材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023090504

InP基连续面型方形微透镜设计与制作技术研究

柳　聪*，张为国，刘　锋，崔大健，张　承，
黄晓峰，高明友，刘奎宇，朱长林，陈益民
（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要： 建立了非球面连续面型方形口径微透镜性能仿真模型，利用ZEMAX软件对10°视场、50 μm周期、填充因子接近100%的磷化铟微透镜面型参数进行了优化设计。开发了衍射调制动态曝光与感应耦合等离子体刻蚀系统误差补偿方法制作出的磷化铟微透镜，其表面粗糙度小于2 nm，面型数据与设计值相比误差小于1/4工作波长，达到完善成像水平。

关键词： 方形微透镜；衍射调制动态曝光；填充因子；粗糙度；面型误差

中图分类号： TN364.2　**文章编号：** 1001－5868(2023)06－0883－06

Research on the Design and Manufacturing Technology of InP-Based Continuous Square Microlens

LIU Cong, ZHANG Weiguo, LIU Feng, CUI Dajian, ZHANG Cheng,
HUANG Xiaofeng, GAO Mingyou, LIU Kuiyu, ZHU Changlin, CHEN Yimin
(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: The performance simulation model of aspheric continuous surface square aperture microlens was established in this paper. The surface parameters of InP microlens with 10° field of view, 50 μm period and fill factor close to 100% were optimized by ZEMAX software. A diffraction-modulated dynamic exposure and inductively coupled plasma etching system error compensation method was developed to produce InP microlens with a surface roughness of less than 2 nm, and the surface shape data has an error of less than 1/4 of the working wavelength compared to the design value, achieving a complete imaging level.

Key words: square microlens; diffraction-modulated dynamic exposure; filling factor; roughness; surface error

0　引言

工作在盖革模式下的雪崩型光电二极管焦平面阵列(GM APD FPA)具备单光子极限探测能力，在激光成像制导、三维地形测绘、环境监测、生物发光检测[1-3]等领域具有广阔的应用前景，是光电子探测领域的重点研究课题。在GM APD FPA芯片研制过程中，由于受像元间距以及有源区扩散工艺中边缘抑制效果的影响，光敏区设计值一般远小于像元尺寸，其占空比不足5%[4]。在进行信号光探测时，大部分光线不能被有效收集，导致探测效率低。另外，未收集到的信号经过衬底材料的多次反射将对临近像元造成串扰，大幅度降低了GM APD FPA探测器件对单光子探测的极限能力。

为了解决信号光的收集效率问题，最直接有效的方式是在探测器进光面集成微透镜结构[5]，利用微透镜对光线的偏折汇聚作用来提高对信号光的吸收效率。最常见的微透镜制作工艺是采用光刻胶热熔和反应离子刻蚀(RIE)技术进行加工，这种方法的缺点是微透镜单元的胶膜结构必须相互隔离，不

收稿日期：2023－09－05.

*通信作者：柳　聪　E-mail：1254328101@qq.com

能有粘连，导致几何填充因子较低，一般以圆形微透镜结构为主，实际制作的微透镜填充因子不足70%[6]，该类型微透镜结构是当前产品的主流形式。另外，国外还有报道[7-8]采用光刻胶做掩膜，通过各向同性腐蚀液进行湿法腐蚀制作微透镜，这种工艺同样存在填充因子低的问题，同时微透镜表面形貌受光刻胶掩膜制作和湿法腐蚀工艺的影响，重复性控制困难。还有报道采用二元光学设计的菲涅尔透镜[9]，理论上可以实现100%填充因子，但本质上它只是连续面型微透镜在某一特定波长下的多台阶近似，因此色差严重，同时由于台阶倒角及加工误差的存在，导致耦合光斑弥散斑较大，能量分散，影响光能收集率。

针对以上问题，本论文研制了一种连续面型方形微透镜结构制作工艺。通过采用衍射调制动态曝光工艺制作出几何填充因子为100%的连续面型方形微透镜胶膜结构。同时采用感应耦合等离子体(ICP)刻蚀技术将微透镜胶膜图形转移至磷化铟(InP)衬底上，实现了表面粗糙度小于2 nm的刻蚀效果。为了获得高精度低失真微透镜结构建立了胶膜逆向补偿方法，大幅度降低了刻蚀后微透镜表面产生的面型误差，最终获得了面型精度优于1/4波长、表面接近光学镜面的微透镜结构。通过测试比较，集成连续面型方形微透镜的GM APD FPA比集成传统圆形微透镜的GM APD FPA在探测效率上获得了30%～40%的提升。

