

文章编号:1007-6735(2011)02-0174-05

紫外衍射微透镜阵列的设计与制备

张 伟¹, 李 毅^{1,2}, 张 虎¹, 黄毅泽¹, 朱慧群³, 孙若曦¹

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093; 2. 上海理工大学 上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093;
3. 五邑大学 薄膜与纳米材料研究所, 江门 529020)

摘要: 通过研究互相关联的光学和工艺参数, 用标量衍射理论设计了用于 128×1 日盲型紫外探测器的衍射微透镜阵列, 其工作中心波长为 400 nm, 单元透镜 F 数为 $f/5$, f 为焦距. 采用组合多层镀膜和剥离的工艺方法制备微透镜阵列, 对工艺流程和制备误差进行了分析, 对制备出的 128×1 的衍射微透镜阵列的光学性能进行测量和分析. 实验结果表明, 衍射微透镜阵列的衍射效率为 87%. 制备误差主要来自对准误差和线宽误差. 紫外衍射微透镜阵列的整体性能满足了微透镜阵列与紫外焦平面阵列的单片集成要求.

关键词: 紫外; 微透镜阵列; 菲涅尔波带片; 组合多层镀膜与剥离
中图分类号: TN 43; TN 213 **文献标志码:** A

Ultraviolet diffractive microlens array design and fabrication

ZHANG Wei¹, LI Yi^{1,2}, ZHANG Hu¹, HUANG Yi-ze¹, ZHU Hui-qun³, SUN Ruo-xi¹

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
3. Institute of Thin Films and Nanomaterials, Wuyi University, Jiangmen 529020, China)

Abstract: Diffractive microlens arrays for 128×1 solar-blind UV photodetectors were designed using scalar diffraction theory by considering the interrelated optical and process parameters. The working center wavelength is 400 nm, the lens F number is $f/5$. The microlens arrays were fabricated by use of combination multi-coatings and stripping technique, the practical processes and fabrication errors were discussed, and the optical characteristics of 128×1 diffractive microlens arrays were measured and analyzed. Experimental results show that the diffraction efficiency of the diffractive microlens array is 87%. The fabrication errors come from the alignment error and the line width error. The overall performance of ultraviolet diffractive microlens array can meet the monolithic integration requirements of the microlens array with the ultraviolet focal plane array.

Key words: ultraviolet; microlens array; Fresnel zone plate; multi-layer coating and stripping

收稿日期: 2010-10-20
项目基金: 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2006AA03Z348); 上海市重点学科建设资助项目(S30502); 上海市人才发展基金资助计划(2009014); 上海市教育委员会科学技术研究重点项目(10ZZ94).
作者简介: 张 伟(1984—), 女, 硕士研究生. 研究方向: 微光学. E-mail: woshishui_5758@163.com
李 毅(联系人), 男, 教授. 研究方向: 光电材料、光电器件、光电模块、光电控制、光通信及微光机电系统等. E-mail: optolyclp@263.net

当今的光电子技术已从可见光波段延伸至红外和紫外等非可见光区.目前,红外技术已经广泛应用于各个领域.现在的紫外技术已经不再仅局限于军事领域,各种紫外光电设备已经在民用领域逐渐得到应用.其中,在民用方面的应用有医学诊疗、天气灾害预警等,还有许多有待开发的用途^[1-2].在紫外成像和紫外探测方面,由于多种因素导致紫外焦平面探测器的单元有效探测面积小于像元单元面积,即填充因子远小于100%,因此,整个视场中只有一部分光能被探测器的光敏面接收.为了提高探测器的灵敏度,必须将照射到非光敏区的光会聚到单元的有效探测面上^[3].

衍射微透镜与传统的折射透镜一样,也有会聚光能和成像的作用,由于它体积小、质量轻、集成度高、易于复制而被广泛地应用于红外光电探测器、图像识别和处理、光通讯、激光医学及空间光学等许多领域.本文通过利用衍射微透镜阵列与焦平面阵列集成,设计和制备了用于128×1日盲型紫外探测器的衍射微透镜阵列,以提高紫外焦平面的填充因子,最终达到提高探测器性能的目的^[3-4].

