以看出 ,非磁绝缘

层厚度较小时 ,TMR 随非磁绝缘层厚度的增加而迅速增大 ,但是当非磁绝缘层厚度增加到 1nm 后 ,TMR 的增大趋势趋于缓和 ,非磁绝缘层厚度增加到 2nm 后 ,TMR 随非磁绝缘层厚度的增加变化很小 ,TMR 的值趋于稳定.这说明插入的非磁绝缘层 NI 不必太

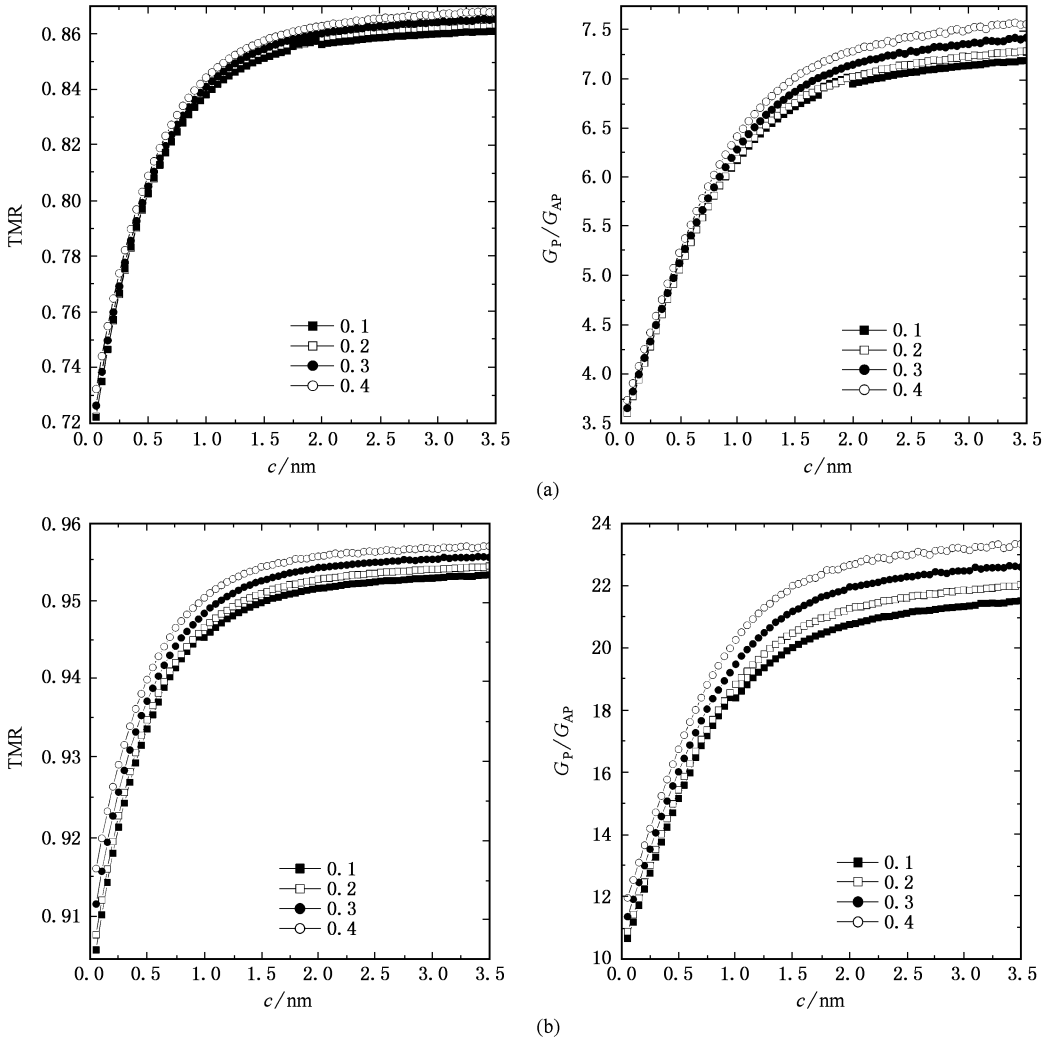


图 4 TMR 及平行电导 (G_P) 和反平行电导 (G_{AP}) 的比值随非磁绝缘层 NI 厚度 ($b = d$ 保持不变) 的变化 小方框内的值为偏压大小.(a) 为 $b = d = 1\text{ nm}$ 时 TMR 及 G_P/G_{AP} 随 NI 厚度 c 的变化 (b) 为 $b = d = 1.5\text{ nm}$ 时 TMR 及 G_P/G_{AP} 随 NI 厚度 c 的变化

厚 ,只要取一适当的值即可得到大而稳定的 TMR.

