锰酸盐薄膜光探测器的阻抗效应

孙 为[①] 赵 昆[①②*] 黄文齐[①] 何 萌[③] 吕惠宾[③]

(① 中国石油大学(北京)数理系, 北京 102249; ② 中国科学院国际材料物理中心, 沈阳 110016; ③ 北京凝聚态物理国家实验室, 中国科学院物理研究所, 北京 100080. * 联系人, E-mali: zhk@cup.edu.cn)

摘要 报道了由生长在倾斜$SrTiO_3$(001)基片上的$La_{0.67}Ca_{0.33}MnO_3$ 薄膜制备的光探测器. 在室温下, 当脉宽 20 ns 的 308 nm 紫外激光照射$La_{0.67}Ca_{0.33}MnO_3$薄膜时, 在样品两端会诱导出光生伏特信号. 为了减小测量回路对探测信号的影响, 系统研究了阻抗效应. 如果示波器的内阻与同轴信号传输电缆的阻抗匹配, 光伏信号脉冲近似为三角对称形状, 响应时间为光源的脉宽. 探测器的灵敏度与辐照能量有关, 在低能量时与辐照面积呈线性关系. 由于这种探测器既不需要外置偏压, 也不需要信号放大单元, 工艺简单, 因此利于实际应用与开发.

关键词 锰酸盐 薄膜 光探测器 阻抗效应

钙钛矿结构稀土锰氧化物涉及到电子强关联、多体、绝缘体-金属转变等许多凝聚态物理的基本问题, 包含多种相互作用的竞争[1~5]. 为了加深理解各种奇特效应产生的物理机制, 国内外学者采用了多种方法对这类材料进行了广泛的研究, 例如同位素效应, 电子顺磁共振, 中子衍射, 光学测量, 离子沟道测量, 高分辨率电子显微镜, 高压, 超声等.

由于锰氧化物局域自旋载流子的强交换耦合, 光照方法不仅可以影响体系的电荷结构、改变载流子浓度, 在不改变无序度的情况下研究体系的物性变化, 而且还可能引起体系中载流子自旋态的改变. 因此, 近年来, 稀土锰氧化物的物理特性与光辐射场的关系引起了研究者的极大关注[6~14]. 利用锁相放大与差分方法, Zhao等人[9]探索了$La_{0.67}Ca_{0.33}MnO_3$薄膜在 1.5 eV的飞秒脉冲激光辐射下感生的瞬态输运特性响应, 在排除了热辐射机制的影响后, 作者认为顺磁绝缘态的快速响应起源于Jahn-Teller小极化子的光致电离, 而在铁磁金属态, 由于光诱导磁激子使得载流子迁移率降低, 导致了光响应的慢弛豫特征. 之后, Averitt等人[10]研究了自旋涨落和声子对$La_{0.67}R_{0.33}MnO_3$ (R = Ca, Sr)电导率的贡献. 进一步的研究表明, 连续光照射能够在锰氧化物薄膜中感生出持久光电导现象, Dai等人[11~13]提出"光诱导铁磁团簇生长模型"来解释这一体系中的光诱导效应. 另外, Zhang等人[14]还在掺Co的层状钙钛矿结构锰氧化物$La_{1.2}Sr_{1.8}Mn_{1.8}Co_{0.2}O_7$ 薄膜中, 观察到与光照引起的Co^{3+}离子自旋态转变有关的光诱导效应.

前期工作中, 我们研究了$La_{0.67}Ca_{0.33}MnO_3$(LCMO)薄膜的超快光电效应, 在 25 ps激光脉冲的照射下, 薄膜两端感生电压信号的上升沿和半高宽分别达到 300 和 700 ps[15]. 为了减小测量回路对探测信号的影响, 本文中着重报道基于LCMO薄膜的光探测器的阻抗效应.

