

12

微透镜阵列用于线列红外探测器的研究

张新宇 易新建 赵兴荣 麦志洪 何苗

(华中理工大学光电子工程系, 湖北, 武汉, 430074)

TN 215.03

刘鲁勤 ✓

(航天部二院 25 所, 北京, 100584)

摘要 采用离子束刻蚀制备了线列长方形拱面熔凝石英微透镜阵列, 用准分子激光扫描消融法淀积了性能均匀而且稳定的 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 高温超导薄膜, 用湿法刻蚀制备了超导薄膜器件, 用微透镜阵列与超导薄膜器件耦合构成组合式红外探测器. 测试了组合器件在 $1\sim 5\mu m$ 红外波段的光响应特性.

关键词 石英微透镜, 超导红外探测器, 微透镜/红外探测器组件.

引言

近年来, 随着高温超导薄膜材料的发展, 人们陆续开发出一些高温超导薄膜器件, 并应用于红外探测等领域^[1~5]. 理论分析表明, 采用特殊工艺制备的高温 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 系超导薄膜探测器对从可见光至毫米波范围内的电磁辐射具有响应特性良好, 噪声水平较常规的红外探测器低一至几个数量级的特点. 上述特点对于利用二元光学的原理, 在同一衬底材料上制作性能良好, 并实现多色红外, 甚至红外/毫米波复合探测等的凝视焦平面成像器件来说, 具有重要的理论意义和实用价值. 本文研究了离子束刻蚀技术, 准分子激光扫描消融法淀积技术等制备石英微透镜阵列/线列高温超导薄膜红外探测器的工艺及组合器件的光电特性.

1 实验

1.1 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 高温超导薄膜红外探测器

采用准分子激光扫描消融法淀积 YBCO 高温超导薄膜, 其工艺过程如下: 在高真空条件下将 (100) $Y-ZrO_2$ 衬底加热至适当温度, 然后在氧气氛下用所选频率的准分子激光脉冲照射, 待薄膜被淀积至预定厚度后将衬底自然冷却至室温, 即可得到所需厚度和面积, 而且均匀性和稳定性良好的超导薄膜材料. 器件制备: 选用国产 BP212 紫外正型光刻胶在已制成的超导薄膜材料上制备光致抗蚀剂掩膜, 然后经烘焙、显影、冲洗及再烘焙后去胶得到超导薄膜器件. 所制器件为 8 元线列微桥型结构, 单元探测器的光敏面尺寸为 $40 \times 100\mu m^2$, 相邻探测器光敏面的中心距为 $100\mu m$, 其结构见图 1.

1.2 熔凝石英微透镜阵列

利用离子束刻蚀制作线列长方形拱面熔凝石英微透镜阵列,其工艺过程如下:首先采用光刻和重力辅助的熔融法制备线列长方形拱面光致抗蚀剂微透镜图形并经固化处理,然后通过氩离子束刻蚀实现抗蚀剂微透镜图形向石英基片上转移,所制单元微透镜底部的外形尺寸为 $106 \times 300 \mu\text{m}^2$,平均冠高为 $10.81 \mu\text{m}$,平均曲率半径为 $135.33 \mu\text{m}$,平均焦距为 $405.99 \mu\text{m}$,平均 $F/\#$ 数为 3.83,平均 $T/\#$ 数为 4.15,平均光焦度 φ 为 3.7×10^3 折光度,扫描电子显微镜和表面探针的测试表明,所制的 20 元线列石英微透镜阵列的图形整齐均匀,每单元微透镜的轮廓清晰,表面光滑平整(见图 2)。

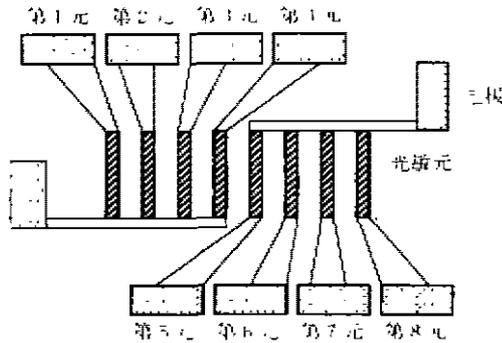


图1 8元线列YBCO高温超导薄膜器件的结构示意图

Fig.1 The structure diagram of 8-element high- T_c linear YBCO superconducting detectors

