

# YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>高温超导薄膜线列探测器的研究\*

麦志洪 赵兴荣 周方桥 孙汉东 郝建华 易新建

(华中理工大学光电子工程系, 湖北, 武汉, 430074)

宋文栋

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 湖北, 武汉, 430074)

**摘要** 采用准分子激光扫描消融法淀积性能均匀的 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> 高温超导薄膜, 用离子束刻蚀进行器件的图形制备, 获得了非均匀性小于 10% 的 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> 高温超导薄膜 8 元线列探测器. 测试了器件在 8~14 μm 波段的性能及光响应特性, 单元探测器为 40×100 μm<sup>2</sup> 的微桥结构. 器件的平均归一化探测率 ( $\bar{D}^*$ ) 为  $1.44 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ , 平均噪声等效功率 ( $\overline{NEP}$ ) 为  $4.4 \times 10^{-12} \text{ WHz}^{-1/2}$ ,  $\bar{D}^*$  的非均匀性小于 10%. 研究结果表明: 该线列探测器具有良好的均匀性, 证实了该工艺适用于制备均匀性良好的高温超导薄膜红外探测器阵列.

**关键词** YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>, 高温超导薄膜, 线列探测器.

## 引言

从理论上讲, 超导红外探测器可响应从毫米波到  $x$  射线的电磁波辐射; 实验表明, 高温超导薄膜在可见光与红外光波段有良好的响应, 并具有极快的响应速度, 无论是 Bolometer 型还是非 Bolometer 型超导薄膜红外探测器, 只要合理优化器件参数, 均可响应 ns 级甚至 ps 级的超快光脉冲<sup>[1]</sup>, 这说明超导薄膜红外探测器完全适用于目前热像系统所采用的标准电视帧速 (30 帧/s). 由于该探测器的制备工艺简单, 均匀性好, 可以满足热成像的要求, 因为像元间的响应均匀性是决定图像质量的一个重要因素<sup>[2]</sup>. 由于超导薄膜红外探测器具有以上特点, 所以它是实现长波红外探测与成像很有希望的途径.

本文报道了关于 YBCO 高温超导薄膜线列红外探测器的研究结果. 实验中采用准分子激光扫描消融法淀积 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> 高 T<sub>c</sub> 超导薄膜. 该方法是在真空系统外用一光学变换传输系统使得激光束绕一定的半径旋转, 旋转的激光在超导靶上扫描消融, 消融的等离子体羽在基片上淀积超导薄膜. 实验表明用这种方法提高了超导薄膜的厚度均匀性<sup>[3]</sup>. 器件的制备采用离子束刻蚀, 它避免了化学刻蚀工艺中腐蚀残留液对超导薄膜的不良影响, 而且适用于精细图形加工, 工艺参数易于控制<sup>[4]</sup>. 研究表明采用上述两种技术可获得均匀性良好的超导

\* 国防科工委预研基金资助项目

本文 1994 年 9 月 9 日收到, 修改稿 1995 年 1 月 11 日收到

薄膜线列探测器.

## 1 实验

采用准分子激光扫描消融法淀积  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  的工艺条件为:淀积超导薄膜时通过正对基片的氧气喷嘴充入 39Pa 的流动氧气,基片温度为 650℃,基片与超导靶的间距为 4.3cm,激光能量密度为  $3\text{J}/\text{cm}^2$ ,激光脉冲重复频率为 9Hz,扫描淀积 20min 后充入  $6.7 \times 10^{-4}\text{Pa}$  的氧气,然后自然冷却到室温.调节激光扫描半径为 9mm.实验中我们采用 (100)Y-ZrO<sub>2</sub> 单晶衬底,基片尺寸为  $5 \times 8\text{mm}^2$ .该基片能完全处在激光消融的等离子羽均匀淀积的区域内,从而保证了超导薄膜的均匀性.该方法所制备的 YBCO 薄膜为沿 C 轴取向的外延膜<sup>[3]</sup>.本实验淀积的薄膜厚度约为 300nm.

离子束刻蚀是在 LD-3 型离子束刻蚀机上进行的.实验中采用正型光致抗蚀剂掩膜,其厚度为  $1\mu\text{m}$ ,经前烘、显影、冲洗后送入离子束刻蚀机内.采用 Kaufman 离子源,实验条件为:本底真空度为  $8 \times 10^{-3}\text{Pa}$ ,离子源工作气压为  $4 \times 10^{-2}\text{Pa}$  Ar 气.  $\text{Ar}^+$  离子能量范围为 400-800eV,束流为 40-70mA,束流直径为  $\varnothing 10\text{cm}$ ,采用半导体制冷冷却衬底.刻蚀完成后用丙酮浸泡去胶.

