

引用格式: YANG Xiaowei, YUAN Weifang, LI Tonghui, et al. Design and Fabrication of Integrated Microlens for High Speed Photodetectors[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(8):0823001

杨晓伟,袁纬方,李同辉,等. 高速光探测器的集成微透镜结构设计及制备[J]. 光子学报, 2023, 52(8):0823001

高速光探测器的集成微透镜结构设计及制备

杨晓伟,袁纬方,李同辉,李玉,董晓雯,刘凯,黄永清,段晓峰

(北京邮电大学 信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

摘 要: 高速光探测器以获得更高的 3 dB 带宽为目标,减小器件台面面积能够使结电容降低从而提高带宽,但同时也增大了系统中的光耦合损耗。针对该问题,在高速光探测器衬底背面单片集成微透镜结构是一种有效的解决方案,该结构可通过补偿对准偏差来提高器件的光耦合效率。设计了一种面向数据中心应用的,与 1.31 μm 光探测器芯片单片集成的 InP 基微透镜结构;通过热熔法制作微透镜胶型,并利用电感耦合等离子体刻蚀实现微透镜胶型转移,电感耦合等离子体刻蚀过程选择 SiCl_4 和 Ar 作为刻蚀气体以保证实验的安全性;制备了一种直径 90.3 μm 、冠高 18.5 μm 、表面形貌光滑的 InP 基微透镜结构。单片集成微透镜的 PIN 光探测器在 1.31 μm 波长处,入射光偏离主光轴 3° 的情况下,光探测器的响应度仅下降 4%。

关键词: 集成微透镜;光探测器;微透镜胶型;热熔法;电感耦合等离子体刻蚀

中图分类号: TN364.2

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235208.0823001

0 引言

大数据和云计算等新型产业的加速发展,对通信网络容量提出更高的要求,由于电互连的自身限制,光互连在通信系统中的占比越来越大^[1]。为了满足光通信网络容量快速增加的需求,提高单通道传输速率是一种有效的解决方法,因此,高速光探测器被广泛应用于光通信系统中^[2]。

传统上,通过减小光探测器的台面直径、降低结电容来提升光探测器的 3 dB 带宽^[3-4],以满足高速应用。但是减小台面直径直接影响了光敏面面积,增加了系统对准难度。微透镜是光学器件中重要的光学元件^[5],而高速光探测器芯片多采用背入光方式,因此,可以将大尺寸微透镜集成在光探测器的背面,利用微透镜对光的汇聚功能,使偏移的入射光耦合进器件中,增加器件的有效光敏面面积,提高光耦合效率并补偿对准偏差。2018年,中国电子科技公司第十三所的李庆伟等将 Cl_2 和 BCl_3 作为电感耦合等离子体(Inductive Coupled Plasma, ICP)刻蚀气体,制备出集成在雪崩光探测器背面的微透镜,微透镜的直径为 50 μm ,冠高为 18 μm ^[6];2022年,重庆光电技术研究所的黄晓峰等采用倒装焊结构,报道了一种与 25 Gbit/s 高速 InAlAs 雪崩光电二极管单片集成的微透镜,提高了光耦合孔径^[7];2022年,中国科技大学微纳研究与制造中心王亮等为了获得高性能 InGaAs 单光子雪崩探测器(Avalanche Photo Diode, APD),将金属布拉格反射镜(Distributed Bragg Reflection, DBR)和微透镜集成在光探测器上,集成后的器件吸收效率提高 58%^[8]。

本文通过理论计算得到所设计微透镜的曲率半径和焦距;分别用准直和发散角 10° 的两种入射光进行仿真,仿真结果表明该尺寸的微透镜在所设计焦距处对入射光实现了汇聚和补偿偏差功能;利用光刻胶热熔法制作出微透镜形状的胶型;选择更为安全的 SiCl_4 和 Ar 作为 ICP 刻蚀气体,使用 ICP 刻蚀将微透镜胶型转移到 InP 衬底上,制备出可以与光探测器单片集成,具有高耦合效率和表面形貌光滑的 InP 微透镜。在 1.31 μm 波长的入射光偏离主光轴 3° 方向入射下,集成微透镜的光电二极管(Positive Intrinsic Negative, PIN)响应度仅下降 4%。

基金项目: 创新研究群体项目(No. 62021005), 国家重点研发计划(No. 2018YFB2200803)

第一作者: 杨晓伟, yangxiaowei2714@bupt.edu.cn

通讯作者: 段晓峰, xfduan@bupt.edu.cn

收稿日期: 2023-02-14; 录用日期: 2023-04-06

<http://www.photon.ac.cn>

1 微透镜的设计

1.1 理论设计

根据所设计的PIN光探测器的层厚度以及减薄后的衬底厚度,对与光探测器单片集成的InP微透镜进行设计。首先通过理论计算得出微透镜直径为 $100\ \mu\text{m}$ 、冠高为 $18\ \mu\text{m}$ 时的曲率半径和汇聚焦距。图1为集成微透镜的背入射PIN光探测器剖面示意,图中正面为背入射PIN光探测器结构,光探测器中间区域为InGaAs材料的吸收区;背面为InP材料的微透镜部分;底部为入射光纤。其中,所设计PIN光探测器的工作波长为 $1.31\ \mu\text{m}$,材料为InGaAs/InP系,吸收区为直径 $12\ \mu\text{m}$ 的圆形台面。当入射光在微透镜表面偏离中轴线不同位置入射时,光束将汇聚至光探测器吸收区的同一焦点处。

