

# 退火氧压对 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 薄膜中的激光感生热电电压效应的影响<sup>\*</sup>

熊 飞<sup>1)†</sup> 张 辉<sup>1)</sup> 李洪山<sup>1)</sup> 张鹏翔<sup>1)</sup> 蒋最敏<sup>2)</sup>

1) 昆明理工大学光电子新材料研究所, 昆明 650051)

2) 复旦大学应用表面物理国家重点实验室, 上海 200433)

(2007 年 11 月 13 日收到, 2008 年 4 月 25 日收到修改稿)

测量了在不同氧压下退火生长的  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO) 薄膜中的激光感生热电电压 (LITV) 信号, 发现随退火氧压的增大可使 LITV 信号的峰值有 2—4 倍的增强, 并且变化趋势与薄膜热电势的各向异性随氧含量的变化规律相同. 波长在 473—808 nm 范围内的连续激光辐照, 在 5000 Pa 的氧压下退火生长的 YBCO 薄膜中探测到的 LITV 信号最大, 而紫外脉冲激光辐照时, LITV 信号的最大值出现在退火氧压为  $10^5$  Pa 的薄膜中. LITV 信号的光响应时间随退火氧压的增大而减小. 理论分析表明, 这一结果是由于退火氧压的提高导致薄膜材料的热扩散系数增大所致. 在退火氧压为 5000 Pa 的 YBCO 薄膜中探测到响应最快的 LITV 信号, 对紫外脉冲激光的响应时间为 78 ns, 并且信号的上升时间只有 29 ns, 与激光的脉冲宽度 (约为 28 ns) 相当.

关键词:  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  薄膜, 激光感生热电电压, 各向异性的 Seebeck 系数, 氧含量

PACC: 7430F, 7530G, 7475, 4255

## 1. 引 言

生长在斜切衬底上的  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO) 薄膜, 是目前所发现的具有激光感生热电电压 (LITV) 信号最大的材料之一<sup>[1-10]</sup>. 能量密度为  $1 \text{ J/cm}^2$  的紫外脉冲激光 (波长为 308 nm) 辐照, 可以在与  $\text{SrTiO}_3$  (001) 晶面倾斜  $20^\circ$  生长的 YBCO 薄膜中产生大于 250 V 的 LITV 信号, 而信号的响应时间不到 100 ns<sup>[6]</sup>. 利用 YBCO 薄膜中 LITV 信号高灵敏、快响应的特点进行激光探测是一种新的尝试<sup>[11-14]</sup>. 深入研究 YBCO 薄膜具有强 LITV 信号的机理, 可以为遴选和寻找基于 LITV 效应的实用探测器的薄膜材料奠定理论基础.

大量的实验研究表明<sup>[15-17]</sup>, YBCO 薄膜中 LITV 信号的大小与不同晶向上的 Seebeck 系数张量元的差成正比, LITV 信号的产生源于材料各向异性的热电输运性质. 不同温度下测得的 LITV 信号与薄膜电阻随温度的变化趋势相同<sup>[2, 17]</sup>, 表明材料的热电效

应与电导过程相互耦合. LITV 效应是薄膜电输运性质各向异性的体现, 而这一特性在高温超导氧化物薄膜中表现得尤为明显<sup>[17]</sup>. 因此, 测量薄膜的 LITV 信号可以作为研究材料电输运性质各向异性的有效手段, 研究高温超导薄膜的 LITV 效应有助于探索高温超导的机理.

氧含量是影响 YBCO 薄膜电输运性质的重要因素. 高温超导铜氧化物的载流子浓度高度依赖于材料的氧含量<sup>[18]</sup>. 能带结构计算结果表明, 氧含量对费米面态密度分布的影响是各向异性的<sup>[19-22]</sup>, 这意味着 YBCO 薄膜的氧含量对高灵敏的 LITV 信号起重要作用. YBCO 薄膜中氧含量对热电势各向异性的影响, 表现为  $\text{CuO}_2$  面内热电势的大小和符号对氧含量非常敏感<sup>[23-28]</sup>. 测量 YBCO 的热电势甚至成为一种确定其氧含量的有效方法<sup>[25]</sup>. 然而, 有关 YBCO 薄膜中 LITV 信号随氧含量的变化规律以及与热电势各向异性内在联系的研究, 国内外很少报道.

本文采用在不同氧压下低温退火的方法制备不同氧含量的 YBCO 薄膜, 测量激光辐照在 YBCO 薄

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金 (批准号: 10274026) 和云南省自然科学基金 (批准号: YKS199907022) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: f\_xiong888@yahoo.com.cn

膜中产生的 LITV 信号,研究 LITV 信号的峰值和响应时间随退火氧压的变化规律,从而揭示氧含量对 YBCO 薄膜的 LITV 效应和热电输运性质的影响.

