

MgO基磁性隧道结温度-偏压相图的理论研究

吕杰 方贺男 吕涛涛 孙星宇

Theoretical study on temperature-bias phase diagram of MgO-based magnetic tunnel junctions

Lü Jie Fang He-Nan Lü Tao-Tao Sun Xing-Yu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 107302 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201905

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201905>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

PS3000-b-PAA5000球形胶束温度效应的原位小角X射线散射技术研究

Temperature dependence of spherical micelles of PS3000-b-PAA5000 studied by in-situ small angle X-ray scattering

物理学报. 2018, 67(4): 048301 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172167>

高应变率下温度对单晶铁中孔洞成核与生长影响的分子动力学研究

Molecular dynamics simulation of effect of temperature on void nucleation and growth of single crystal iron at a high strain rate

物理学报. 2019, 68(24): 246102 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190920>

SnSe₂的忆阻及磁阻效应

Memristive and magnetoresistance effects of SnSe₂

物理学报. 2020, 69(11): 117301 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200160>

射线总剂量辐照对单轴应变Si纳米n型金属氧化物半导体场效应晶体管栅隧穿电流的影响

Influence of γ -ray total dose radiation effect on the tunneling gate current of the uniaxial strained Si nanometer n-channel metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

物理学报. 2017, 66(7): 076101 <https://doi.org/10.7498/aps.66.076101>

三端磁隧道结的稳定性分析

Stability analysis in three-terminal magnetic tunnel junction

物理学报. 2019, 68(20): 207201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190927>

基于工艺偏差的电压调控磁各向异性磁隧道结电学模型及其在读写电路中的应用

Process deviation based electrical model of voltage controlled magnetic anisotropy magnetic tunnel junction and its application in read/write circuits

物理学报. 2020, 69(19): 198502 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200228>

MgO 基磁性隧道结温度-偏压相图的理论研究*

吕杰 方贺男[†] 吕涛涛 孙星宇

(南京邮电大学电子与光学工程学院, 南京 210023)

(2020 年 11 月 12 日收到; 2020 年 12 月 15 日收到修改稿)

MgO 基磁性隧道结是自旋电子器件研究的热点问题, 其温度特性和偏压特性在实际应用中极其重要. 因此, 亟需在理论上计算得到 MgO 基磁性隧道结的温度-偏压相图. 本文构建了适用于单晶势垒层磁性隧道结的理论. 该理论将单晶势垒层视作周期性光栅, 利用光学衍射理论处理势垒层对隧穿电子的衍射, 因此可以很好地计入隧穿电子波的相干性. 根据此理论, 同时计入温度和偏压的影响计算了 MgO 基磁性隧道结的温度-偏压相图. 理论结果表明, 通过调节 MgO 基磁性隧道结的铁磁电极半交换劈裂能 Δ 、化学势 μ 以及势垒层周期势 $v(\mathbf{K}_n)$ 可以优化其温度特性和偏压特性. 该结果为 MgO 基磁性隧道结的应用提供了坚实的理论基础.

关键词: 磁性隧道结, 隧穿磁阻效应, 温度效应, 偏压效应

PACS: 73.43.Qt, 73.43.Jn, 73.50.-h

DOI: 10.7498/aps.70.20201905

1 引言

在上世纪 90 年代, 磁性隧道结的势垒层大多选取非晶 Al_2O_3 来制备. 然而, 由于非晶 Al_2O_3 势垒层中存在严重的无序散射, 所以很大程度上抑制了磁性隧道结隧穿磁阻 (tunneling magnetoresistance, TMR) 的大小. 尽管很多课题组对 Al-O 结的物理结构等因素进行了优化, 使得 Al-O 结低温下的 TMR 可以达到 107%^[1], 但是仍然难以满足下一代磁存储器件的要求. 2001 年, Butler 和 Mathon 等利用第一性原理对基于单晶 MgO 势垒层和 Fe 电极的磁性隧道结进行了理论计算, 预测其可能实现超过 1000% 的 TMR. 随后, 人们对单晶 MgO 基磁性隧道结展开了广泛的实验研究. 2004 年, Yuasa 等^[2] 在室温的 Fe/MgO/Fe 磁性隧道结中实现了 180% 的 TMR. 2007 年 Lee 等^[3] 在 CoFeB/MgO/CoFeB 磁性隧道结中将 TMR 在

