

高温超导晶界结型红外探测器工作原理*

周方桥 郝建华 易新建 赵兴荣 孙汉东

(华中理工大学光电子工程系, 湖北, 武汉, 430074)

李再光

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 湖北, 武汉, 430074)

摘要: 提出了高温超导晶界结型红外探测器在液氮温区可能同时存在测辐射热和光致非平衡两种效应的工作原理, 给出了两种效应的响应率计算式, 并在实验上研制了性能指标较高的 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 红外探测器.

关键词: 高温超导体, 测辐射热, 光致非平衡.

引言

超导红外探测器与其它材料的红外探测器相比具有功耗小、响应波段宽(近红外至毫米波)和灵敏度高等特点, 但由于受低温条件限制, 其发展较慢. 自 1986 年底液氮温区氧化物超导体发现以来, 许多研究^[1-3]表明, 高温超导薄膜红外探测器可能成为极具发展潜力的新型红外探测器. 目前有关这种新型材料器件的工作机理尚不明确^[4]. 本文针对高温氧化物超导材料具有晶界的结构特性, 从理论上分析了高温超导体对红外辐射可能存在的两种效应, 并实验研制了高性能 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 超导薄膜红外探测器.

1 理论分析

1.1 测辐射热效应

超导体最典型的特征是具有零电阻效应. 如图 1 为典型的 $R-T$ 和微分 $dR/dT-T$ 曲线. 其中 T_{cn} 为起始转变温度, T_{c0} 为电阻降到零时温度. 可见超导样品在转变温区具有较大的 dR/dT 值, 即很高的吸收系数 α . 当超导样品接受红外辐照, 吸收能量后, 温度升高 δT . δT 由下式给出^[5,6]:

本文 1992 年 7 月 15 日收到, 修改稿 1993 年 8 月 30 日收到.

* 国家自然科学基金资助项目.

$$\delta T = \frac{E^2 R}{GR_L^2} + \frac{\eta P}{2G} + \left(\frac{2\eta P}{\pi G} \right) (1 + \omega^2 \tau^2)^{-\frac{1}{2}} \sin(\omega t - \varphi); \quad (1)$$

式(1)是在红外辐射调制为方波, 辐照达稳态情形下得到的. 式中 E 、 R 、 G 、 R_L 、 η 、 P 分别为偏置电压、探测器电阻值、热导、偏置电阻、样品红外光吸收率和光照入射功率. $\tau = C/G$ 为时间常数, 其中 C 为样品热容. $\varphi = \arcsin[\omega\tau/(1 + \omega^2\tau^2)^{\frac{1}{2}}]$.

给定探测器样品的偏置电流 I_b , 便可得到 δT 引起的响应信号电压 V_{S1} ,

$$V_{S1} = \alpha I_b R \delta T = \alpha I_b R \left[\frac{E^2 R}{GR_L^2} + \frac{\eta P}{2G} + \left(\frac{2\eta P}{\pi G} \right) (1 + \omega^2 \tau^2)^{-\frac{1}{2}} \sin(\omega t - \varphi) \right]; \quad (2)$$

在实际测量中, 红外辐射经斩光器斩光后的辐射功率可表示为

$$P(t) = \begin{cases} P, & 0 \leq \omega t \leq \pi, \\ 0, & \pi < \omega t \leq 2\pi; \end{cases} \quad (3)$$

将 $P(t)$ 按傅里叶级数展开得

$$\begin{aligned} P(t) &= P \left[\frac{1}{2} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2 \sin(2n+1)\omega t}{(2n+1)\pi} \right] \\ &= \frac{P}{2} + \frac{2P}{\pi} \sin \omega t + \frac{2P \sin 3\omega t}{\pi \cdot 3} + \frac{2P \sin 5\omega t}{\pi \cdot 5} + \dots \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)若近似到基波分量, 则 $P(t)$ 可近似为

$$P(t) \doteq \frac{P}{2} + \frac{2P}{\pi} \sin \omega t,$$

则入射到器件上的辐射功率基波分量均方根值为 $\bar{P} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} P$, 根据响应率定义, 可得到超导辐射热效应的电压响应率为