1 紫外衍射微透镜的设计

衍射微透镜是根据菲涅尔波带片原理设计的,是由若干个以光轴为中心的圆环组成,每一个圆环都相当于一个独立的折射面,这些圆形环带均能使入射光线会聚到一个共同的焦点.但是,由于连续面型的衍射微透镜难于加工,目前都用多台阶结构来近似连续面型结构,台阶数越多,其衍射效率就越高.在许多应用场合中,当微光学元件的特征尺寸为波长量级或亚波长量级,刻蚀深度也较大时,标量衍射理论中的假设和近似便不再成立.此时,光波的偏振性质和不同偏振光之间的相互作用对光的衍射结果起着重大作用,必须使用严格的矢量衍射理论及其设计方法.当衍射结构的横向特征尺寸大于光波波长时,光波的偏振属性变得不那么重要,仍可采用传统的标量衍射理论.本文应用标量衍射理论来设计衍射微透镜阵列^[3].

衍射微透镜阵列与紫外焦平面阵列的集成如图1所示,通过微透镜的会聚作用,将光会聚到探测器的光敏面上,增加了光能利用率.

对用于128×1日盲型紫外探测器的衍射微透镜阵列,通过考虑工艺参数和探测器阵列的结构参数,设计了一个中心波长为400 nm的128×1紫外

衍射微透镜阵列,其中,焦距 $f = 400 \mu\text{m}$,台阶数 $L = 8$,中心距为 $80 \mu\text{m}$,透镜 F 数为 $f/5$,浮雕的台阶深度

$$d = \frac{\lambda}{n_{\text{GaN}} - n_0} \quad (1)$$

式中, n_{GaN} 为微透镜材料的折射率; n_0 为空气的折射率; λ 为入射光的波长.

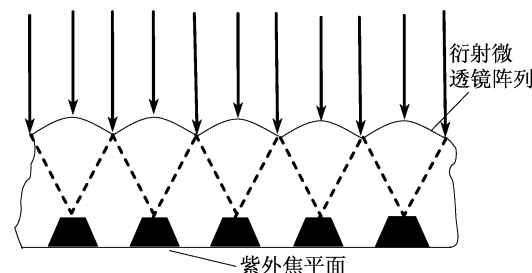


图1 衍射微透镜阵列与紫外焦平面阵列的集成

Fig.1 Integration between UV focal plane array and diffractive microlens array

由于微透镜的厚度仅为波长量级,它与传统的折射元件相比是一个平面元件,表面由多个环带构成,其中,第 m 个环带的第 l 个台阶的半径^[5]

$$r_{m,l} = \sqrt{\lambda^2 \left(\frac{l}{L} + m \right)^2 + 2\lambda f \left(\frac{l}{L} + m \right)} \quad (2)$$

其中, $m = 1, 2, \dots, 8$.

最小特征尺寸

$$d_{\min} = \frac{M\lambda}{LNA} \quad (3)$$

位相深度因子 M 定义为

$$M = \frac{h_{\max} \Delta n}{\lambda} \quad (4)$$

式中, M 为整数; Δn 为两种介质折射率差,与设计波长 λ 有关; $h_{\max}$ 是位相深度因子为 M 时元件的最大浮雕深度.

光学元件的设计必须同实际的工艺加工条件相结合,由于工艺设备极限分辨率的限制,使得大数值孔径元件的制备非常困难.为了增大元件表面的最小特征尺寸,使加工过程易于实现,通常引入参数 M ,其取值范围为 $M \geq 1$ 的整数.此时,相位分布为 $0 \sim 2M\pi$ 内的锯齿状分布.对相同的相位分布,当 M 增加时,每个波带其横向和纵向尺寸都得到了增加.因此,在量化台阶数相同的情况下,通过改变 M 的大小来调节波带周期,可以控制元件表面的最小特征尺寸.当透镜边缘某一局部区域内的最小特征尺寸小于工艺设备的极限分辨率时,可通过改变该区域 M 的值加大表面浮雕结构的深度,从而扩大该

区域的横向宽度,使最小特征尺寸大于工艺分辨率. 这种设计方法称为相位匹配,其中,位相深度因子 M 又称为相位匹配因子,它直接决定元件局部区域

内的浮雕深度^[6]. 通过计算得到衍射微透镜的各台阶半径数值,如表 1 所示.

