

# 铁磁多层膜中的力致磁电阻效应\*

许小勇 钱丽洁 胡经国†

(江苏扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225002)

(2008 年 5 月 12 日收到, 2008 年 8 月 14 日收到修改稿)

通过研究外应力场下铁磁多层膜系统中的自旋结构, 讨论了系统磁电阻对外应力的依赖关系. 结果表明, 外应力能够诱发磁电阻效应, 且其磁电阻紧密依赖于外应力的方向和大小. 一般地对铁磁性层间耦合, 其磁电阻与外应力之间的关系紧密地依赖于两铁磁层的磁致伸缩系数以及磁晶各向异性之差异. 具体地, 大小一定的外应力由磁易轴向磁难轴旋转的过程中, 磁电阻先缓慢增大后急剧减小, 在磁难轴附近变化较敏锐, 并出现峰值. 外应力方向一定时, 磁电阻随应力的增大先敏锐增强后缓慢减小, 且应力方向偏离磁易轴越远, 变化趋势越显著. 特别地, 当外应力完全垂直于磁易轴时, 应力大小的变化会引起磁电阻翻倍. 而外应力场介于  $8\pi M/5 \leq H_A \leq 18\pi M/5$  时, 磁电阻会随应力的旋转单调上升, 并在磁难轴附近急剧增强, 产生 GMR 效应. 对反铁磁性层间耦合, 其 GMR 效应对应力大小和方向的响应近似地相反于铁磁性层间耦合情形.

关键词: 铁磁/非磁/铁磁三层膜, 自旋结构, 磁电阻, 应力场

PACC: 7570, 7580, 7570K, 7540M

## 1. 引言

自 Baibich 等人在 Fe/Cr 多层膜中发现了巨磁电阻(GMR)效应<sup>[1]</sup>以来, 特别是在自旋阀结构<sup>[2,3]</sup>得到广泛应用之后, 磁性多层膜的磁电阻效应已经被广泛应用到磁传感器件、磁读写、磁随机存储器及无接触磁控元件等技术领域中. 比如, 利用磁电阻效应制作的传感器, 具有灵敏度高、能耗低、体积小、可靠性高、温度特性好、工作频率高、耐恶劣环境能力强以及易与数字电路匹配等优点<sup>[4]</sup>, 现已经成为传感器家族中的后起之秀. 因此, 磁电阻效应的研究已成为凝聚态物理和材料科学领域中的研究热点之一.

多层磁薄膜的磁电阻依赖于相邻磁薄膜层中磁化强度的相对取向, 相邻的两层膜中磁化强度如反平行排列, 磁电阻达最大, 如果平行排列, 则其磁电阻最小<sup>[1,4]</sup>. 为此, 通常可以使用磁场调控磁电阻, 实现电信号的存储、读取等. 最近, 多铁材料备受关注, 因为利用其电磁耦合作用可以实现电场调控磁电阻. 然而, 在实际应用中, 广泛需要对力学信号的储存、读取及传输等, 因此, 本文旨在研究外应力能否调制磁电阻. 目前, 人们已经对外应力场下多层磁薄

膜中的铁磁共振以及磁化性质等方面做了讨论<sup>[5-8]</sup>, 但对应力场所调制的磁阻效应的研究尚缺乏. 实验<sup>[9]</sup>和理论<sup>[6]</sup>都已证实外应力场可以改变磁薄膜中的磁化取向, 特别是最近的实验<sup>[10]</sup>发现, 以柔软的、高弹性的聚酰亚胺为衬底可以将外应力很好地注入到磁性多层膜中. 此外, 铁磁/非磁/铁磁三层膜结构是 GMR 自旋阀的核心结构. 因此, 本文旨在研究铁磁/非磁/铁磁三层膜系统中磁电阻与外应力之间的关系, 进而讨论铁磁多层膜中的力致磁电阻效应.

## 2. 模型

考虑两层铁磁性材料通过中间非磁层耦合而成的体系, 其中间非磁层可以实现两铁磁层间交换耦合的调节<sup>[11]</sup>. 假定  $x-y$  平面位于薄膜平面内,  $z$  轴垂直于薄膜平面, 如图 1 所示.  $M_A, M_B$  分别为两铁磁层的磁化强度(为简化起见, 令  $M_A = M_B = M$ ). 采用球坐标系,  $\theta, \varphi$  分别代表磁化方向与  $z$  轴、 $x$  轴之夹角, 习惯上分别称之为极角和方位角, 其中  $M_A$  方向由  $\theta_A$  和  $\varphi_A$  标定,  $M_B$  由  $\theta_B$  和  $\varphi_B$  标定, 应力方向由

\* 国家自然科学基金(批准号: 310347118)和江苏省高校自然科学基金(批准号: 2006KJB140133, 2007KJD140241)资助的课题.