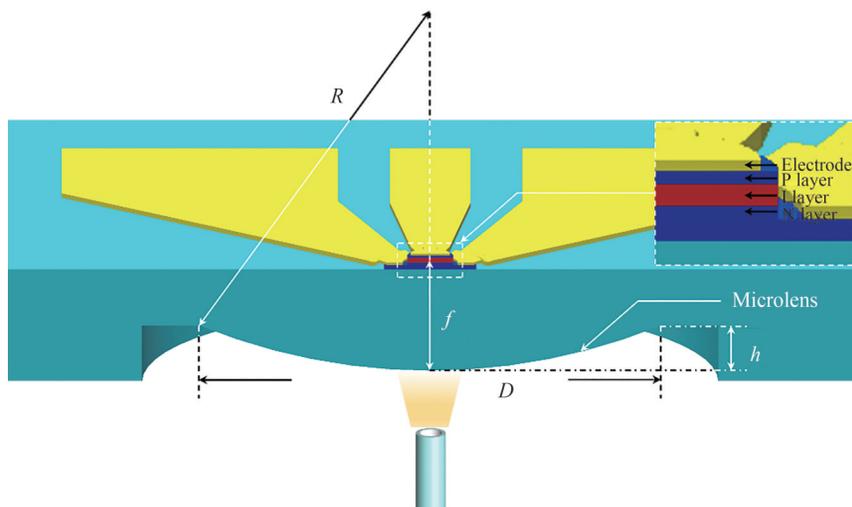


图1 集成微透镜器件的剖面示意
Fig.1 Schematic of an integrated microlens device

如图所示,其中 R 为微透镜球冠的曲率半径, h 为微透镜球冠的冠高, D 为微透镜的底面直径, f 为微透镜的焦距。微透镜球冠的曲率半径 R 可表示为^[9]

$$R = \frac{D^2 + 4h^2}{8h} \quad (1)$$

微透镜的焦距 f 可表示为

$$f = \frac{nR}{n-1} \quad (2)$$

式中, n 为微透镜材料InP在 $1.31\ \mu\text{m}$ 波长处的折射率,其值为3.2。

焦距是光学系统中重要的参数之一^[10],微透镜的焦距 f 决定着集成器件的性能。焦距过小时,经由微透镜耦合,入射光将会汇聚到光探测器吸收区之前的位置;焦距过大时,经由微透镜耦合,入射光将会汇聚到光探测器吸收区以外的位置。因此,过大或者过小的焦距均不能提高器件的光耦合效率和补偿对准偏差。本文设计的集成微透镜底面直径为 $100\ \mu\text{m}$ 、冠高为 $18\ \mu\text{m}$,通过式(1)、(2)计算可得,该微透镜的曲率半径 R 为 $78.4\ \mu\text{m}$ 、焦距 f 为 $114\ \mu\text{m}$,满足单片集成光探测器的需求。

1.2 仿真分析

根据理论计算的结果,利用COMSOL仿真软件中的电磁波和波束包络模型,在偏离主光轴的不同位置处,仿真微透镜对准直和发散角 10° 的两种入射光的汇聚和偏差补偿功能。

1) 准直入射光

图2(a)~(e)为束腰 $10\ \mu\text{m}$ 的准直高斯光在偏离主光轴 $0\ \mu\text{m}$ 、 $2.5\ \mu\text{m}$ 、 $5\ \mu\text{m}$ 、 $7.5\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ 位置处,沿水平方向入射时经过微透镜的光场图,横轴表示准直入射光穿过微透镜后传播的距离,纵轴表示入射光偏离主光轴移动的距离。图中黄色箭头为入射光方向,光束经由微透镜,汇聚至垂直虚线标出的焦点处。