3.2. 不同铁磁绝缘层总厚度下 TMR 及电导 G_P/G_{AP} 与偏压 V 的关系

保持非磁绝缘层 NI 厚度 $c = 1\text{ nm}$ 、势垒高度 $U_0 = 0.7\text{ eV}$ 和分子场 $h_0 = 0.18\text{ eV}$ 不变 ,在改变铁磁绝缘层的总厚度 ,但令两个 FI 的厚度相等的条件下 ($b = d = 0.8\text{ nm}, 1\text{ nm}, 1.5\text{ nm}$),双自旋过滤隧道结中

TMR 及电导 G_P 和 G_{AP} 的比值随偏压 V 的变化关系如图 5 所示.

从图 5 中可以看到 ,利用 NM/FI/NI/FI/NM 型双自旋过滤隧道结可获得极大的 TMR ,并且和传统的 FM/I/FM 及最近的 FMS/NM/FMS 结构的磁性隧道结的 TMR 随着偏压的增大而迅速单调下降的现象不同.对于 NM/FI/NI/FI/NM 型双自旋过滤隧道结 ,其 TMR 先随偏压的增加而增加 ,到达极大值后再迅速

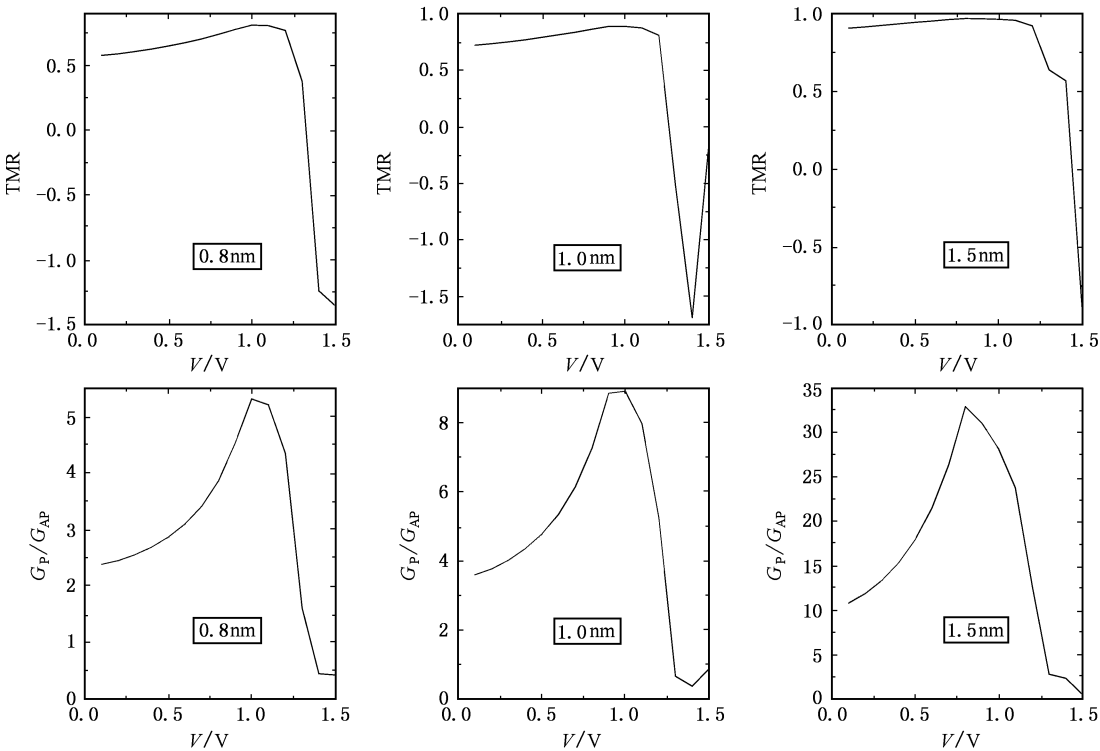


图 5 保持非磁绝缘层 NI 厚度 $c = 1\text{nm}$ 、势垒高度 $U_0 = 0.7\text{eV}$ 和分子场 $h_0 = 0.18\text{eV}$ 不变,不同铁磁绝缘层的总厚度下(图中小方框内的值 0.8、1.0、1.5nm 分别对应于不同的单个铁磁绝缘层厚度),双自旋过滤隧道结中 TMR 及电导 G_P 和 G_{AP} 的比值随偏压 V 的变化

下降.在所加偏压范围(0—1.5V)内,未出现明显的 TMR 随 V 的振荡变化.从图 5 还可看出 TMR 的极大值随着势垒层厚度的增加而增加,在 $b = d = 1.5\text{nm}$ 时,TMR 的极大值接近于 1,即 100%.同时 NM/FI/Ni/FI/NM 型双自旋过滤隧道结的 TMR 在急剧的下降后均出现了负值.在保持绝缘层的总厚度不变和两个磁性绝缘层的厚度相等($d_1 = d_2 = 1\text{nm}$)以及分子场大小($h_0 = 0.18\text{eV}$)固定的条件下,改变绝缘层的零偏压平均势垒高度 U_0 ,NM/FI/Ni/FI/NM 型双自旋过滤隧道结 TMR 随偏压的变化和图 5 类似.