我们采用常规方法对研制出的 YBCO 超导薄膜 8 元线列红外探测器的性能及光响应特性进行了测试.把探测器装在一个为 8 元探测器而设计的杜瓦瓶中,杜瓦瓶冷指温度为 83K.在测试中我们选择 8-14 $\mu\text{m}$  红外波段,辐射源黑体的温度为 500K,调制频率为 1000Hz.器件工作时采用恒流源偏置,响应信号由 Model 5209 锁相放大器读出.

我们所研制出的器件为 8 元线列探测器,其显微照片如图 1 所示,它是由 8 个微桥型的探测器单元平行排列而成.微桥尺寸为  $40\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ ,微桥之间的距离为  $60\mu\text{m}$ .

## 2 实验结果与分析

表 1 给出了偏置电流  $I_b$  为 3.5mA 时的性能测试结果.从表 1 中可以得出平均归一化探测率( $\bar{D}^*$ )为  $1.44 \times 10^9\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ ,平均噪声等效功率( $\overline{NEP}$ )为  $4.4 \times 10^{-12}\text{WHz}^{-1/2}$ , $D^*$  的非均匀性小于 10%.

Bolometer 型超导红外探测器是根据超导材料的电阻在转变温区随温度急剧变化的特性来工作的,探测器的电压变化量可表示为:

$$V_s = I_b \frac{dR_b}{dT} \Delta T, \quad (1)$$

式(1)中  $\Delta T$  为器件吸收热量而产生的温度变化, $I_b$  为偏置电流.式(1)表明 Bolometer 型超导薄膜红外探测器的响应信号的大小决定于偏置电流及电阻随温度的变化率,在相同偏置

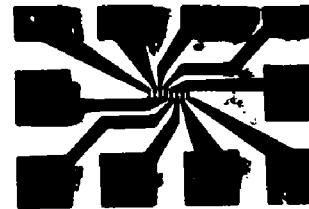


图 1 YBCO 高温超导薄膜  
8 元线列探测器显微照片  
Fig. 1 The microphotograph of  
8-element linear array detectors  
of YBCO thin films

的情况下,单元器件具有一致的  $R-T$  曲线是阵列探测器获得均匀光响应的必要条件.从我们的实验过程可以看出,可采用准分子激光扫描消融法淀积超导薄膜和利用离子束刻蚀进行器件和图形加工两种工艺来提高线列探测器的光响应均匀性.

表 1 8 元线列 YBCO 薄膜红外探测器性能测试结果  
Table 1 Measurement results biased at the current of 3.5mA

单元序号	1	2	3	4	5	6	7	8
$R(V/W)$	6756	7118	6658	7314	8033	7778	6963	7611
$NEP(\times 10^{-12} WHz^{-1/2})$	4.72	4.48	4.79	4.36	3.97	4.10	4.58	4.19
$D^*(\times 10^9 cmHz^{1/2} W^{-1})$	1.34	1.41	1.32	1.45	1.59	1.54	1.38	1.51

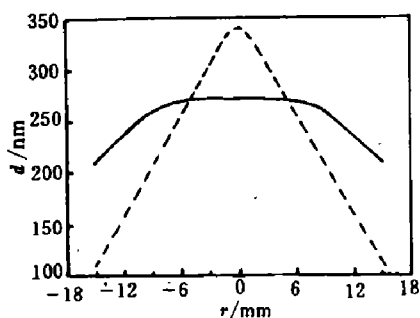


图 2 激光扫描消融淀积的超导薄膜厚度分布曲线  
实线:扫描半径为 9mm;虚线:扫描半径为 0

Fig. 2 The distribution curve of the thickness of superconducting thin films deposited by excimer laser scanning ablation. Solid line:  $R=9\text{mm}$ ; dashed line:  $R=0$

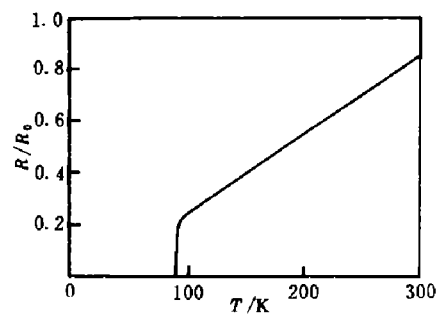


图 3 薄膜与探测器的  $R-T$  特性曲线  
Fig. 3 The  $R-T$  curves of the detectors and thin films

图 2 为采用准分子激光扫描消融法淀积的 YBCO 超导薄膜厚度分布曲线.从图 2 可看出,当扫描半径  $R$  为 9mm 时,在所需的区域内薄膜厚度的分布是非常均匀的<sup>[3]</sup>.为了便于比较,图 2 中还给出了扫描半径  $R$  为 0 时的膜厚分布曲线.

图 3 为薄膜与离子束刻蚀出的线列探测器单元的  $R-T$  特性曲线,该曲线采用 YEW3086 型 X-Y 记录仪测试,测试结果表明探测器的  $R-T$  曲线与薄膜几乎完全一致.由于采用离子束刻蚀所制备的器件仍能保持与薄膜一致的超导特性,因此在薄膜超导特性均匀的情况下,采用离子束刻蚀可以保证阵列探测器各单元器件具有一致的  $R-T$  特性.