† E-mail: jghu@yzu.edu.cn, hujgyz@263.net

$\theta_\sigma$  和  $\varphi_\sigma$  标定. 考虑磁薄膜中的单轴各向异性、应力磁弹性能以及磁薄膜间界面耦合等, 则单位体积内系统的自由能可表示为

$$E = \sum_{i=A}^B \left[ -\frac{3}{2} \lambda_i \sigma_i \cos^2(\varphi_\sigma - \varphi_i) + K_{\text{ueffi}} \sin^2 \theta_i + K_{\text{upi}} \sin^2 \theta_i \sin^2 \varphi_i \right] - J \cos(\varphi_A - \varphi_B), \quad (1)$$

其中  $i = A, B$ , 求和式中的三项分别为两铁磁层的应力能、有效磁晶各向异性能以及平面内单轴磁晶各向异性能, 最后一项为两铁磁层间的交换耦合能. 式中  $\lambda_i$  为第  $i$  铁磁层的磁致伸缩系数,  $\sigma_i$  为应力强度 ( $\sigma_A = \sigma_B = \sigma$ );  $K_{\text{ueffi}}$  为第  $i$  层铁磁材料的有效磁晶各向异性常数, 定义为  $K_{\text{ueffi}} = K_{\text{ui}} - 2\pi M_i^2$ , 包括形状各向异性和平面外单轴各向异性,  $K_{\text{ui}}$  是相应的各向异性常数;  $K_{\text{upi}}$  为第  $i$  层铁磁层在  $x$ - $y$  平面内的单轴磁晶各向异性常数;  $J$  为界面耦合常数,  $J > 0$  代表层间铁磁性耦合,  $J < 0$  代表层间反铁磁性耦合.

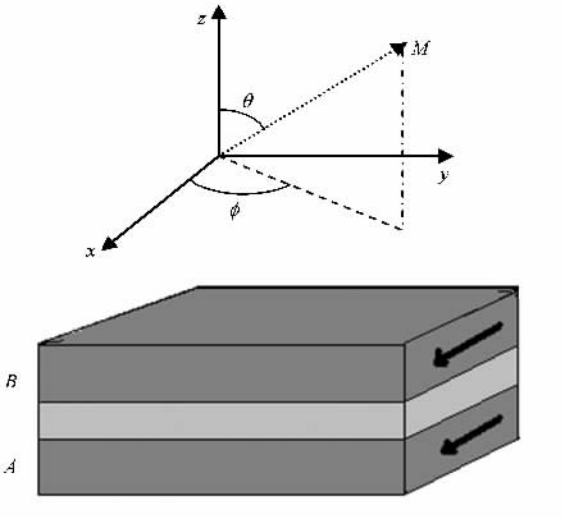


图1 铁磁/非磁/铁磁三层膜结构示意图

根据平衡方程, 即  $\frac{\partial E}{\partial \theta_i} = 0$ ,  $\frac{\partial E}{\partial \varphi_i} = 0$ , 发现  $\theta_A = \theta_B = 90^\circ$  是方程的解, 表明磁化强度  $M_i$  在薄膜平面内. 系统平衡态的能量为

$$\frac{E}{M} = \sum_{i=A}^B \left[ -\frac{3}{2} \lambda_i H_\sigma \cos^2(\varphi_\sigma - \varphi_i) + \frac{1}{2} H_{\text{ueffi}} + \frac{1}{2} H_{\text{upi}} \sin^2 \varphi_i \right] - H_e \cos(\varphi_A - \varphi_B), \quad (2)$$

且  $\varphi_i$  由下面两个方程决定:

$$\frac{\partial E}{\partial \varphi_A} = -\frac{3}{2} \lambda_A H_\sigma \sin 2(\varphi_\sigma - \varphi_A) + \frac{1}{2} H_{\text{upA}} \sin 2\varphi_A + H_e \sin(\varphi_A - \varphi_B) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial E}{\partial \varphi_B} = -\frac{3}{2} \lambda_B H_\sigma \sin 2(\varphi_\sigma - \varphi_B) + \frac{1}{2} H_{\text{upB}} \sin 2\varphi_B - H_e \sin(\varphi_A - \varphi_B) = 0 \quad (4)$$

其中参数  $H_\sigma = \frac{\sigma}{M}$ ,  $H_{\text{ueffi}} = \frac{2K_{\text{ueffi}}}{M}$ ,  $H_{\text{upi}} = \frac{2K_{\text{upi}}}{M}$ ,  $H_e = \frac{J}{M}$ .

根据方程(3)和(4)可以得到两铁磁层磁化强度的取向角  $\varphi_A, \varphi_B$ , 进而获得两铁磁层磁化取向之夹角  $\Delta\varphi$  随外应力场  $H_\lambda$  大小和方向的变化关系. 实验与理论研究<sup>[12,13]</sup>表明, 理想情况下, 磁性多层膜的磁电阻与相邻磁性层磁化取向之夹角  $\Delta\varphi$  之间的关系, 对  $J > 0$ ,

$$R(\Delta\varphi) = R^P + \Delta R \sin^2(\Delta\varphi/2), \quad (5)$$

对  $J < 0$ ,

$$R(\Delta\varphi) = R^A - \Delta R \cos^2(\Delta\varphi/2), \quad (6)$$

因此, 相应的磁电阻率分别为

$$MR = \frac{R(\Delta\varphi) - R^P}{R^P} = \frac{\Delta R}{R^P} \sin^2(\Delta\varphi/2), \quad (7)$$

或

$$MR = \frac{R(\Delta\varphi) - R^A}{R^A} = -\frac{\Delta R}{R^A} \cos^2(\Delta\varphi/2). \quad (8)$$

其中  $R^P$  为磁化方向平行时系统磁电阻;  $R^A$  为磁化方向反平行时系统磁电阻; 其中  $\Delta R$  为系统磁电阻最大变化量, 即  $\Delta R = R^A - R^P$ . 因此, 通过(3)–(8)式, 可以讨论磁电阻与外应力、磁各向异性以及磁致伸缩系数等之间的关系.