1 连续面型方形微透镜光学设计

由于微透镜尺寸远大于入射光波长，采用以几何光学为基础的ZEMAX光学设计软件仿真即可得到准确的设计结果。为了更真实地模拟微透镜使用环境，仿真模型将在ZEMAX非序列模式下建立，如图5所示。目标为在0°～10°视场下，将一个像元面积(50 μm×50 μm)内的全部光斑能量集中在5 μm×5 μm的光敏面区域。本文光学模型中微透镜尺寸为50 μm×50 μm，为了使得不同视场下聚焦光斑的能量集中，需要降低透镜自身形貌所带来的球差及其他像差。因此，本文采用了非球面设计，考以K值和R值为优化变量，进行优化分析，最终仿真结果确定了非球系数$K=-3.28$，$R=105$ μm。

经过仿真计算得到，在±10°视场内，光斑均未超出探测器光敏面，耦合效率理论上接近100%。如图2所示，0°视场下，聚焦光斑集中在距中心直径0.5 μm范围内，10°视场下，聚焦光斑集中在距中心直径3.8～5.0 μm范围内，即像元周期内的光能均可落在探测器光敏面上，达到了设计的目标需求。

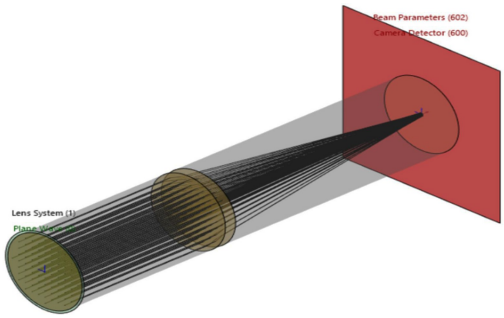
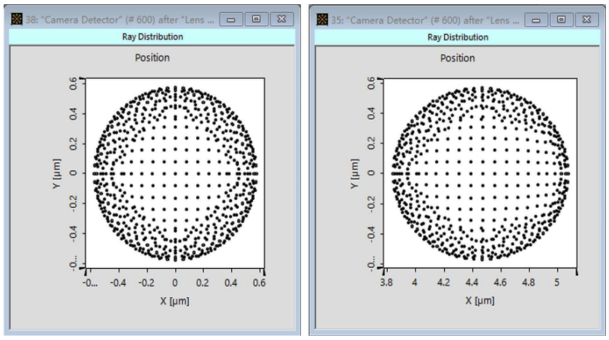


图1 微透镜光学仿真模型



(a) 视场角 $FOV=0°$ (b) 视场角 $FOV=10°$

图2 在不同视场角条件下的光学仿真结果

2 连续面型方形微透镜工艺制作

2.1 微透镜刻蚀掩膜工艺制作

2.1.1 光刻胶涂覆工艺研究

微透镜阵列为一体化成形及使用，在使用过程中无法对每一个微透镜独立调整，因此要求微透镜具有较高的均匀性，其中在实际应用场景中焦距的均匀性影响最大、也最难控制。材料相同的情况下焦距由曲率半径决定，曲率半径又受透镜口径和矢高的限制。横向口径受掩模板制约，当前已经可以达到非常高的精度，曲率半径受透镜矢高的影响较大。矢高主要与光刻胶厚度有关，实际加工过程中，控制光刻胶的厚度均匀性至关重要。本文在此方面开展了如下研究：

(1)基片平整度与光刻胶涂覆均匀性的关系

为了获得高均匀性的光刻胶模型，研究了不同平整度基片对光刻胶涂覆均匀性的影响。实验采用直径为20 mm的锗衬底片，对比了在不同平整度条件下光刻胶的均匀性，如图3所示。可以看到，基片曲率半径越大，光刻胶涂覆越平整，均匀性越高。为此，本研究在采购的基片基础上，利用金刚石车削技

术进行基片的整形及抛光处理，获得直径为 20 mm、平面度达 60 nm的基片，用于光刻胶涂覆实验，获得光刻胶均匀性优于 1%，如表 1 所示。

表 1　平整度小于 60 nm 时光刻胶涂覆均匀性

样品编号	081001	081002	081003	081101	081102	081103	081201	081202	081203
平均厚度/μm	28.583	28.734	28.669	28.928	28.963	28.965	28.377	28.203	28.103
均匀性/%	0.48	0.85	0.57	0.79	0.81	0.83	0.74	0.43	0.93
重复性/%	1.51								

