

高温超导红外探测器的研制

陈举新 石保安 周炳 吴汝佳 何文莲 贡树行

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

曹效能 杨彩炳 方希曾 李淑琴 闫旭

(中国科学院电子研究所, 北京, 100080)

张鹰子 赵玉英 李林

(中国科学院物理研究所, 北京, 100080)

用在两种衬底 (SrTiO_3 和 LaAlO_3) 上生长的 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 薄膜制成高灵敏的热敏型高温超导红外探测器。经 500 K 标准黑体的测量, 在 10 Hz 调制频率时, 以 SrTiO_3 为衬底的器件, $D^*(500, 10, 1)$ 达 $8.2 \times 10^8 \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$, $\text{NEP}(500, 10, 1)$ 达 $1.6 \times 10^{-10} \text{W} / \text{Hz}^{1/2}$; 以 LaAlO_3 为衬底的器件, $\text{NEP}(500, 10, 1)$ 达 $10^{-11} \text{W} / \text{Hz}^{1/2}$ 。还测量并分析了 D^* 和 NEP 随频率的变化和噪声频谱。

关键词: 高温超导体, 红外探测器, 测辐射热计。

1 引言

自从高温超导材料问世以来, 高温超导薄膜制作技术日趋成熟, 国内外竞相报道了高温 ($T_c > 77 \text{K}$) 超导红外探测器(简称 HTSD)^[1~4]。

由于材料制备等方面的原因, 目前 HTSD 器件以热敏型高温超导探测器为主, 简称 HTSB 器件。根据 P. L. Richards 等^[3] 的理论计算, 在 10 Hz 调制频率时, 这种器件的噪声等效功率(NEP)可达 $(1 \sim 20) \times 10^{-1} \text{W} / \text{Hz}^{1/2}$ 。目前一些实验室制成的这种器件性能都较低, 例如美国 J. O. Brasunas 等^[4] 用 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (简称 YBCO) 薄膜制成 HTSB 器件, 其噪声等效功率 $\text{NEP} = 5.7 \times 10^{-8} \text{W} / \text{Hz}^{1/2}$, 响应率 $R_v = 5.2 \text{V} / \text{W}$, 响应时间 $\tau = 32 \text{s}$; 瑞士 B. Dwir 等^[5] 制得的同类器件的 $R_v = 5 \text{mV} / \text{W}$, $\text{NEP} = 10^{-6} \text{W} / \text{Hz}^{1/2}$; 我国李羲之等^[6] 制备的这类器件, 在 0.2~10 Hz 时, $\text{NEP} = 5 \times 10^{-8} \text{W} / \text{Hz}^{1/2}$; 曾光丽等^[7] 最近报道的器件的 $\text{NEP}(500, 3.8, 1) = 1.6 \times 10^{-9} \text{W} / \text{Hz}^{1/2}$, 探测率 $D^*(500, 2, 1) = 4.15 \times 10^7 \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ 。我们利用以 SrTiO_3 为衬底的 YBCO 薄膜制成的这种器件, $\text{NEP}(500, 10, 1)$ 达 $1.6 \times 10^{-10} \text{W} / \text{Hz}^{1/2}$, $D^*(500, 10, 1)$ 达 $8.2 \times 10^8 \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$; 以 LaAlO_3 为衬底的同类器件,

NEP(500, 10, 1)已达 $10^{-11} \text{W}/\text{Hz}^{1/2}$ 数量级。

由此可见, HTSB 器件很可能成为高温超导体最先走向实用化的重要器件之一, 估计这种器件不久将在光谱技术, 天文观察, 远红外激光接收, 热核等离子参数测量等方面获得广泛的应用。