## 2. 实验方法

本文的实验工艺流程如图 1 所示.

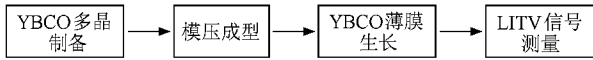


图 1 实验工艺流程

YBCO 多晶采用固相反应法合成. 化学计量的  $Y_2O_3$  (99.99%),  $CuO$  (99.99%),  $BaCO_3$  (99.99%) 原料在 1220 K 的温度下煅烧 12 h, 前驱体经过模压成型后于 1320 K 烧结 24 h, 得到用于薄膜生长的多晶靶材. 靶材的直径为 20 mm、高为 5 mm. X 射线衍射 (XRD) 表明, 该条件下合成的 YBCO 多晶为正交对称结构 (图 2), 晶格常数为  $a = 0.3802$  nm,  $b = 0.3863$  nm,  $c = 1.1652$  nm, 杂相含量低于 5%.

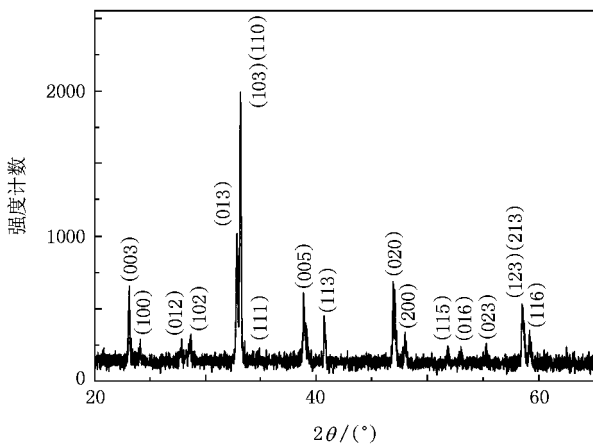


图 2 YBCO 多晶的 XRD 谱

采用脉冲激光沉积技术生长 YBCO 薄膜. 沉积过程中使用的激光源为 KrF 准分子激光器, 激光脉冲的重复频率为 5 Hz, 单脉冲激光能量为 400 mJ, 脉冲宽度为 28 ns. 薄膜生长在斜切的  $LaAlO_3$  (LAO) 单晶衬底上, 衬底的倾斜方向与文献 [1] 报道相同, 衬底表面法线方向与 LAO 晶体 100 晶向的夹角为  $15^\circ$  并同在 (010) 晶面内. 薄膜生长温度为 1070 K, 气氛为 40 Pa 的流动氧, 沉积时间为 6 min, 薄膜厚度约为 200 nm. 薄膜采用两级退火模式, 在 3000 Pa 的静态氧压下原位退火 1 h 之后, 于 720 K 下低温退火

3 h. 实验通过改变低温退火氧压的方法得到氧含量不同的 YBCO 薄膜样品, 用于 LITV 信号测量. 薄膜的结构表征采用 BDX3200 型 XRD 仪,  $CuK\alpha$  辐射.

薄膜的表面尺寸为  $2\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ , 采用压钢法在薄膜表面焊接电极后, 置于金属屏蔽箱内制成光敏探头. LITV 信号的测量采用两种不同的方法, 测量系统与文献 [13] 报道相同. 脉冲激光辐照下的 LITV 信号采用 TDS210 型示波器直接记录, 示波器采样频率为 1 GHz, 连续激光经频率为 1000 Hz 的斩波器斩波后辐照在薄膜表面, 由于所产生的 LITV 信号较弱, 采用锁相放大器探测 LITV 信号的峰值.

## 3. 结果及讨论

### 3.1. YBCO 薄膜的结构

图 3 所示为 YBCO 薄膜 XRD 的  $\theta-2\theta$  扫描曲线, 纵坐标为强度  $I$  的对数. LITV 效应的原子层热电堆模型 [16] 和实验研究 [17] 指出: 薄膜的外延取向对 LITV 信号有很大的影响, 薄膜的缺陷导致 LITV 信号的急剧减小, 偏离理论曲线. 图 3 的结果表明: 在本文的薄膜生长条件下 YBCO 薄膜沿  $c$  轴取向在 LAO (100) 晶面上外延生长, 所有样品均为正交对称结构, 由此推断薄膜的氧含量大于 6.5. 薄膜 (00 $l$ ) 晶面的衍射峰的强度和半高宽可以与单晶相比, 表明薄膜的结晶质量较好. 根据 XRD 计算得到薄膜的晶格常数  $c$  随退火氧压的增大而减小, 表明在高氧压下退火的薄膜氧含量较大 [29]. 与体材料相比, 薄膜的晶格常数只改变了 0.2% 左右, 因此薄膜与衬底的晶格失配应力已近乎完全弛豫.