### 3. 结果分析和讨论

我们首先研究铁磁/非磁/铁磁三层膜系统中层间耦合为铁磁性耦合 ( $J > 0$ ) 情形下, 其 GMR 效应对应力大小和方向的响应. 数值计算中, 我们选取参数<sup>[5]</sup>  $4\pi M = 10$  (MA/m),  $H_{\text{upA}} = 1.0$  (MA/m),  $H_{\text{upB}} = 3H_{\text{upA}} = 3.0$  (MA/m),  $\lambda_A = 0.1$ ,  $\lambda_B = \lambda_A = 0.1$ ,  $H_e = 0.1$  (MA/m).

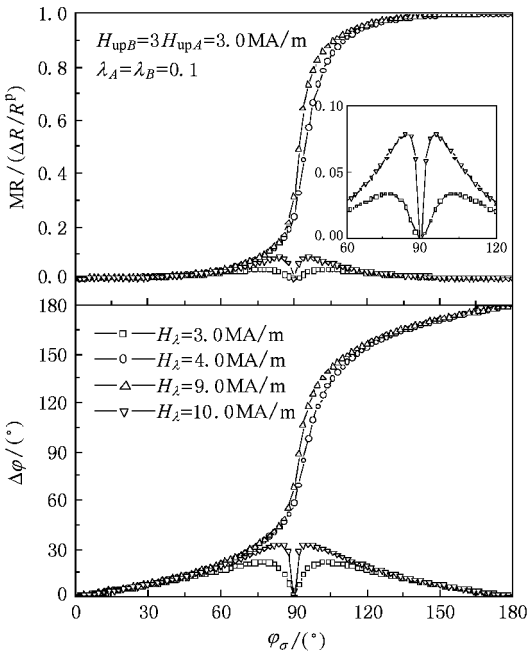


图2 不同应力场值  $H_\lambda$  的情况下,两铁磁层磁化取向之夹角  $\Delta\varphi$  和系统磁电阻率 MR 随外应力角度  $\varphi_\sigma$  的变化关系

图2 描绘了不同应力场值  $H_\lambda$  的情况下,两铁磁层磁化强度夹角  $\Delta\varphi$  和系统磁电阻率(MR)随外应力角度  $\varphi_\sigma$  的变化关系.在外应力从系统易轴( $x$ )方向连续旋转  $180^\circ$  的过程中,两铁磁层磁化强度的夹角变化分为两种情形.对于  $8\pi M/5 \leq H_\lambda \leq 18\pi M/5$

的情况  $\Delta\varphi$  随  $\varphi_\sigma$  的增大而增大,当  $\varphi_\sigma$  旋转到  $180^\circ$  时  $\Delta\varphi$  达到最大值,即  $180^\circ$ .在  $H_\lambda < 8\pi M/5$  或  $H_\lambda > 18\pi M/5$  的情况下  $\Delta\varphi$  发生两次对称的恢复行为,在  $\varphi_\sigma = 90^\circ$  附近出现最大值  $\Delta\varphi_{\max}$ ,变化相对急剧.从 MR 随外应力角度  $\varphi_\sigma$  的变化关系,我们可以发现:如果  $H_\lambda < 8\pi M/5$  或  $H_\lambda > 18\pi M/5$ ,MR 随  $\varphi_\sigma$  发生对称的非单调性变化.在应力从易轴旋转  $90^\circ$  的过程中,MR 先缓慢增大后快速恢复,并在磁难轴附近出现峰值.当外应力旋转到  $90^\circ$  时,MR 恢复到初始值.如果  $8\pi M/5 \leq H_\lambda \leq 18\pi M/5$ ,MR 随  $\varphi_\sigma$  的增大而单调上升,产生 GMR 效应,且在系统难轴附近,MR 最敏感,当外应力旋转到  $180^\circ$  时,MR 达到最大值.

为了研究磁性能参量(如各向异性常数、磁致伸缩系数等)对磁电阻的应力方向相关性的影响,我们分析了磁致伸缩系数不同的情况下,磁化取向之夹角以及磁电阻随外应力方向的变化关系.如图3所示,保持两铁磁层单轴各向异性  $H_{\text{up}B} = 3H_{\text{up}A} = 3.0\text{MA/m}$  不变,  $\lambda_B$  分别取  $0.5\lambda_A, 2\lambda_A$ .结合图2,我们发现:随着  $\lambda_B/\lambda_A$  的减小,产生 GMR 效应的应力大小范围变大,小端临界值恒为  $8\pi M/5$ (即  $4.0\text{MA/m}$ ),大端临界值随  $\lambda_B/\lambda_A$  的减小而增大.比如,图3(a)产生 GMR 效应的  $H_\lambda$  的范围为  $8\pi M/5 \leq H_\lambda \leq 38\pi M/5$ ,图2 产生 GMR 效应的  $H_\lambda$  范围为  $8\pi M/5 \leq H_\lambda \leq 18\pi M/5$ .此外,我们还注意到:随着  $\lambda_B/\lambda_A$  与

