

## YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3-x</sub>Zn<sub>x</sub>O<sub>7</sub> 薄膜红外探测器的研究\*

钟丽云 朱世秋 王 翊 杨齐民

杨 宇

(云南工业大学激光研究所, 昆明, 650051)

(昆明物理研究所, 昆明, 650051)

摘要: 在对红外探测器进行理论分析的基础上, 设计并研制了液氮温度下的 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3-x</sub>Zn<sub>x</sub>O<sub>7</sub> 薄膜红外探测器, 系统地测试了器件的特征参数。最好的结果为: 对于波长为 10 $\mu$ m, 调制频率为  $f = 500\text{Hz}$ , 带宽为  $\Delta f = 1\text{Hz}$  的红外输入辐射  $R_v(500, 10, 1) = 3587\text{V/W}$ ,  $\text{NEP}(500, 10, 1) = 6.5 \times 10^{-12}\text{W/Hz}^{1/2}$ ,  $D^*(500, 10, 1) = 7.2 \times 10^{12}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ,  $\tau(500, 10, 1) = 1.2\text{ms}$ 。

关键词: YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3-x</sub>Zn<sub>x</sub>O<sub>7</sub> 薄膜 红外探测器 掺杂

## Study of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3-x</sub>Zn<sub>x</sub>O<sub>7</sub> thin film infrared detector

Zhong Liyun, Zhu Shiqiu, Wang Yi, Yang Qimin

(Institute of Laser, Yunnan Polytechnic University, Kunming, 650051)

Yang Yu

(Kunming Institute of Physics, Kunming, 650051)

**Abstract:** Base on the theoretical analysis, the YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3-x</sub>Zn<sub>x</sub>O<sub>7</sub> thin film infrared detector has been designed and manufactured. The properties of the detector has been measured at 77 K and are well agreement with design, as follow:  $R_v(500, 10, 1) = 3587\text{V/W}$ ,  $\text{NEP}(500, 10, 1) = 6.5 \times 10^{-12}\text{W/Hz}^{1/2}$ ,  $D^*(500, 10, 1) = 7.2 \times 10^{12}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ,  $\tau(500, 10, 1) = 1.2\text{ms}$ .

**Key words:** YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3-x</sub>Zn<sub>x</sub>O<sub>7</sub> thin film infrared detector doping

### 引 言

高温超导薄膜红外探测器由于具有低功耗、宽频带、低噪声、小尺寸等许多优点, 因此在军事、航天等方面有广阔的应用前景, 越来越受到人们的重视, 掺杂作为改变物性的一种有效手段在高温超导体的研究中占有重要地位, YBCO 体系的掺杂可以改善超导性能和消除层错<sup>[1,2]</sup>, YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3-x</sub>Zn<sub>x</sub>O<sub>7</sub> 高  $T_c$  超导薄膜由于具有较高的红外吸收系数和较低的反射率, 用其制作红外探测器将大大提高器件的灵敏度和探测率, 我们在对器件进行理论分析的基础上, 提出了一些改善高温超导薄膜红外探测器性能指标的新方法。

### 一、理 论 分 析

热效应的红外探测器主要有以下几个特征参数:

#### 1. 响应度 $R_v$

响应度是输出与输入之比, 设探测器的热容量为  $C$ , 通过热传导  $G$  与热库相连。则在热辐射  $\Psi = \Psi_0 e^{i\omega t}$  作用下, 探测器的温度变化为<sup>[3]</sup>

\* 云南省科委应用基金资助。

$$\Delta T = 2 \Psi_0 / [G(1 + \omega^2 C^2 / G^2)^{1/2}] \quad (1)$$

式中,  $\Psi_0$  是入射到探测器上的辐射功率振幅。由此式可以定义热时间参数  $t = C/G$ , 如器件的偏置电流为  $I$ , 则

$$\Delta V = IdR = (2I \Psi_0 \alpha \beta R) / [G(1 + \omega^2 C^2 / G^2)^{1/2}] \quad (2)$$