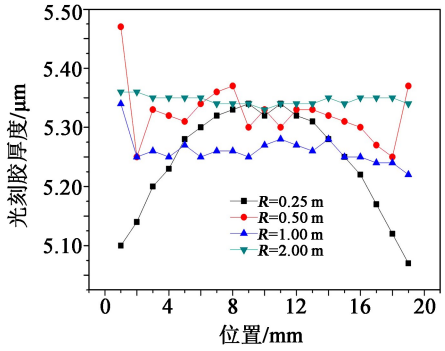


图 3　不同翘曲度基片不同区域胶厚分布曲线

(2)涂胶厚度与旋转速度的关系

为了研究涂胶转速对涂胶厚度的影响规律，设计不同转速情况下测量光刻胶对应厚度实验。在平面锗片上旋涂 AZ9260 光刻胶，选择不同的旋转速度，用白光干涉仪测试沿平面锗片直径方向上光刻胶的厚度变化。图 4 为涂胶厚度平均值与旋转速度的关系。

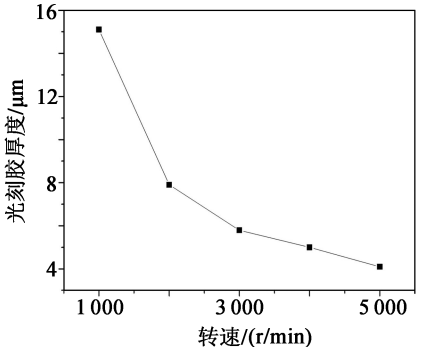


图 4　不同转速下胶厚平均值曲线

通过曲线趋势分析，随着旋转速度增加，光刻胶厚度不断减小。在制作正式微透镜光刻胶模型时，可以参考微透镜所需矢高，设计合适的涂胶转速从而获得最佳胶膜厚度。

2.1.2　方形微透镜曝光技术研究

在基片及光刻胶材料完成预处理之后，需进一步研究微透镜的光刻胶图案的精确成形，本文研究了衍射调制动态曝光方法，其原理框图如图 5 所示。

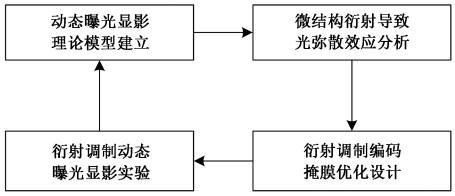


图 5　衍射调制动态光刻原理框图

首先分析光刻胶内光场传输及吸收的规律，该规律符合 Dill 曝光模型[10]，如公式(1)所示，随光刻胶的深度变化，光强呈指数规律衰减，因此虽然界面处光强相同，但不同深度处的光刻胶所接受的曝光剂量并不相同。光刻胶需要达到曝光阈值，方能实现可控显影。因此，控制目标图案的曝光深度分布，核心是控制曝光剂量分布。

$$\frac{\partial I(z,t)}{\partial Z}=-I(z,t)[AM(z,t)+B]$$

$$\frac{\partial M(z,t)}{\partial t}=-I(z,t)M(z,t)C$$

$$M(x,y,z,t)=\mathrm{e}^{-C\times Q(x,y,z,t)} \tag{1}$$

假设目标微透镜每一点的深度值为 $z(x,y)$，结合公式(1)，可获得光刻胶界面处光强分布为：

$$Q(x,y)=\rho\cdot z_{\mathrm{f}}(x,y) \tag{2}$$

其中，ρ 为工艺过程中的影响因子。光源发出的光通过掩模照射到光刻胶界面，可根据光场传输理论获得掩模板上透光区域分布，如公式(3)所示：

$$d(x,y)=-\frac{1}{\mathrm{j}\lambda}\iint_{\sum}Q(x,y)\,\frac{k(\theta)}{r}\exp\left(\mathrm{j}\,\frac{2\pi}{\lambda}r\right)\mathrm{d}s \tag{3}$$