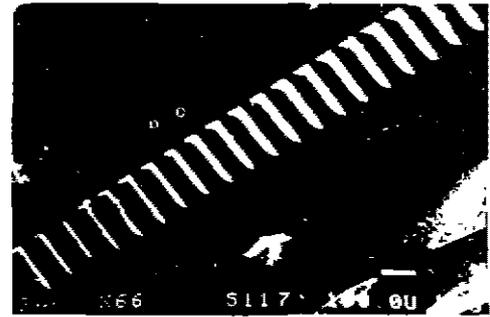


图2 长方形拱面熔凝石英微透镜阵列的SEM照片

Fig.2 The SEM photograph of the rectangular arch quartz microlens array

1.3 组合器件的制作

由图1可见,每单元超导探测器的光敏元间的空隙大于探测器本身的宽度,为了将投射在这些“死区”内的光会聚到光敏面上,增强超导器件对入射光的响应,减小入射光的热效应对超导器件的不良影响,我们将所制作的单片微透镜阵列用粘合剂与超导器件耦合构成组合红外探测器,在制作组合器件的过程中,须在所制微透镜阵列器件的背面(无微透镜面)进行再次光刻和离子束刻蚀,对所制超导器件进行套刻(二次光刻和离子束刻蚀),在超导器件的光入射面上涂布薄层粘合剂,经上述处理后,即可将微透镜阵列器件和超导器件套装构成组合红外探测器,制作组合器件所采用的光刻和离子束刻蚀的过程须经严格和精确的控制,以保证耦合过程中每单元微透镜与每单元超导器件能精确对准,并使超导器件的光敏面处在微透镜的焦平面处以获得高的光利用率。

2 测试

对所制未安装微透镜阵列的超导薄膜器件和组合器件的光响应特性进行常规测试,无微透镜阵列的超导薄膜器件和组合器件分别被安装在特制的杜瓦瓶中,器件的工作温度为 83K ,测试波段 $1 \sim 5 \mu\text{m}$,黑体的温度为 500K ,斩波器的工作频率可调,各器件工作时均采用恒流源偏置,响应信号由 Model 5209 锁相放大器读出,测试线路见图3。

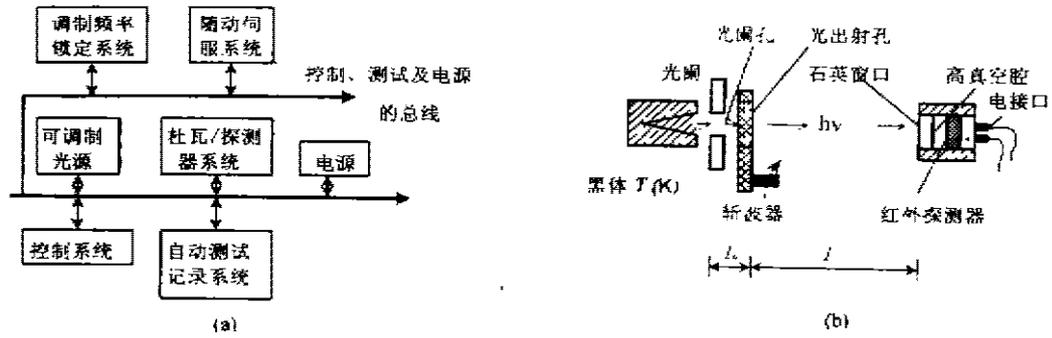


图 3 红外探测器的测试原理示意图

(a) 测试线路框图 (b) 光源·光路·探测器

Fig. 3 The measurement principle of high- T_c superconducting IR detecting device
(a) Block diagram of measurement circuit (b) Light source optical path detector

3 分析与讨论

由实验可知,已研制的每单元微透镜的底宽为 $106\mu\text{m}$,每单元超导探测器光敏面的有效宽度为 $40\mu\text{m}$,考虑粘合剂薄层的光衰减作用后,组合探测器和未加微透镜阵列的超导器件的电信号响应的计算如下.到达组合器件(W')和单一超导器件(W)的光敏面上的光能量分别为:

$$W = A_2 \left[\frac{\varepsilon_0 \sigma T_{\text{黑体}}^4 A_0 A_1(t) \tau_{\text{空气}} \tau_{\text{滤光片}} \tau_{\text{石英窗}}}{\pi^2 l_0^2} + \frac{M_c(T)(A_1 - A_1(t))}{\pi l_0^2} \right], \quad (1)$$

$$W' = \frac{a}{b} \tau_{\text{增透膜}} \tau_{\text{石英窗}} \tau_{\text{微透镜}} \tau_{\text{粘合剂}} W. \quad (2)$$