室温下提升至 604%, 低温下提升至 1144%. 上述结果表明单晶 MgO 基磁性隧道结有潜力成为下一代磁存储器件的基本元件.

单晶 MgO 基磁性隧道结除了具有较高的 TMR 外, 还展现了许多新奇的物理效应, 其中最重要的是偏压特性与温度特性. MgO 基磁性隧道结温度特性的实验结果大多表现为: 反平行电导 (antiparallel conductance, G_{AP}) 和 TMR 均随温度升高而显著降低, 而平行电导 (parallel conductance, G_{P}) 随温度单调变化且幅度较小^[4-10]. 另外, 也有实验发现平行电导 G_{P} 会随温度振荡^[11]. MgO 基磁性隧道结偏压特性的实验结果大多表现为: TMR 随偏压增大单调减小^[12,13]. 然而, 有部分实验发现 TMR 会随偏压非单调变化^[14]. 此外, 研究表明温度特性与偏压特性是耦合在一起的, 即温度对偏压特性有影响, 偏压对温度特性也有影响^[14,15]. 上述结果表明温度和偏压对 MgO 基磁性隧道结 TMR 的影响比较复杂, 因此在实际应用中

* 国家自然科学基金 (批准号: 11704197) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: fanghn@njupt.edu.cn

需要寻找最优的温度和偏压来实现最大的 TMR. 在物理上, 这相当于在以温度和偏压作为双变量的相图上找到 TMR 最大的 (或极大的) 相点. 为此, 首先需要通过理论计算得到上述相图.

本课题组之前已经发展出一个适用于单晶势垒层磁性隧道结的理论. 该理论基于传统的光学衍射理论, 将单晶势垒层视作周期性光栅, 很好地计入了单晶势垒层对隧穿电子的散射所带来的相干性. 此理论可以较好地解释 MgO 基磁性隧道结的基本特性, 特别地, 上述偏压特性和温度特性的物理机理均可以在该理论框架下得到阐明. 因此, 本文拟对上述理论进行拓展来同时计入温度和偏压对 MgO 基磁性隧道结的影响, 进而计算得到以温度和偏压作为双变量的 TMR 相图.

2 理论模型

单晶势垒层的周期势可以写作:

$$U(\mathbf{r}) = \sum_{l_3=0}^{n-1} \sum_{\mathbf{R}_h} v(\mathbf{r} - \mathbf{R}_h - l_3 \mathbf{a}_3), \quad (1)$$

其中 $v(\mathbf{r})$ 表示势垒层每个格点处的原子势; n 表示势垒层总层数; $\mathbf{R}_h = l_1 \mathbf{a}_1 + l_2 \mathbf{a}_2$, 其中 \mathbf{a}_1 和 \mathbf{a}_2 是势垒层面内初基矢量, l_1 和 l_2 是相应的整数; \mathbf{a}_3 是层间的初基矢量, l_3 是其相应的整数. 定义 $e_z = \frac{\mathbf{a}_1 \times \mathbf{a}_2}{|\mathbf{a}_1 \times \mathbf{a}_2|}$, 即 z 轴的正方向为从上电极指向下电极, 如图 1 所示.

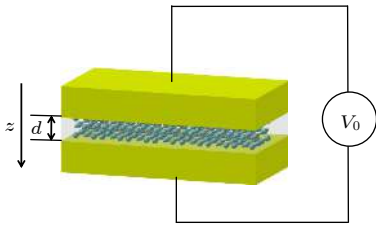


图 1 MgO 基磁性隧道结示意图

Fig. 1. Diagram of MgO-based magnetic tunnel junction.