式中,  $dR$  为热辐射引起的电阻变化量,  $\alpha$  为电阻温度系数 ( $\alpha = 1dR/(RdT)$ ),  $\beta$  为吸收系数。由上式可知, 要获得一个高响应的热效应探测器必须要: (1) 高的电阻温度系数  $\alpha$  值及高响应速度; (2) 高的探测器电阻  $R$ ; (3) 高的吸收系数; (4) 低的热容; (5) 合适的热导。

通过对上述各物理参数的调整控制可获得最大的光电转换信号, A. Carrington 等人的研究结果表明<sup>[4]</sup>, 适量  $Zn$  的掺杂可以提高  $YBa_2Cu_{3-x}Zn_xO_7$  薄膜的吸收系数, 降低其热容。我们通过大量的研究发现, 以  $YBa_2Cu_{3.6}Zn_{0.4}O_7$  组分的薄膜效果最好。

## 2. 噪声等效功率 (NEP)

热效应的红外探测器的噪声主要有以下三种:

(1) 黑体源的辐射噪声, 背景辐射噪声; (2) 探测器噪声: 包括  $1/f$  噪声, 热噪声, 琼生噪声等; (3) 电子读测系统的噪声。

NEP 是入射到探测器上, 产生的信号输出等于均方根噪声输出时所需的入射光功率。NEP 值是在相同条件下对同类探测器进行比较的一个实用参量, 可用下式表达:

$$NEP = \varphi [1/(S/N)] / [1/(\Delta f)^{1/2}] \quad (3)$$

式中,  $\varphi$  为红外辐射功率,  $S$  为信号,  $N$  为噪声,  $\Delta f$  为带宽。

对于超导红外探测器, 可以推得

$$NEP = \frac{4K_B^2 T_B^2}{h^3 c^2} \int_0^\infty \frac{t^4 e^f}{(e^f - 1)^2} dt + \frac{4K_B T_B^2 c G}{\omega} + \frac{4K_B T c R}{R_V^2} + \frac{A V^2}{f R_V^2} + \frac{4K_B T_N R}{R_V^2} \quad (4)$$

式中,  $K_B$  为波尔兹曼常数,  $T_B$  为黑体温度,  $R$  为探测器电阻,  $R_V$  为探测器响应度,  $A$  为实验测定的常数,  $f$  为调制频率,  $T_N$  为读出系统的噪声温度,  $t$  为积分因子,  $t^4 e^f / (e^f - 1)^2$  为辐射噪声,  $4K_B T_B^2 c G$  为器件热噪声,  $4K_B T c R / R_V^2$  为琼生噪声,  $A V^2 / (f R_V^2)$  为  $1/f$  噪声,  $4K_B T_N R / R_V^2$  为测试系统噪声。

利用上式可算出超导红外探测器的 NEP 理论值大约在  $1 \times 10^{-12}$  到  $2 \times 10^{-11} \text{WHz}^{-1/2}$  之间, 因此降低系统噪声才能提高探测器的信噪比和灵敏度。

## 3. 探测度 $D$ 及归一化探测度 $D^*$

$D$  是等效噪声功率的倒数, 是探测器灵敏度的标志。

$$D = 1/NEP \quad (5)$$

$$D \propto 1/A \Delta f$$

为了对同类探测器在不同尺寸  $A$  和不同频带宽度  $\Delta f$  条件下进行比较, 对  $A$  和  $\Delta f$  进行归一化, 用归一化探测率  $D^*$  来表示:  $D^* = D A \Delta f = A \Delta f / NEP$  (6)

它表示当带宽为 1Hz, 1W 的辐射功率入射到  $1\text{cm}^2$  的探测器面积上的信噪比, 其单位为  $\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 。

