

文章编号: 0258-702X(2002)03-0205-04

YBa₂Cu₃O_{7-δ} 薄膜激光功率计

张鹏翔¹, 文小明², 顾梅梅¹, 张国勇¹

(¹ 昆明理工大学材料系, 云南昆明 650051; ² 云南大学物理系, 云南昆明 650091)

提要 基于氧化物高温超导体 YBa₂Cu₃O_{7-δ} 的各向异性 Seebeck(塞贝克)效应, 制作了室温下的激光功率计, 并测量了从红外到紫外波段下的激光响应。结果表明, 在一定激光功率范围内, 器件的信号响应与激光功率呈较好的线性关系。综合性测试表明, 这类器件的优点是频谱响应宽, 时间响应可达到 ns 量级。

关键词 YBa₂Cu₃O_{7-δ} 功率计 塞贝克效应 热电元件

中图分类号 TH 741 文献标识码 A

YBa₂Cu₃O_{7-δ} Thin Film Room-temperature Laser Power Meter

ZHANG Peng-xiang¹, WEN Xiao-ming², GU Mei-mei¹, ZHANG Guo-yong¹

(¹ Material Department, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051)

² Physics Department, Yunnan University, Kunming 650091

Abstract Based on the anisotropic Seebeck effect of oxide high- T_c superconductor, a new type laser power meter was designed, and the optical response of this device to the pulsed laser and the chopped laser was measured from infrared to ultraviolet. The measured signal shows a good linear relation to the laser power in a limited range, and a very fast time response to the irradiating laser.

Key words YBa₂Cu₃O_{7-δ}, power meter, Seebeck effect, thermoelectrical device

1 引言

氧化物高温超导体在经历十余年的研究发展后, 已逐步形成一门独特的学科, 并有极具潜力的应用前景。它的应用主要集中在电磁(辐射)测量、能量贮备器件等, 如超量子干涉器件(SQUID)^[1,2]、超导电流引线^[3]、高温超导热电子混频器^[4]、红外探测器^[5-7]、红外热成像^[8,9]等。近几年来, 人们在 YBa₂Cu₃O_{7-δ}(YBCO)类高温超导薄膜中发现了另一种光热辐射感生电压效应, 这是由于 YBCO 薄膜中各向异性塞贝克(Seebeck)系数引起的, 目前, 基于这种效应的应用已初露锋芒^[5,10]。

本文基于 Seebeck 效应的原理, 提出器件设计与应用, 给出红外(1.064 μm)、可见(0.532 μm)、紫外(0.308 μm)脉冲激光下及调制后的连续 He-Ne(0.6328 μm)激光辐射的器件响应, 并对测量结果进

行分析, 指出该器件的改善途径和应用前景。

2 原理

近几年来, 国内外对高温超导体的热电势(Seebeck 效应)进行了广泛深入的研究^[5,10-14]。热电势也就是温差电现象(Seebeck effect)。最常见的是在两种金属的界面上, 如热电偶, 当冷热端温度不同时, 会在热电偶两端产生电压。具有各向异性的晶体材料中也有温差电效应, 例如倾斜衬底上生长的 YBCO 薄膜。微观上可以认为导电层和绝缘层就是一组热电元件, 所以也有人称图 1 所示的结构为原子层热电堆器件^[15,16]。在这类材料中, 一个与时间有关的温度梯度 $\vec{\nabla} T$ 将产生一热电场

$$\vec{E} = S \vec{\nabla} T \quad (1)$$

其中 S 为晶体的 Seebeck 张量。对于倾斜衬底上生

收稿日期 2000-10-19; 收到修改稿日期 2001-03-08

作者简介 张鹏翔(1942—)男, 昆明理工大学教授, 中国科技大学博士生导师。主要从事固体物理、光电子材料、拉曼光谱研究。E-mail: PXZhang@public.km.yn.cn