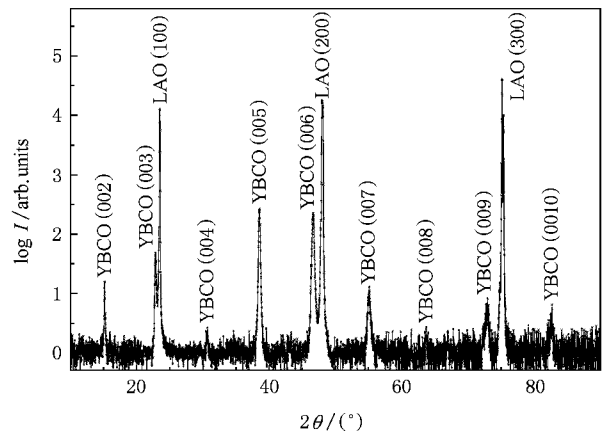


图 3 YBCO 薄膜的 XRD 谱

### 3.2. 退火氧压对 LITV 信号峰值的影响

连续激光辐照时,在不同退火氧压下生长的 YBCO 薄膜中探测到的 LITV 信号的峰值如图 4 所示.当某一种特定波长的激光辐照 YBCO 薄膜时,随退火氧压增高测量得到的 LITV 信号先增大后减小,在 5000 Pa 氧压下退火的薄膜中探测到的 LITV 信号最大.不同波长的激光辐照时薄膜中的 LITV 信号随退火氧压的变化规律相同,绿光(波长为 532 nm)辐照产生的 LITV 信号强度最大,红外激光(波长为 808 nm)辐照产生的信号最小.

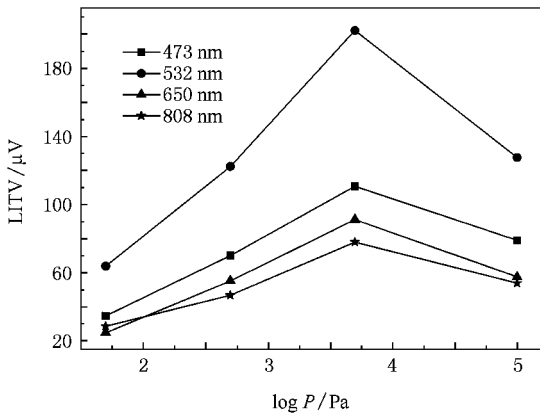


图 4 不同波长的连续激光辐照时,在 YBCO 薄膜中探测到的 LITV 信号与退火氧压  $P$  的关系.连续激光的功率为 100 mW

LITV 信号是非立方对称晶体中各向异性的温差热电效应的体现,其峰值  $U_p$  与材料热电势的张量元差 ( $S_{ab} - S_c$ ) 成正比<sup>[1,15,16]</sup>.退火氧压的不同改变了 YBCO 薄膜的氧含量,引起薄膜的热电势发生变化<sup>[19-28]</sup>,YBCO 薄膜在连续激光辐照下的 LITV 信号随退火氧压的变化规律可以反应氧含量对薄膜热电输运性质的影响.根据文献报道,对于充分氧化的 YBCO 单晶, $c$  轴晶向的热电势  $S_c$  约为  $30 \mu\text{V/K}$ ,并且随氧含量的减小缓慢增大<sup>[23]</sup>;  $ab$  面的热电势  $S_{ab}$  与  $S_c$  相比要小得多,但受氧含量的影响较大.对于  $x = 0$  的 YBCO 单晶<sup>[25]</sup>和多晶<sup>[27]</sup>, $S_{ab}$  在温度  $T < 310$  K 时为负值,随氧缺陷  $x$  增加向正值转变,当  $x = 0.1$  时符号为正. Lowe 等<sup>[28]</sup>的研究表明,氧含量对  $S_{ab}$  的影响主要体现在沿  $\text{CuO}$  链方向的热电势对氧含量极为敏感.这种各向异性的输运行为是多载流子和窄带电结构的体现,对 YBCO 能带结构的计算可以与实验结果相互印证<sup>[22]</sup>.因此,随氧含量的减少, $\text{CuO}$  链上的氧空位增加, $\text{CuO}_2$  面的输运特性由

金属行为向窄带半导体输运行为转变.当氧含量减小到 6.7 左右时, $S_{ab}$  快速增加到  $30 \mu\text{V/K}$ <sup>[26]</sup>;当氧含量在 6.2 左右时, $S_{ab}$  增加到  $80 \mu\text{V/K}$ ,远大于  $S_c$ <sup>[29]</sup>.一般而言,材料的热电势同时包含载流子的扩散热电势  $S_d$  和声子曳引的贡献  $S_g$ .Cohn 等<sup>[24]</sup>结合  $S_d \propto T$ ,  $S_g \propto 1/T$  提出一个描述高温超导体热电势的公式,

$$S = AT + B/T.$$

Cochrane 等<sup>[26]</sup>测量了高纯的 YBCO 单晶在不同晶向上的热电势并用此公式拟合,拟合曲线在 110—310 K 的温度范围内与实验测量的结果相符合.根据 Cochrane 等<sup>[26]</sup>拟合的结果,本文计算了温度在 300 K 时,不同氧含量的 YBCO 单晶在不同晶轴方向上的热电势和热电势的各向异性 ( $\Delta S = S_{ab} - S_c$ ),结果如图 5 所示.