将掩模各点处透光分布进行数字化离散，是指划分为多个等周期的灰度分布条带，如公式(4)所述，通过移动周期实现空间各点的曝光量调制。

$$d(x,y)=\sum_{i=1}^{N}d_i(x,y) \tag{4}$$

通过采用以上理论模型制作出了连续面型方形微透镜胶膜模型，如图 6 所示。微透镜胶膜实现了 100%填充。同时，结合 ICP 刻蚀过程中光刻胶与 InP 刻蚀比动态变化，导致 InP 微透镜与光刻胶膜

面型存在传递误差的问题，对胶膜面型进行了补偿。另外，用白光干涉仪多点测量透镜阵列显影后曲率，通过 CAD 软件拟合，将显影后数据与设计值进行对比，结果显示面型精度约为 198 nm，制作胶膜表面粗糙度约为 1 nm，如图 7 所示。

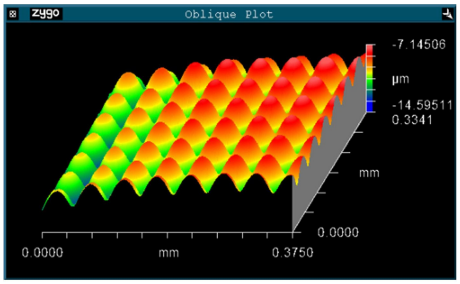
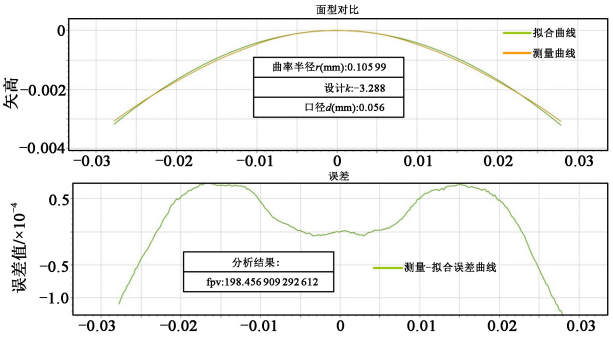
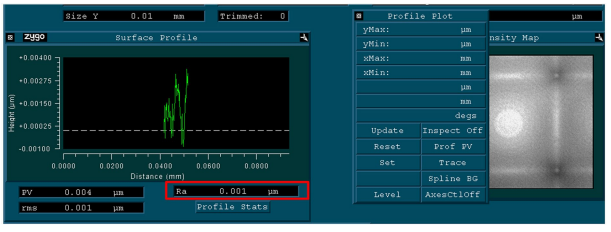


图 6 微透镜胶膜实物图



(a) 微透镜胶膜面型拟合



(b) 微透镜胶膜表面粗糙度测试

图 7 微透镜刻蚀掩膜制作结果测试结果

2.2 连续面型方形微透镜 ICP 刻蚀工艺

在完成光刻胶图案制作的基础上，采用 ICP 刻蚀工艺完成微透镜图形转移。在刻蚀过程中，需要研究等离子体刻蚀传递机制，以使得光刻胶图案向 InP 衬底材料精确转移。在该过程中，等离子体的刻蚀行为与其中刻蚀腔室中的各种物理化学参数及基片图案本身提升相互影响，并相互耦合，使得刻蚀过程动态变化，原理如图 8 所示。等离子体刻蚀过程中，影响微透镜面形精度的直接参数是 InP 材料与光刻胶的刻蚀选择比(InP/PR)、刻蚀速率和刻蚀时间，其中刻蚀选择比是影响面形控制最核心的因素。在研究连续面形微透镜刻蚀工艺时发现，刻蚀气体流量配比是影响选择比最关键的因素。