式中的 ε_0 为黑体的有效发射率, T 为黑体的温度, A_1 为斩波器透光孔的面积, $A_1(t)$ 为斩波器透光孔的瞬时透光面积, A_2 为探测器光敏元的有效受光面积, $M_c(T_c)$ 为斩波器表面的辐射度, $\tau_{\text{空气}}$ 为空气的光透过率, $\tau_{\text{滤光片}}$ 为滤光片的光透过率, $\tau_{\text{石英窗}}$ 为杜瓦瓶石英窗口的光透过率, $\tau_{\text{增透膜}}$ 为微透镜表面所镀增透膜的光透过率, $\tau_{\text{石英窗}} \tau_{\text{微透镜}}$ 为微透镜的光透过率, $\tau_{\text{粘合剂}}$ 为粘合剂的光透过率, l_0 为黑体的辐射出射孔(光阑处)距斩波器的辐射出射孔的距离, l_1 为斩波器的辐射出射孔距杜瓦瓶石英窗口的距离, σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数. 器件的光响应信号分别为:

$$V_{\text{超导}} = W\eta. \quad (3)$$

$$V'_{\text{组合}} = W'\eta. \quad (4)$$

式(3)和式(4)中的 $V_{\text{超导}}$ 及 $V'_{\text{组合}}$ 分别为超导器件和组合器件的电压响应信号, η 为超导器件的光电转换系数. 使用微透镜阵列后超导探测器的电信号增益 A 为:

$$A = \frac{V'_{\text{组合}}}{V_{\text{超导}}}. \quad (5)$$

将式(3)和式(4)代入式(5),有:

$$A = \frac{a}{b} \tau_{\text{增透膜}} \tau_{\text{石英微透镜}} \tau_{\text{粘合剂}} \quad (6)$$

由于石英和粘合剂的光透过率的实测值分别为 85% 和 91%，故组合器件较未安装微透镜的超导器件的电响应信号约增大 2 倍。

组合器件的光响应度 (R)、等效噪声功率 (NEP) 和探测率 (D^*) 分别为：

$$R = \frac{V'}{\overline{W}}, \quad (7)$$

$$NEP = \frac{W'}{V'/V_{\text{噪声}}}, \quad (8)$$

$$D^* = \frac{(A_z \Delta f)^{1/2}}{NEP}. \quad (9)$$

在液氮温区，恒流偏置为 2mA，黑体的温度为 500K，调制频率为 10kHz，在响应信号由锁相放大器读出的测试条件下的实测结果为：平均响应度 (\overline{R}) 为 16069V/W，平均等效噪声功率 (\overline{NEP}) 为 $2.00 \times 10^{-12} \text{WHz}^{-1/2}$ ，平均探测率 ($\overline{D^*}$) 为 $3.19 \times 10^9 \text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$ ， D^* 的非均匀性不大于 14%，组合器件 D^* 的非均匀性较未加微透镜阵列的超导器件 D^* 的非均匀性降低的原因将另文讨论^[7]，表 1 给出了 8 元组合器件和未加微透镜阵列的超导器件的光响应特性的实测数据。

图 4 为组合器件的光响应信号 (V') 与器件上所加的偏置电流 (I) 的关系曲线，由图 4 可见，在所测试的偏置电流范

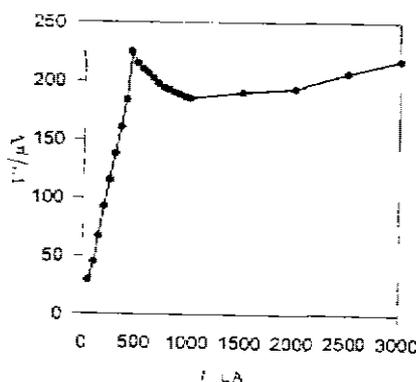


图 4 组合红外探测器光响应信号 (V') 与器件上加的偏置电流 (I) 的关系
Fig. 4 The curve of the optical response (V') vs. the bias current (I) for the composite device