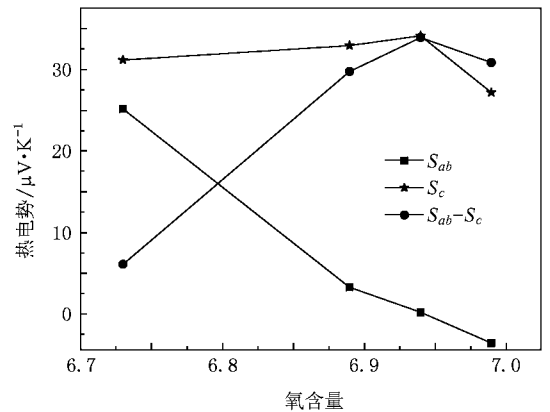


图 5 不同氧含量的 YBCO 单晶在不同晶轴方向上的热电势及其各向异性

图 4 与图 5 比较的结果表明:在 YBCO 薄膜中 LITV 信号随退火氧压的变化趋势与热电势的各向异性随氧含量的变化规律一致,LITV 信号随退火氧压不同而变化主要是受 YBCO 各向异性的热电输运性质控制.氧含量的变化对  $S_c$  的影响不大, $\Delta S$  的改变是由于  $S_{ab}$  随氧含量的增加而急剧减小.因此,LITV 信号随退火氧压的变化规律可以反映氧含量的变化对  $S_{ab}$  的影响,即  $\text{CuO}_2$  面内的电输运行为表现出强的金属特性,载流子浓度  $n$  的变化对  $S_{ab}$  的影响可表示为<sup>[10]</sup>

$$S_{ab} = -\frac{\pi^2}{3} \frac{k^2 T}{E_F} \times \left\{ \left[ \frac{\partial \ln \alpha(E)}{\partial \ln E} \right]_{E=E_F} + \alpha \frac{C_g}{3ne} \right\}. \quad (1)$$

值得一提的是, Xiong 等<sup>[30]</sup>在氧含量低于 6.5 的 YBCO 薄膜中探测到反向 LITV 信号,可以将这一现象归因于随氧含量的减小,  $S_{ab}$  快速增大到  $80 \mu\text{V/K}$  并远大于  $S_c$ .

对 YBCO 的结构和电输运特性的研究表明: 当一个晶胞内含有 6.5—7 个氧原子时, YBCO 为正交对称的超导相, 超导转变温度随氧含量的减少而降低; 当氧含量小于 6.5 时, YBCO 为四方对称的非超导相, 电输运特性表现为半导体行为. 在本文实验条件下制备得到的 YBCO 薄膜氧含量大于 6.5, 热电势以  $\text{CuO}_2$  面和  $\text{CuO}$  链的载流子输运为主导, 因此受载流子浓度的影响较大. 另一方面, 在较低的温度下 ( $T \leq 720 \text{ K}$ ), YBCO 薄膜的氧含量发生变化主要是由于  $\text{CuO}$  链上氧原子的热振动在链方向上受  $\text{Cu}$  离子的束缚较弱,  $\text{CuO}$  链上的氧原子容易丢失, 这也是 YBCO 的载流子浓度发生改变的主要原因. 尽管随氧含量的变化 YBCO 薄膜晶体结构的变化也会对热电势产生影响而改变 LITV 信号的行为特征, 但是与载流子浓度的作用相比要小得多. 因此, YBCO 薄膜中 LITV 信号随退火氧压的变化规律主要反应载流子浓度对  $\text{CuO}_2$  面热电势的影响, 这也是高温超导体系强烈的二维载流子局域特性的体现. 因此, 通过测量具有不同氧含量的 YBCO 薄膜中的 LITV 信号, 可以从另一个角度证明在 YBCO 薄膜的生长工艺中, 采用提高低温退火氧压的方法可减少  $\text{CuO}$  链上的氧空位, 增大载流子浓度, 从而有效地调节和控制薄膜的电输运性质. 对 YBCO 薄膜电导率的研究也可以得到同样的实验结果<sup>[18]</sup>.

采用不同氧压退火生长的 YBCO 薄膜在紫外脉冲激光辐照下的 LITV 信号如图 6 所示. 脉冲激光的波长为 248 nm, 激光的能量密度为  $0.26 \text{ mJ/mm}^2$ , 因此辐照在薄膜表面的激光能量为  $0.78 \text{ mJ}$ . 激光的脉冲宽度为 28 ns, 脉冲激光功率较大, 所产生 LITV 信号的强度大. 采用示波器可以记录 LITV 信号随时间的演变过程.