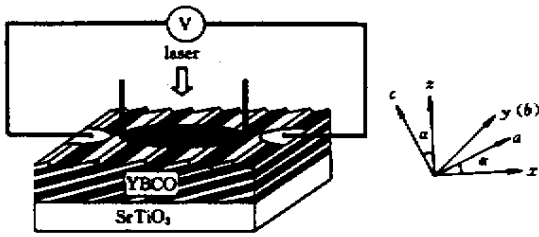


图 1 倾斜 SrTiO₃ 衬底上生长的 YBa₂Cu₃O_{7-δ} 薄膜的原子层热电堆及 Seebeck 效应模型

Fig.1 Atom-layer thermo-electric-pile and Seebeck effect model of YBa₂Cu₃O_{7-δ} grown on vicinal SrTiO₃ substrate

长的 YBCO 晶体材料,经坐标变换(见图 1 的坐标系)之后,Seebeck 张量具有以下形式^[5, 16, 17]

$$S = \begin{bmatrix} S_{ab} \cos^2 \alpha + S_c \sin^2 \alpha & 0 & \frac{1}{2}(S_{ab} - S_c) \sin 2\alpha \\ 0 & S_{ab} & 0 \\ \frac{1}{2}(S_{ab} - S_c) \sin 2\alpha & 0 & S_{ab} \sin^2 \alpha + S_c \cos^2 \alpha \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, S_{ab} , S_c 分别为 YBCO 在 a - b 平面内和 c 轴方向上的 Seebeck 张量的分量, α 是外延薄膜法向对 c 轴的倾角。假设光照垂直于薄膜表面,将(2)式代入(1)式,并沿 x 方向在光照长度上积分,得到热电压的表达式

$$U_x = \Delta T_z (S_{ab} - S_c) \frac{l_x}{2d} \sin(2\alpha) \quad (3)$$

其中 U_x 为沿 x 方向在长度 l_x 内获得的电压, ΔT_z 为沿 z 轴方向产生的温差,该温差可以是 YBCO 膜吸收光脉冲、黑体辐射或其他辐射后引起薄膜上下表面的温度不同。 d 为膜厚。从(3)式可知,热电压正比于 z 方向的温差、样品长度 l_x 和倾角 α 。晶体的 Seebeck 张量元各向异性 ($S_{ab} - S_c$) 越大,所产生的热电压也越大。同时, U_x 反比于薄膜厚度 d , d 越小, U_x 越大。这不仅有利于器件灵敏度的提高,也有利于器件的小型化。然而,在薄膜厚度减小的情况下,如何控制外延膜的质量也是制膜工艺上的一

个重要问题。P. X. Zhang 等^[14]研究了 U_x 与膜厚 d 的关系,发现在现有工艺条件下, d 约为 300 nm 时 U_x 极大,这为设计器件提供了实际的基础。

(3)式表明热电压完全是由温度梯度引起的,只要存在温度梯度 ΔT_z ,就存在感生电压。由于 YBCO 薄膜在很宽的波长范围内的光吸收都很强,所以,对于光热辐射的响应,它覆盖了很宽的频谱,包括红外、可见和紫外^[5]。

器件的时间响应由建立温差 ΔT_z 的时间和去掉辐射后温差消失的时间决定。响应的上升前沿只与建立温差有关,不需要热平衡,并且温差建立后产生的载流子的迁移只在绝缘层到导电层几纳米距离内,因此这种器件的响应时间很短,有报道说可达到 ps 量级^[17]。

3 实验技术

YBCO 薄膜是采用激光溅射法(LPD)沉淀在倾斜 SrTiO₃ 单晶衬底上制备的。薄膜光刻成如图 2 所示的图形,即每块薄膜光刻为两个原型器件,分别称为 L 膜和 R 膜。

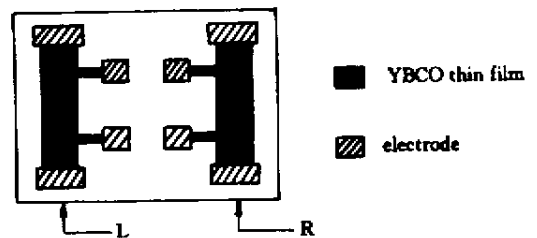


图 2 生长在 SrTiO₃ 衬底上的 YBa₂Cu₃O_{7-δ} 薄膜功率计光敏面图形

Fig.2 Diagram of etched YBa₂Cu₃O_{7-δ} thin film grown on SrTiO₃ for laser power meter

