

· 电子信息材料与器件 ·

## 巨磁电阻效应的非接触光学表征方法研究

钟智勇<sup>1</sup>, 刘爽<sup>2</sup>, 唐晓莉<sup>1</sup>, 石玉<sup>1</sup>, 张怀武<sup>1</sup>

(1. 电子科技大学电子薄膜与集成器件国家重点实验室 成都 610054; 2. 电子科技大学光电信息学院 成都 610054)

**【摘要】**根据自平均极限模型推导了在巨磁电阻薄膜中折射系数与自旋非对称因子的关系。用傅立叶变换红外光谱仪组建了磁折射效应测试装置,并测试了自旋阀多层薄膜(Si/PtMn/CoFe/Ru/CoFe/Cu/Co/NiFe)的磁折射效应。结果表明:在红外波段,可以用磁折射效应表征巨磁电阻效应。

**关键词** 巨磁电阻效应; 磁折射效应; 磁性材料; 自旋电子学  
**中图分类号** TN4; O48 **文献标识码** A

## An Optical Method of Contactless Measurement of Giant Magnetoresistance Effects in Magnetic Multi-Layer Films

ZHONG Zhi-yong<sup>1</sup>, LIU Shuang<sup>2</sup>, TANG Xiao-li<sup>1</sup>, SHI Yu<sup>1</sup>, ZHANG Huai-wu<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

2. School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** The dependence of refractive index on spin asymmetrical coefficient was deduced based on self-averaging limit model in magnetic thin film materials with giant magnetoresistance effects and a measurement system using Fourier transform infrared spectroscopy was constructed to measure magnetorefractive effects (MRE). The measurement results of spin-valve multilayers Si/PtMn/CoFe/Ru/CoFe/Cu/Co/NiFe showed that MRE can be used to characterize GMR effect of magnetic thin films in infrared region.

**Key words** giant magnetoresistance effect; magnetorefractive effect; magnetic materials; spin electronics

自旋电子学是凝聚态物理的研究热点之一。在该领域中,目前对磁电阻效应的测量大多采用传统的四探针法。该方法将探针与样品表面接触,对样品有一定的破坏性。文献[1]从理论和实验上研究了磁折射效应(Magnetorefractive Effect, MRE),当加在巨磁电阻(Giant Magnetoresistance, GMR)材料上的磁场改变时,GMR材料的电导率发生改变。在红外频段用红外光谱可以探测到材料的反射率或透射率的变化,可观测到MRE。理论研究表明,MRE的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,但MRE的变化值和GMR的变化值在长波频段时是正相关的<sup>[2]</sup>,可以将MRE作为一种非接触测量技术表征GMR。采用这种非接触测试技术,可避免对样品的损坏,用于在线测试监测产品质量,对工业化大生产具有特别意义。但已有的利用MRE

表征巨磁电阻效应的工作主要集中在颗粒磁性膜<sup>[3-4]</sup>,而对多层磁性薄膜的研究较少。本文针对自旋阀多层薄膜的磁折射效应展开研究。

### 1 测量原理

均匀金属的折射系数表示为<sup>[5]</sup>:

$$\begin{cases} n - ik = \sqrt{\epsilon_r - \frac{i\sigma(\omega)}{\epsilon_0\omega}} \\ \sigma(\omega) = \frac{\sigma_0}{1 + i\omega\tau} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\epsilon_0$  是自由空间的介电常数;  $\sigma_0$  是静态电导率;  $\epsilon_r$  是相对介电常数;  $\tau$  是弛豫时间,  $\omega$  是角频率。

而对于GMR材料,应考虑电子的自旋。对自旋向上 $\uparrow$ 与自旋向下 $\downarrow$ 的电子可以看成两个并联的独立通道分别考虑<sup>[6]</sup>。结合自平均极限(Self-Averaging

收稿日期: 2005-05-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90306015、60490296、60671029); 教育部科技重点资助项目(105151); 四川省青年学术带头人培养基金资助项目(04ZQ026-003)