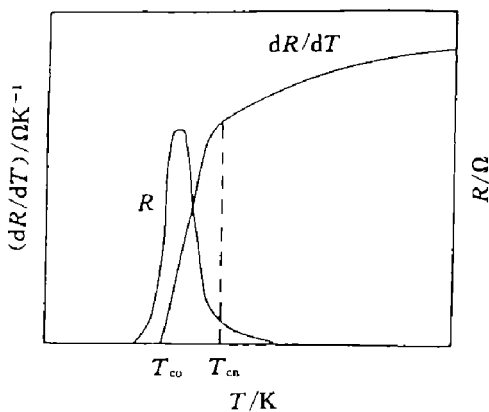


图1 超导体 $R-T$ 及 $dR/dT-T$ 曲线
Fig. 1 The curves of R vs. T and dT/dT vs. T

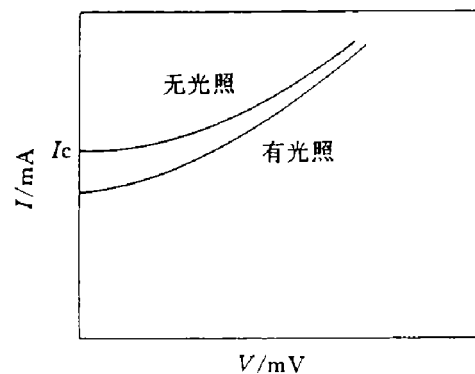


图2 有光照和无光照的弱连接 $I-V$ 曲线
Fig. 2 The curves of I vs. V for weak-link structure with and without irradiation

$$R_{S1} = \frac{\bar{V}_{S1}}{\bar{P}} = \frac{\alpha I_b R \eta}{G} (1 + \omega^2 \tau^2)^{-\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

1.2 光致非平衡效应

高温超导材料具有多晶陶瓷结构. 其典型结构特性是存在大量能发生超导相变的晶粒, 晶粒间被金属相或半导体相的晶界隔开, 构成了晶界约瑟夫逊结, 简称 BJJ (Boundary Josephson Junctions). 当超导样品置于 T_{c0} 以下时, 某些晶粒将发生超导相变, 且在超导样品中出现若干 BJJ. 随着温度的进一步降低, 更多的晶粒发生相变, 并进一步增加了 BJJ 的数目, 直至温度降到 T_{c0} 时, 整个样品发生超导相变. 当红外辐射照到 BJJ 时, 发生拆对作用, 库珀对从超导基态激发到激发态形成准粒子. 由于 BJJ 是一种复连通网络, 这种拆对效应在整个薄膜样品中表现出宏观量子效应, 导致超导样品的伏安特性曲线变化 (见图 2). 根据弱连接型的 RSJ 模型^[7], 弱连接的 $I-V$ 特性解析式可表示为

$$V = R_n \sqrt{I^2 - I_c^2}, \quad (6)$$

式 (6) 中 R_n 为结的正常态电阻, I_c 为临界电流. 当红外辐射照到超导样品时, 考虑到非平衡态时临界电流 I_c 的降低, 则信号电压 V_{S2} 为

$$V_{S2} = R_n \left\{ \sqrt{I^2 - (I_c - \delta I_c)^2} - \sqrt{I^2 - I_c^2} \right\}, \quad (7)$$

式 (7) 中 I_c 的 Ambegaokar-Baratoff 解析式^[8]可简化为

$$I_c \approx \frac{\pi \hbar \Delta(T)}{2eR_n}, \quad (8)$$

式 (8) 中 $\Delta(T)$ 为超导体能隙参数, e 为电子电荷. 当 $I = I_c$ 时, V_{S2} 达到最大值并可近似为

$$V_{S2} = R_n \sqrt{2I_c \delta I_c} = \pi \hbar \sqrt{\Delta \delta \Delta / 2e^2}, \quad (9)$$

由此得到超导体光致非平衡效应的电压响应率为

$$R_{S2} = \frac{\bar{V}_{S2}}{\bar{P}} = \frac{\pi^2 \hbar \sqrt{\Delta \delta \Delta}}{2eP}. \quad (10)$$

2 实验与讨论

采用电子束多层蒸发方法在 (100) ZrO_2 衬底上制备 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 超导薄膜, 薄膜呈 C 轴取向, 零电阻温度 T_{c0} 均在 83 K 以上, 扫描电镜分析结果表明用此方法制备的超导薄膜中存在大量晶界弱连接结构. 用普通光刻法和 $H_3PO_4:H_2O=1:60$ (体积比) 的腐蚀液将超导膜刻蚀成尺寸为 $100 \times 40 \mu m^2$ 的微桥型灵敏元. 将器件装置在液氮杜瓦瓶内, 为了减小测量噪声, 样品的恒流偏置采用串联干电池, 用标准的四引线法检测器件的性能参数. 测量