根据文献 [16,17], 温度对隧穿磁阻效应的影响来源于晶格畸变对势垒层周期势的修正, 偏压对隧穿磁阻效应的影响来源于外加势场与势垒周期势的叠加. 因此, 在物理上, 两者均是通过改变势垒层势场进而影响隧穿磁阻效应的. 考虑到上述影响后, 根据 Bethe 理论、双束近似方法以及文献 [16–18], 自旋向上子能带到自旋向上子能带通

道的透射系数如下:

$$T_{\uparrow\uparrow}(\mathbf{k}) = \frac{1}{8k_z} \left\{ \mathbf{p}_+^z e^{i[\mathbf{p}_+^z - (\mathbf{p}_+^z)^*]d} + \mathbf{p}_-^z e^{i[\mathbf{p}_-^z - (\mathbf{p}_-^z)^*]d} + \mathbf{q}_+^z e^{i[\mathbf{q}_+^z - (\mathbf{q}_+^z)^*]d} + \mathbf{q}_-^z e^{i[\mathbf{q}_-^z - (\mathbf{q}_-^z)^*]d} + \mathbf{p}_+^z e^{i[\mathbf{p}_+^z - (\mathbf{p}_-^z)^*]d} + \mathbf{p}_-^z e^{i[\mathbf{p}_-^z - (\mathbf{p}_+^z)^*]d} - \mathbf{q}_+^z e^{i[\mathbf{q}_+^z - (\mathbf{q}_-^z)^*]d} - \mathbf{q}_-^z e^{i[\mathbf{q}_-^z - (\mathbf{q}_+^z)^*]d} + \text{c.c.} \right\}, \quad (2)$$

式中, \mathbf{k} 表示入射电子的波矢量, k_z 是其 z 方向分量; d 表示势垒层厚度; \mathbf{p}_\pm 和 \mathbf{q}_\pm 为透射电子波函数分波的波矢, 可表示为:

$$\mathbf{p}_\pm^z = [\mathbf{k}^2 - \mathbf{k}_h^2 \pm 2m\hbar^{-2}v(\mathbf{K}_h) + 2me\hbar^{-2}V_0]^{1/2}, \quad (3a)$$

$$\mathbf{q}_\pm^z = [\mathbf{k}^2 - (\mathbf{k}_h + \mathbf{K}_h)^2 \pm 2m\hbar^{-2}v(\mathbf{K}_h) + 2me\hbar^{-2}V_0]^{1/2}, \quad (3b)$$

其中, \mathbf{k}_h 是 \mathbf{k} 的面内分量; \mathbf{K}_h 是 \mathbf{R}_h 相应的倒格矢; m 是电子的质量, \hbar 是普朗克常量; e 是电子电荷; V_0 是外加偏置电压.

$$v(\mathbf{K}_h) = \left\{ 1 + 2\frac{\sigma}{1-\sigma} \cos \left[\mathbf{K}_h \cdot \alpha_0 \left(1 - \frac{T}{T_c} \right) \right] \right\} \times (1-\sigma)v_0(\mathbf{K}_h), \quad (4)$$

式中 σ 是缺陷浓度; α_0 为绝对零温下势垒层的应变; T_c 为回复温度, 它的物理含义是当温度 $T = T_c$ 时, 应变刚好消失; $v_0(\mathbf{K}_h)$ 是理想单晶势垒层原子势的傅里叶变换,

$$v_0(\mathbf{K}_h) = \Omega^{-1} \int d\mathbf{r} v(\mathbf{r}) e^{-i\mathbf{K}_h \cdot \mathbf{r}}, \quad (5)$$

其中 Ω 是单晶势垒层原胞的体积 $\Omega = (\mathbf{a}_1 \times \mathbf{a}_2) \cdot \mathbf{a}_3$.