作者简介: 钟智勇(1970-), 男, 博士, 教授, 主要从事纳米磁性材料及应用方面的研究。

Limit, SAL)模型<sup>[4]</sup>, 考虑自旋的电导率表示为:

$$\sigma_{\text{SAL}}(\omega) = \frac{\sigma_{0,\text{SAL}}}{1 + i\omega\tau_{\text{SAL}}} = \frac{\sigma_{0,\text{SAL},\uparrow}}{1 + i\omega\tau_{\text{SAL},\uparrow}} + \frac{\sigma_{0,\text{SAL},\downarrow}}{1 + i\omega\tau_{\text{SAL},\downarrow}} \quad (2)$$

对由铁磁金属(F)和非铁磁金属(N)组成的双层薄膜或颗粒薄膜, 铁磁金属中两种自旋有关的体弛豫时间表示为:

$$\tau_{\uparrow/\downarrow}^{(F)} = \frac{\tau^{(F)}}{1 \mp \beta} \quad (3)$$

式中  $\tau^{(F)}$  是铁磁金属中与自旋无关的体弛豫时间;  $\beta$  是铁磁金属中的体自旋非对称系数。同时考虑铁磁和非铁磁金属界面(I)存在自旋相关的散射, 则界面自旋相关弛豫时间分别为:

$$\tau_{\uparrow/\downarrow}^{(I)} = \frac{\tau^{(I)}}{1 \mp \gamma} \quad (4)$$

式中  $\tau^{(I)}$  是界面自旋无关的弛豫时间;  $\gamma$  是界面自旋非对称系数。

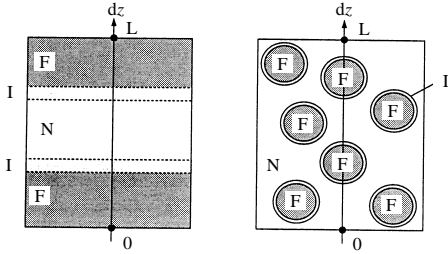


图1 三层膜和颗粒薄膜的自平均积分

根据文献[4]的模型, 在自平均系统中存在:

$$\frac{1}{\tau_{\text{SAL}}} = \frac{1}{L} \int_{\text{period}} \frac{dz}{\tau(z)} \quad (5)$$

式中  $L$  是多层膜中铁磁/非铁磁薄膜的周期或者是颗粒膜中的晶粒间距;  $dz$  是薄膜厚度方向的增量。利用式(5)分别对自旋上与自旋下积分(如图1所示), 得到:

$$\frac{1}{\tau_{\text{SAL}}^{\uparrow/\downarrow}} = \frac{1 \mp \beta_{\text{SAL}}}{\tau_{\text{SAL}}} \quad (6)$$

式中

$$\begin{cases} \frac{1}{\tau_{\text{SAL}}} = \frac{C_F - C_I/2}{\tau_F} + \frac{1 - C_F - C_I/2}{\tau_N} + \frac{C_I}{\tau_I} \\ \beta_{\text{SAL}} = \tau_{\text{SAL}} \left( \beta \frac{C_F - C_I/2}{\tau_F} + \gamma \frac{C_I}{\tau_I} \right) \end{cases} \quad (7)$$

式中  $C_F$  是铁磁薄膜在总薄膜体积中占的百分数;  $C_I$  是界面在总薄膜体积中占的百分数;  $\beta_{\text{SAL}}$  是自旋非对称常数。体和界面非对称自旋系数  $\beta$  和  $\gamma$  是在饱和时定义的<sup>[7]</sup>, 故当外磁场不足以使材料饱和时, 需

要考虑把它们乘以归一化的磁化强度  $M/M_s$ , 并将结果代入式(3), 得到:

$$\sigma_{\text{SAL}}(\omega) = \varepsilon_0 \omega_p^2 \frac{\tau_{\text{SAL}}}{1 + i\omega\tau_{\text{SAL}}} \times \left( 1 + \frac{\beta_{\text{SAL}}^2 (M/M_s)^2}{(1 + i\omega\tau_{\text{SAL}})^2 - \beta_{\text{SAL}}^2 (M/M_s)^2} \right) \quad (8)$$

