

线列混合型石英微透镜/红外探测器 阵列的研究

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 武汉 430074)

刘鲁勤

(航天部二院 25 所 北京 100584)

提要 阐述了利用离子束刻蚀技术制作线列长方状拱面石英微透镜阵列的工艺方法,对所制微光学元件的光学性能进行了测试和讨论,所制成的石英微透镜阵列器件在线列 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 高 T_c 超导薄膜红外探测器上得到了应用。实验结果表明,混合型的石英微透镜/红外探测器结构显著改善了线列 YBCO 高温超导薄膜红外探测器的光响应特性。

关键词 离子束刻蚀,微透镜阵列, YBCO 超导薄膜, 红外探测器

1 引 言

由于折射型微透镜阵列器件可以实现对入射光的聚焦、成像和分束等,因此它在焦平面集光、光效率增强、频谱分离、光束整形、大面阵显示、像差修正、立体照像、光互联、光计算、仿生复眼及微型光扫描等方面具有广阔的应用前景,将会在许多先进的光学系统中发挥重要作用。目前,国外已有文献报道将离子束刻蚀方法应用于制作一些大面阵微透镜/焦平面成像阵列器件,并将此类器件应用于军用传感器及民用产品等^[1~3],国内在这一领域的研究也已起步^[4,5]。

利用离子束刻蚀方法制作的集成微光学元件具有光学质量优良、均匀性好等特点,同时该方法又具有适用于精细图形加工、工艺参数易于控制、费用低廉、可重复性好、环境污染小等优点。本文简要介绍了利用离子束刻蚀方法制作 20 元线列长方状拱面石英微透镜阵列器件的工艺技术,给出了将石英微透镜阵列应用于线列 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 高 T_c 超导薄膜红外探测器的实验结果。

2 微透镜阵列的制作

我们采用紫外光刻法制备光致抗蚀剂掩膜图形。制备合乎要求的光致抗蚀剂掩膜图形是控制光致抗蚀剂微透镜图形形状的前提,在石英基片上制备光致抗蚀剂微透镜图形的工艺流程见文献[6]。为了在同等条件下制备具有更大曲率的光致抗蚀剂微透镜图形,我们引入了光致抗蚀剂微透镜图形的重力辅助成形技术。实验发现,经重力辅助后成形的光致抗蚀剂微透镜图形的底宽明显小于常规方法制备的光致抗蚀剂微透镜图形,冠高有明显增加,曲率半径有明显增大。

在光致抗蚀剂微透镜图形阵列制成之后,即可进行离子束刻蚀。我们根据实验所得出的离

子束刻蚀速率 R 的经验关系式为

$$R = K_1 \frac{Y(E, \theta) (K_2 - a^{K_3 J_b}) \sin K_4 (\theta - \theta_0)}{\lg(K_5 \rho / \rho_0)} \quad (0 < a < 1) \quad (1)$$

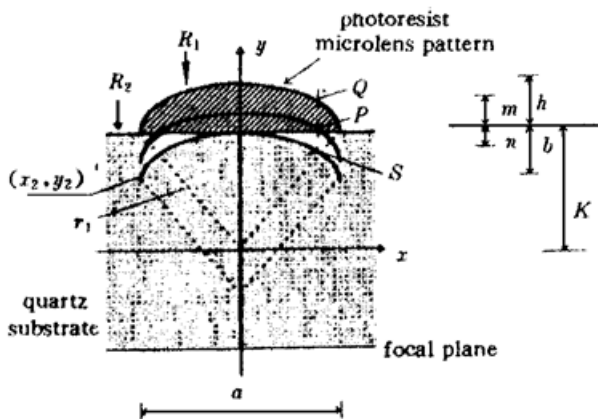


图 1 光致抗蚀剂微透镜向石英衬底上的转移示意图

Fig. 1 The transformation of the photoresist microlens array onto a quartz substrate

式中的 J_b 为离子束的束流密度 (mA/cm^2), ρ 为靶材料的原子密度 ($\text{个}/\text{cm}^3$), ρ_0 为作离子束刻蚀的材料所必须具有的最小原子密度, $Y(E, \theta)$ 为单个入射离子所能溅射出的原子数 (或分子数), θ 为离子束对靶材料的刻蚀角度, θ_0 为初始位相, K_1 至 K_5 及 a 均为常数。