YBCO 薄膜在紫外脉冲激光辐照下所产生的 LITV 信号对退火氧压同样敏感. 如图 7 所示, LITV 信号的峰值随退火氧压的提高有 2—4 倍的增强, 并且表现出与连续激光辐照时相似的变化规律. 不同于图 4 的实验结果, 具有最大 LITV 信号的 YBCO 薄膜的退火氧压为  $10^5 \text{ Pa}$ , 表明短波长激光辐照下的 LITV 信号的最大值出现在高氧含量的薄膜中.

文献 1 在平面热源的假设条件下, 得到显含时

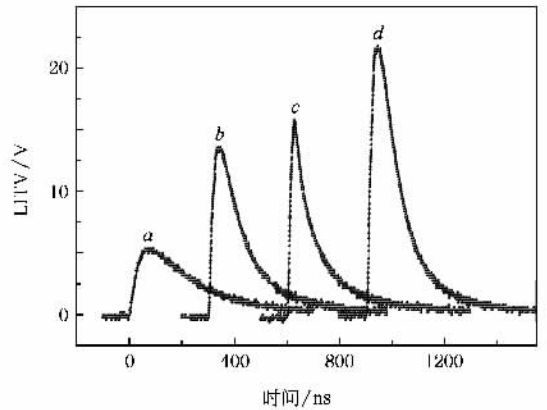


图 6 经不同氧压退火生长的 YBCO 薄膜在波长为 248 nm 的脉冲激光辐照下探测到的 LITV 信号. 曲线 a 为 50 Pa, 曲线 b 为 500 Pa, 曲线 c 为 5000 Pa, 曲线 d 为  $10^5 \text{ Pa}$

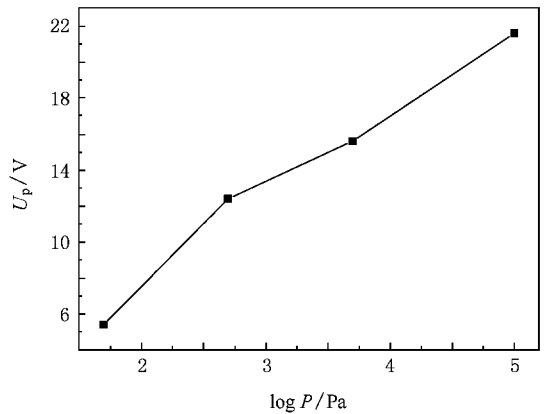


图 7 YBCO 薄膜在波长为 248 nm 的脉冲激光辐照下测得的 LITV 信号的峰值  $U_p$  与退火氧压  $P$  的关系

间  $t$  的 LITV 信号的表达式为

$$U(t) = \frac{\alpha_0 l E_0 \sin(2\theta)}{4d\rho c \sqrt{\pi Dt}} (S_{ab} - S_c) \times \left( \exp\left(-\frac{\delta^2}{4Dt}\right) - \exp\left(-\frac{d^2}{4Dt}\right) \right), \quad (2)$$

式中  $\rho$ ,  $c$ ,  $D$  分别为薄膜的密度、比热容和热扩散系数,  $l$  为薄膜表面有效激光辐照长度,  $\theta$  为衬底的倾斜角度,  $E_0$  为辐照在薄膜表面的激光能量,  $\alpha_0$  为薄膜对激光的吸收系数,  $\delta$  为激光在薄膜中的穿透深度.  $\alpha_0$  和  $\delta$  均为激光波长的函数, 从而根据 (2) 式可以推断, 对于一定厚度  $l$  的薄膜存在一个特定波长, 使得在这一波长的激光辐照下薄膜中的 LITV 信号较大. 图 4 的结果表明, 与其他波长的连续激光相比, 532 nm 的激光辐照在 YBCO 薄膜中产生的 LITV 信号较大.

与图 4 所示的结果相比,由图 7 可以看出,短波长激光辐照下的 LITV 信号的极大值出现在高氧压退火的 YBCO 薄膜中,这是各向异性的 Seebeck 系数和激光在薄膜中的穿透深度协同作用的结果.提高薄膜的退火氧压导致薄膜的载流子浓度增大,电导率增大,激光在薄膜中的穿透深度随之减小,从而有效地增强了 LITV 信号,而在使用短波长的激光辐照薄膜时这种增强效应可以表现得更为明显.因此,LITV 信号峰值的变化要考虑由于激光波长变短和薄膜电导率变大引起激光穿透深度减小对信号所产生的增强作用.我们在对 La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub> 和 Nd<sub>2-x</sub>Ce<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub> 薄膜的 LITV 效应的研究中也发现了同样的实验现象.