4. 总 结

在 Slonczewski 近自由电子模型^[7]的基础上,用转移矩阵法和针对任意形状势垒的计算方法^[18]研

究了双自旋过滤隧道结 NM/FI/Ni/FI/NM 中磁性绝缘层厚度,绝缘层厚度和偏压的变化对 TMR 的影响.在原双自旋过滤隧道结 NM/FI/FI/NM 插入一个 NI 层是期望避免原双自旋过滤隧道结中相邻的两 FI 层界面处磁矩耦合作用对隧穿磁电阻的不利影响.计算结果显示 NM/FI/Ni/FI/NM 型双自旋过滤隧道结可以通过调节各绝缘层的厚度获得较大的 TMR 值,在一个较大的偏压范围内该隧道结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.以上结果虽然只是在理想情况下得出的,但仍可看出双自旋过滤隧道结具有不同于传统隧道结的一些特点,这些特点可能会使磁电阻元件的研制者感到兴趣.

在上述分析及计算中,我们没有考虑温度、界面粗糙度、以及电子间相互作用等因素的影响.进一步的研究正在进行中.

[1] Moodera J S, Mathon G J 1999 *Magn. Magn. Mater.* **200** 248
[2] Inomata K 1999 *J. Magn. Soc. Jpn.* **23** 1826
[3] Meservy R, Tedrow P M 1994 *Phys. Rep.* **38** 174
[4] Moodera J S, Kinder L R, Wong T M, Meservy R 1995 *Phys.*

Rev. Lett. **74** 3273

[5] Zhang X D , Wang J Z , Li B Z , Pu F C 1998 Chin. Phys. **7** 703

[6] Pickett W E , Moodera J S 2001 Phys. Today. **5** 39

[7] Moodera J S , Meservey R , Hao X 1993 Phys. Rev. Lett. **70** 853

[8] Slonczewski J C 1989 Phys. Rev. B **39** 6995

[9] Li Y , Li B Z , Zhang W S , Dai D S 1998 Phys. Rev. B **57** 079

[10] Worledge D C , Geballe T H 2000 J. Appl. Phys. **88** 5277

[11] Xie Z W , Li B Z 2002 Science in China A **32** 696 (in Chinese) [谢征微、李伯臧 2002 中国科学 A **32** 696]

[12] Wang Y Z , Zhang M C , Wang J et al 2000 Acta Phys. Sin. **49** 1600 (in Chinese) [王亦忠、张茂才、王 晶等 2000 物理学报 **49** 1600]

[13] Tokura Y 2000 Colossal Magnetoresistive Oxides (Amsterdam : Gordon & Breach Scipub)

[14] Wolf E L 1985 Principles of Tunneling Spectroscopy (New York : Oxford Univ. Press)

[15] Li F F , Li Z Z , Xiao M W , Du J , Xu W , Hu A 2004 Phys. Rev. B **69** 054410

[16] Gao P , Zheng Z M , Xing D Y 2002 Acta Phys. Sin. **51** 2128 (in Chinese) [高 鹏、郑之明、邢定钰 2002 物理学报 **51** 2128]

[17] Xie Z W , Li B Z 2002 Acta Phys. Sin. **51** 399 (in Chinese) [谢征微、李伯臧 2002 物理学报 **51** 399]

[18] Tsu R , Esaki L 1973 Appl. Phys. Lett. **22** 562

The tunnel conductance and tunnel magnetic resistance of NM/FI/NI/FI/NM double spin filter junction^{*}

Zhu Lin¹⁾ Chen Wei-Dong¹⁾ Xie Zheng-Wei^{1)†} Li Bo-Zang¹⁾²⁾

1) \AA College of Physics and Electronic Engineering , Sichuan Normal University , Chengdu 610066 , China)

2) \AA Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China)

(Received 22 February 2006 ; revised manuscript received 27 March 2006)

Abstract

Based on the NM/FI/FI/NM double spin filter junction (NM represents the nonmagnetic metal layer and FI the ferromagnetic insulator or semiconductor layer) , a new type of double spin filter junction NM/FI/NI/FI/NM (NI represents the nonmagnetic insulator layer) is discussed . By inserting an nonmagnetic insulator layer between the ferromagnetic insulator layers , the adverse influence on the tunneling magnetic resistance (TMR) caused by the magnetic coupling at the interface between the ferromagnetic insulator (FI) layers can be avoided . Using the free-electron approximation and transfer matrix method the dependence of the tunneling conductance and TMR on the thickness of the FI layer and the NI layer and on the bias voltage in the double spin filter junction NM/FI/NI/FI/NM are studied .

Keywords : double spin filter tunnel junction , tunnelling magnetoresistance , nonmagnetic insulator (semiconductor) interlayer

PACC : 7340G , 7570

^{*} Project supported by the Ministry of Education , China (Grant No. 20040422) and Sichuan Education Fund (Grant No. 2003A076)

[†] Corresponding author . E-mail : zzwxie@yahoo.com.cn