由 $T_{\uparrow\uparrow}$, 可以得到自旋向上子能带到自旋向上子能带的电导 $G_{\uparrow\uparrow}$:

$$G_{\uparrow\uparrow} = \frac{e\hbar}{16\pi^3 m V_0} \int_{\sqrt{k_{F\uparrow}^2 - 2me\hbar^{-2}V_0}}^{k_{F\uparrow}} d\mathbf{k} \int_0^{\pi/2} d\theta \times \int_0^{2\pi} d\varphi k^3 \sin(2\theta) T_{\uparrow\uparrow}(\mathbf{k}, \theta, \varphi), \quad (6)$$

$$k_{F\uparrow} = \sqrt{2m\hbar^{-2}(\mu + \Delta)}, \quad (7)$$

其中 θ 表示 \mathbf{k} 和 e_z 之间的角度, φ 表示 \mathbf{k}_h 和 \mathbf{a}_1 之间的角度, $k_{F\uparrow}$ 表示自旋向上电子的费米波矢量, μ 和 Δ 分别表示铁磁电极的化学势和半交换劈裂能. 类似地, 可以得到 $G_{\downarrow\uparrow}$, $G_{\uparrow\downarrow}$ 以及 $G_{\downarrow\downarrow}$, 进而可以得到平行电导 $G_P = G_{\uparrow\uparrow} + G_{\downarrow\downarrow}$, 反平行电导 $G_{AP} =$

$G_{\uparrow\downarrow} + G_{\downarrow\uparrow}$, 以及 $TMR = (G_P/G_{AP}) - 1$. 下文将上述公式应用于单晶 MgO 磁性隧道结: 根据文献 [19], 此时 $K_h = 2.116 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$; 因为在已有文献中 MgO 势垒层厚度范围通常为 1—3 nm, 所以势垒层厚度 d 在本文中设定为 2 nm; 晶格畸变的相关参数选取为 $\sigma = 0.08$, $K_h \cdot \alpha_0 = \pi/3$ 以及 $T_c = 800 \text{ K}$.

3 讨论部分

首先, 计算了在不同的铁磁电极半交换劈裂能 Δ 下的温度-偏压相图, 结果如图 2 所示. 其中, 化学势 $\mu = 11 \text{ eV}$, 原子势的傅里叶变换 $v(K_h) = 15.3 \text{ eV}$. 图 2(a)—图 2(c) 分别对应于 $\Delta = 8 \text{ eV}$, $\Delta = 9 \text{ eV}$ 和 $\Delta = 10 \text{ eV}$. 从图 2 可以看出, TMR 最大的相点均处于低偏温区域, 这与已有的 MgO 磁性隧道结的实验结果相符 [20]. 此外, 由图 2(b) 和图 2(c) 可知, 当 $\Delta = 9 \text{ eV}$ 和 $\Delta = 10 \text{ eV}$ 时, TMR 分别在温度为 240 K 和 400 K 时出现了与最大值接近的极大值点. 在物理上, 由公式 (2)、公式 (3)、公式 (4) 和公式 (7) 可知, 这来源于隧穿电导随温度的振荡效应 [17]. 该结果表明可以通过调节铁磁电极的半交换劈裂能使 TMR 的极大值处于室温区域, 这将有利于磁性隧道结在室温下的实际应用.

其次, 计算了在不同的化学势 μ 下的温度-偏压相图, 结果如图 3 所示, 其中半交换劈裂能 $\Delta = 9 \text{ eV}$, 原子势的傅里叶变换 $v(K_h) = 15.3 \text{ eV}$. 图 3(a)—图 3(c) 分别对应 $\mu = 10 \text{ eV}$, $\mu = 11 \text{ eV}$ 和 $\mu = 12 \text{ eV}$. 从图 3 可以看出 TMR 最大的相点对应的偏压随化学势会显著变化, 在物理上, 由 (2) 式、(3) 式和 (7) 式可知, 这来源于化学势 μ 对透射系数振荡项相位的影响. 由上可知, 如果通过改变铁磁电极材料来改变化学势, 则可以令 MgO 磁性隧道结既能够在低偏压下应用于低功率器件, 又能够在高偏压下实现大的 TMR, 进而提高输出电压 ($V_{\text{out}} \equiv V \times (G_P - G_{AP})/G_P$) 来应用于高功率磁性隧道结器件.