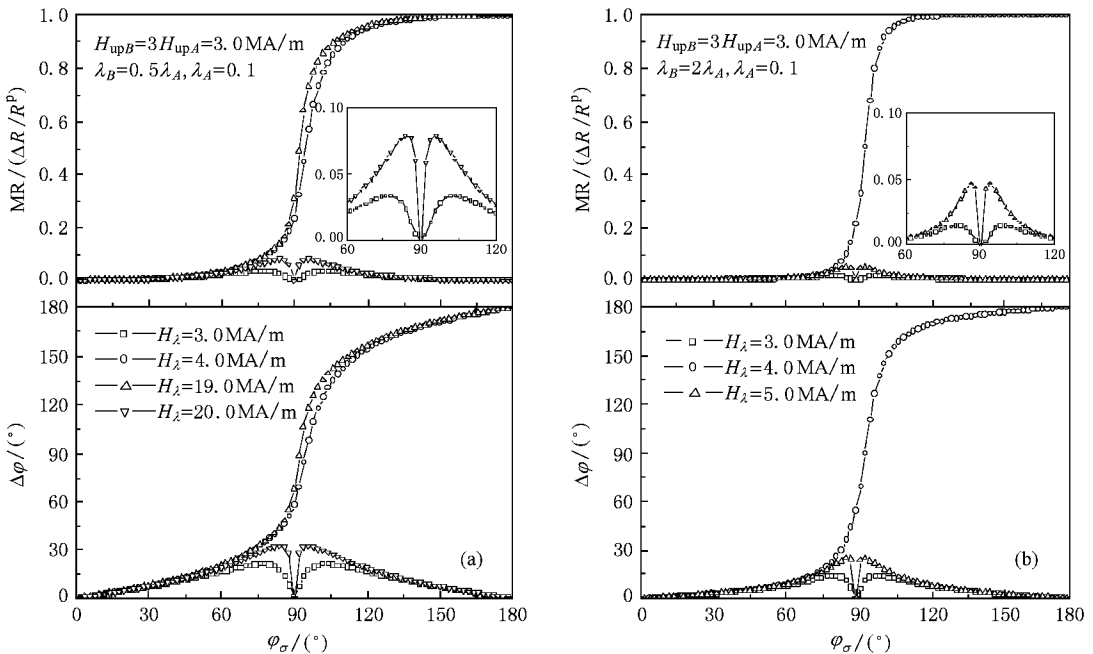


图3 不同应力场值  $H_\lambda$  的情况下,两铁磁层磁化取向之夹角  $\Delta\varphi$  和系统磁电阻率 MR 随外应力角度  $\varphi_\sigma$  的变化关系.两铁磁层的单轴各向异性能为  $H_{\text{up}B} = 3H_{\text{up}A} = 3.0\text{MA/m}$  不变,磁致伸缩系数分别取(a)  $\lambda_B = 0.5\lambda_A = 0.05$  (b)  $\lambda_B = 2\lambda_A = 0.2$

$H_{\text{up}B}/H_{\text{up}A}$  差距的扩大, MR 随应力方向的变化关系类似, 但其变化幅度明显增大, 即 MR 的灵敏度和最大值都显著提高, 但出现峰值  $\text{MR}_{\text{max}}$  的位置远离磁难轴. 比如  $H_{\lambda} = 3.0 \text{ MA/m}$  时, MR 峰值的位置和大小分别为图 3(a),  $\varphi_{\text{crit}} = 74^\circ$ ,  $\text{MR}_{\text{max}} = 0.43 \frac{\Delta R}{R^P}$ ; 图 2  $\varphi_{\text{crit}} = 76^\circ$ ,  $\text{MR}_{\text{max}} = 0.034 \frac{\Delta R}{R^P}$ ; 图 3(b)  $\varphi_{\text{crit}} = 82^\circ$ ,  $\text{MR}_{\text{max}} = 0.015 \frac{\Delta R}{R^P}$ . 特别地, 如果  $\lambda_B/\lambda_A = H_{\text{up}B} = H_{\text{up}A}$ , 两铁磁层磁化取向之夹角  $\Delta\varphi$  随外应力的旋转不变, 其诱发的系统磁电阻恒为零.

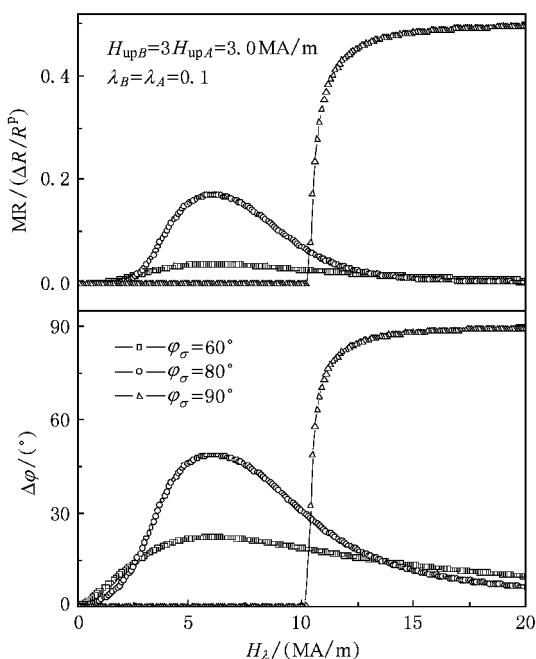


图 4 不同应力场方向的情况下, 两铁磁层磁化取向之夹角  $\Delta\varphi$  和系统磁电阻率 MR 随外应力大小  $H_{\lambda}$  的变化关系