为了通过离子束刻蚀有效地实现光致抗蚀剂微透镜图形向石英衬底上的转移, 在各种材料及工作条件选定的情况下, 需合理配置各项工艺参数。具体的分析过程如下所述。图 1 为光致抗蚀剂微透镜图形向石英衬底上的转移示意图。由图可见, 圆弧形的光致抗蚀剂微透镜图形的轮廓线方程为

$$x^2 + y^2 = r_1^2 \quad \left[-\frac{a}{2} \leq x \leq \frac{a}{2}, r_1 - h \leq y \leq r_1 \right] \quad (2)$$

m (Q 点和 P 点间的距离) 和 n (P 点和 S 点间的距离) 之间的关系为

$$\frac{m}{R_1} + \frac{n}{R_2} = \frac{h}{R_1} = \frac{b}{R_2} = A \quad (3)$$

$$m = y - K \quad (4)$$

$$n = K - y_2 \quad (5)$$

式(3) 中的 R_1 和 R_2 分别为离子束对经热处理后所制成的光致抗蚀剂掩膜图形及石英材料的刻蚀速率, h 为光致抗蚀剂微透镜图形的冠高, b 为石英微透镜的冠高, A 为比例常数, (4) 式和 (5) 式中的 K 为坐标原点至石英基片的上表面的距离。将(4) 式和(5) 式代入(3) 式并化简后得

$$y = K + AR_1 - \frac{R_1}{R_2}(K - y_2) \quad (6)$$

将式(6) 代入(2) 式并整理后得

$$x^2 + \left[\frac{R_1}{R_2}(y_2 - K) + (K + AR_1) \right]^2 = r_1^2 \quad (7)$$

式中的 (x_2, y_2) 为弧形石英微透镜轮廓线上的任意点的坐标。

令 $\frac{R_1}{R_2} = C$, $K + AR_1 = B$, 则

$$x^2 + [C(y_2 - K) + B]^2 = r_1^2 \quad (8)$$

即为

$$x^2 + C^2 \left[(y_2 - K) + \frac{B}{C} \right]^2 = r_1^2 \quad (9)$$

由上式可见, 由光致抗蚀剂微透镜图形转移到石英衬底上后所形成的石英微透镜的横剖面的轮廓线为二次曲线。当离子束对光致抗蚀剂掩膜图形和石英衬底材料的刻蚀速率的比率取不同值时, 可以得到圆弧或具有不同曲率的椭圆弧等图形, 如图 2 所示。

由图 2 可见,当 C 等于 1 时,光致抗蚀剂微透镜图形可以无失真地传递到石英衬底上,这是我们所希望得到的结果。因此,在衬底材料选定的条件下,合理选择光刻胶和作刻蚀用离子的种类及配置优化的工艺流程以得到最佳的实验结果就成为能否制作出合乎使用要求的微透镜器件的关键所在。

实验中,选用电离后的氩作刻蚀离子。实验表明,在选定的工作条件下,氩离子束对石英的刻蚀速率略高于所使用的紫外正型光刻胶的刻蚀速率,因此,光致抗蚀剂微透镜图形向石英基片上的传递可以有效地实现。实验中,离子束刻蚀在国产 LD-3 型离子束镀膜刻蚀机上进行,采用 Kaufman 离子源,真空工作室的本底真空度为 0.133×10^{-4} Pa 量级,工作气压为 13.3×10^{-2} Pa 量级,氩离子能量为 10^2 eV 量级,氩离子束流强度为 40~70 mA,束流直径为 10 cm,氩离子束的入射角度为 45° ,采用大功率半导体热电致冷器冷却衬底,衬底匀速转动,热阴极电流为 6.0 A。实测表明,氩离子束对所制的经热处理的光致抗蚀剂掩膜图形的刻蚀速率为 41 nm/min,对所用石英材料的刻蚀速率为 42 nm/min。

我们采用了光致抗蚀剂微透镜图形的固化技术对其作重整化处理。在刻蚀过程中,对所用的刻蚀离子束采用了强迫分离技术以改善刻蚀条件,采取以上技术措施后即得到表面光滑平整、轮廓清晰、具有良好的均匀性和光学质量的石英微透镜阵列器件,如图 3 和图 4 所示。

