

· 光电器件与材料 ·

## 衍射光学元件的加工工艺及其在各种光谱镜头中的应用

程习敏<sup>1,3</sup>, 白 瑜<sup>1,2,3</sup>, 谢伟民<sup>1</sup>, 邢廷文<sup>1</sup>, 林妩媚<sup>1</sup>

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; 2. 电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 综述了当前衍射光学元件的加工制作工艺方法, 包括光刻法、薄膜沉积法、直写法、金刚石车削法、准分子激光加工法、灰阶掩模法和复制法。详细说明了这几种方法加工衍射光学元件的工艺过程, 并分析了各种加工方法的优缺点。介绍了衍射光学元件在各种光谱镜头中的应用, 分别给出了衍射面在可见光波段、红外波段和紫外波段系统中的具体设计实例。最后得出结论, 说明衍射光学元件可以增加设计自由度, 简化系统结构, 减小体积, 减轻质量, 改善像差, 提高系统成像质量。

**关键词:** 衍射光学; 光刻; 薄膜沉积; 金刚石车削

中图分类号: O436

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2014)-02-0031-08

## Fabrication Technology and Application in Spectral Lens of Diffractive Optical Elements

CHENG Xi-min<sup>1,3</sup>, BAI Yu<sup>1,2,3</sup>, XIE Wei-min<sup>1</sup>, XING Ting-wen<sup>1</sup>, LIN Wu-mei<sup>1</sup>

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China; 2. Electro-optical Information Institute, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The fabrication technologies of diffractive optical elements such as photolithography, thin-film deposition, direct writing, diamond turning, excimer laser etching, gray-tone mask and replication are summarized. The technology processes of the methods for fabricating diffractive optical elements are introduced in detail. And the advantages and disadvantages of the methods are analyzed. The applications of diffractive optical elements in spectral lens are introduced. The detailed design examples of diffractive surface in the waveband of visible, infrared and ultraviolet spectrum are described respectively. The conclusion shows that diffractive optical elements can help to increase design freedom, simplify system structure, reduce system volume and weight, and improve system astigmatism and imaging quality.

**Key words:** diffractive optics; photolithography; thin-film deposition; diamond turning

衍射光学元件是以光的衍射理论为基础, 具有汇聚、成像、分光等作用的一类光学元件。衍射光学元件独特的负色差和负热差特性, 与传统光学元件结合可以很好地实现消色差与消热差, 从而减少系统中元件数量, 简化光学系统结构, 提高性能, 更加灵活充分利用光能, 对开辟光学技术的数字化领域中有重大意义。近年来国外很多镜头都采用了带有衍射面的光学系统, 美国雷神公司设计了带有衍射面的 MWIR 波段 TWS 双视场观瞄系列望远镜头; 休

斯顿飞行公司设计制造了折衍混合双视场红外望远镜, 提高了系统性能; 该公司设计的头盔显示系统采用折衍混合光学结构, 拓宽了光谱范围和出瞳口径, 减小了系统质量。衍射光学元件已广泛应用于光学传感、光通讯、光计算、医学、数据存储和消费娱乐等领域。现有的加工衍射光学元件的技术有很多种, 最早是采用了大规模集成电路制作的光刻工艺, 适合批量生产, 但多次套刻精度低, 20 世纪 90 年代开始研究直写技术, 无需掩模, 直接利用激光或电子束

收稿日期: 2014-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(10874181)资助

作者简介: 程习敏(1989-), 男, 河南新乡人, 硕士研究生, 主要从事光学精密机械设计、红外探测、光学检测等方面的研究与设计。

写入浮雕图案,但曝光时间长,设备庞大,比较昂贵。到90年代后期,出现了准分子激光加工和灰阶掩模等新方法,降低了成本,缩短了制作周期。文中详细说明了目前衍射光学元件的加工方法及工艺过程,并分析了各种加工方法的优缺点,最后给出了衍射光学元件在各种光谱镜头中的应用。