最后, 计算了在不同 $v(K_h)$ 下的温度-偏压相图, 结果如图 4 所示. 其中, 化学势 $\mu = 11 \text{ eV}$, 铁磁电极半交换劈裂能 $\Delta = 9 \text{ eV}$. 图 4(a)—图 4(c) 分别对应于 $v(K_h) = 12.3 \text{ eV}$, $v(K_h) = 15.3 \text{ eV}$ 和 $v(K_h) = 18.3 \text{ eV}$. 从图 4 可以看出, TMR 的相图

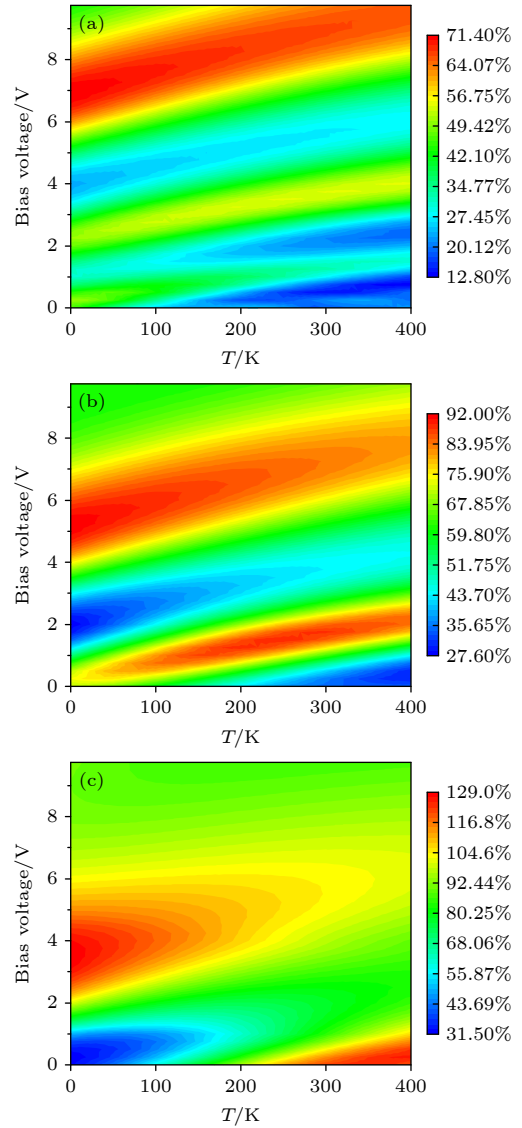


图 2 不同铁磁电极半交换劈裂能 Δ 下的温度-偏压相图 (a) $\Delta = 8 \text{ eV}$; (b) $\Delta = 9 \text{ eV}$; (c) $\Delta = 10 \text{ eV}$

Fig. 2. Phase diagram of temperature and bias with variation of half the exchange splitting of the ferromagnetic electrodes Δ : (a) $\Delta = 8 \text{ eV}$; (b) $\Delta = 9 \text{ eV}$; (c) $\Delta = 10 \text{ eV}$.

显著依赖于 $v(K_h)$ 的变化. 这是因为, 根据 (2) 式、(3) 式和 (4) 式, 相比于半交换劈裂能 Δ 和化学势 μ , 透射系数对 $v(K_h)$ 的变化更敏感. 该结果说明, 如果将单晶 MgO 势垒层换作其他的单晶势垒层材料, 将会显著地改变 TMR 的温度-偏压相图. 因此, 势垒层材料的选择是优化磁性隧道结温度和偏压特性的重要因素.