2 工作原理

HTSB 器件是利用 YBaCuO 等高温超导薄膜在超导转变温区的电阻随温度急剧变化的特点制成的。探测器的灵敏元由于吸收入射辐射而温度升高, 引起的灵敏元电阻的变化为

$$\Delta R = \frac{\alpha R \eta p_0}{G(1+4\pi^2 f^2 \tau^2)^{1/2}}, \quad (1)$$

这里 R 是灵敏元接收红外辐照前的电阻, G 是探测器经热沉的总热导, f 是信号调制频率, τ 是热时间常数, η 是灵敏元的光吸收率, p_0 是投射到灵敏元上的辐射功率, $\alpha = (1/R)(dR/dT)$ 是灵敏元在工作点附近的电阻温度系数。

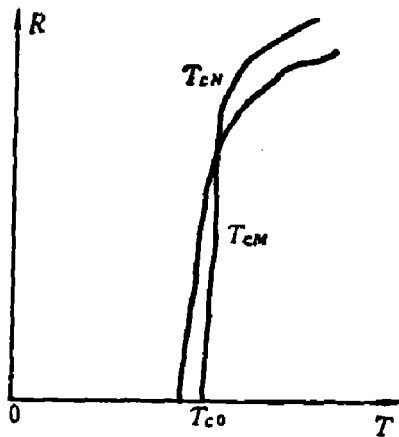


图1 YBaCuO 薄膜电阻随温度的变化

Fig. 1 Variation of resistivity of YBaCuO film vs temperature

图1是两种 YBaCuO 超导薄膜电阻 R 随温度 T 的变化曲线。超导薄膜是分别生长在 LaAlO_3 (曲线1) 和 SrTiO_3 (曲线2) 衬底上的。从图1可知, 前者的超导转变宽度 $\Delta T = 0.4 \sim 1 \text{K}$ 较小, 后者 $\Delta T = 1 \sim 2 \text{K}$ 较大。 ΔT 越小, α 则越大, ΔR 也越大, 对探测器越有利。

当在探测器灵敏元上施加一个恒定电流 I 时, 电阻的变化引起电压的变化, 从而在灵敏元上获得电压信号 V_s , 根据定义, 电压响应率为

$$R_v = \frac{I \alpha R \eta}{G(1+4\pi^2 f^2 \tau^2)^{1/2}}, \quad (2)$$

从式(2)可知, 要想提高探测器的响应率, 要求超导薄膜有大的电阻温度系数 α , 较高的电阻 R , 良好的光吸收率 η , 低的热导 G 和小的热容 $C(C = \tau G)$ 。施加的偏流 I 因受到噪声及超导临界电流密度的限制而必须适当, 调制频率越低则响应率越大。另外, 超导薄膜的厚度与响应速度成反比^[1]。对于快速响应器件对热导和热容的要求更高。

3 探测器结构

灵敏元材料 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 是利用直流磁控溅射法定积在厚度约为 $0.5 \mu\text{m}$ 的 SrTiO_3 或 LaAlO_3 的 $\langle 100 \rangle$ 晶面上, 形成 c 轴取向的 YBCO 薄膜, 厚度约 $200 \sim 300 \text{nm}$, 零电阻温度 $T_{c0} = 90 \text{K}$, 临界电流密度 $J_0 > 1 \times 10^5 \text{A}/\text{cm}^2$ 。

由于超导材料在超导转变中点温度 T_{cm} 附近的电阻率很低, 故采用光刻法将 YBCO 薄膜制成图2所示的曲折形状, 宽度为 $50 \mu\text{m}$, 间隙为 $20 \mu\text{m}$, 总长度约 39mm 。灵敏元的

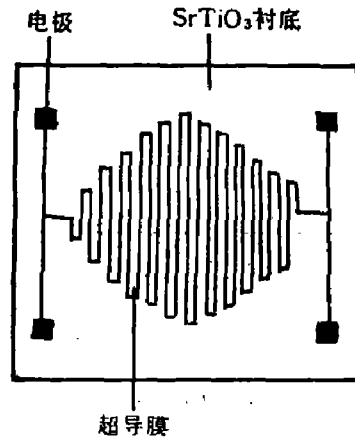


图 2 超导探测器的灵敏元示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the sensitive element of the high T_c superconducting bolometer

直径 $\phi=1.8\text{ mm}$, 在 T_{cm} 附近的电阻约 $2\sim 3\text{ k}\Omega$, 便于制作前置放大器. 灵敏元置于管座中央, 非接触的可调距光锥置于灵敏元上方, 使用光锥的目的是为了提高红外辐射的能量密度. 放置元件的杜瓦瓶采用液氮致冷, 用精密控温仪控制温度, 窗口是 ZnSe 或 KRS-5.