图 2、图 3 均表明: 在磁易轴方向上的外应力不带来层间磁化取向之改变, 故不能诱发系统磁电阻. 而当外应力在磁难轴附近时, 将显著地诱导层间磁化取向的差异, 得到巨磁阻效应. 图 4 描绘了外应力方向偏离易轴  $60^\circ$ ,  $80^\circ$ ,  $90^\circ$  的情况下, 两铁磁磁化强度夹角  $\Delta\varphi$  和系统磁电阻 (MR) 随外应力场大小  $H_{\lambda}$  的变化关系. 当  $\varphi_{\sigma} = 60^\circ$  时,  $\Delta\varphi$  随  $H_{\lambda}$  的增大先快速增大后缓慢下降, 在某临界点 (此例  $H_{\lambda\text{crit}} = 6.0 \text{ MA/m}$ ) 出现  $\Delta\varphi_{\text{max}}$  峰值. 而  $\varphi_{\sigma} = 80^\circ$  时, 这种非单调变化的趋势更加明显,  $\Delta\varphi_{\text{max}}$  峰值变大, 但出现峰值的位置不变. 特别地, 当  $\varphi_{\sigma} = 90^\circ$  时, 随  $H_{\lambda}$  的增大,  $\Delta\varphi$  先恒为  $0^\circ$ , 当  $H_{\lambda}$  达到临界值  $H'_{\lambda\text{crit}}$  (此例  $H'_{\lambda\text{crit}} = 10.2$

MA/m) 时,  $\Delta\varphi$  突然急速上升为  $90^\circ$ , 并保持不变. 由磁电阻随应力大小的变化关系, 我们可以得到 MR 随  $H_{\lambda}$  的增大先敏锐增强后缓慢降低, 有峰值出现. 而且, 当应力方向趋近磁难轴时, MR 对应力大小  $H_{\lambda}$  的敏感度增强, 其峰值也显著增大. 特别地, 当外应力完全垂直于磁易轴时, 随应力大小  $H_{\lambda}$  的增大, 在临界点 (此例  $H'_{\lambda\text{crit}} = 10.2 \text{ MA/m}$ ) 处 MR 会从 0 突变为  $\frac{\Delta R}{2R^P}$ , 导致 GMR 效应.

同样, 为了研究磁性能参量 (各向异性常数、磁致伸缩系数) 对磁电阻的应力依赖性的影响, 我们亦分析了磁致伸缩系数不同的情况下, 磁化取向之夹角以及磁电阻随外应力大小的变化关系. 如图 5 所示, 保持两铁磁层单轴各向异性  $H_{\text{up}B} = 3H_{\text{up}A} = 3.0 \text{ MA/m}$  不变,  $\lambda_B$  分别取  $0.5\lambda_A$ ,  $2\lambda_A$ . 结合图 4, 我们发现, 随着  $\lambda_B/\lambda_A$  趋近  $H_{\text{up}B}/H_{\text{up}A}$  (此例为 3), MR 随  $H_{\lambda}$  的变化关系类似, 但 MR 变化的灵敏度和幅度明显减弱, 其峰值  $\text{MR}_{\text{max}}$  出现的位置向零点偏移. 比如  $\varphi_{\sigma} = 60^\circ$  的情况下,  $\text{MR}_{\text{max}}$  的位置及其大小分别图 5(a)  $H_{\lambda\text{crit}} = 8.6 \text{ MA/m}$ ,  $\text{MR}_{\text{max}} = 0.083 \frac{\Delta R}{R^P}$ ; 图 4  $H_{\lambda\text{crit}} = 6.0 \text{ MA/m}$ ,  $\text{MR}_{\text{max}} = 0.039 \frac{\Delta R}{R^P}$ ; 图 5(b)  $H_{\lambda\text{crit}} = 4.2 \text{ MA/m}$ ,  $\text{MR}_{\text{max}} = 0.006 \frac{\Delta R}{R^P}$ . 当  $\varphi_{\sigma} = 90^\circ$  时, 随着  $\lambda_B/\lambda_A$  比值与  $H_{\text{up}B}/H_{\text{up}A}$  比值差距的减小, MR 发生突变的应力临界值  $H'_{\lambda\text{crit}}$  也向零点漂移. 应当指出, 如果  $\lambda_B/\lambda_A = H_{\text{up}B}/H_{\text{up}A}$ ,  $\Delta\varphi$  将不随外应力大小  $H_{\lambda}$  和方向  $\varphi_{\sigma}$  变化, 恒为  $0^\circ$ , 即系统磁电阻不受应力大小  $H_{\lambda}$  和方向  $\varphi_{\sigma}$  的影响.