利用量子理论进行推导, 可得超导红外探测器的归一化探测率  $D^* \propto l/d$  即  $D^*$  正比于超导薄膜的长厚比  $l/d$ , 与宽度无关。因此在设计超导红外探测器时, 我们必须用细长的弯曲或蛇形图形成来增加薄膜的长度, 并在尽可能的条件下减小薄膜的厚度来提高探测器的  $D^*$ 。

4. 响应时间(τ)

基于热响应的探测器,一般响应时间较长,大多在 ms 量级。超导薄膜探测器的响应时间除了与包含衬底在内的整个器件的热容量和热导有关外,还在很大程度依赖于超导膜和衬底之间的界面电阻和热阻。这是影响超导开关响应时间提高的主要因素。目前我们可用下述方法来确定响应时间。

$$R_V(f) = R_0 / (1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2)^{1/2} \quad (7)$$

选择不同的调制频率  $f_1$  及  $f_2$ , 分别测出  $R_V(f_1)$  和  $R_V(f_2)$ ,  $R_0$  为常数, 根据上式即可算出响应时间。

二、探测器的制作与特性测试结果

根据以上的理论分析和要求, 并综合考虑各种因素, 我们制作了 Zn 掺杂的 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3-x</sub>Zn<sub>x</sub>O<sub>7</sub> 薄膜指标如下:  $x = 0.4$ ,  $T_C \geq 83K$ ,  $J_C \approx 6.5 \times 10^3 A/cm^2$ ,  $\Delta T \leq 1K$ , 基底(SrTiO<sub>3</sub>) 尺寸为 10mm × 10mm, 薄膜的厚度为 1500Å, 采用精细的光刻工艺将薄膜光刻成蛇形形状, 用高热树脂粘接在杜瓦瓶真空室的冷台上, 用导电银胶焊接金丝引线, 密封杜瓦瓶, 抽成高真空, 探测器的测试框图如附图所示。

其中红外光辐射经斩波器调制为方波, 调制频率为 10~ 1500Hz, 超导薄膜用四引线法连接, 光响应信号由记录仪即美国产 Model 5290 锁相放大器读出, 微伏表是用以测量光照射后的输出电压信号, 薄膜样品采用恒流源偏置并放在液氮杜瓦瓶内。

通过对探测器进行多次改进和测量, 目前最好的测试结果如下:

$$R_V = 3578V/W, NEP = 6.5 \times 10^{-12} W/Hz^{1/2}, D^* = 7.2 \times 10^{12} cmHz^{1/2}/W, \tau = 1.2ms$$

Table The comparison of characteristic parameters of different superconducting thin film

superconducting thin film	YBaCu(Zn)O	YBaCuO <sup>[6]</sup>	GdBaCuO <sup>[7]</sup>
shape of thin film	S shaped	zigzag	zigzag
sensitive area(mm <sup>2</sup> )	26 × 0.2	9 × 12	7 × 0.8
noise equivalent power NEP (W·Hz <sup>-1/2</sup> )	6.5 × 10 <sup>-12</sup>	4.3 × 10 <sup>-9</sup>	3.7 × 10 <sup>-11</sup>
responsivity R <sub>V</sub> (V/W)	3587	1391	2098
detectivity D* (500, 10, 1) (cm <sup>2</sup> ·Hz·W <sup>-1</sup> )	7.2 × 10 <sup>11</sup>	5.6 × 10 <sup>8</sup>	4.1 × 10 <sup>9</sup>
response time τ(ms)	1.2	5.8	3.7

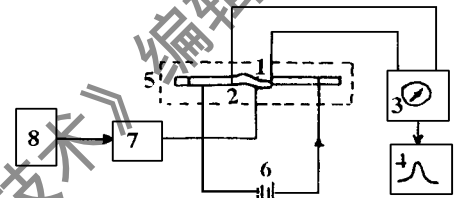


Fig The block of the experimental set-up of measuring characteristic parameters of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3-x</sub>Zn<sub>x</sub>O<sub>7</sub> thin film  
 1—YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3-x</sub>Zn<sub>x</sub>O<sub>7</sub> thin film 2—the position of light radiation 3—microvoltmeter 4—locking phase amplifier 5—constant temperature zone 6—constant ampere source 7—chopper 8—black body