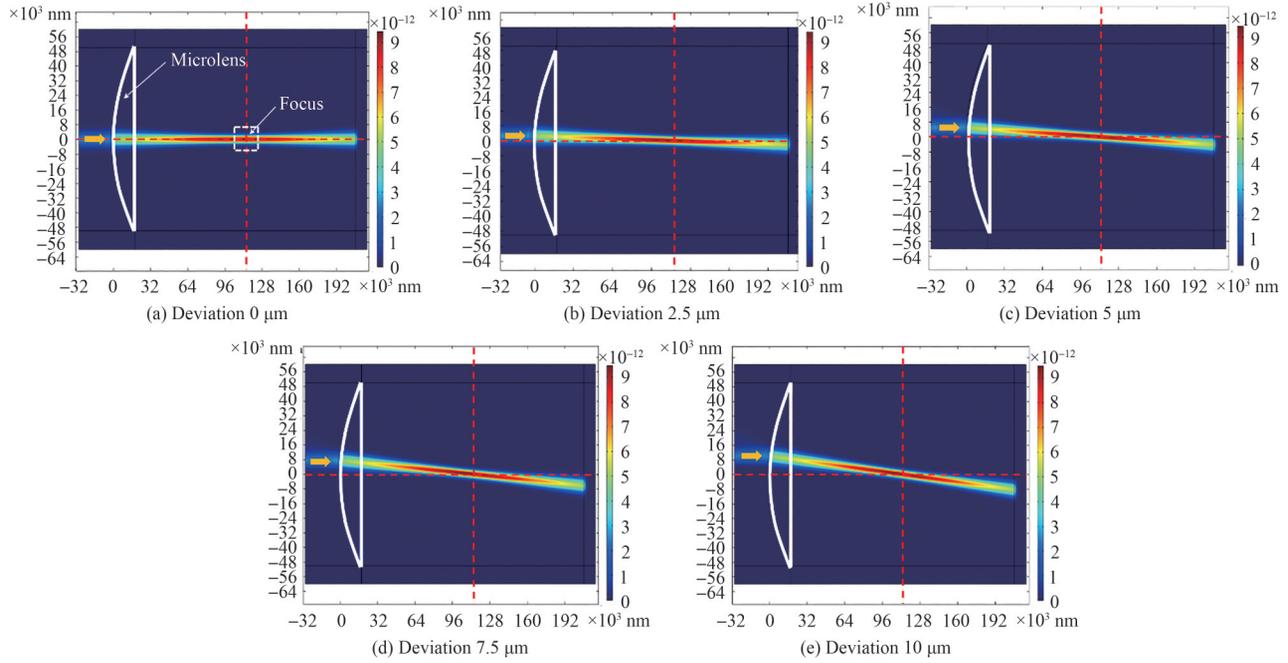


图2 准直入射光经过微透镜的光场图

Fig.2 Light field diagram of collimated incident light passing through a microlens

从图中可知,各入射光经过微透镜后均在同一位置处实现汇聚,汇聚的焦距为 $114 \mu\text{m}$,与理论计算结果相符。

2) 发散角 10° 的入射光

在准直入射光相同位置处仿真束腰 $10 \mu\text{m}$ 、发散角 10° 的入射光光场图,如图 3(a)~(e),横轴表示发散角 10° 的入射光穿过微透镜后传播的距离,纵轴表示入射光偏离主光轴移动的距离。当发散光作为入射光时,经过微透镜后依然在焦距 $114 \mu\text{m}$ 处实现良好的汇聚功能。由准直光和发散角 10° 的入射光两次仿真可得,所设计的微透镜在特定的焦距下能实现较好的汇聚功能且性能稳定,可以提高器件的光耦合效率并补偿对准偏差。

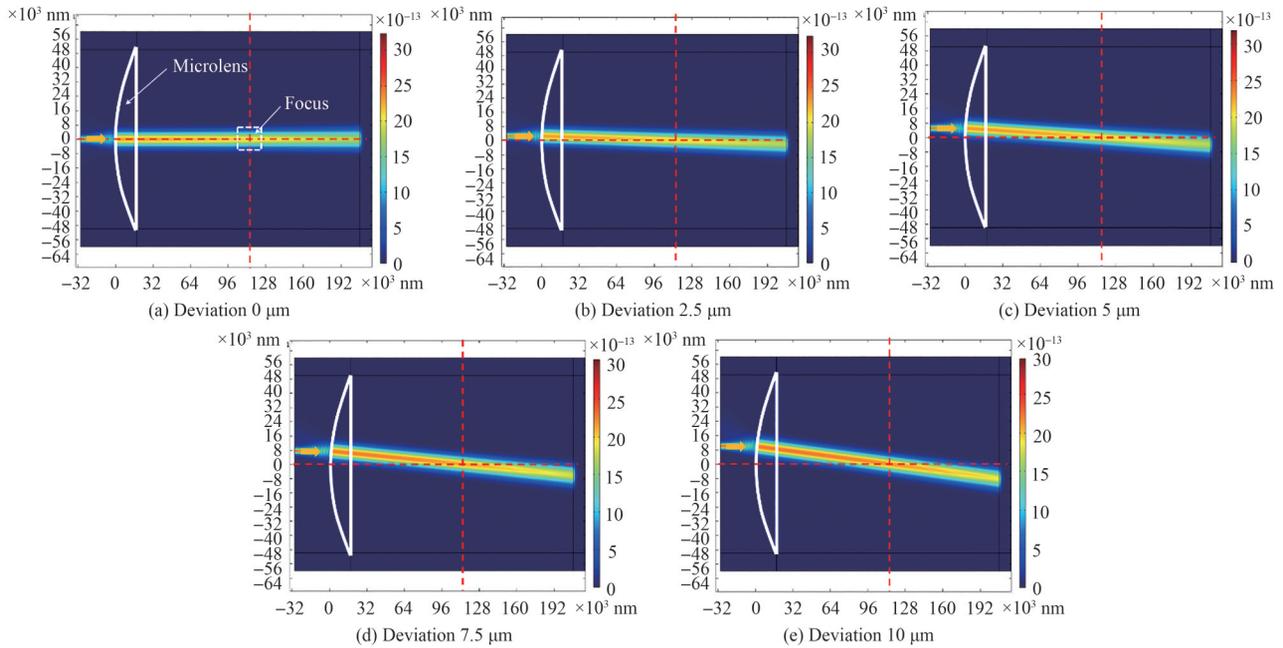


图3 发散入射光经过微透镜的光场图

Fig.3 Light field diagram of diverging incident light passing through a microlens

2 微透镜的制备

首先通过外延生长和后工艺技术制备出台面直径为 $12\ \mu\text{m}$ 的 PIN 光探测器结构, 然后对器件的衬底进行减薄等处理, 最后在光探测器背面制备出所设计的微透镜结构。在对衬底进行处理时, 为了防止光探测器芯片发生破损, 需要将制备好的光探测器芯片通过光刻胶粘附在氮化铝材料的载体上, 再对 PIN 光探测器的背面衬底进行减薄、抛光等工艺步骤的制备, 在处理好的器件背面进行微透镜胶型的制作和微透镜的刻蚀工艺。

2.1 微透镜胶型的制作

制备微透镜首先要制作胶型, 然后通过刻蚀将胶型形状转移到衬底上形成微透镜, 本文利用光刻胶热熔法制作微透镜形状的胶型^[11-13]。光刻胶热熔法是制备微透镜的常用技术, 可以利用标准的半导体设备和工艺制作出形貌尺寸符合要求的微透镜胶型。该方法实验可重复性高, 微透镜胶型均匀性好且成本较低^[14-15]。