对于层间耦合为反铁磁性耦合 ( $J < 0$ ) 情形, 其铁磁/非磁/铁磁三层膜系统的磁电阻随外应力方向和大小的变化关系如图 6 所示. 其中图 6(a) 描绘了不同应力场值  $H_{\lambda}$  的情况下, 两铁磁层磁化强度夹角  $\Delta\varphi$  和系统磁电阻率 MR 随外应力角度  $\varphi_{\sigma}$  的变化关系. 图 6(a) 表明: 在外应力从系统易轴 ( $x$ ) 方向连续旋转  $180^\circ$  的过程中, 两铁磁层磁化之夹角  $\Delta\varphi$  的变化分为两种情形, 对于  $8\pi M/5 \leq H_{\lambda} \leq 18\pi M/5$  的情况,  $\Delta\varphi$  随  $\varphi_{\sigma}$  的增大而减小, 当  $\varphi_{\sigma}$  旋转到  $180^\circ$  时,  $\Delta\varphi$  达到最小值, 即  $0^\circ$ ; 在  $H_{\lambda} < 8\pi M/5$  或  $H_{\lambda} > 18\pi M/5$  的情况下,  $\Delta\varphi$  发生两次对称的恢复行为, 在  $\varphi_{\sigma} = 90^\circ$  附近出现最小值  $\Delta\varphi_{\text{mix}}$ , 变化相对急剧. 从 MR 随外应力角度  $\varphi_{\sigma}$  的变化关系可以发现: 层间反铁

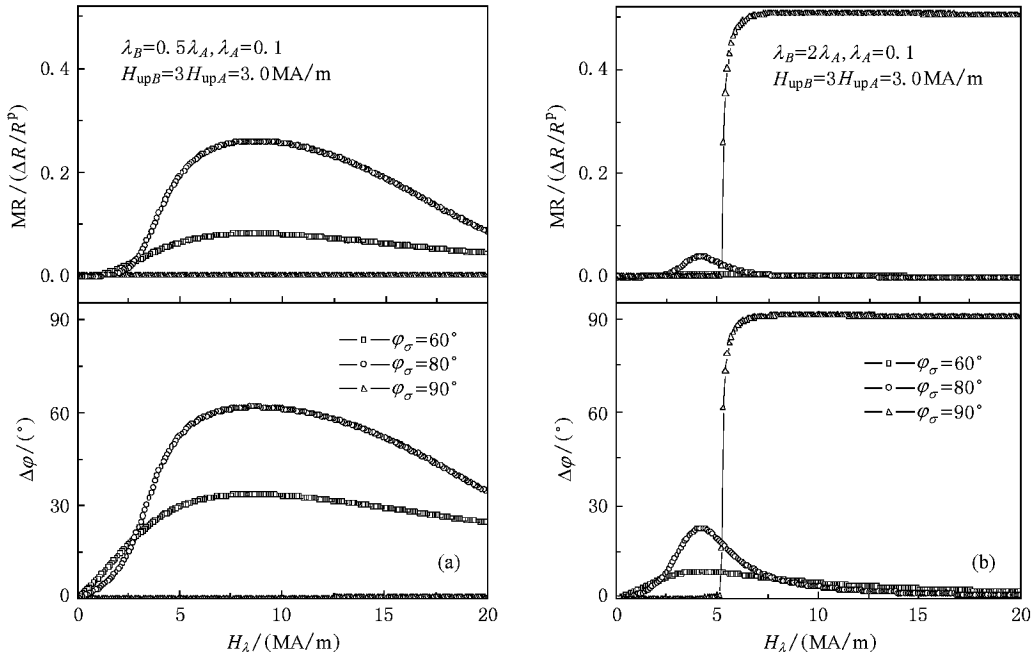


图 5 不同应力场方向的情况下,两铁磁层磁化取向之夹角  $\Delta\varphi$  和系统磁电阻率 MR 随外力大小  $H_\lambda$  的变化关系.两铁磁层的单轴各向异性为  $H_{upB}=3H_{upA}=3.0\text{ MA/m}$  不变,磁致伸缩系数分别取 (a)  $\lambda_B=0.5\lambda_A=0.05$  (b)  $\lambda_B=2\lambda_A=0.2$

