

(CoFe)_{1-x}Ag_x 颗粒巨磁电阻薄膜的磁折射效应研究

钟智勇¹⁾ 刘爽²⁾ 张怀武¹⁾ 石玉¹⁾

¹⁾ 电子科技大学微电子与固体电子学院, 成都 610054)

²⁾ 电子科技大学光电信息学院, 成都 610054)

(2003 年 7 月 24 日收到, 2003 年 8 月 27 日收到修改稿)

在线非接触测试巨磁电阻效应对磁电子器件的工业化生产具有重要的意义. 用红外光谱研究了 (CoFe)_{1-x}Ag_x 颗粒薄膜的磁折射效应. 研究表明在红外波段, 一级近似可以认为巨磁电阻比值与磁折射变化率成正比, 可以利用磁折射效应作为在线非接触工具测量与自旋散射相关的巨磁电阻效应.

关键词: 巨磁电阻效应, 磁折射效应, 颗粒磁性薄膜

PACC: 7570P, 7820L, 7560J

1. 引 言

上世纪 80 年代末期, Baibich^[1] 发现 (Fe/Cr) 多层膜的磁电阻效应比坡莫合金大一个数量级, 并将其命名为巨磁电阻效应 (giant magnetoresistance effect, GMR), 立刻引起了全世界的轰动. 在随后的几年中, 国内外的物理学家和材料科学家在 GMR 效应的基础理论研究及实用上做了大量工作, 不仅在“铁磁金属/非铁磁金属”多层膜中发现了 GMR 效应, 而且也在“铁磁金属/非铁磁金属”的颗粒膜中发现同样存在 GMR 效应^[2], 目前基于 GMR 效应的磁电器件, 如 GMR 磁头和传感器已推向市场^[3,4].

但是对磁电阻效应的测量目前绝大多数均采用传统的四探针法, 这种方法需要探针与样品表面接触, 这对样品有一定的破坏性. 最近, Jacquet 和 Valet^[5] 从理论和实验上研究了磁折射效应 (magnetorefractive effect, MRE), 当加在 GMR 材料上的磁场改变时, GMR 材料的电导率发生改变, 此时在红外频段用红外光谱可以探测到该材料的反射率和透射率的变化, 此效应就是 MRE. 实验已经证明^[6-9], MRE 变化值和 GMR 变化值在长波频段是正相关的, 可以将 MRE 作为一种非接触测量技术测量 GMR. 以前的工作主要集中在研究 Co_{1-x}Ag_x^[6-10], 而 MRE 变化值与常规四探针测试法测量的直流磁

电阻变化值的关系是非常复杂的^[9], 仍需进行深入的理论和实验研究^[7], 所以本文开展新的颗粒薄膜系统 (CoFe)_{1-x}Ag_x 的 MRE 研究, 以期为进一步的理论研究积累实验数据. 同时研究非接触测试技术, 一方面可以避免对样品的损坏, 另一方面可以用于在线测试以监测产品的质量, 这对工业化大生产具有特别意义.

2. 磁折射效应理论

磁折射效应是基于这样的事实而用于探测与自旋相关的输运特性的: 当频率低于能带间跃迁的起始频率, 即处于红外频段时, 导电电子的能带内跃迁决定材料的介电性质, 这样 MRE 就可以作为探测手段检测自旋相关电导率材料中所呈现出的巨磁电阻等输运特性.

对颗粒巨磁电阻薄膜, Zhang 和 Levy^[11] 在计算自旋相关弛豫时间时提出了计算光电导率的模型

$$\alpha(\omega) = \sigma^{\uparrow}(\omega) + \sigma^{\downarrow}(\omega) \\ = \frac{\sigma^{\uparrow}(\omega = 0)}{1 + i\omega\tau^{\uparrow}} + \frac{\sigma^{\downarrow}(\omega = 0)}{1 + i\omega\tau^{\downarrow}}, \quad (1)$$

式中 $\sigma^{\uparrow}(\omega = 0)$, $\sigma^{\downarrow}(\omega = 0)$, τ^{\uparrow} 和 τ^{\downarrow} 分别是自旋相关的直流电导率和弛豫时间, ω 是角频率. 利用 (1) 式, 可以计算折射系数

$$n - ik = \sqrt{\epsilon_r - \frac{i\alpha(\omega)}{\epsilon_0\omega}}, \quad (2)$$

[†]E-mail: zzy@uestc.edu.cn 电话 028-83201440.