胶型的制作工艺步骤包括: 匀胶、前烘、去边胶、曝光、显影和热熔等。首先对 InP 衬底滴涂 AZ4620 光刻胶, 然后进行转速 $900\ \text{rad/s}$ 、时间 $20\ \text{s}$ 的低速匀胶和转速 $2\ 000\ \text{rad/s}$ 、时间 $50\ \text{s}$ 的高速匀胶, 接着对衬底进行温度 $90\ ^\circ\text{C}$ 、时间 $150\ \text{s}$ 的前烘。为了不影响曝光质量, 曝光之前用丙酮进行去边胶处理; 去边胶后进行一定时间的曝光和显影; 将显影后的 InP 衬底进行温度 $140\ ^\circ\text{C}$ 、时间 $150\ \text{s}$ 的高温热熔, 形成微透镜形状的胶型。

图 4 为微透镜胶型的制作步骤, 其中图 4(a) 为匀胶工艺后的示意图, 下方区域为 InP 衬底层, 上方区域为 AZ4620 光刻胶层; 图 4(b) 为曝光工艺示意图, 光刻胶区域上方的物体为掩膜版, 黄色箭头为紫外光可以透过掩膜版照射光刻胶的区域; 图 4(c) 为显影工艺后的示意图, 中间部分为制作的微透镜胶型, 两边为非透镜胶型区域, 在刻蚀后非透镜胶型区域可以对微透镜形成保护作用; 图 4(d) 为热熔工艺后的示意图, 胶型区域热熔成微透镜形状, 由于非透镜区域也受到热熔作用, 其边缘会形成凸起的弧形。

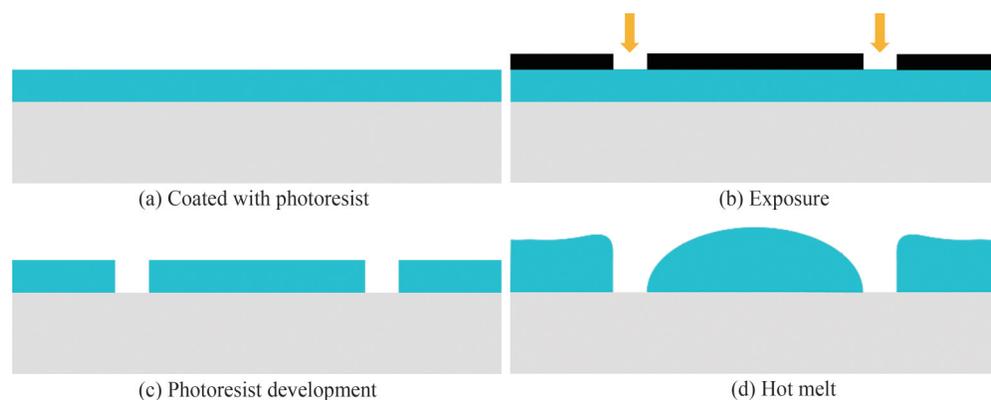


图 4 光刻胶热熔法的制作步骤示意

Fig.4 Schematic of the process of photoresist hot melt

通过热熔法制作出底面直径为 $100\ \mu\text{m}$ 、冠高为 $13\ \mu\text{m}$ 的胶型, 为了观察所制作胶型的表面形貌, 利用电子束蒸发 (Physical Vapor Deposition, PVD) 设备在胶型表面镀一层 Au, 然后利用扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 观察。图 5 为光学显微镜下镀 Au 后的胶型图, 图 6 为 SEM 图。由图可知, 微透

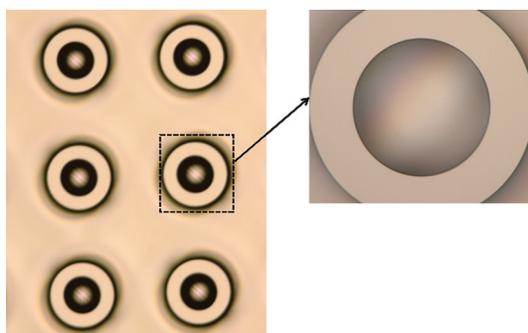


图 5 胶型镀 Au 的光学显微镜图

Fig.5 Light microscope image of colloidal Au plating

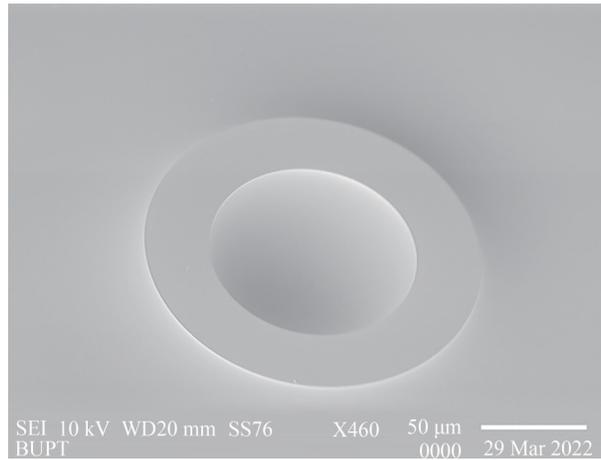


图6 胶型镀 Au 的 SEM 图
Fig. 6 SEM image of colloidal Au plating

镜胶型边缘无缺损较为完整,表面无凹陷较为光滑,具有较好的均匀性和一致性。

2.2 微透镜的刻蚀

将制作好的微透镜胶型进行 ICP 刻蚀,从而把胶型的微透镜形状转移到衬底上,最终在衬底上形成 InP 材料的微透镜^[16-19]。从实验安全角度考虑, ICP 刻蚀采用较为安全的 SiCl₄ 气体和惰性气体 Ar。SiCl₄ 气体为主要的刻蚀气体,在射频下产生的活性自由基与 InP 材料发生化学反应来进行刻蚀;两种气体产生的氟离子和氯离子对光刻胶进行物理轰击作用,同时也对反应过程中产生的生成物进行轰击去除,增加微透镜表面形貌的光滑程度。