式中  $\omega_p$  是等离子体频率。式(8)中, 括号中的第二项是与磁场有关的外磁场的变化。改变自旋上与下载流子的浓度, 从而改变电导率, 可使GMR材料的折射率发生改变。

将自旋相关散射<sup>[8]</sup>纳入Hagen-Rubens关系式<sup>[5]</sup>中, 在红外波段, 即当  $\omega\tau \ll 1$  的长波极限下, 光学常数为:

$$n \approx k \approx \sqrt{\frac{1}{2\varepsilon_0 \rho_0 \omega}} \quad (9)$$

式中  $\rho_0$  是直流电阻率。当入射光为正入射时, 反射率  $R$  可以用Hagen-Rubens关系表示为:

$$R \approx 1 - \sqrt{2\varepsilon_0 \omega \rho_0} \quad (10)$$

在式(10)中, 将  $R$  对  $\rho_0$  微分, 可以得到:

$$\Delta R = -\sqrt{2\varepsilon_0 \omega \rho_0} \times \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \quad (11)$$

从式(11)可看出, 在近似情况下,  $E_{\text{MRE}}$  与  $E_{\text{GMR}}$  的变化值成正相关, 当然也与  $\rho_0$  和频率  $\omega$  有关。

## 2 测量装置与方法

为了实现光谱的快速扫描和提高测试精度, 光源选用Mattson RS10000傅立叶变换红外光谱仪, 工作波长在2.5~15  $\mu\text{m}$ 。普通玻璃由于对红外光有强烈的吸收, 不适用于本系统, 故反射镜用镀银反射镜, 样品室的窗口用抛光的单晶溴化钾(KBr)制作, KBr在  $\lambda < 25 \mu\text{m}$  时是透明的。探测器用宽带铋碲汞 HgCdTe 探测器, 其工作在液氮温度。整个样品室是密封的, 由于水蒸汽 (<2.8  $\mu\text{m}$ , 3.8~5  $\mu\text{m}$ ) 和  $\text{CO}_2$  (2.9  $\mu\text{m}$ , 5.5  $\mu\text{m}$ ) 要吸收红外光。需经常用不含  $\text{CO}_2$  的干空气吹样品室以保持干燥。测量装置如图2所示。

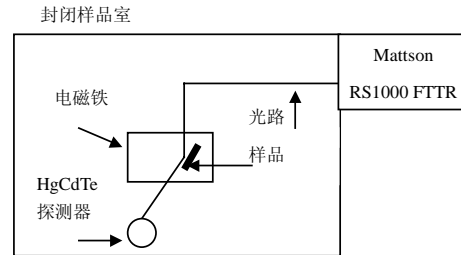


图2 测量装置示意图

为了减少噪声的影响, 以及减少与时间有关的

因素(如水蒸汽、CO<sub>2</sub>等)对测试结果的影响,提高测试精度,需对三种情况下的反射光谱进行测量:

(1) 没有加外磁场时的光谱 $R_1$ 。(2) 加外磁场时的光谱 $R_2$ 。(3) 外磁场撤销后的光谱 $R_3$ 。以上三种光谱,都需经过多次(大于5次)测量。设磁折射效应MRE的变化率表示为:

$$E_{\text{MRE}} = \frac{R_2 - (R_1 + R_3)/2}{R_2} \quad (12)$$

### 3 测量结果与分析

用图2所示的测试装置,测试自旋阀巨磁电阻多层膜的MRE效应。为了对比方便,采用传统的四探针法测量它们对应的GMR变化值。图3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,由于篇幅限制,本文仅给出正向偏置磁场下的情况。负向图谱与正向图谱类似。样品是自旋阀型GMR薄膜(结构为Si/PtMn/CoFe/Ru/CoFe/Cu/Co/NiFe),入射光与样品的法向成65°角。反射光是检测的s-极化的反射光,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<sup>[2]</sup>。由图3可见,自旋阀型多层膜的MRE在波长较小时,有正的峰值出现,而随着波长的增加,MRE效应由正变负,正是磁场改变自旋电子散射的结果<sup>[7]</sup>。