选用四种波长的激光作为辐射源,分别为 $\lambda_1 = 308$ nm, $\lambda_2 = 532$ nm, $\lambda_3 = 1.064$ μ m, $\lambda_4 = 0.6238$ μ m。测量方框图如图 3 所示。

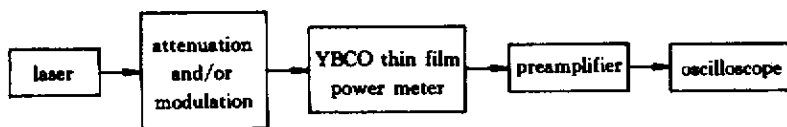


图 3 测量器件对激光响应的方框图(前三种波长下的响应信号较强,所以未加入前置放大器)

Fig.3 Block diagram for measuring the device response to the laser (due to the strong signals from the first three wavelenghtes, the preamplifier is not added)

4 实验结果与分析

4.1 准分子激光器

准分子激光器(Lambda Physik 产品,型号为 LPX105i)充 XeCl 气体时,发射波长为 $\lambda_1 = 308 \text{ nm}$ 的紫外激光,显示的信号波形如图 4(a)所示,感生的峰值电压与激光能量密度 E 的关系如图 4(b)所示。

E 由激光器自身的能量显示读出。灵敏度为 $0.31 \text{ mV/mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

4.2 钕铝石榴石激光器

钕铝石榴石激光器可发射两种波长的脉冲激光,分别为 $\lambda_3 = 1.064 \mu\text{m}$ 和倍频后的 $\lambda_2 = 0.532 \mu\text{m}$ (绿光)。激光器的辐射脉冲宽度为 7 ns 。图 5 与图 6 分别为两波长下的测量结果。

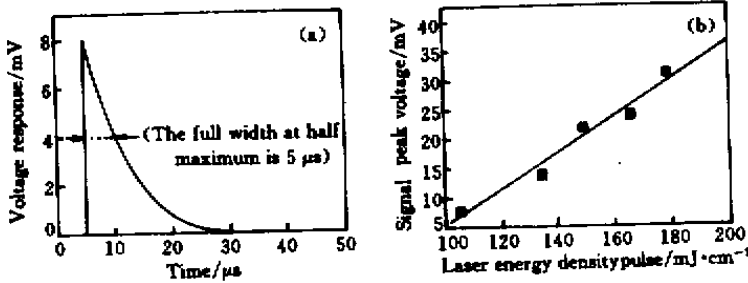


图 4 在 $\lambda_1 = 308 \text{ nm}$ 下器件对激光脉冲的响应波形和峰值电压与单脉冲激光能量密度的线性关系

(a) 响应波形 峰值电压为 8 mV , 半峰宽为 $5 \mu\text{s}$ 相应的入射激光能量密度为 104.9 mJ/cm^2 , 脉冲宽为 20 ns ;

(b) 峰值电压与单脉冲激光能量密度的线性关系

Fig.4 Response shape to the laser pulse and the linear relation between peak voltage and laser energy density per pulse

(a) Response shape of the signal : peak voltage is 8 mV , the full width at half maximum is $5 \mu\text{s}$, the corresponding incident laser energy density is

104.9 mJ/cm^2 , and pulse duration of 20 ns ;(b) The linear relation between peak voltage and laser energy per pulse