图 4 为探测器的响应信号与偏置电流( $V_b, I_b$ )的关系.图 4 中随着偏置电流的增大,光响应信号随之增大,并在  $I_b=3.5\text{mA}$  附近有一个峰值,随后光响应信号随偏置电流的增大反而减小,这说明对于 Bolometer 型超导薄膜红外探测器偏置电流对光响应信号的影响极大.从图 3 与图 4 的分析可看出,该线列探测器光响应的均匀性不仅是由于器件具有一致性的  $R-T$  的特性,同时也具有一致性的  $V_b, I_b$  特性,从而保证器件在相同的偏置下获得均匀的光响应.

此外我们还测试了探测器偏置电流为 3.5mA 时光响应与调制频率的关系(见图 5).从图 5 可以看出,器件的光响应信号随调制频率的增加而有明显的衰减,其主要原因是衬底存

在比器件大得多的热容(器件本身的热容可忽略不计),因而热时间常数很大,严重影响了器件的高频特性. 实验中衬底的厚度为 0.2mm,我们利用双频法测量计算的热时间常数  $\tau = 1.35\text{ms}$ . 如果进一步采取衬底减薄技术,则可使器件这一特性得以明显地改善<sup>[5,6]</sup>.

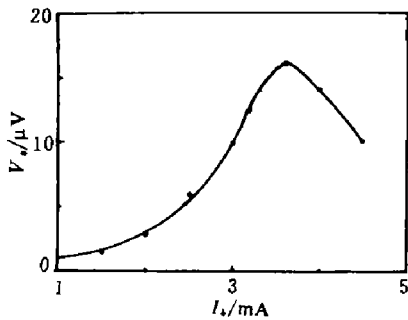


图 4 探测器光响应与偏置电流的关系  
Fig. 4 The bias current dependence of optical response of the detectors

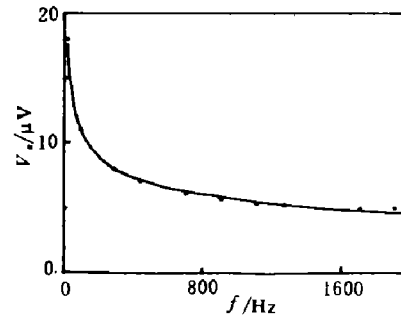


图 5 探测器光响应与调制频率的关系  
Fig. 5 The frequency dependence of optical response of the detectors

### 3 结语

我们用准分子激光扫描消融法淀积  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  高  $T_c$  超导薄膜,并采用离子束刻蚀工艺进行器件的图形加工,制备了非均匀性小于 10% 的高  $T_c$  超导薄膜 8 元线列红外探测器. 实验表明,该工艺对于制备超导薄膜阵列探测器是适用的,从而也证明了实现均匀 Bolometer 型超导薄膜阵列探测器的可能性. 该实验方法对于其它超导电子器件的集成也是适用的.

### 参考文献

- 1 Frenkel A, Saifi M A, et al. *J. Appl. Phys.*, 1990, **67**(6):3054
- 2 Mooney J M, et al. *Optical Engineering*, 1987, **28**(3):223
- 3 宋文栋, 安承武, 等. *物理学报*, 1993, **42**(10):1674
- 4 Yoshizako Y, Tononchi M, Kobayashi T. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1987, **26**(9):L1533
- 5 Flik M I, Zhang Z M, Goodson K E. *Appl. Phys. Lett.* 1993, **62**(22):2862
- 6 Verghese S, Richards P L, Char K, et al. *IEEE Trans. Magn.*, 1991, **MAG-27**:3077

## STUDY ON LINEAR ARRAY DETECTORS OF $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ HIGH $T_c$ SUPERCONDUCTING THIN FILMS\*

Mai Zhihong Zhao Xinrong Zhou Fangqiao Sun Handong Hao Jianhua Yi Xinjian

(Department of Optoelectronics Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Song Wendong

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

**Abstract**  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  superconducting thin films were deposited by excimer laser scanning ablation, and the devices were patterned by ion beam milling. The detectors have a simple structure of microbridge with an area of  $40\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ . The optical response characteristics with the linear array detectors were investigated in the region of  $8 \sim 14\mu\text{m}$ . The average noise equivalent power ( $\overline{NEP}$ ) of the arrays of  $4.4 \times 10^{-12} \text{WHz}^{-1/2}$ , the average detectivity of ( $\overline{D}^*$ ) of  $1.44 \times 10^9 \text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$ , the non-uniformity of  $D^*$  less than 10% were obtained. Measurement results show that the linear arrays have excellent uniformity and that the process used is suitable for fabricating uniform array detectors of high  $T_c$  superconducting thin films.

**Key words**  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ , high  $T_c$  superconducting thin films, linear array detectors.

---

\* The project supported by the Preliminary Study Foundation of the National Defence Science & Industry Commission of China