采用激光分子束外延技术将LCMO薄膜外延生长在斜切的$SrTiO_3$ 单晶基底上, 基片表面与$SrTiO_3$(001)面法向成10°倾角[6,12]. 如图1, 清晰明锐的反射式高能电子衍射(RHEED)条纹表明薄膜以层状二维外延生长, 具有很好的结晶性和光滑的表面. X射线衍射结果表明, 只有当探测方向偏移 10°时, 才能观测到$SrTiO_3$(001)和LCMO(001)的衍射峰, 表明LCMO 薄膜的确沿着基底的[001]轴方向生长, 具有

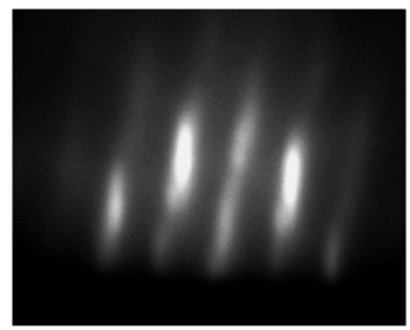

图 1 生长在 10°倾角 $SrTiO_3$ 单晶基底上的 LCMO 薄膜的 RHEED 衍射光斑

2007-06-21 收稿, 2007-07-30 接受

国家自然科学基金(批准号: 50672132, 60576015)和教育部科学技术重点项目(批准号: 107020)资助

单相结构.

为了研究光电效应，把样品切割成 3 mm×10 mm，并用铟在 LCMO 薄膜的倾角方向引出电极，用脉宽 20 ns 的紫外激光(波长 308 nm)作为光源，能量密度为 0.1 mJ·mm^{-2}，薄膜的辐照面积为 3 mm × 8 mm，用带宽为 500 MHz 的示波器测量薄膜长度方向上的表面感生电压. 对于高频测量，传输线和示波器的阻抗可以导致输出信号的失真. 因此，如图 2，我们在薄膜两端并联了一个负载 R_0，用来调制探测器的内阻. 图 2 中 R_T 表示示波器的内阻.

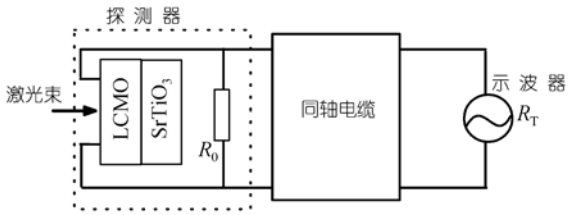

图 2 光生伏特信号测量系统示意图

图 3 描述了当样品两端并联不同阻值的 R_0 时测得的光生伏特脉冲波形，示波器的输入阻抗 R_T 设为 1 MΩ. 开路模式的峰值电压为 3.8 V, 100 Ω时为 1.0 V,

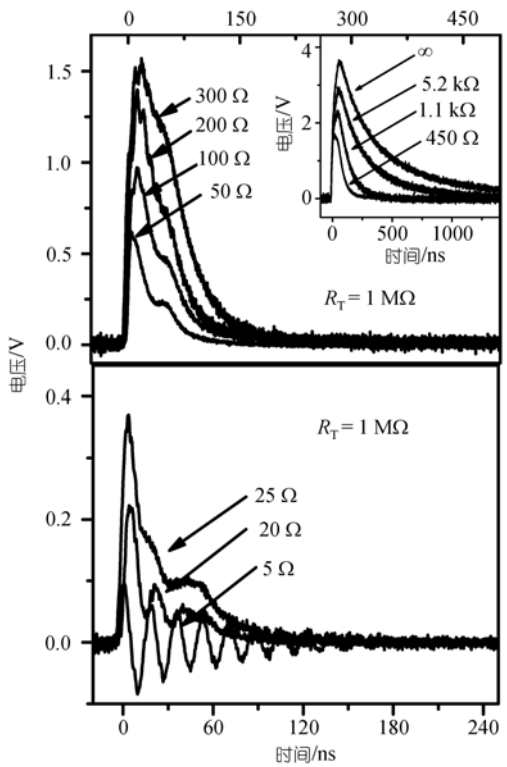

图 3 选择不同阻值的 R_0 时 LCMO 薄膜的光生伏特信号

20 Ω时下降为 0.23 V. 根据电路基本原理，可以知道，样品两端的实际感生电压由公式 $U_S = U_0(1+R_S/R_I)$计算可得，式中 R_I 为示波器的输入端阻抗，约等于 R_0，R_S 为样品内阻，U_0 为示波器的读数电压. 所以，随着 R_0 的减小，U_0 单调下降.