由前文可知, 图 2(c) 中 TMR 极大的相点处于室温区域与低偏压区域, 即在本文选取的参数范围之内, $\Delta = 10 \text{ eV}$, $\mu = 11 \text{ eV}$, $v(K_h) = 15.3 \text{ eV}$ 最有利于 MgO 磁性隧道结的实际应用.

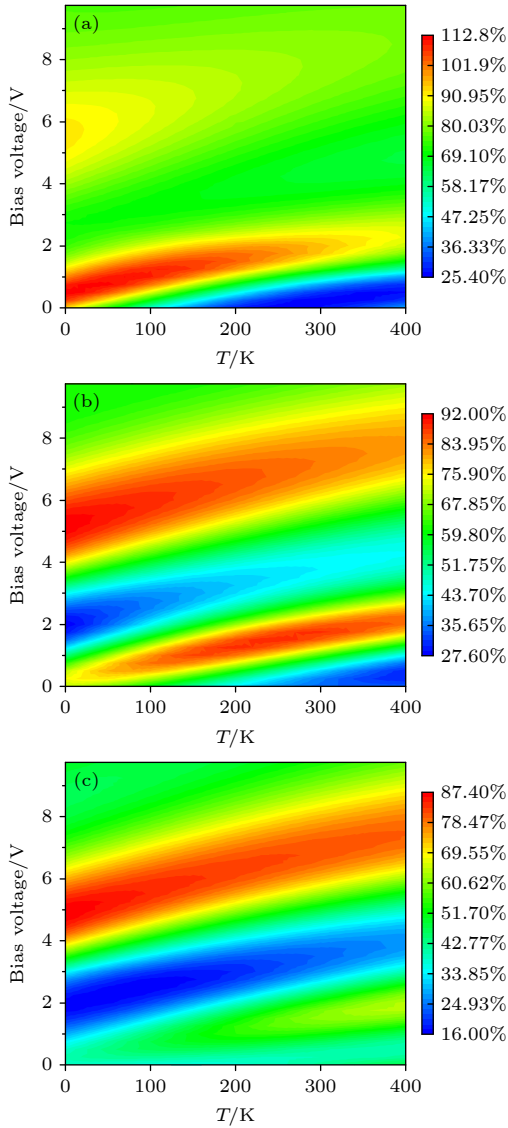


图 3 不同的化学势 μ 下的温度-偏压相图 (a) $\mu = 10$ eV; (b) $\mu = 11$ eV; (c) $\mu = 12$ eV
 Fig. 3. Phase diagram of temperature and bias with variation of chemical potential μ : (a) $\mu = 10$ eV; (b) $\mu = 11$ eV; (c) $\mu = 12$ eV.

4 结 论

本文基于传统光学衍射方法构建了适用于单晶势垒层磁性隧道结的理论. 该理论由于充分考虑了周期性势垒层对隧穿电子的衍射效应, 所以很好地计入了隧穿电子波的相干性. 另外, 此理论可以引入温度和偏压对隧穿磁阻效应的影响, 有利于同时处理温度效应和偏压效应. 利用上述理论, 分别计算了不同铁磁电极半交换劈裂能 Δ 、化学势 μ 和势垒层周期势 $v(\mathbf{K}_h)$ 下的 MgO 基磁性隧道结的温度-偏压 TMR 相图. 结果表明, 可以通过调节半