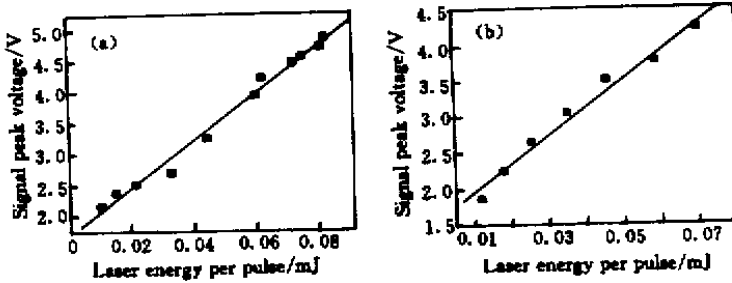


图 5 $\lambda_2 = 532 \text{ nm}$ 时的信号峰值电压与单脉冲激光能量的线性关系

(a) L 膜 (b) R 膜 ;灵敏度分别为 38.11 mV/mJ 和 39.06 mV/mJ

Fig.5 Linear relation between signal peak voltage and laser energy per pulse with $\lambda_2 = 532 \text{ nm}$

(a) L film ;(b) R film ; the sensitivities are 38.11 mV/mJ and 39.06 mV/mJ , respectively

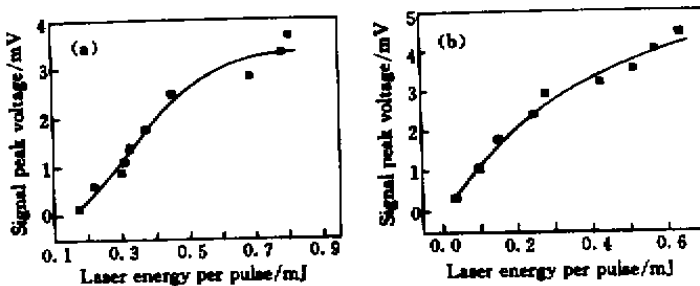


图 6 $\lambda_3 = 1.064 \mu\text{m}$ 时的峰值电压与单脉冲激光能量的关系

(a) L 膜 (b) R 膜

Fig.6 Relation between peak voltage and laser energy per pulse with $\lambda_3 = 1.064 \mu\text{m}$

(a) L film ;(b) R film

4.3 He-Ne 激光器

He-Ne 激光器的波长为 $\lambda_4 = 0.6238 \mu\text{m}$, 功率为 0.5 mW。图 7 为该波长下的测量结果。激光感生信号经过前置放大后输入示波器。

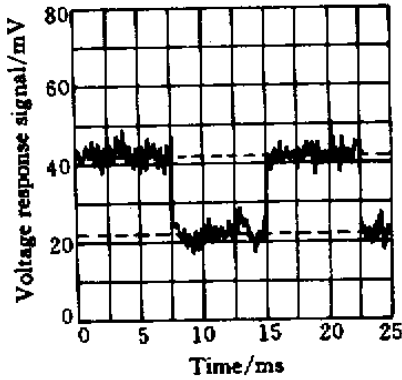


图 7 记忆示波器存储的器件 L 膜对调制过的 $\lambda_4 = 0.6238 \mu\text{m}$ 的 He-Ne 激光响应的信号图形。器件峰值响应电压 $\Delta V = 20.00 \text{ mV}$, 信号周期 $T = 16.40 \text{ ms}$, 斩波器频率 $f = 61 \text{ Hz} = 1/16.40 \text{ ms}$ 加前置放大器 (1000 倍)

Fig. 7 Response shape of L film to chopped He-Ne laser stored by memory oscilloscope with $\lambda_4 = 0.6238 \mu\text{m}$. Peak voltage $\Delta V = 20.00 \text{ mV}$, signal period $T = 16.40 \text{ ms}$, preamplifier (1000 ×)

调制后的 He-Ne 激光辐射近似于方波, 故信号响应也呈方波, 这说明器件的时间响应是很快的。

5 结 论

实验表明, 在能量低于 1 mJ 以及紫外至红外 (308 nm ~ 1.064 μm) 的很宽的波长范围内, 器件都有较好的响应。可以用它做成一种新型室温下工作的宽波段、快响应的激光功率计。我们已完成了一个功率计原型设计。若加工成阵列则可用于测量大功率、短脉冲激光的能量剖面。