其中, ϵ_0 是自由空间的介电常数, ϵ_r 是与能带内跃迁相关的相对介电常数. 从(1)式和(2)式可以看出, 外加磁场会使光电导率 $\alpha(\omega)$ 变化, 从而引起复反射率的变化. 通过干涉矩阵法^[12], 透射和反射因子的相对变化可以确定, 并可计算对 s 和 p 极化光的 Fresnel 因子. 在计算中, 因为考虑了薄膜和薄膜/基片界面的多重反射, 因而也可以用于计算多层磁性薄膜的 MRE 效应^[10].

3. 实 验

(CoFe)_{1-x}Ag_x 颗粒薄膜采用 Co₅₀Fe₅₀ 和纯 Ag 在超高真空室中共电子束蒸发沉积, 基片是 Si(100)/SiO₂. 各组分的 (CoFe)_{1-x}Ag_x 颗粒薄膜厚度均为 150nm, 成膜速率以及本底真空见表 1. 薄膜的成分用俄歇电子能谱证实.

表 1 各组分 (CoFe)_{1-x}Ag_x 颗粒薄膜的蒸发速率

组分	本底真空 /Pa	Ag 蒸发速率 / (nm/s)	CoFe 蒸发速率 / (nm/s)
(CoFe) ₂₀ Ag ₈₀	6×10^{-6}	0.044	0.011
(CoFe) ₂₆ Ag ₇₄	6×10^{-6}	0.052	0.018
(CoFe) ₃₃ Ag ₆₇	4×10^{-6}	0.037	0.018
(CoFe) ₃₈ Ag ₆₂	4×10^{-6}	0.036	0.022
(CoFe) ₄₃ Ag ₅₇	4×10^{-6}	0.034	0.026
(CoFe) ₅₀ Ag ₅₀	6×10^{-6}	0.042	0.042

MRE 的测量用 Mattson RS10000 傅里叶变换红外光谱仪作为光源在 2.5—15 μm 测量, 其反射光用宽带 HgCdTe 探测器检测, 通过电磁铁外加磁场, 磁场大小分别是 $H = 0, 1.5, 0.87, 0.32\text{T}$, 其测量装置的示意图如图 1 所示.

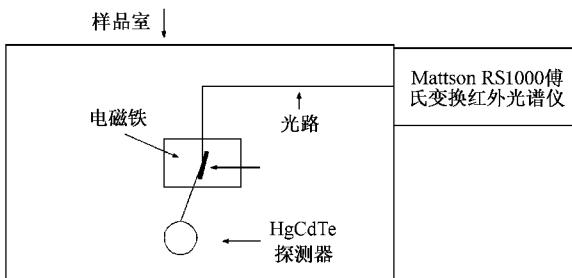


图 1 MRE 测试装置示意图

$$\text{MRE} = \frac{R(H) - R(H=0)}{R(H)} \times 100\%, \quad (3)$$

为了减少噪声的影响, 在每个磁场对应下的光谱都经过多次测量, 经过取平均得到. 同时, 为了便于比较, 我们也用了四探针法在恒电流情况下测量电阻, 其 GMR 的变化率为

$$\text{GMR} = \frac{V(H) - V(H=0)}{V(H)} \times 100\%, \quad (4)$$

式中 V 是在恒电流模式下, 给定磁场下的电压测量值.

4. 结果与讨论

图 2 是红外 s 极化光的反射率在不同外加磁场下随波长变化的典型图谱, 样品的成分是 (CoFe)₃₃Ag₆₇, 入射光与样品的法向成 65°角. 这里的反射光是检测的 s 极化的反射光, 这是由于在大角度入射时 s 极化的 MRE 效应比 p 极化的 MRE 效应大一个数量级, 有利于提高检测灵敏度^[11]. 由图 2 可见, 由于外加磁场造成的反射率随波长的增加而增加, 在观测的波长范围内 (2.5—15 μm) 没有观察到饱和现象, 当波长靠近 15 μm 时, 噪声增加, 这是由于探测器的放大信号能力减弱的原因.