信号波形包括快速上升和缓慢衰减两个部分，缓慢的下降沿是和测量回路的时间常数 RC 有关的. 随着 R_0 的减小，信号的下降沿变得越来越快. R_0<5 Ω时，波形呈现振荡行为，周期为~20 ns. 这是由于测量回路的阻抗失配引起的. 当 R_T=50 Ω时，如图 4，信号波形为近乎对称的三角形状，上升沿为10 ns，说明传输回路的失配已经得到了抑制.

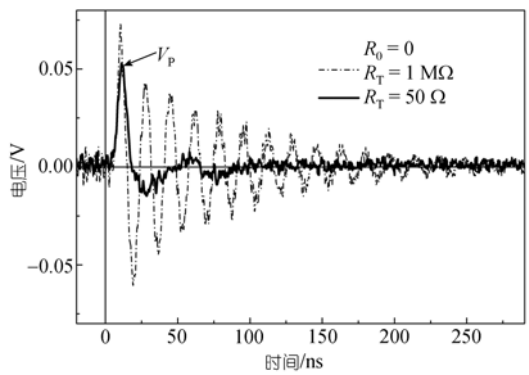

图 4 R_0 = 0, R_T = 50 Ω和 1 MΩ时 LCMO 薄膜的光生伏特信号

图 5(a)描述了辐照面积为 3 mm × 8 mm 的探测器的感生电压峰值 V_P 与辐照能量 E_i 的关系曲线，拟合得到 $V_P \propto 1-\exp(-E_i/E_0)$，式中取 E_0 = 75 mJ. 如图 5(b)，在低辐照能量时，感生电压峰值 V_P 与辐照长度 w(宽度为 3 mm)成线性关系.

我们进一步用波长 1.34 μm 的激光进行了实验，由于相应的光子能量 (0.925 eV)小于 LCMO 的能隙(~1 eV)，不能激发电子和空穴非平衡载流子，因此不能产生光生电压信号，说明我们观测到的光生伏特现象是一种光电效应. 另一方面，$SrTiO_3$ 晶体的禁带宽度为3.2 eV，在388 nm有一个吸收边，因此，308 nm 的紫外光可以在 $SrTiO_3$ 中激发出载流子. 但是，在同样的测试条件下，$SrTiO_3$ 晶体的光生电压比 LCMO 薄膜要小两个数量级，因此，我们观测到的光生伏特现象主要来自于 LCMO 薄膜.

综上所述，基于 LCMO 薄膜的光探测器的阻抗效应研究表明，当示波器的输入阻抗与同轴信号

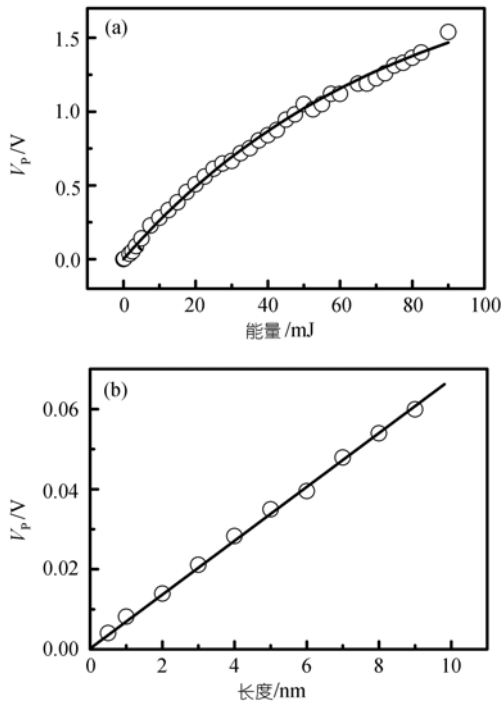

图 5 感生电压峰值与辐照能量的关系

(a) 辐照面积为 3 mm × 8 mm 的探测器的感生电压峰值 V_P 与辐照能量 E_i 的关系; (b) 感生电压峰值 V_P 与辐照长度的关系(宽度为 3 mm)

传输电缆的阻抗匹配时, 光伏信号脉冲近似为三角对称形状, 响应时间约为光源的脉宽. 探测器的灵敏度与辐照能量有关, 在低能量时与辐照面积呈线性关系. 下一步的工作我们将着重于探测器的响应率等特性研究, 并适时地根据光源特性调整材料的能隙.