4 测试结果及分析

高温超导红外探测器的测试系统如图 3 所示, 包括 500 K 标准黑体及 HFY-200 黑体源温控装置, ND-4 可变频率斩波器, B & K 2010 波形分析仪, 小型微机及打印机, BWY-802 温度控制器, 可变温度杜瓦瓶, 及 YEW-3066 记录仪. 自制低噪声前置放大器的增益为 1.6×10^4 , 带宽为 $5\sim 80\text{ kHz}$, 短路噪声 3 nV . 黑体控温精度优于 1 K , 光栏孔径 $\phi=4\text{ mm}$; 调制范围为 $5.4\text{ Hz}\sim 2.1\text{ kHz}$, 精度达 0.01 ; HTSB 元件工作在 T_{cm} 附近的控温精度为 $\pm 0.1\text{ K}$, 测试结果如表 1, 2 所示.

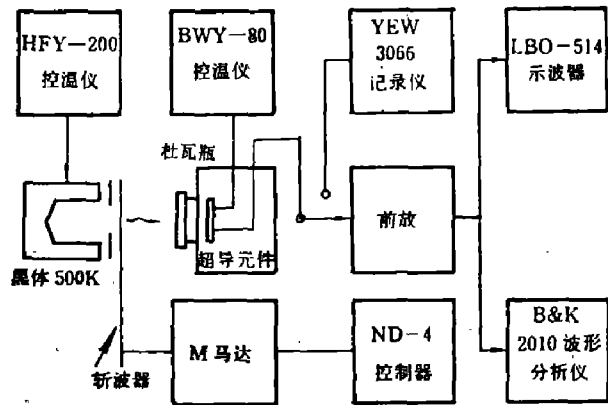


图 3 高温超导红外探测器性能测试系统

Fig. 3 Measuring system for performances of high T_c superconducting IR bolometers

我们还测量了 HTSB 器件的频谱特性, 测试框图如图 4. 由 B & K 2010 频谱仪驱动大功率 GaAs 发光二极管 (辐射波长 $\lambda=0.93\text{ }\mu\text{m}$), 其调制频率由 B & K 2037 记录仪驱动 B&K 2010 进行自动扫描, 频率为 $3\text{ Hz}\sim 200\text{ kHz}$. HTSB 器件的电信号经前置放大器输入 B & K 2010 频谱仪的输入端, 其频谱数据输出到 B & K 2037 记录仪和微机经处理便可打印出响应率 R_v , 噪声 V_n 及探测率 D^* 随调制频率 f 的相对变化值, 如图 5~7 所示.

由表 2 可知, 目前高温超导探测器的低频性能还不如 TGS 热释电红外探测器, 但高频性能已超过 TGS 及其它热释电探测器. 只要采取适当的光学措施, 热敏型高温超导探测器

表 1* 高温超导红外探测器的主要性能

Table 1 Main performances of high T_c superconducting infrared bolometers

元件编号	衬底厚度 (mm)	超导材料	转变温度 (K)	调制频率 (Hz)	信号 V_s (μV)	噪声 V_n (μV)	信噪比 V_s/V_n	响应率 R_v (V/W)	噪声等效功率 NEP ($W/Hz^{1/2}$)	探测率 D^* ($cm \cdot Hz^{1/2}/W$)
5*	SrTiO ₃ 0.5	YBCO	85	10	24	0.036	640	104	2.5×10^{-10}	5.2×10^8
6*	SrTiO ₃ 0.28	YBCO	87	10	17.5	0.022	796	105	2.1×10^{-10}	6.4×10^8
7*	SrTiO ₃ 0.5	YBCO	86.5	10.8	35.7	0.0357	1000	134	1.6×10^{-10}	8.2×10^8
4*	LaAlO ₃ 0.5	YBCO	90	10	20	0.031	640	108	1.7×10^{-10}	5.6×10^8