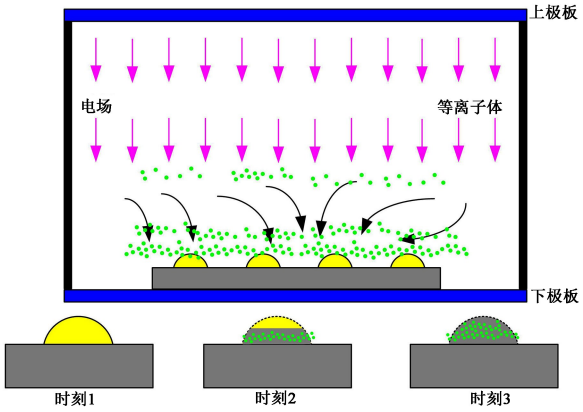
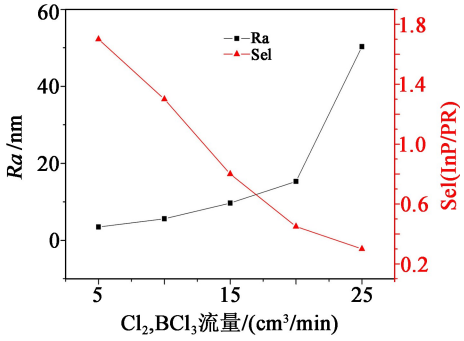
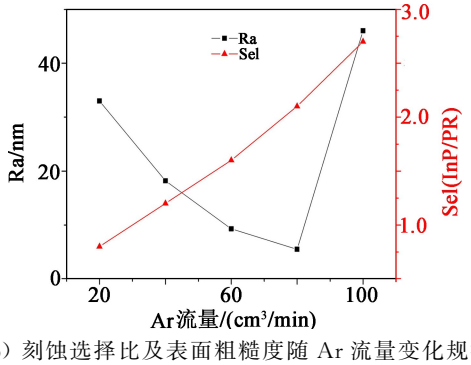


图 8 等离子体刻蚀过程形貌动态变化原理示意图

实验采用 Cl_2 和 BCl_3 作为基础气体，并同时添加 Ar，辅助调节刻蚀选择比(Sel)及表面粗糙度(*Ra*)。如图 9(a)所示，固定流量比 Cl_2 ∶ BCl_3 = 1∶1，随着 Cl_2 和 BCl_3 流量的增加，刻蚀选择比逐渐下降，粗糙度逐渐上升。这是由于随着反应物浓度的增加，InP 刻蚀速率增加，导致大量的 $InCl_3$ 生成并附着在刻蚀基片表面，阻碍 InP 材料刻蚀的进一步进行，相比光刻胶刻蚀速率有所下降，最终表现为刻蚀选择比的下降。同时，附着在基片表面的副产物 $InCl_3$ 充当掩膜作用，随着副产物的增加，刻蚀基片表面变得越来越粗糙。如图 9(b)所示，随着 Ar含量的增加，刻蚀选择比逐渐上升，粗糙度逐渐



(a) 表面粗糙度及刻蚀选择比随 Cl_2/BCl_3 流量变化规律



(b) 刻蚀选择比及表面粗糙度随 Ar 流量变化规律

图 9 气体流量配比对微透镜刻蚀选择比及表面粗糙度的影响

减小。这是因为 Ar 在等离子体刻蚀过程中充当物理轰击作用，随着 Ar 含量的增加，基片表面的副产物 $InCl_3$ 被有效清除，使刻蚀表面变得光滑，同时促进了 InP 材料刻蚀进程，使得刻蚀选择比逐渐上升。但是随着 Ar 含量的进一步上升，物理轰击效应将明显加剧，InP 材料还未来得及刻蚀就被 Ar 轰击出基片表面，导致基片表面出现凹坑，最终表现出来的效果就是表面粗糙度的上升。

为了获得合适的选择比和光滑表面，需要对 Cl_2，BCl_3 及 Ar 流量比进行合理调节。最终调试结果为气体流量比 Cl_2 ∶ BCl_3 ∶ Ar＝1 ∶ 1 ∶ 8，在此气体流量比条件下制作的微透镜表面粗糙度约为 2 nm（更优结果可达到 1 nm），微透镜表面已达光学镜面水平，如图 10 所示。