附表给出了我们目前最好的测试结果, 为了便于比较, 同时给出了目前一些文献<sup>[6, 7]</sup>报道的测试结果。

比较以上的测试结果可以看出, 蛇性结构的 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3-x</sub>Zn<sub>x</sub>O<sub>7</sub> 薄膜红外探测器无论在等效噪声功率、响应率、探测率和响应时间等性能方面比同类探测器都有较大改善, 在研究中我们还发现, 高质量的薄膜、精细的光刻

工艺以及高真空条件是获得高性能 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3-x</sub>Zn<sub>x</sub>O<sub>7</sub> 薄膜红外探测器的重要保证。

参 考 文 献

1 Anderson P W, Carr J P. Phys Rev, 1994; B41: 1893

## 关于激光光束质量若干问题的分析\*

吕百达

(四川大学激光物理与化学研究所, 成都, 610064)

摘要: 从  $M^2$  因子概念出发, 对高功率激光(典型例为惯性约束聚变驱动器中传输的激光和高功率激光的空间运输)的光束质量进行了分析。对高功率激光光束质量定义和测量方法中若干问题也作了讨论。

关键词: 光束质量 高功率激光 惯性约束聚变 高功率激光空间运输

### Analyzing some problems of laser beam quality

L Baida

(Institute of Laser Physics & Chemistry, Sichuan University, Chengdu, 610064)

**Abstract:** Starting from the  $M^2$  factor concept, the beam quality of high-power lasers, typical examples of which are lasers propagating through ICF driver and laser power beaming, has been analyzed. Some aspects concerning the beam quality definition and measurement methods of high-power lasers have also been discussed.

**Key words:** beam quality high-power laser inertial confinement fusion (ICF) laser power beaming

### 引 言

通常认为光束质量是从质的方面来评价激光的特性。但是, 较长时期以来, 光束质量一直没有确切的定义, 也未建立标准的测量方法, 这给科研和应用都带来不便。例如, 在激光产品说明书上常给出远场发散角  $\theta_0$  作为激光光束质量参数, 但并未指明输出光束束宽  $w$  (或束腰宽度  $w_0$ ), 而  $\theta_0$  是可通过附加光学系统改变的, 由此易引起争议。90 年代初, Siegman 对描述激光光束质量的  $M^2$  因子概念给出了较为完整的理论<sup>[1]</sup>,  $M^2$  因子(衍射极限倍数因子)或其倒数  $K$  因子(光束传输因子)成为通常情况下评价激光光束质量参数。国际标准化组织(ISO)

\* 本工作得到国家高技术激光技术主题 410-1 和强辐射重点实验室项目 H96-1 支持。主要内容曾在国家高技术强辐射重点实验室报告。

- 2 Ong N P, Salem J, Lee W Y *et al.* Phys Rev Lett, 1991; 67: 2088
- 3 张振杰译. 光辐射探测器. 西安: 陕西省教育出版社, 1991: 346
- 4 Carrington A, Catts P F. Phys Rev Lett, 1992; 69: 2855
- 5 Richards P L, Fisher M J, Dehart T E *et al.* A P L, 1989; 54: 283
- 6 Polliner C, Sugimoto A, Yamaquchi Y *et al.* J Phys Soc Jpn, 1994; 71: 3348
- 7 Fukuyama H, Tanaka M, Tachikawa M. J Phys Soc. Jpn, 1995; 74: 4213

\* \* \*

作者简介: 钟丽云, 女, 1968 年 2 月出生。硕士, 副教授。主要从事激光技术、激光光谱和光电微弱信号检测方面的研究工作。