在 ICP 刻蚀过程中,对影响刻蚀的不同条件进行研究和实验,然后通过刻蚀制备出满足设计需求的集成微透镜。实验对腔压、Ar 流量、RF 功率这几个影响 ICP 刻蚀的重要因素进行分析:

1) 腔压

图 7 为不同腔压下的刻蚀情况,其中 A~D 分别为腔压 0.798 Pa、0.399 Pa、0.332 5 Pa 和 0.266 Pa 下刻蚀微透镜的光学显微镜照片。在腔压 0.266 Pa 时,刻蚀的微透镜表面比较光滑,冠高为 17.4 μm,实验结果较好。在一定范围内,当腔压逐渐减小时,ICP 刻蚀反应腔内气体电离出的离子和活性自由基减少,减缓离子对光刻胶的物理作用,降低活性自由基对 InP 材料的化学反应速率,导致刻蚀时间加长,而且去光刻胶的速率慢于刻蚀 InP 的速率,最终在减小腔压下刻蚀出的微透镜拱高是逐渐增大的。

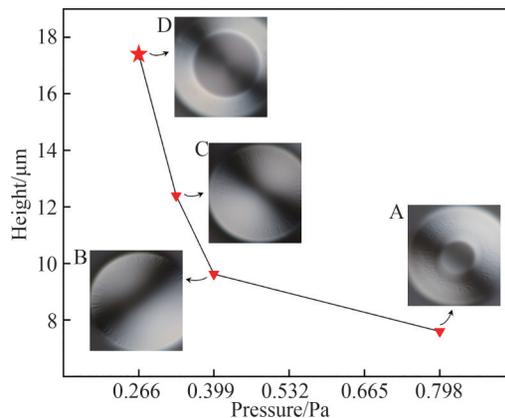


图7 不同腔压的微透镜高度
Fig.7 Microlens heights at different chamber pressures

2) Ar 流量

图 8 为改变 Ar 流量时,微透镜拱高的变化,其中 A~D 分别表示 Ar 流量为 10 sccm、12 sccm、13 sccm 和 14 sccm 下刻蚀的微透镜在光学显微镜下的图片。在 Ar 流量为 13 sccm 时,刻蚀的微透镜表面光滑,冠高为

16.7 μm , 实验结果较好。在一定范围内, Ar 流量较小时, 如 A 和 B 所示, 刻蚀出的微透镜边缘会出现波纹形的条状坑, 这是由于反应生成物沉积到微透镜表面导致的。随着 Ar 流量的逐渐增大, 可以较快地去除掉沉积在微透镜表面的反应生成物, 使微透镜表面的光滑程度有所改善。但是当 Ar 流量过大时, 如 D 所示, 刻蚀出的微透镜表面会出现密集的点状坑, 此现象是由于物理溅射作用太强, 导致微透镜表面的粗糙程度增大, 而过大的 Ar 流量会降低微透镜的拱高。

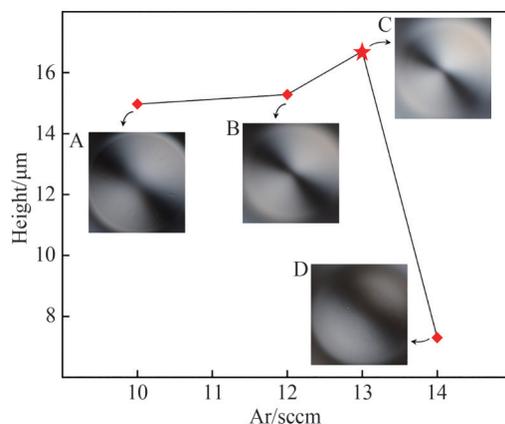


图8 不同 Ar 流量的微透镜高度

Fig.8 Microlens heights with different Ar flows

3) RF 功率

图9为改变RF功率时,刻蚀微透镜的时间变化,其中A~D分别表示RF功率为60 W、90 W、105 W和120 W时刻蚀微透镜的光学显微镜照片。在RF功率为105 W、刻蚀时间为105 min时,刻蚀的微透镜表面光滑,冠高为18.5 μm ,实验结果较好。在一定范围内,RF功率逐渐增大时,垂直方向的电场作用力逐渐增强,加强了刻蚀的物理溅射作用,使去除光刻胶的速度 V_1 和 InP 刻蚀速度 V_2 加快,从而增大刻蚀速率,缩短刻蚀时间,由于 V_2 大于 V_1 ,使得微透镜的拱高更高。另一方面,物理溅射作用增强,能有效去除掉沉积在表面的反应生成物,使刻蚀表面更加光滑。