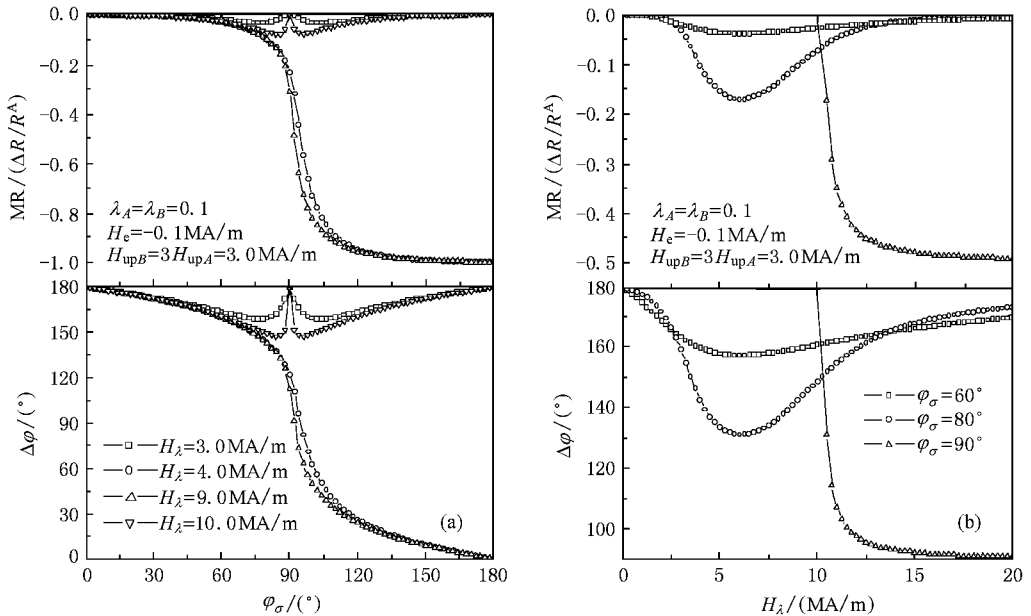


图 6 (a)不同应力场值  $H_\lambda$  的情况下,层间反铁磁性耦合的两铁磁层磁化取向之夹角  $\Delta\varphi$  和系统磁电阻率 MR 随外力角度  $\varphi_\sigma$  的变化关系 (b)不同应力场方向的情况下,层间反铁磁性耦合的两铁磁层磁化取向之夹角  $\Delta\varphi$  和系统磁电阻率 MR 随外力大小  $H_\lambda$  的变化关系

磁性耦合的系统磁电阻随应力方向的依赖性与层间耦合为铁磁性耦合的情形类似,MR 随  $\varphi_\sigma$  单调变化,产生 GMR 效应的应力大小范围都是  $8\pi M/5 \leq H_\lambda$

$\leq 18\pi M/5$ ;而且,同样在应力方向处于系统磁难轴附近时,MR 最敏感.图 6(b)描绘了外力方向偏离易轴  $60^\circ, 80^\circ, 90^\circ$  的情况时,反铁磁性耦合下两铁磁

层磁化夹角  $\Delta\varphi$  和系统磁电阻率 MR 随外应力场大小  $H_\lambda$  的变化关系. 当  $\varphi_\sigma = 60^\circ$  时,  $\Delta\varphi$  随  $H_\lambda$  的增大先快速减小后缓慢增大, 在某临界点(此例  $H_{\lambda\text{crit}} = 5.0 \text{ MA/m}$ )出现  $\Delta\varphi_{\text{max}}$  最小值. 而  $\varphi_\sigma = 80^\circ$  时, 这种非单调变化的趋势更加明显,  $\Delta\varphi_{\text{max}}$  极值变小, 但出现极值的位置不变. 特别地, 当  $\varphi_\sigma = 90^\circ$  时, 随  $H_\lambda$  的增大  $\Delta\varphi$  先恒为  $180^\circ$ , 当  $H_\lambda$  达到临界值  $H'_{\lambda\text{crit}}$  (此例  $H'_{\lambda\text{crit}} = 10.0 \text{ MA/m}$ ) 时,  $\Delta\varphi$  突然急速减小为  $90^\circ$ , 并保持不变. 研究结果还表明: 层间耦合为反铁磁性耦合情况下, 系统的磁电阻随应力大小的变化关系与层间耦合为铁磁耦合的情形也基本一致. 但 MR 随  $H_\lambda$  的增大先敏锐增强后缓慢降低, 有峰值出现. 而且, 当应力方向趋近磁难轴时, MR 对应力大小  $H_\lambda$  的敏感度增强, 其峰值也显著增大. 特别地, 当外应力完全垂直于磁易轴时, 随应力大小  $H_\lambda$  的增大, 在临界点(此例  $H'_{\lambda\text{crit}} = 10.0 \text{ MA/m}$ ) 处 MR 会从 0 突变为  $-\frac{\Delta R}{2R^A}$ , 导致 GMR 效应. 进一步研究还发现: 层间耦合为反铁磁性耦合的情形下, 磁性能参量(各向异性常数、磁致伸缩系数)对磁电阻的应力相关性的影响与铁磁性耦合的情形类似, 都是随着  $\lambda_B/\lambda_A$  与  $H_{\text{up}B}/H_{\text{up}A}$  之差距的减小, MR 随应力大小和方向的变化幅度减小, 如果  $\lambda_B/\lambda_A = H_{\text{up}B}/H_{\text{up}A}$ ,  $\Delta\varphi$  不随外应力大小或方向变化, 恒为  $180^\circ$ , 系统磁电阻不变. 因此, 对反铁磁性层间耦合, 其 GMR 效应对应力大小和方向的响应近似地相反于铁磁性层间耦合情形. 究其原因在于应力各向异性是单轴性的, 不是单方向的.