## 1 衍射光学元件的加工工艺

### 1.1 光刻工艺

光刻法<sup>[1-4]</sup>是制作衍射光学元件较为传统和主要的方法,通过刻蚀基片形成凹槽得到衍射元件,是一种“加法”工艺,其详细工艺过程为:掩模制作,涂胶,前烘,曝光,显影,坚膜,刻蚀,去胶清洗。

首先,根据实际情况,设计出用于光刻的掩模图形,由图形发生器生成衍射振幅掩模。接着在洁净的光学基片上涂光刻胶,涂层要均匀,不能有起伏、针孔。基片涂胶后,放入热恒温容器中给予一定时间的热烘,以增加胶膜与基片的粘附力和胶膜的耐磨性。将光刻掩模板放置到基片上面,使掩模板上的图形与基片位置对准,并在光源下进行曝光,控制曝光时间。将曝光后的基片放入显影液(每种光刻胶均有对应的显影剂)中洗去感光部分的感光胶而保留未感光的光刻胶,掩模图形便转移到了光刻胶上,显影后检查图形是否清晰正确。显影会使胶膜膨胀软化,因此显影后要将胶膜烘干祛除水分,增强胶膜抗蚀性。然后对基片进行刻蚀,保留在基片上的光刻胶保护基片使之不被刻蚀,而暴露的基片则被刻蚀至一定深度。最后把刻蚀后基片上剩余的光刻胶清洗干净。这样便得到一个二台阶的衍射光学元件,对于多相位多台阶的元件,将得到的元件重新涂胶掩模,重复以上制作过程,台阶数 $M$ 与掩模次数 $n$ 的关系为 $M=2^n$ ,每重复一次,基片的刻蚀深度 $d_n$ 减少一半,即 $d_{n+1}=d_n/2$ 。图1给出了衍射光学元件的光刻工艺制作过程,图1a和图1b分别为二台阶和四台阶的微结构分布。

光刻法发展最早,也是当前比较常用的一种方法。但需要多次重复掩模图形转换和刻蚀过程,加工环节多,周期长,对准精度难以控制。而且用多台阶来代替连续浮雕本身就带来误差,要减少误差就必须增加台阶数,使得图形线条变细,精度要求提高,加工更加困难。

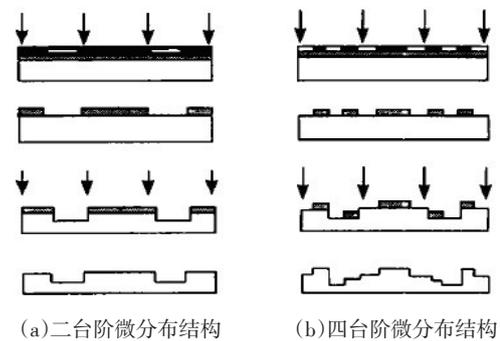


图1 衍射光学元件的光刻工艺过程

### 1.2 薄膜沉积工艺

与光刻法不同,薄膜沉积法<sup>[5-6]</sup>是一种“加法”制作工艺,通过在基片表面上沉积一定厚度的薄膜来制成衍射光学元件。

首先,根据需求设计出掩模图形并生成衍射振幅掩模,要获得与使用光刻法生成同样的衍射元件,对于相同性质的光刻胶,需采用互补的衍射掩模,对于相同的衍射掩模,则需采用性质相反的光刻胶。然后将光学基片清洗干净并利用离心机在其上均匀得涂一层光刻胶,与光刻法类似,烘干后曝光显影,洗去未曝光的光刻胶,将得到的基片放入镀膜机内,采用电子束热蒸发技术沉积一层薄膜,用光控极值法控制膜层厚度。蒸镀后洗去基片上的光刻胶,而保留直接附着在基片上的膜层,便得到一个二台阶的光学元件。图2给出了采用薄膜沉积法制作二阶衍射光学元件的工艺过程,重复以上操作,多次掩模,可以制成多台阶衍射光学元件,每次镀膜厚度 $h_n$ 与掩模次数 $n$ 的关系为 $h_{n+1}=h_n/2$ ,台阶数 $M$ 与镀膜次数成指数关系 $M=2^n$ 。