表 2* HTSB-7 探测器的响应频谱

Table 2 Frequency dependence of the performances of HTSB-7 detector

调制频率 f (Hz)	信号 V_s (μV)	噪声 V_n (μV)	信噪比 V_s/V_n	响应率 R_v (V/W)	噪声等效功率 NEP ($W/Hz^{1/2}$)	探测率 D^* ($cm \cdot Hz^{1/2}/W$)
5.1	19.0	0.022	864	115	1.9×10^{-10}	7.1×10^8
10	17.5	0.022	796	106	2.1×10^{-10}	6.4×10^8
68	5.6	0.013	431	34	3.8×10^{-10}	3.6×10^8
110	4.8	0.012	400	29	4.1×10^{-10}	3.3×10^8
514	2.4	0.010	240	15	6.7×10^{-10}	1.7×10^8
876	1.9	0.011	173	12	9.2×10^{-10}	1.5×10^8
1000	1.6	0.011	155	10	11×10^{-10}	1.2×10^8
1482	1.2	0.011	109	7.2	15×10^{-10}	9.0×10^7
1913	1.0	0.011	91	6.0	18×10^{-10}	7.5×10^7

* 表 1 和表 2 是带光锥的测试数据, 光锥实际光学增益约为 6。

就可能达到从紫外到远红外的全波段响应。

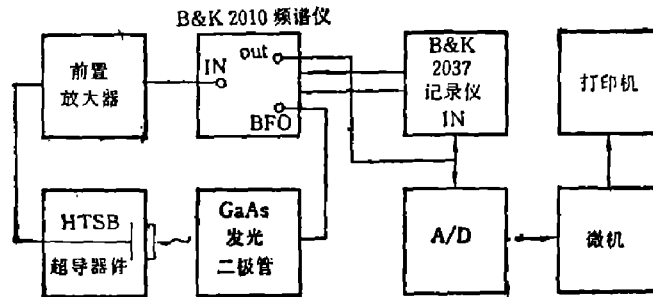


图 4 超导器件频谱测试系统框图

Fig. 4 Schematic diagram of the measuring system for frequency spectrum of high T_c superconducting IR bolometers