系统中采用的红外辐射源为 800 K 的标准黑体, 红外辐射经斩光器调制为方波, 调制频率范围为 5~2000 Hz, 红外辐射入射到实测工作温度为 86 K 的样品上, 由探测器灵敏元转换的响应信号经前置放大器放大, 最后用 Model 5209 锁定放大器读出. 为了在调制频率大于 2000 Hz 条件下测量光响应特性, 实验中还采用了 InGaAsP 半导体激光信号, 激光辐射通过一根单模光纤对准样品的灵敏元以消除外界干扰和噪声. 测试结果表明, 用以上方法制备的 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 薄膜红外探测器件, 在 800 K 标准黑体辐射, 调制频率 $f=10$ Hz, 带宽 $\Delta f=1$ Hz 条件下测得的器件响应率 $R=3.0 \times 10^3$ V/W, 探测率 $D^*(800, 10, 1)=1.5 \times 10^9 \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$, 噪声等效功率 $NEP(800, 10, 1)=4.2 \times 10^{-12} \text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$.

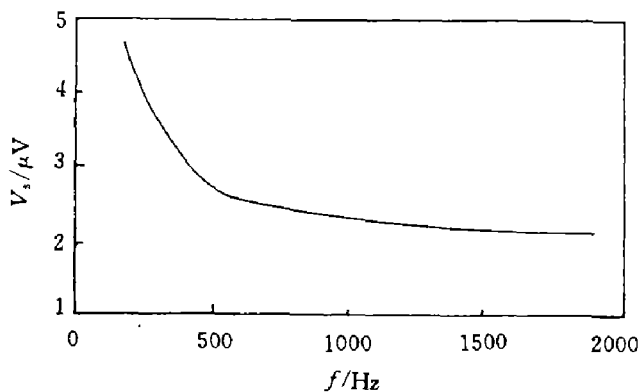


图 3 探测器响应信号与调制频率的关系曲线
Fig. 3 The chopping frequency dependence of signal for the detector

图 3 表示器件的频率特性. 当调制频率低于 800 Hz 时, 响应信号衰减很快, 但是当调制频率提高后, 响应信号逐渐平缓趋于恒定值. 这表明器件可能同时存在两种响应机理. 当调制频率较低时, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 超导薄膜对红外辐射有很强的测辐射热效应^[6]. 调制频率的进一步提高将导致光致非平衡效应成为响应信号的主要成分, 从式 (10) 可看出, 这种机理的响应信号主要是由于超导能隙变化导致临界电流改变而引起的, 它与测辐射热平衡效应无关, 是一种快响应. 我们以 InGaAsP 激光器作红外光源实验, 直至调制频率 f 达到测试系统上限 120 kHz 时仍可观察到明显的响应信号, 这说明了器件中可能同时存在光致非平衡效应.

参考文献

- 1 Leung M et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1987;51:2046
- 2 Richards P L et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1989;54:283
- 3 Hall J et al. *Solid State Comm.*, 1990;76:921
- 4 Kaplan R et al. *J. Appl. Phys.*, 1990;67:4212
- 5 Hao Jianhua et al. *Chin. Phys. Lett.*, 1991;8(10,suppl.):143
- 6 郝建华, 周方桥等. *科学通报*, 1992;37:272
- 7 章立源, 张金龙, 崔广霖. *超导物理*, 北京: 电子工业出版社, 1987, 356
- 8 AmbegaoKar V, Baratoff A. *Phys. Rev. Lett.*, 1963;10:486

A PRINCIPLE OF OPERATION FOR HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTING INFRARED DETECTOR WITH GRAIN BOUNDARY STRUCTURE*

ZHOU FANGQIAO, HAO JIANHUA, YI XINJIAN,
ZHAO XINGRONG, SUN HANDONG

(Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

LI ZAIGUANG

(National Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: A principle of operation for high temperature superconducting infrared detector with grain boundary structure is proposed, in which both bolometric and optically non-equilibrium effects coexist. Responsivities of the detector with the two effects were calculated, and the $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ infrared detector with good performances was prepared.

Key words: high temperature superconductor, bolometer, optically non-equilibrium.

*The project supported by the National Natural Science Foundation of China.