表 1 组合式红外探测器和高温超导薄膜红外探测器光响应特性的测试数据
Table 1 The measurement results of a composite microlens /IR detector and an 8-element linear YBCO IR detector

元 数	1	2	3	4	5	6	7	8
$R_{\text{组合}} (\text{V/W})$	15021	14912	15489	16343	16902	18139	17854	13840
$NEP_{\text{组合}} (10^{-12} \text{WHz}^{-1/2})$	2.12	2.14	2.05	1.95	1.88	1.75	1.78	2.30
$D_{\text{组合}} (10^9 \text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1})$	2.98	2.95	3.08	3.24	3.36	3.61	3.55	2.74
$R (\text{V/W})$	7119	7090	7300	8021	8126	8539	8505	6747
$NEP (10^{-12} \text{WHz}^{-1/2})$	4.52	4.51	4.40	4.00	3.95	3.78	3.77	4.72
$D^* (10^9 \text{cmHz}^{-1/2} \text{W}^{-1})$	1.41	1.40	1.45	1.59	1.61	1.69	1.68	1.36

围内,随着偏置电流的增大,器件的光响应信号随之迅速增大,在 0.4mA 附近达到峰值,随后缓慢减小,在 1.1mA 处达到极小,进而又缓慢增加.在偏置电流小于 0.4mA 的区域,光响应信号与偏置电流呈较好的线性关系,斜率为 $650\mu\text{V}/\mu\text{A}$.在 1.1~3mA 的区域内,光响应信号的变化较小,在维持一定的光响应信号幅度的条件下,偏置电流的动态范围可以取得较宽.

4 结语

(1) 实验结果证实,采用离子束刻蚀技术、准分子激光扫描消融淀积技术、超导薄膜器件的光刻制备技术和组合器件的耦合技术所制成的微透镜/线列超导薄膜红外探测器组件的光电响应性能较无微透镜的同类器件有显著改善.

(2) 由于组合器件中的微透镜元件与超导器件用粘合剂作软联接,因此在具有较高环境要求的场合,如抗强冲击和强重力加速度等的外界条件下,具有明显的优势.既能作为一种缓冲介质,又能分解和吸收一些破坏性应变,从而提高器件的总体刚性水平.

(3) 由于组合器件中的微光学元件将超导器件与外界隔离,避免了外界各种不良的环境因素对器件的影响.实验发现,超导器件的寿命和稳定性较以往器件有明显提高.

REFERENCES

- 1 Johnson B R, Foote M C, March H A, Hunt B D. *Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng. (USA)*, 1994. **2267**: 24~30
- 2 Fardmanesh M, Thwarf A R, Scoles K J. *J. Appl. Phys.* 1995. **77**(9): 4568~4575
- 3 Xinjian Y, Zhihong M, Xingrong Z, et al. *International Journal of Infrared and millimeter Waves*. 1996. **17**(4): 705~710
- 4 Mai Z H, Zhao X R, et al. *J. Infrared Millim. Waves* (麦志洪,赵学荣等,红外与毫米波学报), 1995. **14**(6): 451~455
- 5 Zhou F Q, Hao J H, Yi X J, et al. *J. Infrared Millim. Waves* (周方桥,郝建华,易新建等,红外与毫米波学报) 1993. **12**(6): 447~451

IR DETECTOR ARRAY WITH QUARTZ MICROLENS

ZHANG Xin-Yu YI Xin-Jian ZHAO Xing-Rong MAI Zhi-Hong HE Mi-Ao

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

LIU Lu-Qin

(25th Institute, 2nd Academy of China Aviation Industry Corporation, Beijing 100854, China)

Abstract A rectangular arch quartz microlens array was fabricated using ion beam milling. The high- T_c $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ superconducting thin films with uniform and stable performances were deposited by using excimer laser scanning ablation. The superconducting thin film device was patterned by photolithography method, and for the first time the microlens / IR detectors were prepared by using a special glue to connect the quartz microlens array and the superconducting IR detector. The optical response characteristics of the device were measured in the region of $1\sim 5\mu\text{m}$ IR optical spectrum.

Key words quartz microlens, superconducting IR detector, microlens/ IR detector composite device.