参 考 文 献

1 Fontcuberta J, Martinez B, Seffar A, et al. Colossal magnetoresistance of ferromagnetic manganites: Structural tuning and mechanisms. Phys Rev Lett, 1996, 76(7): 1122—1125[DOI]

2 Blasco J, Garcia J, de Teresa J M, et al. A systematic study of structural, magnetic and electrical properties of $(La_{1-x}Tb_x)_{2/3}Ca_{1/3}MnO_3$ perovskites. J Phys: Condens Matter, 1996, 8(40): 7427—7442[DOI]

3 Wang H S, Li Q, Liu K, et al. Low-field magnetoresistance anisotropy in ultrathin $Pr_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3$ films grown on different substrates. Appl Phys Lett, 1999, 74(15): 2212—2214[DOI]

4 Park J H, Vescovo E, Kim H J, et al. Magnetic properties at surface boundary of a half-metallic ferromagnet $La_{0.7}Sr_{0.3}Mn_{O3}$. Phys Rev Lett, 1998, 81(9): 1953—1956[DOI]

5 Jin S, Tiefel T H, Mccromark M, et al. Thickness dependence of magnetoresistance in La-Ca-Mn-O epitaxial films. Appl Phys Lett, 1995, 67(4): 557—559[DOI]

6 Zhao K, Huang Y H, Lu H B, et al. On microscopic origin of photovoltaic effect in $La_{0.8}Sr_{0.2}MnO_3$ films. J Rare Earths, 2005, 23(5): 526—529

7 Zhao K, Huang Y H, Lu H B, et al. Anomalous photovoltaic effect in $La_{0.8}Sr_{0.2}MnO_3$ films grown on $SrTiO_3$(001) substrates by laser molecular beam epitaxy. Eur Phys J Appl Phys, 2006, 35: 173—176[DOI]

8 Rajeswai M, Chen C H, Goyal A, et al. Low-frequency optical response in epitaxial thin films of $La_{0.67}Ca_{0.33}MnO_3$ exhibiting colossal magnetoresistance. Appl Phys Lett, 1996, 68(25): 3555—3557[DOI]

9 Zhao Y G, Li J J, Shreekala R, et al. Ultrafast laser induced conductive and resistive transients in $La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$: Charge transfer and relaxation dynamics. Phys Rev Lett, 1998, 81(6): 1310—1313[DOI]

10 Averitt R D, Lobad A I, Kwon C, et al. Ultrafast conductivity dynamics in colossal magnetoresistance manganites. Phys Rev Lett, 2001, 87(1): 017401[DOI]

11 Dai J M, Song W H, Du J J, et al. Cluster-glass state and photon-induced effects in perovskite manganite $(La_{0.3}Nd_{0.7})_{2/3}Ca_{1/3}MnO_3$ films. Phys Rev B, 2003, 67(14): 144405[DOI]

12 Dai J M, Song W H, Wang S G, et al. Visible-light-induced persistent photoconductivity in perovskite manganite films of $(La_{0.3}Nd_{0.7})_{2/3}Ca_{1/3}MnO_3$. J Appl Phys, 2001, 90(6): 3118—3120[DOI]

13 Dai J M, Song W H, Wang S G, et al. Visible-light induced persistent photoconductivity in trilayered films of perovskite manganites. J Appl Phys, 2001, 89(11): 6967—6969[DOI]

14 Zhang R L, Dai J M, Song W H, et al. Photoinduced spin-state transition of Co3+ in the layered perovskite manganite thin film. J Phys: Condens Matter, 2004, 16(13): 2245—2252[DOI]

15 Zhao K, Jin K J, Huang Y H, et al. Laser induced ultrafast photovoltaic effect in $La_{0.67}Ca_{0.33}MnO_3$ films at room temperature. Phys B, 2006, 373(1): 72—75[DOI]