薄膜沉积法相对于光刻法的优点是能够实现膜层厚度的实时监控,台阶深度精度高,但在结构

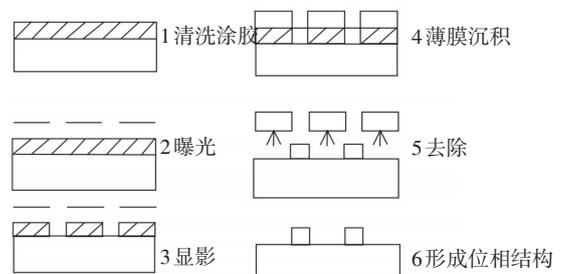


图2 衍射光学元件的薄膜沉积工艺过程

强度及牢固性方面不及光刻法,而且薄膜沉积法制作的也是多台阶结构,同样无法回避台阶数与制作精度的冲突。

### 1.3 直写工艺

直写法<sup>[7-10]</sup>主要包括激光束直写法和电子束直写法。直写法可以制作连续位相衍射光学元件,无需多次重复掩模,一次成型且无离散化近似精度相对较高。通常有两种方式:一种是通过改变光刻胶表面的曝光强度或曝光时间,BOE信息被写入附着在基片上的光刻胶层,显影后形成表面轮廓,通过压模或铸造等方式复制到聚合物上;另一种是显影后直接利用离子束刻蚀得到所需的衍射光学元件。

激光直写设备一般由工控计算机、激光器、光路准直透镜组、自动聚焦系统和坐标控制系统等组成。图3是一种衍射光学元件激光直写设备的布局。首先由元件表面的设计结构和抗蚀材料的显影特性计算确定表面各点所需的曝光计量分布,并将该数据存入计算机,计算机按照以上数据控制声光调制器,对激光强度进行调节,经透镜组准直后由自动聚焦系统聚焦到基片表面的抗蚀剂表面,同时,计算机通过坐标控制系统控制旋转台角速度和直写头径向位移对抗蚀剂进行定位定量曝光,显影后即可得到所需的浮雕结构,对其进行进一步刻蚀可以将抗蚀剂表面结构转移到基片上。

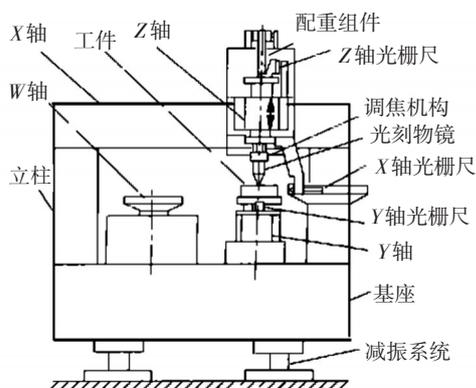


图3 激光直写设备主体布局图

电子束直写与激光直写大体相同,设备一般比较庞大昂贵,而且需要在高真空环境中进行。主要包括电子束源、抗震系统、气垫光学平台、高精度干涉定位仪、光学自聚焦系统、全真空系统和计算机自动控制系统。

首先,根据元件的作用结合实际表面设计数据,

基于电子束在抗蚀层表面曝光计量与显影后抗蚀层高度的线性关系,将光学元件轮廓分布用曝光计量的大小表示出来,并利用光学软件转化成直写数据存入计算机中,用离心法在基片上涂一层电子束抗蚀材料(对电子敏感),通过计算机控制电子束源等设备使电子束源以一定的半径进行圆周扫描,直到要求的剂量,然后将扫描半径增大至一定数量进行逐点扫描曝光,显影后得到设计的表面轮廓。