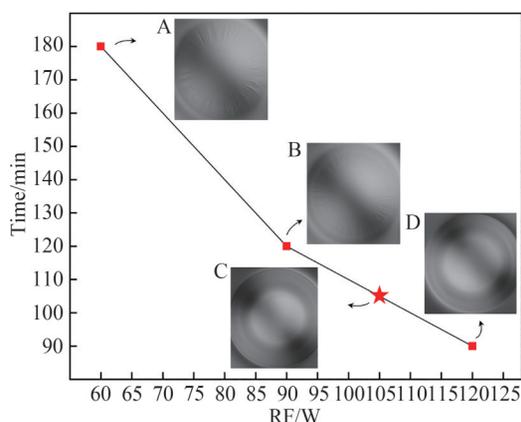


图9 不同 RF 功率的微透镜刻蚀时间

Fig.9 Etching time of microlens with different RF power

结合仿真和实验条件的优化,最终选择 SiCl_4 流量为 13 sccm、Ar 流量为 13 sccm、腔压为 2 mTorr、ICP 功率为 500 W、RF 功率为 105 W 的 ICP 刻蚀条件,在 105 min 的刻蚀时间后,制备出直径为 90.3 μm 、冠高为 18.5 μm 、表面光滑的 InP 微透镜。图10为所制备的 InP 微透镜的 SEM 图,所制备的微透镜边缘无缺陷较为完整,表面无生成物附着、无凹陷的坑状特征,形貌比较光滑。

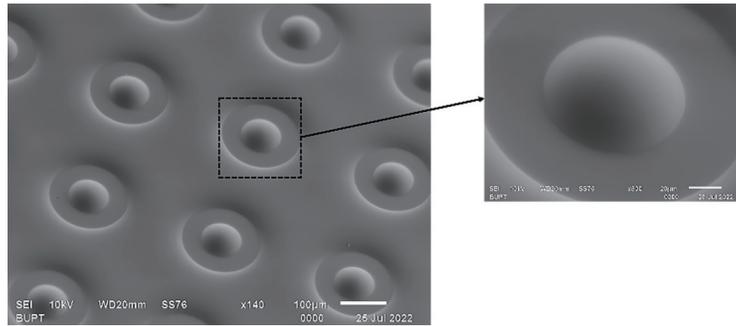


图 10 可集成微透镜的 SEM 图
Fig.10 SEM images of integrated microlenses

3 测试

在 $1.31\ \mu\text{m}$ 波长的入射光下,利用源表、光纤、探针台等仪器对背面单片集成微透镜的 PIN 光探测器进行响应度测试。在测试过程中,波长为 $1.31\ \mu\text{m}$ 激光器输出的光信号通过光纤入射到光探测器中,光探测器产生的电信号经过高频线进入到源表,改变激光器的输出光功率并记录源表上对应的光电流数值,最终计算出 PIN 光探测器的响应度。图 11 为光探测器的响应度测试图片。

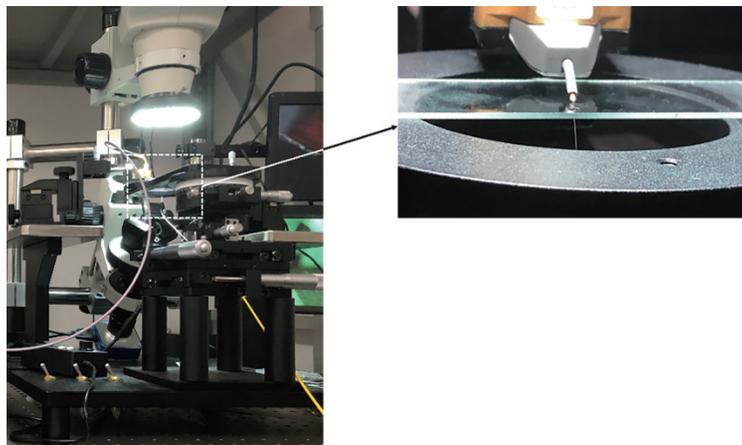


图 11 光探测器响应度的测试图
Fig.11 Test picture of light detector responsivity

图 12 为测试的器件响应度随所加反向偏压变化的归一化(Normalization, NOR)拟合曲线,其中插图为所制备集成器件的背面图片,横轴为所加的反向偏压,纵轴为归一化后的器件响应度,从图中可以看出,当

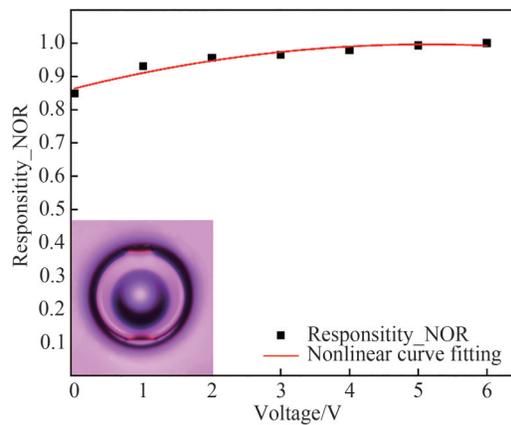


图 12 不同反向偏压下的归一化响应度
Fig.12 Normalized responsivity under different reverse bias

反向偏压从0 V变化到6 V时,器件的响应度逐渐增大。

对制备的器件进行入射光不同位置处的响应度测试,其中,定义入射光在主光轴位置入射时的角度为 0° ,然后对入射光偏离主光轴 15° 范围内进行测试,得到各个不同位置处入射光的响应度。入射光偏离主光轴 15° 范围内入射时,测得的器件响应度的归一化拟合曲线如图13,横轴为入射光所偏移的角度,纵轴为器件归一化后的响应度。由图可知,当入射光位置偏离主光轴 3° 时,器件响应度比在 0° 入射时降低4%左右;当入射光位置偏离主光轴 6° 时,器件响应度比在 0° 入射时降低16%左右;当入射光位置偏离主光轴大于 6° 时,器件的响应度迅速下降。