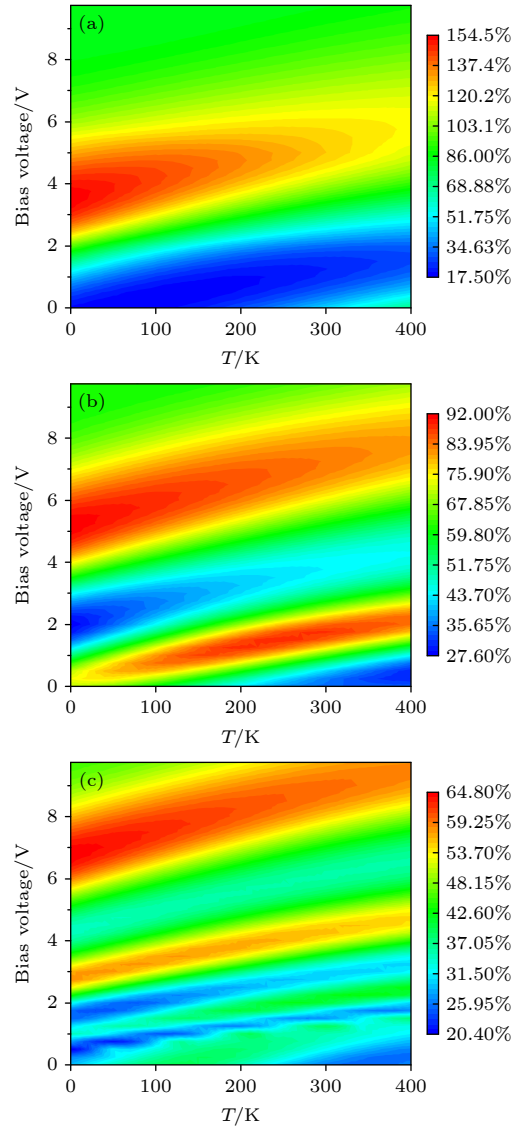


图 4 不同 $v(\mathbf{K}_h)$ 下的温度-偏压相图 (a) $v(\mathbf{K}_h) = 12.3$ eV; (b) $v(\mathbf{K}_h) = 15.3$ eV; (c) $v(\mathbf{K}_h) = 18.3$ eV
 Fig. 4. Phase diagram of temperature and bias with variation of $v(\mathbf{K}_h)$: (a) $v(\mathbf{K}_h) = 12.3$ eV; (b) $v(\mathbf{K}_h) = 15.3$ eV; (c) $v(\mathbf{K}_h) = 18.3$ eV.

交换劈裂能 Δ 使得 TMR 极大的相点处于室温区域中. 此外, 可以通过调节化学势 μ 改变 TMR 最大的相点对应的偏压. 同时, 研究发现, 温度-偏压 TMR 相图显著依赖于势垒层周期势 $v(\mathbf{K}_h)$. 上述结果说明, 通过调节铁磁电极半交换劈裂能 Δ 、化学势 μ 和势垒层周期势 $v(\mathbf{K}_h)$ 可以优化 MgO 基磁性隧道结的温度特性和偏压特性, 进而有利于 MgO 基磁性隧道结的实际应用.