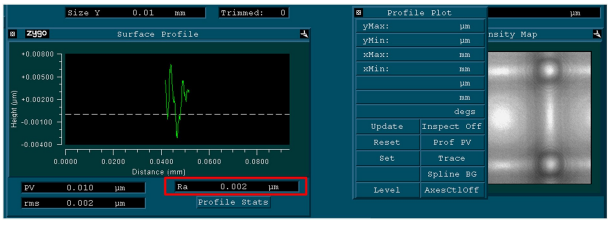


图 10　微透镜 ICP 刻蚀后粗糙度测试结果

3　微透镜性能测试

3.1　填充因子测试

如图 11 所示为采用衍射调制动态曝光和 ICP 刻蚀工艺制作出的连续面型方形微透镜实物图。为了测试微透镜几何填充因子，实验采用白光干涉仪

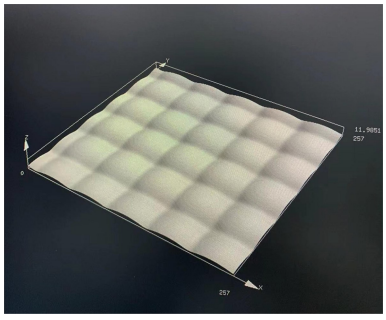
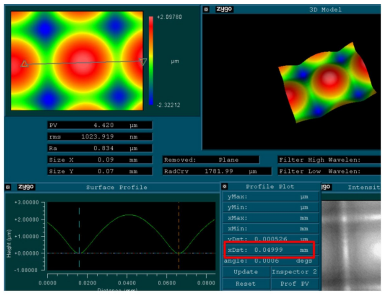
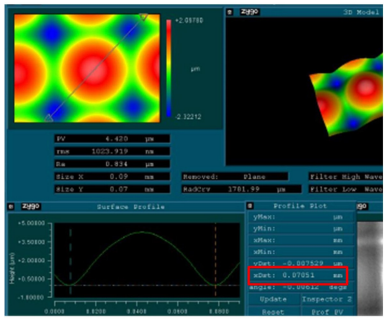


图 11　ICP 刻蚀后微透镜实物图



（a）微透镜边长测试结果



（b）微透镜对角线测试结果

图 12　方形微透镜有效口径测试结果

对制作后透镜有效口径进行了测试，如图 12 所示，测试结果显示有效边长为 49.99 μm，对角线方向有效尺寸为 70.7 μm，说明微透镜几何填充因子已达到了 100%。

3.2　面型精度测试

面型精度（PV 值）在 ICP 刻蚀后有所增大，但基本控制在 98 nm 左右，低于工作波长（λ＝1 064 nm）的 1/4，达到完善成像水平，如图 13 所示。

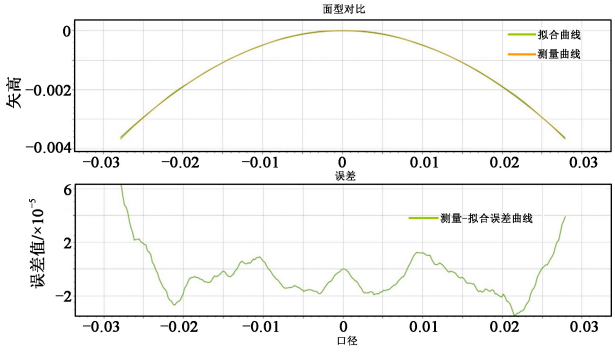


图 13　ICP 刻蚀后微透镜面型精度拟合结果

3.3　集成不同结构微透镜后器件性能对比

为了测试制作的方形微透镜对信号光线收集效率的提升效果，实验采用了本单位成熟的 InGaAs GM APD相关产品，对比测试了集成传统圆形微透

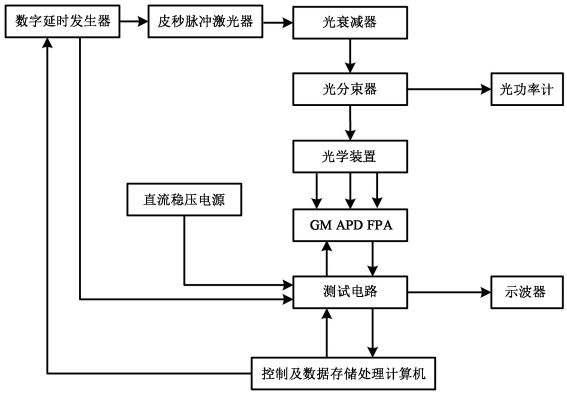


图 14　PDE 测试原理框图

镜和方形微透镜时器件探测效率(PDE)的变化情况。如图 14 所示为 PDE 测试原理框图,在规定工作温度、电源电压、入射光波长及时序控制信号等条件下,通过衰减器调节激光器输出功率使每个像元通过微透镜聚焦接收的光脉冲平均强度达到单光子量级,测试各像元在统计时间内被光脉冲触发雪崩并被有效检测到的计数概率,求出所有有效像元的计数概率的算术平均值,得到光子探测效率 PDE。