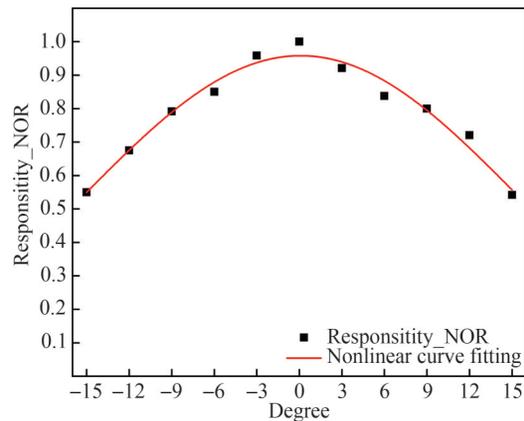


图13 不同位置处的归一化响应度

Fig.13 Normalized responsiveness at different locations

4 结论

本文设计、仿真并制备了单片集成在光探测器背面的InP微透镜,能够提高器件的光耦合效率并补偿对准偏差。通过仿真得到,在准直和发散角 10° 的两种光入射下,直径 $100\ \mu\text{m}$ 、冠高 $18\ \mu\text{m}$ 的微透镜均在焦距 $114\ \mu\text{m}$ 处实现汇聚功能,满足集成在光探测器背面的要求。利用光刻胶热熔法,制作了表面光滑无凹陷的微透镜胶型。刻蚀气体采用较为安全的 SiCl_4 和Ar,通过研究腔压、刻蚀气体流量和RF功率等条件对ICP刻蚀的影响,最终选择 SiCl_4 流量 $13\ \text{sccm}$ 、Ar流量 $13\ \text{sccm}$ 、反应腔内压强 $0.266\ \text{Pa}$ 、RF功率 $105\ \text{W}$ 的ICP刻蚀条件,制备出直径 $90.3\ \mu\text{m}$ 、拱高 $18.5\ \mu\text{m}$ 、表面形貌光滑的InP微透镜。对集成微透镜的背入射PIN光探测器进行响应度测试,在 $1.31\ \mu\text{m}$ 波长的入射光偏离主光轴 3° 方向入射下,光探测器的响应度仅下降4%,所制备的InP微透镜满足设计需求。

参考文献

- [1] AHMAD Z, LIAO Y M, WANG P S, et al. Avalanche photodiodes with composite charge-layers for low dark current, high-speed, and high-power performance [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2021, 28(2): 1-10.
- [2] NADA M, NAKAJIMA F, YOSHIMATSU T, et al. Inverted p-down design for high-speed photodetectors [C]. Photonics, 2021, 8(2): 39.
- [3] CHAO E, XIONG B, SUN C, et al. Ultrafast modified uni-traveling carrier photodiode with 3-dB bandwidth of 150 GHz [C]. 2021 Conference on Lasers and Electro-optics (CLEO), Optical Society of America, 2021: SM1D. 3.
- [4] ZHANG H, ZHAO Y, LI Q, et al. Metalens array for InGaAs/InP avalanche photodiodes at optical-communication wavelengths [J]. Optics Communications, 2022, 514: 128159.
- [5] YANG Xue, SUN Huilai, YUE Duanmu, et al. Research progress of microlens arrays prepared by femtosecond laser [J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0500005.
杨雪, 孙会来, 岳端木, 等. 飞秒激光制备微透镜阵列的研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 0500005.
- [6] LI Qingwei, YIN Shunzheng, SONG Hongwei, et al. Design and fabrication of InP microlens [J]. Microelectronic Technology, 2018, 55(4): 296-301.
李庆伟, 尹顺政, 宋红伟, 等. InP 微透镜的设计与制作 [J]. 微纳电子技术, 2018, 55(4): 296-301.
- [7] HUANG Xiaofeng, CHEN Wei, DONG Xufeng, et al. A 25 Gbit/s high speed InAlAs avalanche photodiode with back incidence [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(1): 122.