值得一提的是,实验在不同氧压下退火的 YBCO 薄膜中均可以观察到 LITV 信号,在激光辐照不会破坏薄膜的前提下,LITV 信号的峰值与辐照在薄膜表面的激光能量(或者功率)表现出良好的线性关系,

$$U_p = KE_0,$$

式中  $K$  为常数.在从红外到紫外的范围内不同波长的激光辐照,尽管  $K$  值会不同,但是  $U_p$  和  $E_0$  线性关系总能成立.这一结果与文献[11,13]的报道相同.依此线性关系推算,在文献[6]报道的激光能量条件(1 J/cm<sup>2</sup>)下,在 10<sup>5</sup> Pa 的氧压下退火生长的 YBCO 薄膜中可以探测到的 LITV 信号要比文献[6]报道的实验结果( $U_p = 250$  V)大很多.基于 YBCO 薄膜中 LITV 信号对氧含量的敏感程度,使得 LITV 信号的测量有望成为一种探测薄膜氧含量的新方法.

### 3.3. 退火氧压对 LITV 信号响应时间的影响

响应时间是描述 LITV 信号的重要参数.如图 8

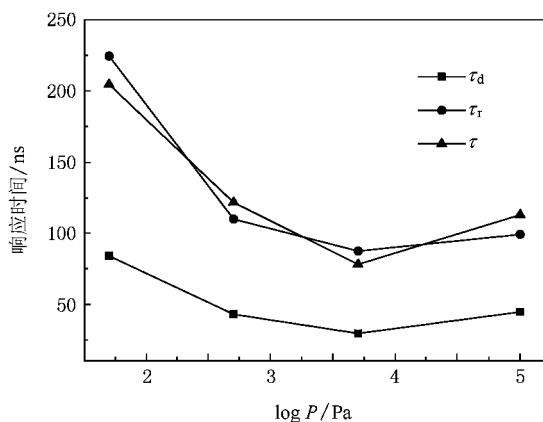


图 8 LITV 信号的响应时间与退火氧压  $P$  的关系. 使用 248 nm 脉冲激光辐照 YBCO 薄膜,激光的脉冲宽度为 28 ns

所示,使用 248 nm 的脉冲激光辐照 YBCO 薄膜,观察到随退火氧压的增大 LITV 信号的响应时间变短,在 5000 Pa 氧压下退火生长的 YBCO 薄膜中 LITV 信号响应最快,并且 LITV 信号的上升时间  $\tau_r$ 、下降时间  $\tau_d$  以及响应时间的总体评价参数  $\tau$  (即 LITV 信号波形的半高宽)随退火氧压的变化规律相同.

含时的 LITV 公式(2)可以很好描述 LITV 信号的上升时间<sup>[1,14]</sup>,在薄膜厚度一定的情况下, $\tau_r$  是  $\delta$  和  $D$  的函数, $\tau_r = f(\delta, D, d)$ .图 8 所示的实验结果表明,YBCO 薄膜中 LITV 信号的上升时间远小于下降时间,并且变化不大.因此,LITV 信号的响应快慢决定于信号的下降时间.实验观察到 YBCO 薄膜中 LITV 信号呈指数衰减,与  $\tau_d$  的关系满足下列公式:

$$U(t) = U_p \exp\left(-\frac{t}{\tau_d}\right). \quad (3)$$

文献[8,9]指出, $\tau_d$  主要决定于薄膜的热扩散系数,

$$\tau_d = d^2/D.$$

因此,图 8 中 LITV 信号响应时间的变化规律是不同氧压下退火导致薄膜的热扩散系数发生变化的结果.通常情况下,材料的热扩散由自由载流子和声子导热共同决定,

$$D = \frac{\kappa_e + \kappa_p}{C_e + C_p}.$$

对 YBCO 而言,载流子浓度约为 10<sup>20</sup>—10<sup>21</sup> cm<sup>-3</sup>,由于载流子热容  $C_e$  要比晶格热容  $C_p$  小( $C_e/C_p \approx 0.01$ ),并且自由载流子的热导率  $\kappa_e$  远大于声子的热导率  $\kappa_p$ ( $\kappa_e/\kappa_p \approx 1-10$ ),因此,YBCO 薄膜的热扩散系数可以表示为

$$\begin{aligned} D &= \frac{\kappa_e + \kappa_p}{C_e + C_p} \\ &\approx \frac{\kappa_e + \kappa_p}{C_p} \\ &= \frac{\kappa_e}{C_p} + D_p, \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $D_p$  为声子的热扩散系数, $C_p$  为原子密度的函数,室温下接近于杜隆-帕替经典极限,基本不随载流子浓度的变化而改变, $\kappa_e$  与载流子浓度成正比,因此,随退火氧压提高,载流子浓度增加,载流子的导热成为热传导的主导( $\kappa_e/C_p \gg D_p$ ),使得热扩散系数迅速增大,从而在 YBCO 薄膜中 LITV 信号的响应时间随退火氧压的增大而显著减小.然而,在 10<sup>5</sup> Pa 的氧压下退火的薄膜中 LITV 信号的响应时间

出现反常变化,这可能是由于薄膜中充入了过量氧导致缺陷增加,载流子受缺陷的碰撞使平均自由程下降导致载流子热导率减小所致.对此,还有待于进一步研究.