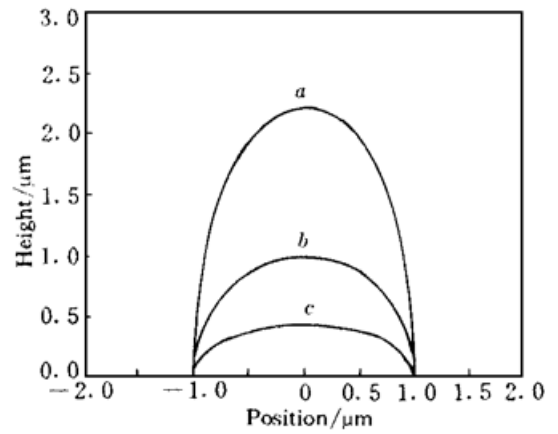


图 2 离子束刻蚀的速率比 (C) 取不同值时的刻蚀结果比较

Fig. 2 The results of ion beam etching
a: $C = 0.45$, b: $C = 1$, c: $C = 2.24$

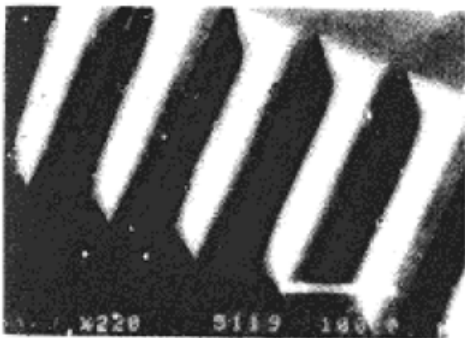


图 3 长方状拱面熔融石英微透镜阵列的 SEM 照片

Fig. 3 The SEM photograph of a rectangular arch fused quartz microlens array

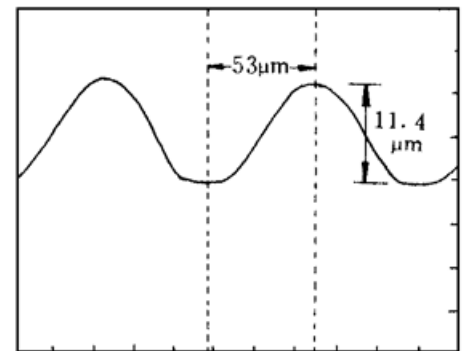


图 4 长方状拱面熔融石英微透镜阵列的表面探针测试曲线

Fig. 4 The curve of the surface stylus measurement of the rectangular arch fused quartz microlens array

所制单元长方状拱面石英微透镜的焦距 f , F 数, T 数(有效 F 数) 及光焦度 Φ 分别为

$$f = \frac{n}{2b(n-1)} \left[\frac{a^2}{4} + b^2 \right] \tag{10}$$

$$F = \frac{f}{a} \tag{11}$$

$$T = \frac{F}{\sqrt{T_r}} \quad (12)$$

$$\phi = \frac{n}{f} \quad (13)$$

式(10)和式(13)中的 n 为所用石英材料对入射光的折射率,式(12)中的 T_r 为石英微透镜的光透过率。

由图4可见,单元长方状拱面石英微透镜的平均冠高为 $11.41 \mu\text{m}$,底宽为 $102 \mu\text{m}$ 。由(10)至(13)式所得到的石英微透镜的平均焦距为 $359.05 \mu\text{m}$,平均 F 数为3.52,平均 T 数为3.82,平均光焦度 ϕ 为 4.18×10^3 折光度。

3 混合型微透镜阵列/红外探测器阵列

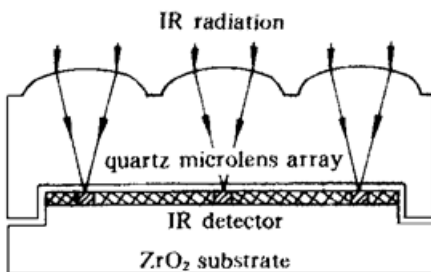


图5 有石英微透镜的高 T_c YBCO 超导薄膜红外探测器模块图

Fig. 5 The structural diagram of the YBCO high T_c superconducting detector array with a quartz microlens

我们将石英微透镜阵列与高 T_c 超导红外探测器阵列对准粘合,形成8元线列高 T_c YBCO 超导薄膜红外探测器与20元线列石英微透镜阵列的混合模块(12元石英微透镜空置)。采用常规测试方法对有无微透镜的两种红外探测器阵列的光响应特性作了对比测试实验。

未安装微透镜阵列的高温超导器件的光响应特性包括:器件对 $1 \sim 5 \mu\text{m}$ 红外波段光的响应度(R'),平均归一化探测率(D^*),平均噪声等效功率(NEP), D^* 的非均匀性,详见表1。安装微透镜阵列后的模块在同一波段的入射光照射下,各项光响应特性如表2所示。由微透镜阵列和高温超导器件所构成的组合器件如图5所示。