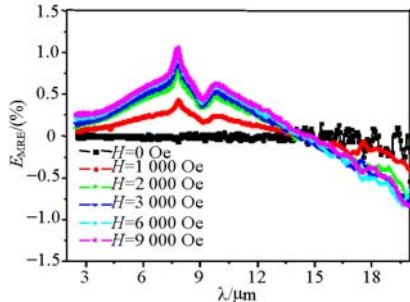


图3 自旋阀型多层薄膜的MRE效应与s-极化光波长的关系

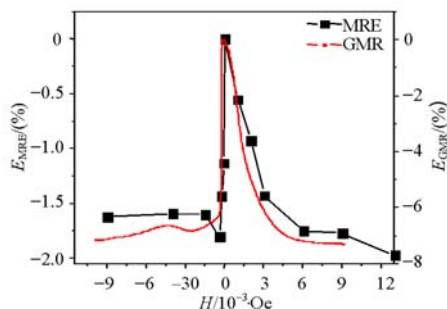


图4 自旋阀的MRE与GMR随磁场的变化关系

图4是自旋阀型巨磁电阻薄膜(结构为Si/PtMn/CoFe/Ru/CoFe/Cu/Co/NiFe)的MRE( $\lambda=10\ \mu\text{m}$ )与GMR随磁场变化的曲线,从图中可以看出MRE和GMR变化值虽然在数值上差别很大,但它们随外加磁场变化的曲线形状是一致的,说明在长波长频段内,两者具有正相关性,可以用MRE表征磁电阻效应。

### 4 结论

本文基于自平均极限模型推导了GMR材料中折射系数与自旋非对称因子的关系,根据理论结果,用傅立叶变换红外光谱仪组建了MRE测试装置,测量的结果表明在红外波段,可以用MRE表征GMR效应。理论推导过程表明,MRE与光的波长和自旋非对称因子有相当复杂的关系,这方面还有待深入的理论与实验研究。

本文的研究工作得到英国University of York大学Sarah Thompson博士提供的实验的支持,在此表示感谢。

### 参考文献

- [1] JACQUET J C, VALET T, Marinero E. Magnetic ultrathin films, multilayers and surface[M]. Pittsburgh : Materials Research Society of USA, 1995.
- [2] CAMPLIN J P, THOMPSON S M, Loranine D R, et al. Contactless measurement of giant magnetoresistance in thin films by infrared reflection[J]. J Appl Phys, 2000, 87(9): 4846-4848.
- [3] GESTER M, SCHLAPKA A, THOMPSON S M, et al. Contactless measurement of giant magnetoresistance in CoAg granular films using infrared transmission spectroscopy[J]. J Appl Phys, 1999, 85(8): 5045-5047.
- [4] ZHANG S, LEVY P M. Conductivity and magnetoresistance in magnetic granular films[J]. J Appl Phys, 1993, 73(10): 5315-5319.
- [5] ABELES F. Optical properties of solids[M]. Amsterdam: Elsevier, 1972.
- [6] CAMLEY R E, BARNAS J. Theory of giant magnetoresistance effects in magnetic layered structures with antiferromagnetic coupling[J]. Phys Rev Lett, 1989, 63: 664-667.
- [7] VALET T, FERT A. Theory of the perpendicular magnetoresistance in magnetic multilayers[J]. Phys Rev B, 1993, 48: 7099-7113.
- [8] KRAVETS V G, BOZEC D, MATTEW J A D. Calculation of the magnetorefractive effect in giant magnetoresistive granular films[J]. J Appl Phys, 2002, 91(10): 8587-8589.

编辑 熊思亮