值得关注的是,在退火氧压为 5000 Pa 的 YBCO 薄膜中 LITV 信号响应最快,响应时间为 78 ns,并且 LITV 信号的上升时间只有 29 ns,与激光的脉冲宽度(28 ns)相当.这样的测量结果可以间接地反映出在本文的实验条件下生长的 YBCO 薄膜的结晶质量较好.Zhang 等<sup>[14]</sup>从光探测器件设计的角度考虑,将 LITV 信号的峰值与信号的上升时间的比值定义为薄膜光响应的品质因子  $F_m$ .退火氧压为 5000 Pa 的 YBCO 薄膜的品质因子( $F_m$  为 0.969 V/nSmJ)较高,可以用作快响应、高灵敏激光探测器件的光敏薄膜.

## 4. 结 论

实验和理论分析的结果表明,不同氧压下低温退火改变了 YBCO 薄膜的氧含量,LITV 信号的峰值随退火氧压的变化而不同,主要是由于氧含量的变化导致薄膜的电输运行为发生了改变.YBCO 薄膜

中 LITV 信号随退火氧压增大表现出先增大后减小的变化特点,并且在使用不同波长的连续激光辐照薄膜时 LITV 信号随退火氧压的变化规律相同.退火氧压增大会导致激光在薄膜中的穿透深度减小,这对 LITV 信号有明显的增强作用.因此,短波长激光辐照时,在高氧含量的 YBCO 薄膜中观察到较大的 LITV 信号,是热电势的各向异性和激光的穿透深度同时变化、共同作用的结果.LITV 信号的响应时间主要受薄膜热扩散系数的影响,高氧压退火增大了薄膜的载流子浓度,导致薄膜的热扩散系数增大,从而在薄膜中观察到随退火氧压增大 LITV 信号响应变快.

在退火氧压为 5000 Pa 时生长的 YBCO 薄膜中探测到峰值大、响应时间短的 LITV 信号.从 LITV 效应用于激光探测的角度考虑,这种具备较高品质因子的薄膜是用作高灵敏、快响应激光探测器件的较佳选择.另外, $10^5$  Pa 的高退火氧压能够有效地提高 LITV 信号的峰值,当响应时间不作为最重要的影响参数时,可以将高退火氧压下生长的 YBCO 薄膜应用于高灵敏的激光探测.