直写法最大的优点是器件定位后可一次写出多相位阶数或连续相位的二元光学器件,从而避免了多次掩模套刻丧失的共轴精度。但也存在一些缺点,直写最大的问题是不能精确控制轮廓深度,容易引起轮廓变形,电子束直写还存在电子束临近效应,曝光时间长,元件制作费用过高。

### 1.4 金刚石车削工艺

金刚石车削法<sup>[11-13]</sup>可以制作各种球面、非球面等光学元件。该工艺是在超精密数控机床上实现的,通过编程精确控制被加工原件和金刚石刀具的运动,形成被加工表面。目前的单点金刚石车床系统集成了先进的空气静压主轴、液压导轨、直线电机、自适应数制系统等关键零部件和核心技术,通过配置快刀伺服系统和慢刀伺服系统可以进行三轴联动以实现各种自由曲面的加工,主要用于加工中小尺寸、中等批量的红外晶体和金属材料的光学零件。该方法生产效率高、重复性好、广泛应用于各类光学镜头中。加工流程包括分析、装夹、模拟、加工。首先,根据设计得出待加工元件的位相函数,并根据位相函数结合具体元件求出待加工表面微结构分布函数,利用软件对设计的衍射面进行模拟,优化出元件的结构参数,编程存入计算机中。将元件装夹到指定位置,对于质软材料如Ge,可以采用车床的直接真空吸附,选择合适的刀具并将元件微调到转盘中心,操作计算机控制机床进行加工。

单点金刚石车削主要用于加工中小尺寸,中等批量的红外晶体和金属材料的光学零件,其加工元件粗糙度好,加工过程相对简单,避免了掩模板的制作、对准和刻蚀环节带来的误差,因此精度较高,可在任意形状的基体上加工含有任意高次项分布的衍射结构。但该方法加工的材料有较大限制,只有晶体,金属和塑料等可以加工,另外由于其加工原理的限制,该方法只能加工圆对称的衍射结构。

### 1.5 准分子激光加工工艺

准分子激光<sup>[14-16]</sup>对无机材料,有机材料和聚合材料都有着很好的刻蚀和消融性能。由于准分子激光的波长位于紫外波段,波长较短,聚焦光斑直径达到微米量级,对于相同的光学系统,所能成像的最高分辨率远高于可见光束及红外光束。准分子激光加工的方式有激光投影光刻和激光直写光刻两种。

图4是准分子激光加工光路系统图。投影光刻系统一般包括准分子激光器、匀束系统、对准观察系统、掩模、光刻投影物镜、加工台等。首先准分子激光器发出的光束通过光束整形均匀器均匀地打在掩模板上,透过掩模的光照射到基片上对其进行刻蚀,通过控制刻蚀时间,便将掩模图案转移到基片表面及纵深方向,从而完成材料的深层加工。这种方法为并行加工方式,一次成形,加工的材料面宽,效率高且成本较低。激光直写光刻不同于激光投影光刻的差别在于激光直写不需要掩模板,直接将光束经过透镜形成尺寸极小的光斑聚焦在基片上,由计算机系统控制工作台在水平面内进行扫描运动,而在纵深方向控制进给及不同位置的激光通断状态来实现三维深深刻蚀,此方法由于不需要掩模,因而加工过程更加灵活。

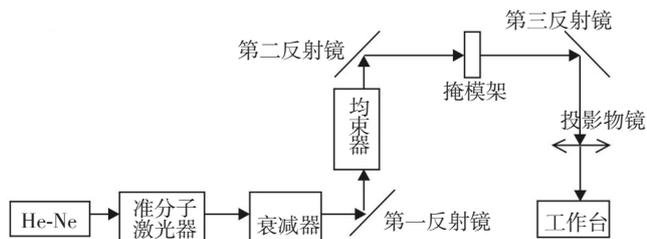


图4 准分子激光加工光路系统图

准分子激光加工质量好,精度高,加工形状可自由设定,加工的多台阶结构面平滑,不存在刻蚀中出现的侧向钻蚀问题,通过精确控制激光脉冲的数目,从而可以精确控制加工深度,误差非常小。在微细加工、脆性材料和高分子材料加工等方面具有激光热加工无法比拟的优越性,具有广阔的应用前景。