表 1 衍射微透镜的各台阶半径数值
Tab.1 Diffractive microlens radius of each step number

m	L							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0	6.325	8.945	10.956	12.651	14.144	15.495	16.737	17.893
1	18.980	20.006	20.983	21.917	22.813	23.675	24.506	25.311
2	26.091	26.848	27.585	28.302	29.002	29.685	30.353	31.007
3	31.647	32.275	32.891	33.496	34.090	34.673	35.248	35.813
4	36.369	36.917	37.457	37.990	38.515	39.033	39.545	40.000

2 制备工艺

2.1 制备工艺设计

目前用于制备微透镜的工艺方法是采用类似于集成电路的光刻和刻蚀工艺,存在工作温度高、设备昂贵、工艺兼容性差及成本高等一系列问题. 考虑到在紫外波段,表面浮雕结构的深度为纳米量级,因此,采用了组合多层镀膜与剥离的微细加工工艺制备衍射微透镜的表面浮雕结构,该制备方法具有精度高、可重复性好等特点^[7-9]. 这种制备技术可以克服现有制备技术精度低、工艺兼容性差、设备昂贵,以及由于制造工艺过程中的不均匀所导致的产品成品率下降和高温工艺可能导致焦平面阵列性能下降等缺点. 通过采用有效的双面对准技术,组合多层镀膜与剥离的微细加工工艺,将衍射微透镜阵列制备在紫外探测器芯片的背面,以提高小填充因子的紫外焦平面的性能. 由于单片集成是在焦平面阵列制造工艺完成之后,在同一芯片上进行衍射微透镜阵列的制备,为确保在单片集成衍射微透镜的制备过程中不致引起紫外焦平面阵列性能下降,要求各项工艺的温度最好低于 100 ℃.

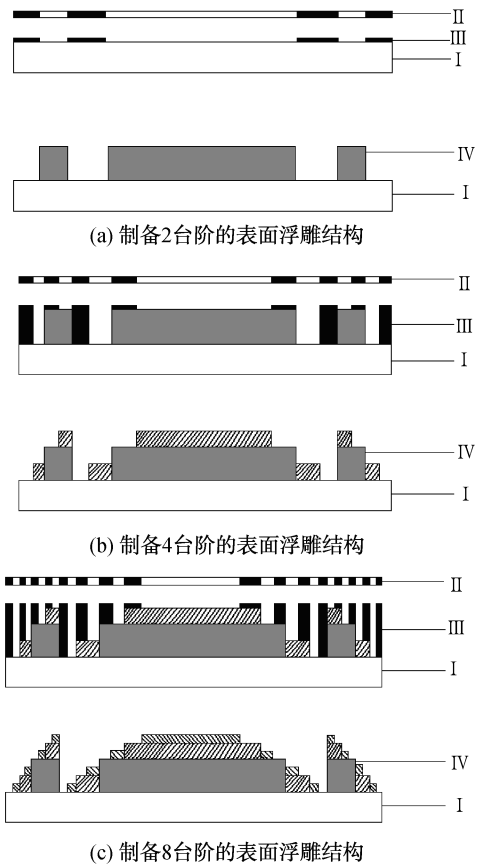
2.2 制备工艺流程

组合多层镀膜与剥离的微细加工工艺制备衍射微透镜阵列的步骤如下:

- a. 利用光刻技术直接在背照式紫外焦平面芯片的光入射面制备光刻掩模图形;
- b. 采用镀膜方法在具有光刻掩模图形的表面沉积膜层,多层镀膜的材料为 GaN,各层的厚度分别为 235, 118, 59 nm;
- c. 将具有膜层的芯片浸入去胶剂中,浸泡 3~5 min;
- d. 通过摇晃或超声震动,将光刻胶上的膜层和

光刻胶去除干净. 上述工艺完成,可获得 2 台阶的表面浮雕结构,如图 2(a)所示;

e. 通过一次重复 a—c 的工艺步骤,可获得所需 4 台阶的表面浮雕结构,如图 2(b)所示,通过两次重复 a—c 的工艺步骤,可获得所需 8 台阶的表面浮雕结构,如图 2(c)所示;



I 为紫外焦平面阵列芯片, II 为掩模板,
III 为光刻掩模图形, IV 为表面浮雕结构

图 2 组合多层镀膜和剥离方法制备 8 阶
微透镜阵列的工艺流程

Fig.2 Mix multi-layer coating and stripping method
of 8 step microlens fabrication process

f. 最终将具有衍射微透镜的紫外焦平面阵列芯片用去离子水清洗 1~2 min, 最后用高纯氮气吹干。

图 2 是采用组合多层镀膜与剥离的微细加工工艺制备 8 台阶衍射微透镜阵列^[10]。

应用 JC500-3/D 型磁控溅射镀膜设备, 在衬底温度不超过 80 °C 的条件下制备 GaN 膜层, 实验中光刻胶为 AZ-P4620。在制备工艺中发现, 涂光刻胶时, 在不影响均匀性和分辨率的前提下, 光刻胶越厚越好, 这样容易剥离不需要的 GaN 膜层。此外, 曝光时一定要保持曝光充分, 以确保显影时能够显示清晰的图形。当微透镜台阶深度比较大时, 曝光量小于曝光阈值的区域就比较小, 所以, 微透镜面形失真的区域比较小。而当要制备的微透镜台阶深度较小时, 抗蚀剂表面曝光量小于曝光阈值的区域就变得非常大, 显影结束后微透镜面形失真的区域将大大降低对光的调制能力^[9]。

通过上述的设计方法和工艺技术, 制备了用于 128×1 的衍射微透镜阵列, 其中, 焦距为 400 μm, 中心距为 80 μm, 台阶数为 8, 中心波长为 400 nm, 其显微照片如图 3 所示。

组合多层镀膜与剥离的微细加工工艺技术具有整个过程简单、薄膜厚度可精确至纳米级、精度高、操作方便、重复性好及实用性强等特点。较之目前市场上灰度等级掩模与刻蚀, 激光束辅助加工技术等具有不可比拟的优势^[5]。由于这种工艺方法的膜层厚度可精确到纳米级, 深度误差对衍射微透镜的影响不大。因此, 制备主要有线宽误差和对准误差这两种误差。