在脉冲激光照射下,连续测试采集 5 次保存 f 帧数据,通过 Matlab 程序分析统计 f 帧数据中各像元由激光脉冲引起的雪崩触发次数。之后按公式(5)~(6)计算器件的光子探测效率 PDE。

$$PDE(i,j)=\frac{1}{\mu}\ln\left(\frac{1-\frac{N_{\mathrm{d}}(i,j)}{t\times f_{\mathrm{g}}}}{1-\frac{N_{\mathrm{l}}(i,j)}{t\times f_{\mathrm{laser}}}}\right) \tag{5}$$

$$PDE=\frac{1}{M\cdot N-d}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}PDE(i,j) \tag{6}$$

结果显示,在同一工作条件下,工作波长为 1 064 nm 时,采用圆形微透镜测得的 PDE 约为 19%,而方形微透镜约为 25%;在工作波长为 1 550 nm 时,采用圆形微透镜测得的 PDE 约为 15%,而方形微透镜约为 21%。由此可见,采用方形微透镜的器件 PDE 增加了 6%左右,相比圆形微透镜提升了 30%~40%的探测效率。

4 结论

本文通过采用独特的衍射调制动态曝光工艺和 ICP 刻蚀技术,成功制作出几何填充因子为 100%的连续面型方形微透镜结构。同时结合光刻胶膜逆向补偿技术大幅度降低了刻蚀后微透镜表面产生的面型误差,最终获得了面型精度优于 1/4 波长,表面接近光学镜面的微透镜结构。通过测试比较,集成非球面方形微透镜的 GM APD 比集成传统圆形微透镜的 GM APD 在探测效率上获得了 30%~40%的提升。通过利用微透镜结构对入射光线的偏折汇聚作用,大幅度提高芯片光填充因子,从而提高探测器对信号光的探测效率。连续面型方形微透镜结构将在高性能 GM APD FPA 器件研制中发挥重要的作用,并拥有广阔的应用前景。

参考文献:

[1] 吴青林,刘 云,陈 巍,等. 单光子探测技术[J]. 物理学进展,2010,30(3):296-306.
Wu Qinglin, Liu Yun, Chen Wei, et al. Single photon detection technology[J]. Progress in Phys., 2010, 30(3): 296-306.

[2] Isoshima T, Isojima Y, Hakomori K, et al. Ultrahigh wensitivity single photon detector using a Si avalanche photodiode for the measurement of ultraweak biochemiluminescence[J]. Rev. Sci. Inst., 1995, 66: 2922-2926.

[3] 张秀川,蒋利群,高新江,等. InGaAs/InP 盖革模式雪崩焦平面阵列的研制[J]. 半导体光电,2015,36(3):356-360.
Zhang Xiuchuan, Jiang Liqun, Gao Xinjiang, et al. Fabrication of InGaAs/InP Geiger-mode avalanche focal plane arrays[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2015, 36(3): 356-360.

[4] Donati S, Martini G, Norgia M, et al. Microconcentrators to recover fill-factor in image photodetectors with pixel on-board processing circuits[J]. Opt. Express, 2007, 15(26): 18066-18075.

[5] 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.
Li Qingwei, Yin Shunzheng, Song Hongwei, et al. Design and fabrication of an InP microlens [J]. Micronanoelectronic Technol., 2018, 55(4): 296-301.

[6] Gyongy I, Calder N, Davies A, et al. A 256×256, 100-kfps, 61% fill-factor SPAD image sensor for time-resolved microscopy applications [C]// 2016 IEEE Inter. Electron Devices Meeting (IEDM), 2017: 1-8.

[7] Park E H, Kwon Y S. Chemical etching of in GaAsP/InP using HBr-H_3PO_4-$K_2Cr_2O_7$ and its application to microlens array[C]// IEEE Xplore, 2023: 190-192.

[8] Kim Y S, Kim J, Jeon H, et al. Semiconductor microlenses fabricated by one-step wet etching [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2000, 12(5): 507-509.

[9] 陈思乡,易新建,曾延安. 二元衍射微透镜的亚波长结构设计方法[J]. 光电子·激光,2001,12(1):1-3.
Chen Sixiang, Yi Xinjian, Zeng Yanan, et al. The design of binary diffrative microlens with subwavelegth structures[J]. J. Optoelectronics·Laser, 2001, 12(1): 1-3.

[10] H. P. 赫尔齐克. 微光学元件、系统和应用[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
Herzik H. P. Micro-Optics, Systems and Applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.

作者简介:

柳 聪(1985—),男,硕士,工程师,主要从事光电探测器芯片工艺技术研究。