## 4. 结 论

本文通过研究外应力场下铁磁/非磁/铁磁三层膜系统中的自旋结构, 讨论了系统磁电阻对外应力的依赖关系. 结果表明, 外应力能够诱发磁电阻效应, 且其磁电阻紧密依赖于外应力的大小和方向. 一般地对铁磁性层间耦合  $J > 0$ , 如果两铁磁层的磁致伸缩系数比值与单轴各向异性常数比值相等, 系统磁电阻不受外应力场的影响, 不出现应力诱发的磁电阻效应. 当两铁磁层的磁致伸缩系数以及单轴各向异性常数不相等时, 大小一定的外应力由磁易轴向磁难轴旋转的过程中, 磁电阻先缓慢增大后急剧减小, 在磁难轴附近变化较敏锐, 并出现峰值; 当外应力偏离磁易轴方向一定时, 磁电阻随应力的增大先敏锐增强后缓慢减小, 出现极值, 且应力方向偏离磁易轴越远, 变化趋势越显著. 特殊地, 当外应力完全垂直于磁易轴时, 外应力大小的变化会诱导磁电阻从 0 到  $\frac{\Delta R}{2R^P}$  的突变. 如果外应力大小在一定范围内(如图 2 中  $8\pi M/5 \leq H_\lambda \leq 18\pi M/5$ ), 磁电阻会随外应力的旋转单调上升, 在磁难轴附近急剧增强, 产生 GMR 效应. 明显地, 两铁磁层的磁致伸缩系数以及单轴各向异性常数差异越大, 外应力诱导的磁电阻效应越显著, 磁电阻峰值增大, 但对应的峰值位置会发生漂移, 产生 GMR 效应的临界值也会发生变化. 对反铁磁性层间耦合  $J < 0$ , 其 GMR 效应对应力大小和方向的响应近似地相反于铁磁性层间耦合情形.

- [1] Baibich M N, Broto J M, Fert A, Nruyen Van Dau F, Petroff F, Eitenne P, Creuzet G, Friederich A, Chazelas J 1988 *Phys. Rev. Lett.* **61** 2472
- [2] Dieny B 1994 *J. Magn. Magn. Mat.* **136** 335
- [3] Schwieger S, Kienert J, Nolting W 2005 *Phys. Rev. B* **71** 174441
- [4] Cai J W 2006 *Progress in Physics* **26** 180 (in Chinese) [蔡建旺 2006 物理学进展 **26** 180]
- [5] Pan J, Tao Y C, Hu J G 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3032 (in Chinese) [潘 靖、陶永春、胡经国 2006 物理学报 **55** 3032]
- [6] Pan J, Hu J G 2006 *Phys. Lett. A* **358** 236
- [7] Özkaya B, Saranu S, Mohanan S, Herr U 2008 *Phys. Stat. Sol.*

(a) **205** 1876

- [8] Rong J H, Yun G H, Narsu B, Sprung D W L 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 083901
- [9] Dokupil S, Bootsman M T, Stein S, Lohndorf M, Quandt E 2005 *J. Magn. Magn. Mat.* **291** 795
- [10] Uhrmann T, Bär L, Dimopoulos T, Wiese N, Ruhrig M, Lechner A 2006 *J. Magn. Magn. Mat.* **307** 209
- [11] Unquiris J, Cellotta R J, Pierce D T 1991 *Phys. Rev. Lett.* **67** 140
- [12] Barnas J, Baksalary O, Fert A 1997 *Phys. Rev. B* **56** 6079
- [13] Chaiken A, Prinz G A, Krebs J J 1990 *J. Appl. Phys.* **67** 4892

# Magnetoresistance induced by the stress field in ferromagnetic multilayer<sup>\*</sup>

Xu Xiao-Yong Qian Li-Jie Hu Jing-Guo<sup>†</sup>

( College of Physics Science and Technology , Yangzhou University , Yangzhou 225002 , China )

( Received 12 May 2008 ; revised manuscript received 14 August 2008 )

## Abstract

By investigating the spin configuration in ferromagnetic multilayer under stress field , the dependence of magnetoresistance ( MR ) upon the stress field in the ferromagnetic multilayer is discussed. The stress field can induce MR , and the MR strongly depends on both the value and the direction of the stress field. Generally , for the case of  $J > 0$  , the stress field dependence of MR is closely related with the differences in magnetostriction and magnetocrystalline anisotropy between two ferromagnetic layers. When the stress field deviates from the magnetic easy axis towards the magnetic hard axis , the MR first increases slowly , and then decreases rapidly. For a given direction of stress field , the MR first increases rapidly , later decreases slowly with stress field increasing. Moreover , when the direction of stress field approaches that of the hard axis , the dependence of MR upon both the value and the direction of the stress field becomes obvious. Especially , if the direction of the stress field is perpendicular to the easy axis , change of MR can double its value with the stress field increasing. When the stress field  $H_\lambda$  meets the condition  $8\pi M/5 \leq H_\lambda \leq 18\pi M/5$  , MR increases monotonically , and the giant magnetoresistance ( GMR ) occurs. In the case of  $J < 0$  , the stress field dependence of GMR is almost similar to that in the case of  $J > 0$ .

**Keywords** : FM/NM/FM trilayers , spin configuration , magnetoresistance , stress field

**PACC** : 7570 , 7580 , 7570K , 7540M

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Sciences Foundation of China ( Grant . No. 10347118 ) and the Natural Science Foundation of College of Jiangsu Province ( Grant . Nos. 2006KJB140133 and 2007KJD140241 ).

<sup>†</sup> E-mail : jghu@yzu.edu.cn , hujgyz@263.net