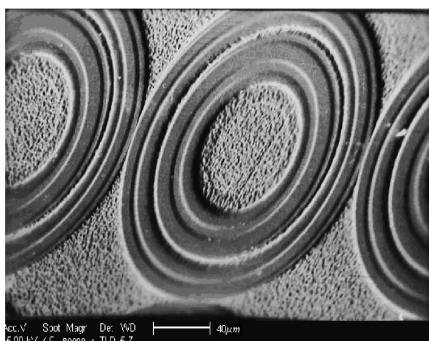


图 3 衍射微透镜阵列的显微照片

Fig.3 Micrograph of microlens array

a. 线宽误差。它是由掩模图形制备过程或掩模图形转印过程引起的图形线宽与设计线宽偏差。

b. 对准误差。它是在掩模图形多次转印过程中

由于掩模版之间的对准误差而引起浮雕轮廓相对理论设计轮廓的偏差。

对准误差对衍射效率的影响最大, 制备过程中控制好套刻中的对准误差尤为重要^[3]。

3 光学性能测试与分析

3.1 焦点测试

针对所制备的衍射微透镜阵列, 测量了微透镜的焦距。由于氮化镓衍射微透镜阵列的设计焦距为 400 μm, 很难实现直接测量焦距, 所以, 先测量了微透镜的光斑尺寸, 然后计算出对应的数值孔径。使用了 1 个数值孔径为 0.25 的物镜、1 个波长为 442 nm 的氦镉(He-Cd)激光器和 1 个紫外电荷耦合器件(CCD)。在测量系统中, 物镜和 CCD 的距离保持恒定。根据式 $1/p + 1/q = 1/f$, 物镜和 CCD 之间的距离 q 是固定的, 物镜的焦距也是个常数。当把衍射微透镜放置于物镜前 p 处, 可以在 CCD 上得到一张衍射微透镜的清晰图片; 然后将衍射微透镜向后挪, 直至在 CCD 上得到清晰的聚焦点。这时衍射微透镜聚焦, 而且焦点就在一开始衍射微透镜被放置的 p 处, 微透镜的位移即为焦距。CCD 上得到的是一个清晰的被放大的焦点。微透镜的图像与其焦点也被放大了。然而, 已经知道微透镜的直径, CCD 上则获得被放大的微透镜和焦点的图像。在像和物(微透镜)之间存在着线性关系, 可以根据像的尺寸和微透镜的直径获得真正的焦点尺寸^[9]。

微透镜的像和焦点的像的直径分别为 R_L 和 r 。微透镜的直径为 R_O 。因此, 真正的焦点尺寸 $D = (r/R_L)R_O$ 。在分析中, 点的尺寸被定义为最大值一半处的宽度。

实验中随机抽取微透镜阵列样品中的 32 个单元透镜进行测试。经过测试、计算和分析, 其中, 典型的焦点尺寸的分布如图 4 所示。N 为像素数。

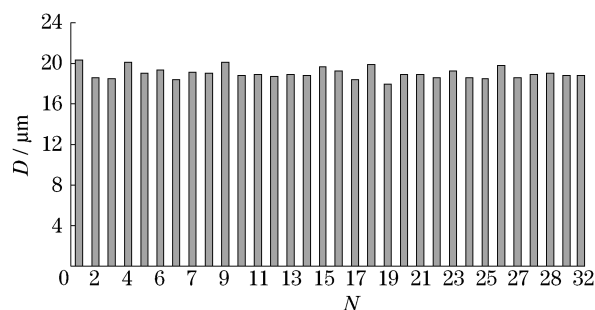


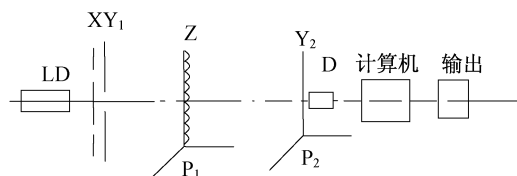
图 4 样品典型的焦点尺寸分布

Fig.4 Focus size distribution of sample

3.2 衍射效率

微透镜的衍射效率是一个重要参数,它是决定微透镜质量的关键,而微透镜的质量又是决定其能否在系统中实际应用的关键,所以,检测衍射效率就成为检测微透镜质量的关键^[11-13].

图5是用于测量衍射微透镜阵列衍射效率的系统装置图.



X为斩波器,Y₁为前光阑,Y₂为后光阑,Z为微透镜阵列

图5 测试系统装置图

Fig.5 Test system setup

在理论中,多台阶的衍射效率的表达式为^[8]

$$\eta = \left[\frac{\sin(\pi/L)}{\pi/L} \right]^2 = \sin^2 [c^2 (M/L)] \quad (5)$$

多级量化的衍射微透镜阵列衍射效率取决于台阶数(量化级次) L ,量化级次越大,衍射效率越高^[14-16].

在实际测试中要考虑制备材料的反射和吸收,所以,实际衍射效率 η 定义为照射到焦面上的探测器实际有效面积上的衍射光能量 E_a 与扣除平基板反射吸收后的出射平面总光能 E_p 的比值^[7].

$$\eta = E_a/E_p \quad (6)$$

对制备的衍射微透镜阵列进行测试,理论的衍射效率为94%,实际中测得的衍射效率为87%,其中的偏差主要来自于制备中的对准误差和线宽误差的共同影响^[17,18].