参考文献

[1] Han X F 2008 *Physics* **37** 392 (in Chinese) [韩秀峰 2008 物理

- 37 392]
- [2] Yuasa S, Nagahama T, Fukushima A, Suzuki Y, Ando K 2004 *Nat. Mater.* **3** 868
- [3] Ikeda S, Hayakawa J, Ashizawa Y, Lee Y M, Miura K, Hasegawa H, Tsunoda M, Matsukura F, Ohno H 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 082508
- [4] Parkin S S P, Kaiser C, Panchula A, Rice P M, Hughes B S, Mahesh Y S H 2004 *Nat. Mater.* **3** 862
- [5] Ma Q L, Wang S G, Zhang J, Wang Y, Ward R C C, Wang C, Kohn A, Zhang X G, Han X F 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 052506
- [6] Faure-Vincent J, Tiusan C, Jouguelet E, Canet F, Sajieddine M, Bellouard C, Hehn M, MONTAIGNE F, Schuhl A 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 4507
- [7] Miao G X, Chetry K B, Gupta A, Bulter W H, Tsunekawa K, Djayaprawira D Xiao G 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 08T305
- [8] Ishikawa T, Marukame T, Kijima H, Matsuda K I, Uemura T, Arita M, Ymamoto M 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 192505
- [9] Yuasa S, Fukushima A, Kubota H, Suzuki Y, Ando K 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 042505
- [10] Hayakawa J, Ikeda S, Lee Y M, Matsukura F 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 232510
- [11] Hu B, Moges K, Honda Y, Liu H X, Uemura T, Yamamoto M, Inoue J, Shirai M 2016 *Phys. Rev. B* **94** 094428
- [12] Slonczewski J C 1989 *Phys. Rev. B* **39** 6995
- [13] Nozaki T, Hirohata A, Tezuka N, Sugimoto S, Inomata K 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 082501
- [14] Tanaka M A, Hori T, Mibu K, Kondou K, Ono T, Kasai S, Asaka T, Ionue J 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 073905
- [15] Wang S G, Ward R C C, Du G X, Han X F, Wang C, Kohn A 2008 *Phys. Rev. B* **78** 180411
- [16] Fang H, Zang X, Xiao M, Zhong Y, Tao Z 2020 *J. Appl. Phys.* **127** 163902
- [17] Fang H, Xiao M, Rui W, Du J 2018 *J. Magn. Magn. Mater.* **465** 333
- [18] Fang H, Xiao M, Rui W, Du J, Tao Z 2016 *Sci. Rep.* **6** 24300
- [19] Matsumoto R, Fukushima A, Nagahama T, Suzuki Y, Ando K, Yuasa S 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 252506
- [20] Kou X, Schmalhorst J, Thomas A, Reiss G 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 212115

Theoretical study on temperature-bias phase diagram of MgO-based magnetic tunnel junctions*

Lü Jie Fang He-Nan[†] Lü Tao-Tao Sun Xing-Yu

(College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

(Received 12 November 2020; revised manuscript received 15 December 2020)

Abstract

MgO-based magnetic tunnel junction is a hot issue in the field of spin electronic devices, and its temperature and bias voltage play quite an important role in practical applications. Therefore, it is desiderated to obtain the temperature-bias phase diagram of MgO-based magnetic tunnel junction. This paper develops a theory which is suitable for magnetic tunnel junctions with single crystal barrier. In this theory, the single crystal barrier is regarded as a periodic grating, and the tunneling process is treated by optical diffraction theory, so the coherence of the tunneling electron can be well taken into account. Most importantly, the theory can handle both the temperature effect and bias effect of MgO-based magnetic tunnel junctions. According to the present theory, the temperature-bias phase diagram of MgO-based magnetic tunnel junctions is calculated under different half the exchange splittings, chemical potentials and periodic potentials. The theoretical results show that the extreme phase point of tunneling magnetoresistance (TMR) can move to high temperature region through regulating half the exchange splitting Δ of ferromagnetic electrode of MgO-based magnetic tunnel junction. This will be beneficial to the applications of magnetic tunnel junctions at room temperature. Moreover, the chemical potential μ can change the bias corresponding to the maximum phase point of TMR. As is well known, the chemical potential will vary with the material of ferromagnetic electrode. Therefore, if the material of ferromagnetic electrode is chosen with a proper chemical potential, we can obtain a large TMR under high bias voltage. In other words, the output voltage can be considerably increased. This will be favorable for the preparation of high power devices. In addition, it is found that the phase diagram of TMR is significantly dependent on periodic potential $v(\mathbf{K}_h)$. As a result, the effects of temperature and bias voltage in the MgO-based magnetic tunnel junctions can be optimized by regulating half the exchange splitting Δ , chemical potential μ , and periodic potential $v(\mathbf{K}_h)$. The present work provides a solid theoretical foundation for the applications of MgO-based magnetic tunnel junctions.

Keywords: magnetic tunnel junctions, tunneling magnetoresistance, effect of temperature, effect of bias voltage

PACS: 73.43.Qt, 73.43.Jn, 73.50.-h

DOI: 10.7498/aps.70.20201905

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11704197).

[†] Corresponding author. E-mail: fanghn@njupt.edu.cn