表1 无微透镜阵列的线列高 T_c YBCO 超导红外探测器的光响应特性

Table 1 The measured results of 8-element high T_c YBCO superconducting IR detectors without a microlens array

No.	1	2	3	4	5	6	7	8
$R'/\text{V/W}$	6756	7128	7096	7349	8001	8126	8543	8497
$NEP/(\times 10^{-12}\text{WHz}^{-1/2})$	4.72	4.47	4.49	4.34	3.99	3.92	3.73	3.75
$D^*/(\times 10^9\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1})$	1.34	1.41	1.41	1.46	1.58	1.61	1.69	1.68

表2 微透镜阵列/高 T_c YBCO 超导红外探测器阵列模块的光响应特性

Table 2 The measured results of 8-element high T_c YBCO IR detectors array with a fused quartz microlens array

No.	1	2	3	4	5	6	7	8
$R'/\text{V/W}$	13849	15040	14901	15580	16242	16902	18196	17758
$NEP/(\times 10^{-12}\text{WHz}^{-1/2})$	2.30	2.12	2.14	2.05	1.96	1.89	1.75	1.80
$D^*/(\times 10^9\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1})$	2.75	2.98	2.95	3.08	3.23	3.34	3.61	3.51

由表1和表2可见,线列组合红外探测器的光响应特性较线列超导器件有明显改善,具体如下:平均响应度(R')由 7687 V/W 增加到 16058 V/W ,平均等效噪声功率(NEP)由4.18

$\times 10^{-12} \text{ WHz}^{-1/2}$ 降低到 $2.00 \times 10^{-12} \text{ WHz}^{-1/2}$, 平均探测率 ($\overline{D^*}$) 由 $1.52 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 提高到 $3.18 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 。另外, D^* 的非均匀性由不大于 13% 改变为不大于 14%, 并无显著变化。

4 结 语

本文简要介绍了利用离子束刻蚀方法制作 20 元线列长方状拱面石英微透镜阵列的工艺, 并应用于自制的高 T_c YBCO 超导薄膜红外探测器阵列。实验结果表明, 所制成的线列石英微透镜阵列能显著改善线列高 T_c YBCO 超导薄膜红外探测器的光响应特性。可以预测, 通过应用该技术从而开发出与凝视焦平面红外成像阵列相匹配的大面阵微透镜阵列, 以期显著改善凝视焦平面红外成像器件的性能, 无疑是可行的。

参 考 文 献

- 1 N. T. Gordon, C. L. Jones, D. J. Purdy. Application of microlenses to infrared detector arrays. *Infrared Phys.*, 1991, **31**(6) : 599~ 604
- 2 William H. Southwell. Focal-plane pixel-energy redistribution and concentration by use of microlens arrays. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(16) : 3460~ 3464
- 3 H. Schneidewind, F. Schmidl, S. Linzen *et al.*. The possibilities and limitations of ion-beam etching of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ thin film and microbridges. *Physica C* (Netherlands), 1995, **250**(1-2) : 191~ 201
- 4 Mai Zhihong, Yi Xinjian, Zhao Xingrong *et al.*. The monolithic preparation for an IRFPA microlens array. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech.* (华中理工大学学报), 1996, **24**(7) : 77~ 79 (in Chinese)
- 5 Mai Zhihong, Yi Xinjian, Zhao Xingrong. Fabrication of silicon microlens arrays using ion beam milling. *Semiconductor Photonics and Technology*, 1996, **2**(1) : 61~ 65
- 6 Zhang Xingyu, Yi Xinjian, Zhao Xingrong *et al.*. Fabrication of linear fused quartz microlens arrays using photolithography and Ar ion beam etching. *Chinese Journal of Quantum Electronics* (量子电子学) (in Chinese, received)

Study of the Linear Hybrid Quartz Microlens Array/IR Detectors

Zhang Xinyu Yi Xinjian Zhao Xingrong Mai Zhihong He Miao

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

Liu Luqin

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

Abstract The technique for preparing a linear rectangular arch microlens array with 20 elements on quartz substrate using Ar ion beam etching has been investigated. The optical performance of the microlens array has been measured. The microlens array was mounted onto a linear $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ high T_c superconducting thin film IR detector. The experimental results show that the optical response performance with hybrid structure of microlens and IR detector array can be remarkably improved.

Key words ion beam etching, microlens array, YBCO superconducting, IR detector