4 结束语

针对紫外焦平面阵列的实际需求,用标量衍射理论设计了中心波长为400 nm的128×1紫外衍射微透镜阵列,研究了紫外微透镜阵列的制备关键工艺技术,提出了一整套以组合多层镀膜与剥离技术为主的制备衍射微透镜阵列的工艺方法.采用组合多层镀膜和剥离的工艺方法制备了8台阶128×1衍射微透镜阵列.实验结果表明,衍射效率超过87%.可以预计,通过紫外微透镜阵列与紫外焦平面阵列单片集成技术来改善紫外焦平面阵列的光学性能是比较理想的.

致谢: 本文的工作得到了张宇明,周晨,李榴,沈雨剪,郑秋心等同学的支持和帮助,在此表示衷心感谢.

参考文献:

- [1] WATANABE Wataru, KURODA Daisuke, ITOH Kazuyoshi. Fabrication of Fresnel zone plate embedded in silica glass by femtosecond laser pulses[J]. Optics Express, 2002, 10(19): 978-983.
- [2] WANG M R, SU Heng. Laser direct-write gray-level mask and one-step etching for diffractive microlens fabrication [J]. Applied Optics, 1998, 37(32): 7568-7576.
- [3] 金国藩, 严瑛白, 邬敏贤, 等. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 19-54.
- [4] 姚启钧. 光学教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989: 123-145.
- [5] 李毅. 衍射微透镜阵列与红外焦平面阵列单片集成研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2000.
- [6] 杜春雷, 安小强, 邱传凯, 等. 二元位相匹配衍射透镜的研究与应用[J]. 光电工程, 1998, 25(6): 41-45.
- [7] 李毅, 易新建, 陈思乡. 128×128PtSi 红外焦平面用硅衍射微透镜阵列的设计与制备[J]. 红外与毫米波学报, 2000, 19(3): 197-200.
- [8] 程志军, 黄光, 何苗, 等. 8 相位 256×256 衍射微透镜的设计与制备[J]. 光电子技术与信息, 2002, 15(1): 32-35.
- [9] 侯佳宏. 氮化镓微光学元件之研究[D]. 中坜: 中央大学, 1993.
- [10] 李毅. 衍射微透镜阵列与紫外焦平面阵列单片集成技术[P]. 中国专利: 200710040514, 2008-11-12.
- [11] 杜春雷, 邱传凯, 邓启凌, 等. 微透镜阵列与红外探测器阵列集成芯片的研究[J]. 光电工程, 2003, 30(1): 1-4.
- [12] 杜春雷, 林祥棣, 周礼书, 等. 微透镜阵列提高红外探测器能力的方法研究[J]. 光学学报, 2001, 21(1): 246-249.
- [13] 徐欢, 李湘宁, 周果. 基于 Zemax 软件的大齿距等厚菲涅尔透镜的设计[J]. 上海理工大学学报, 2007, 29(1): 99-102.
- [14] 刘玉玲, 隋成华, 李博. 多台阶圆形衍射微透镜聚焦性能的矢量分析[J]. 光学学报, 2008, 28(6): 1124-1130.
- [15] 董小春, 杜春雷, 陈波, 等. 微透镜阵列光刻工艺过程的模拟与分析[J]. 微纳电子技术, 2003, 12: 39-42.
- [16] 彭钦军, 郭永康, 曾阳素, 等. 实时灰阶掩膜技术制备微透镜阵列[J]. 中国激光, 2003, 30(10): 893-896.
- [17] 张鸿海, 范细秋, 胡晓峰, 等. 一种微透镜阵列制备[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(6): 77-79.
- [18] 张玉, 刘德森. 六角形孔径平面微透镜阵列的制备及基本特性研究[J]. 光子学报, 2008, 37(8): 1639-1642.