- 黄晓峰,陈伟,董绪丰,等.一种25 Gbit/s背入射高速InAlAs雪崩光电二极管[J].半导体光电,2022,43(1):122.
- [8] ZHANG B, YIN S, LIU Y, et al. High performance InGaAs/InP single-photon avalanche diode using DBR-metal reflector and backside micro-lens[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(12): 3832-3838.
- [9] NUSSBAUM P, VOELKEL R, HERZIG H P, et al. Design, fabrication and testing of microlens arrays for sensors and microsystems[J]. Pure and applied optics: Journal of the European Optical Society Part A, 1997, 6(6): 617.
- [10] SHENG Shuwu, LI Linhai, XIN Zhihui, et al. Uncertainty analysis and system deviation correction for focal length measurement of convex lens [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 1412001.
盛树武,李林海,辛志慧,等.凸透镜焦距测量不确定度分析及系统偏差校正[J].光学学报,2021,41(14):1412001.
- [11] LI Jianjun, CHU Chunyan, LU Weitong, et al. Advances in fabrication and application of microlens arrays[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(21): 2100001.
李建军,褚春艳,卢玮彤,等.微透镜阵列的制备与应用研究进展[J].光学学报,2021,41(21):2100001.
- [12] WEI Y, LI L H, LEE W B, et al. Fabrication of microlens array and its application: a review[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 31(1): 16.
- [13] CHEN Changfeng, ZHENG Yi, FANG Chaolong, et al. Microlens array membrane enhances the luminescence efficiency and stability of CsPbBr₃ quantum dot films[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(13): 1313001.
陈长锋,郑懿,方朝龙.微透镜阵列结构膜提高CsPbBr₃量子点薄膜发光效率及其稳定性[J].中国激光,2021,48(13):1313001.
- [14] FENG Xianfei, DENG Jun, LIU Ming, et al. Fabrication of microlens array for short-wave infrared detector[J]. Opto-electronic Engineering, 2017, 44(6): 633-637.
冯献飞,邓军,刘明,等.用于短波红外探测器的微透镜阵列制作[J].光电工程,2017,44(6):633-637.
- [15] AUDRAN S, FAURE B, MORTINI B, et al. Study of dynamical formation and shape of microlenses formed by the reflow method[C]. SPIE, 2006, 6153: 1368-1377.
- [16] LIU Z, ABBASI H N, ZHU T F, et al. Fabrication of micro lens array on diamond surface[J]. AIP Advances, 2019, 9(12): 125218.
- [17] ZHU T F, LIU Z, LIU Z, et al. Fabrication of monolithic diamond photodetector with microlenses[J]. Optics Express, 2017, 25(25): 31586.
- [18] LIU Z, ZHU T F, WANG Y F, et al. Fabrication of diamond submicron lenses and cylinders by ICP etching technique with SiO₂ balls mask[J]. Materials, 2019, 12(10): 1622.
- [19] SUN C, WANG J, ZHOU Q, et al. Room temperature dry etching of InP-based semiconductors for optoelectronic device fabrication using inductively coupled plasma[C].2007 IEEE 19th International Conference on Indium Phosphide & Related Materials, IEEE, 2007: 229-232.

Design and Fabrication of Integrated Microlens for High Speed Photodetectors

YANG Xiaowei, YUAN Weifang, LI Tonghui, LI Yu, DONG Xiaowen, LIU Kai,
HUANG Yongqing, DUAN Xiaofeng

(State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: With the accelerated development of new industries such as big data and cloud computing, higher requirements are put forward for the capacity of communication networks. Due to the limitations of electrical interconnection, optical interconnection occupies an increasing proportion in the communication system. In order to meet the demand of rapid increase of optical communication network capacity, improving the transmission rate of single channel is an effective solution. Therefore, high speed optical detector is widely used in optical communication system. The goal of high speed optical detector is to obtain a higher bandwidth of 3 dB, and reducing the surface area of the device is an effective way to achieve it. The decrease of the mesa area can reduce the junction capacitance of the optical detector and thus improve the bandwidth of the optical detector. However, the decrease of the mesa area can reduce the optical coupling efficiency of the optical detector and directly increase the optical coupling loss in the system. To solve this problem, the monolithic integrated microlens structure on the back of high speed optical detector substrate is an effective solution. The structure increases the equivalent photosensitive surface of the optical

detector, increases the optical coupling efficiency of the optical detector, and can effectively compensate the alignment deviation. An InP-based microlens structure integrated with a 1.31 μm optical detector chip is designed for data center applications. An InP-based microlens structure integrated with a 1.31 μm optical detector chip is designed for data center applications. An experimental method was developed to fabricate microlens glue by hot melt and transfer microlens glue by Inductively Coupled Plasma (ICP) etching. SiCl_4 and Ar were selected as etching gases in ICP etching process to ensure the safety of the experiment. An InP-based microlens with diameter of 90.3 μm , crown height of 18.5 μm and smooth surface morphology was prepared. In this paper, a single InP microlens integrated on the back of the optical detector is designed, simulated and fabricated, which can improve the optical coupling efficiency of the device and compensate the alignment deviation. Through software simulation, the microlens with a diameter of 100 μm and a crown height of 18 μm can realize the convergence function at the focal length of 114 μm under two light incident angles of collimation and divergence of 10° , which meets the requirement of integration on the back of the optical detector. To prepare the microlens, the adhesive shape is first made, and then the adhesive shape is transferred to the substrate by etching to form the microlens. The adhesive shape of the microlens is made by photoresist hot melt method. Photoresist hot melt method is a common technology for microlens preparation. It can be used to produce microlens adhesive with the morphology and size meeting the requirements by using standard semiconductor equipment and technology. The method has high repeatability, good homogeneity and low cost. The microlens adhesive with smooth surface and no depression was prepared by photoresist hot melt method. The relatively safe SiCl_4 and Ar were used for etching gas. By studying the influence of cavity pressure, etching gas flow and RF power on ICP etching, the ICP etching conditions of SiCl_4 flow 13 sccm, Ar flow 13 sccm, pressure 0.266 Pa in the reaction cavity and RF power 105 W were finally selected. The InP microlens with diameter of 90.3 μm , arch height of 18.5 μm and smooth surface morphology was prepared. The responsivity of PIN light detector with backside monolithic integrated microlens was tested by source meter, optical fiber and probe station under incident light with wavelength of 1.31 μm . In the test process, the optical signal output by the laser with wavelength of 1.31 μm is incident into the optical detector through the fiber. The electrical signal generated by the optical detector enters the source table through the high-frequency line, changes the optical output power of the laser and records the corresponding optical current value on the source table, and finally calculates the responsiveness of the PIN optical detector. When the incident light of 1.31 μm wavelength is incident in the direction of 3° from the main optical axis, the response of the PIN light detector decreases by 4%. The prepared InP microlens meets the design requirements.

Key words: Integrated microlens; Photodetector; Microlens photoresist type; Melt method; Inductive Coupled Plasma etching

OCIS Codes: 230.3990; 040.5160; 130.3120