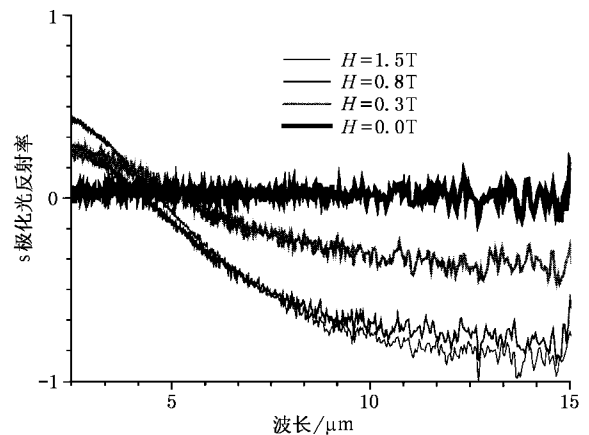


图 2 在不同磁场下 (CoFe)₃₃Ag₆₇ 的 s 极化光的反射率随波长的关系

图 3 是四探针测的各组分在 0.32T 和 0.87T 时的 GMR 比值与用红外光谱法测得的 MRE 变化值的比较, MRE 的值取自 $\lambda = 10\mu\text{m}$, 这一值与 Co_{1-x}Ag_x^[6-10] 系统取 $\lambda = 14\mu\text{m}$ 不一样, 这是由于 MRE 与颗粒薄膜的微观结构密切相关^[7]. 由图可以看出两点, 第一是在这两个外场作用下, GMR 与 MRE 随成

MRE 的变化率用下式计算:

分变化的趋势是一致的,第二就是 $(\text{CoFe})_{1-x}\text{Ag}_x$ 颗粒薄膜的 GMR 效应在 $x = 33$ 附近存在极值点. 对于 GMR 与 MRE 变化值正相关的关系,英国约克大学的学者^[10]认为可以将自旋相关反射考虑 Hagen-Rubens 关系式^[13]中得到圆满解释. 当薄膜材料为非磁性材料时,在红外波段,即当 $\omega\tau \ll 1$ 长波极限下,光常数为

$$n \approx k \approx \sqrt{\frac{1}{2\varepsilon_0\rho_0\omega}}, \quad (5)$$

式中 ρ_0 是直流电阻率. 当入射光为正入射时,反射率 R 可以用 Hagen-Rubens 关系表示

$$R \approx 1 - \sqrt{2\varepsilon_0\omega\rho_0}. \quad (6)$$

在(6)式中,将 R 对 ρ_0 微分,可以得到

$$\Delta R = -\sqrt{2\varepsilon_0\omega\rho_0} \times \frac{\Delta\rho}{\rho_0}. \quad (7)$$

从(7)式看出,在近似情况下,MRE 与 GMR 的变化值成正比,当然也与 ρ_0 和频率 ω 有关.

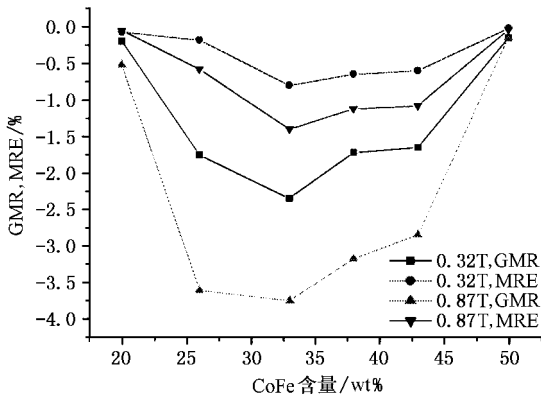


图3 GMR 与 MRE 比值随组分变化曲线

图4是没有考虑电子自旋时,用 Hagen-Rubens 关系式预测的理论结果与测量的 MRE 比较. 取 $\lambda = 10\mu\text{m}$, $H = 0.87\text{T}$. 从图4中可以看出,理论预测值与实验测试值随成分变化的曲线形状是相似的,即都在同一成分区出现极值,这表明我们取的 $\lambda =$

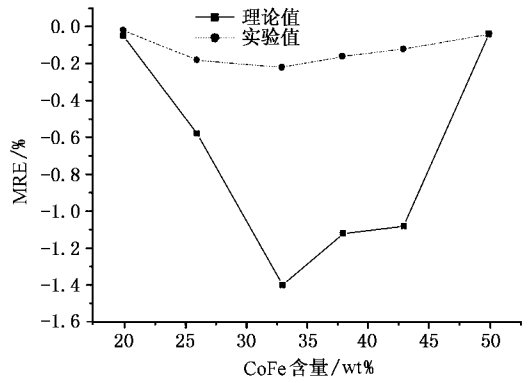


图4 MRE 的理论值与实验值的比较 ($H = 0.87\text{T}$)

$10\mu\text{m}$ 在长波极限内,用 MRE 表征 $(\text{CoFe})_{1-x}\text{Ag}_x$ 颗粒薄膜的 GMR 效应是适宜的. 在图4中出现的理论值与实验值相差较远的原因是在理论计算时忽略了自旋相关反射.