- [ 1 ] Zhang P X ,Lee W K ,Zhang G Y 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 4026
- [ 2 ] Habermeyer H U ,Li X H ,Zhang P X ,Leibold B 1999 *Solid State Commun.* **110** 473
- [ 3 ] Chang C L ,Kleinhammes A ,Moulton W G ,Testardi L R 1990 *Phys. Rev. B* **40** 11564
- [ 4 ] Habermeyer H U ,Jisrawi N ,Jager-Waldau G 1996 *Appl. Surf. Sci.* **96—98** 689
- [ 5 ] Tan S L ,Zhang H ,Cui W D ,Yuan Y ,Zhang P X 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4227 ( in Chinese ) [ 谈松林、张 辉、崔文东、袁 圆、张鹏翔 2006 物理学报 **55** 4227 ]
- [ 6 ] Lengfeller H ,Zeuner S ,Prettl W ,Renk K F 1994 *Europhys. Lett.* **25** 375
- [ 7 ] Zhang P X ,Zhang G Y ,Wu H J 2004 *Trans. Mater. Res. Soc. Jpn.* **29** 1423
- [ 8 ] Zahner T ,Stierstorfer R ,Reindl S ,Schauer T ,Penzkofer A ,Lengfeller H 1999 *Physica C* **313** 37
- [ 9 ] Zeuner S ,Lengfeller H ,Prettl W 1995 *Phys. Rev. B* **51** 11903
- [ 10 ] Pi H F ,Zhang L F ,Hang H S ,Zhang H Y 1998 *Chin. J. Low Temp. Phys.* **20** 373 ( in Chinese ) [ 皮海峰、张连芳、黄贺生、张慧云 1998 低温物理学报 **20** 373 ]
- [ 11 ] Zhang P X ,Wen X M ,Gu M M ,Zhang G Y 2002 *Chin. J. Lasers* **29** 205 ( in Chinese ) [ 张鹏翔、文小明、顾梅梅、张国勇 2002 中国激光 **29** 205 ]
- [ 12 ] Zeuner S ,Prettl W ,Lengfeller H 1995 *Appl. Phys. Lett.* **64** 1833
- [ 13 ] Cui W D ,Zhang H ,Zhang G Y ,Hu J T ,Dai Y N ,Zhang P X 2007 *Chin. J. Lasers* **34** 130 ( in Chinese ) [ 崔文东、张 辉、张国勇、胡俊涛、戴永年、张鹏翔 2007 中国激光 **34** 130 ]
- [ 14 ] Zhang G Y ,Zhang P X ,Zhang H ,Lee W K 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 2379
- [ 15 ] Hilinski K L ,Johnson R D ,Chang C L ,Hilinski E F 1990 *J. Appl. Phys.* **67** 4375
- [ 16 ] Lengfeller H ,Kremb G ,Schnellbogl A ,Betz J ,Renk K F ,Prettl W 1992 *Appl. Phys. Lett.* **60** 501
- [ 17 ] Li X H 2000 *Ph. D. Dissertation* ( Beijing : Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences )
- [ 18 ] Terasaki I ,Sato Y ,Miyamoto S 1995 *Phys. Rev. B* **52** 16246
- [ 19 ] Herman F ,Kasowski R V ,Thsu W 1987 *Phys. Rev. B* **36** 6904
- [ 20 ] Matheiss L F ,Rhamann D 1987 *Solid State Commun.* **63** 395
- [ 21 ] Massidda S ,Yu J ,Freeman A J ,Koelling D D 1987 *Phys. Lett. A* **122** 198
- [ 22 ] Allen P B ,Pickett W E ,Krakauer H 1988 *Phys. Rev. B* **37** 7482
- [ 23 ] Crommie M F ,Zettl A ,Barbee T W III ,Cohen M L 1988 *Phys. Rev. B* **37** 9734
- [ 24 ] Cohn J L ,Wolf S A ,Selvamanickam V ,Salama K 1991 *Phys. Rev. Lett.* **66** 1098

- [ 25 ] Cohn J L , Skelton E F , Wolf S A , Liu J Z 1992 *Phys. Rev. B* **45** 13140
- [ 26 ] Cochrane J W , Hartmann A , Russell G J 1996 *Physica C* **265** 135
- [ 27 ] Ouseph P J , Ray M , O'Bryan 1990 *Phys. Rev. B* **41** 4123
- [ 28 ] Lowe A J , Regan S , Howson M A 1991 *Phys. Rev. B* **44** 9757
- [ 29 ] Cornejo I A , Trefny J U , Yasar B 1993 *J. Mater. Res.* **8** 255
- [ 30 ] Xiong X M , Peng Z Q , Zhou Y L , Cheng Z H , Lu H B , Wang H S , Cui D F , Li L , Yang G Z 1997 *Physica C* **280** 266

## Influence of annealing oxygen pressure on the laser-induced thermoelectric voltage effect in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ thin films<sup>\*</sup>

Xiong Fei<sup>1)†</sup> Zhang Hui<sup>1)</sup> Li Hong-Shan<sup>1)</sup> Zhang Peng-Xiang<sup>1)</sup> Jiang Zui-Min<sup>2)</sup>

1) *Institute of Advanced Materials for Photo-electronics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China*

2) *State Key Laboratory of Surface Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China*

( Received 13 November 2007 ; revised manuscript received 25 April 2008 )

### Abstract

The laser-induced thermoelectric voltage (LITV) signals were measured in the  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO) films annealed under different oxygen pressure. It was found that the detected LITV signals were enhanced 2—4 times with the increasing of annealing oxygen pressure. The effect can be explained by the dependence of thermoelectric anisotropy on the oxygen content in YBCO. When the films were illuminated by continuous lasers in the wavelength range of 473—808 nm, the measured signals in the films annealed under 5000 Pa oxygen pressure were larger than those in other films. Meanwhile, pulse ultraviolet laser illumination produced the largest signal in the films annealed under oxygen pressure of  $10^5$  Pa. The response time of LITV signals was observed to become shorter with the increasing of annealing oxygen pressure, which was shown to have resulted from the increasing of thermal conductivity theoretically. The films annealed under 5000 Pa oxygen pressure had the fastest response to the pulsed ultraviolet laser. The response time was 70 ns and the rise time of 29 ns was comparable to the duration of the applied laser pulse (about 28 ns).

**Keywords :**  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  films, laser-induced thermoelectric voltage, anisotropy of Seebeck coefficient, oxygen content

**PACC :** 7430F, 7530G, 7475, 4255

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 10274026 ) and the Natural Science Foundation of Yunan Province, China ( Grant No. YKS199907022 ).

<sup>†</sup> E-mail : f\_xiong888@yahoo.com.cn