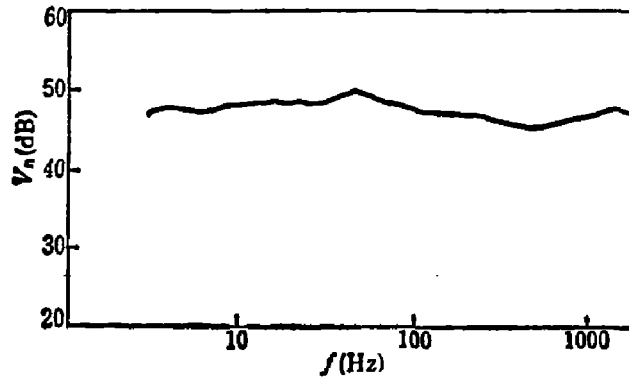


图 5 高温超导红外探测器的噪声频谱

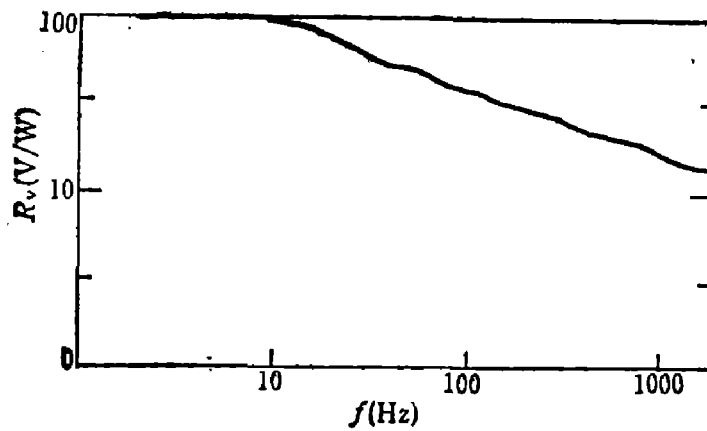
Fig. 5 Noise spectrum of the high T_c superconducting IR bolometer

图 6 高温超导红外探测器的响应率频谱

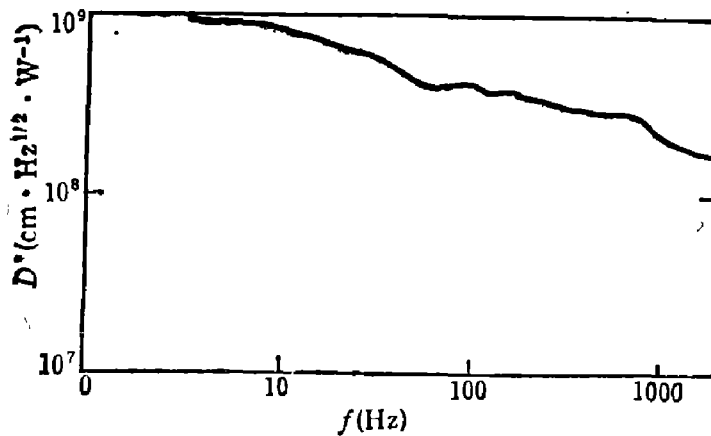
Fig. 6 Responsivity spectrum of the high T_c superconducting IR bolometer

图 7 高温超导红外探测器的探测率频谱

Fig. 7 Detectivity spectrum of the high T_c superconducting IR bolometer

参 考 文 献

- 1 西野寿一, 川道边潮, オプトロニクス, 1987; (11): 106~110
- 2 Carr G L et al, *Appl. Phys. Lett.*, 1990; **57**(25): 2725
- 3 Richards P L et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1989; **54**(3): 283~285

- 4 Brasunas J C et al. *J. Appl. Phys.*, 1989; **66**(9): 4551~4554
- 5 Dwir B et al. *Supercond. Sci. Technol.*, 1989; **2**(6): 314~316
- 6 Li Xizhi et al. *Int'l J. IR & MM Waves*, 1989; **10** (3). 445~456
- 7 曾光丽等, 红外技术, 1991; **13**(1): 1~5

DEVELOPMENT OF HIGH T_c SUPERCONDUCTING INFRARED BOLOMETERS

CHEN JUXIN, SHI BAO'AN, ZHOU BING, WU RUJIA,
HE WENLIAN, GONG SHUXING

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

CAO XIAONENG, YANG CAIBING, FANG XIZENG, LI SHUQIN, YAN XU
(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

ZHANG YINZI, ZHAO YUYING, LI LIN
(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

High T_c superconducting infrared bolometers have been developed by using two kinds of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ thin films sputtered on SrTiO_3 and LaAlO_3 substrates respectively. The performances of the bolometers are measured by using a standard blackbody at 500K. The NEP (500, 10, 1) of the bolometer on SrTiO_3 is $1.6 \times 10^{-10} \text{W/Hz}^{1/2}$, its $D^*(500, 10, 1)$ is $8.2 \times 10^{-8} \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$. The NEP(500, 10, 1) of the bolometer on LaAlO_3 is $10^{-11} \text{W/Hz}^{1/2}$. The frequency dependence of the detectivity and responsivity and the noise spectrum are measured respectively and analyzed in this paper.

Key words: high T_c superconductors, infrared detectors, bolometers.