至于 $(\text{CoFe})_{1-x}\text{Ag}_x$ 颗粒薄膜的 GMR 效应在 $x = 33$ 附近存在极值点,这一点与其他体系的颗粒薄膜类似,这与颗粒膜的逾渗阈值有关^[14]. 当 CoFe 成分远小于逾渗阈值时,铁磁颗粒呈单畴并相互分离,自旋散射中心浓度随 CoFe 成分的增加而增加,导致 GMR 效应增加;当 CoFe 成分趋近逾渗阈值时,形成 CoFe 团簇,减少了磁表面散射中心,并可能导致多畴结构,这两种因素使 GMR 效应减弱^[15].

5. 结 论

1. 在一级近似下,可以认为 MRE 与 GMR 的变化率成正比,MRE 可以作为非接触探测工具在线测试与自旋相关的巨磁电阻效应;

2. $(\text{CoFe})_{1-x}\text{Ag}_x$ 颗粒薄膜的 GMR 效应在 $x = 33$ 附近存在极值点,极值点与颗粒膜的逾渗阈值有关.

感谢英国 University of York 物理系 Dr. Sarah Thmopson 提供的实验支持.

[1] Baibich M N et al 1988 *Phys. Rev. Lett.* **61** 2472
 [2] Cai J W, Zhao J G, Zhan W S and Shen B G 1997 *Progress in Physics* **17** 119 (in Chinese) 蔡建旺、赵见高、詹文山、沈保根 1997 物理学进展 **17** 119]

[3] Jiang H W et al 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1366 (in Chinese) 姜宏伟等 2002 物理学报 **51** 1366]
 [4] Chai C L et al 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1846 (in Chinese) 柴春林等 2002 物理学报 **51** 1846]

- [5] Jacquet J C , Valet T 1995 *Magnetic Ultrathin Films , Multilayers and Surface* , edited by E. Marinero (Materials Research Society , Pittsburgh) 8587
- [6] Uran S *et al* 1998 *Phys. Rev. B* **57** 2705
- [7] Kravets V G *et al* 2002 *Phys. Rev. B* **65** 054415
- [8] Gester M *et al* 1999 *J. Appl. Phys.* **85** 5045
- [9] Camplin J P *et al* 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 4846
- [10] Kravets V G , Bozec D and Matthew J A D 2002 *J. Appl. Phys.* **91**
- [11] Zhang S and Levy P M 1993 *J. Appl. Phys.* **73** 5315
- [12] Abeles F 1963 *Progress in Optics* , edited by E. Wolf (North-Holland , Amsterdam) , Vol. 11
- [13] Abeles F 1972 *Optical Properties of Solids* (Elsevier , Amsterdam)
- [14] Yan J S *et al* 1998 *J. Functional Materials and Devices* **4** 41 (in Chinese] 严健生 等 1998 *功能材料与器件学报* **4** 41]
- [15] Bisero D *et al* 2003 *J. Magn. Magn. Mater.* **262** 84

Study on magneto-refractive effects in (CoFe)_{1-x} Ag_x granular thin films

Zhong Zhi-Yong^{1)†} Liu Shuang²⁾ Zhang Huai-Wu¹⁾ Shi Yu¹⁾

¹⁾(College of Microelectronics and Solid-state Electronics , University of Electronic Science and Technology of China , Chengdu 610054 , China)

²⁾(College of Opto-electronic Information , University of Electronic Science and Technology of China , Chengdu 610054 , China)

(Received 24 July 2003 ; revised manuscript received 27 August 2003)

Abstract

It is very important for magnetoelectronic devices that the giant magnetoresistance (GMR) effect is measured on-line without electrode contact. The magnetorefractive effects (MRE) in granular (CoFe)_{1-x} Ag_x thin films are studied by infrared spectroscopy technology. The results show that in the first approximation the variation of refractivity of infrared beam is proportional to that of GMR measured by conventional four-probe method , and MRE can be used as an on-line probe method to detect spin dependent GMR effects in magnetic thin films.

Keywords : giant magnetoresistance effects , magnetorefractive effects , granular magnetic thin films

PACC : 7570P , 7820L , 7560J

[†]E-mail : zzy@uestc.edu.cn ; Tel 028-83201440.