参 考 文 献

- 1 Millind N. Kunchur, D. K. Christen, C. E. Klabunde *et al.*. Exploring the dissipative regime of superconductors for practical current-lead applications [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67** (6) : 848 ~ 850
- 2 B. S. Karasik, W. R. McGrath, M. C. Gaidis. Analysis of a high- T_c hot-electron superconducting mixer for terahertz applications [J]. *J. Appl. Phys.*, 1997, **81** (3) : 1581 ~ 1589
- 3 H. Neff, J. Laukemper, G. Hefle *et al.*. Extended function of a high- T_c transition edge bolometer on a micromachined Si membrane [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67** (13) : 1917 ~ 1919
- 4 P. C. Shan, Z. Celik-Butler, D. P. Butler *et al.*. Investigation of semiconducting YBaCuO thin films [J]. *J. Appl. Phys.*, 1996, **80** (12) : 7118 ~ 7123
- 5 Zhang Peng-xiang, Li Guo-zhen, Zhang Yan *et al.*. Room temperature light-thermo-detector made of high- T_c superconductor [J]. *Acta Physica Sinica*, 1998, **7** (11) : 810 ~ 816 (over sea)
- 6 M. J. M. E. de Nivelles, M. P. Bruijn, R. de Vries *et al.*. Low noise high- T_c superconducting bolometers on silicon nitride membranes for far-infrared detection [J]. *J. Appl. Phys.*, 1997, **82** (10) : 4719 ~ 4726
- 7 J. M. Glidemeister, Adrian T. Lee, P. L. Richards. A fully lithographed voltage-biased superconducting spiderweb bolometer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74** (6) : 868 ~ 870
- 8 P. I. Oden, P. G. Datskos, T. Thundat *et al.*. Uncooled thermal imaging using a piezoresistive microcantilever [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69** (21) : 3277 ~ 3279
- 9 S. J. Berkowitz, A. S. Hirahara, K. Char. Low noise high-temperature superconducting bolometers for infrared imaging [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69** (14) : 2125 ~ 2127
- 10 K. Robl, G. Schlaffer, C. Oprea *et al.*. Photovoltaic signals in YBa₂Cu₃O_{7- δ} films due to laser-induced magnetic flux redistribution [J]. *Phys. C*, 1995, **249** (3 ~ 4) : 333 ~ 338
- 11 W. Kiehl, H. M. Duan, A. M. Hermann. Anisotropic Seebeck coefficient in Tl₂Ba₂CuO_{6- δ} single crystals [J]. *Phys. C*, 1995, **253** (3 ~ 4) : 271 ~ 278
- 12 I. V. Pleshakov, D. A. Lazarev, A. I. Grachev *et al.*. Photoresponse of granular YBaCuO thin films [J]. *Supercond. Sci. Technol.*, 1996, **9** (3) : 155 ~ 160
- 13 J.-S. Zhou, J. P. Zhou, J. B. Goodenough *et al.*. Chain contribution to the Seebeck coefficient in YBa₂Cu₃O_{7- δ} [J]. *Phys. Rev. B*, 1995, **51** (5) : 3250 ~ 3253
- 14 P. X. Zhang, U. Sticher, B. Leibold *et al.*. Thickness dependence of the thermoelectric voltages in YBaCuO_{7- δ} thin films on tilted substrate of SrTiO₃ [J]. *Phys. C*, 1997, **282** ~ 287 : 2551 ~ 2552
- 15 C. L. Chang, A. Kleinhammes, W. G. Moulton *et al.*. Symmetry-forbidden laser-induced voltages in YBa₂Cu₃O₇ [J]. *Phys. Rev. B*, 1990, **41** (16) : 11564 ~ 11567
- 16 H. Lengfellner, S. Zeuner, W. Prettl *et al.*. Thermoelectric effect in normal-state YBa₂CuO_{7- δ} films [J]. *Europhysics. Lett.*, 1994, **25** (5) : 375 ~ 378
- 17 Th. Zahner, R. Stierstorger, S. Reindl *et al.*. Picosecond thermoelectric response of thin YBa₂CuO_{7- δ} films [J]. *Phys. C*, 1999, **313** (1 ~ 2) : 37 ~ 40