### 1.6 灰阶掩模工艺

灰阶掩模法<sup>[3,17-18]</sup>其实与前面所讲的几种方法是一致的。不同之处是通过制作一张带不同灰度等级的掩模板来代替原来透过率仅为0和1的二元掩模,通过改变掩模的透射率来调制入射光通过掩模

后的强度,灰阶掩模的制作是灰阶掩模法的关键。目前将三维面形编码得到二元掩模的方法主要有两种:脉冲宽度调制和脉冲频率调制。其中脉冲宽度调制是保持开孔单元间距不变,通过调整开孔单元的大小来控制掩模的透过率;而脉冲频率调制反之,即在保持开孔单元大小不变的条件下,通过调整开孔单元的间距控制掩模的透过率;还有一种方法是两者的结合。用上述方法实现灰阶效果以后,再进行曝光显影刻蚀,得到所需的三维浮雕结构。掩模灰度级数越多,曝光显影后形成的台阶就越多,越接近连续浮雕结构。图5给出了灰阶掩模法制作衍射光学元件的工艺流程。

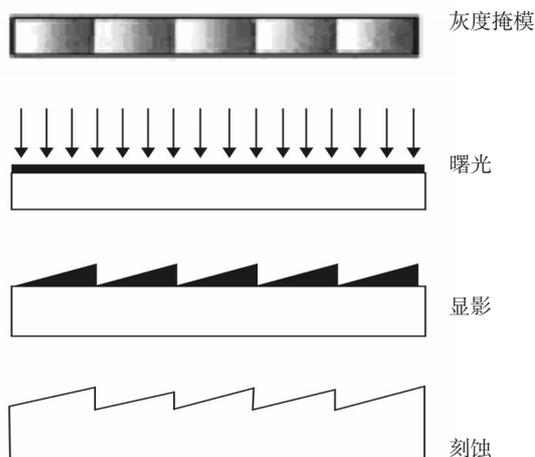


图5 衍射光学元件的灰阶掩模工艺流程

灰阶掩模法可以用来制作任意轮廓的光学元件,单个掩模包含一组二元掩模的全部信息,不但掩模制作简单,成本低,而且抗蚀剂处理与掩模制作无关。该方法经一次图形转印即在基片的抗蚀材料上形成多台阶或连续变化的浮雕轮廓,具有成本低、周期短、方法简便之优点,且无套刻对准误差问题,因此是一种很有前途的衍射光学元件制作方法。

### 1.7 复制工艺

衍射光学元件制造技术的发展也有很多集中在复制技术上<sup>[19-20]</sup>,通过选取一定材料,转移母版浮雕结构于光学基底表面,得到满足系统使用要求的元件。现有的复制技术有模压全息技术、平面热压技术、溶胶凝胶技术等。

模压法的基本过程是先在一个基片上制作一个微结构的负板,这个基片就作为复制的母板,母板的选择应保证复制后不变形,可多次复制。在母

板和光学平面之间放入待加工材料,复制材料要保证复制件的性能,还要保证脱模容易。用加压的方法将它们一起放入高温的真空炉中,调节好温度、压力等参数,一定时间后降温取出,将母板分离后就得到复制品,用这种方法制造的产品质量一致,是大批量制造衍射光学元件和集成光学系统的好方法。但是对于一些特别细小的结构不容易模压,另外模压材料如果是塑料等质软材料的话容易产生热变形。

溶胶凝胶复制技术是经过一系列特殊工序将微结构成形在二氧化硅基底材料中,具有透射光谱范围宽、抗辐射能力强、硬度强度高、化学稳定性好等优点。首先由母板制作复制模子,然后用溶胶凝胶技术将模子结构复制到二氧化硅材料中,其工艺过程包括:混合、浇铸、凝胶、老化、干燥和密化六道工序。将二氧化硅的母体与去离子水混合,发生水解和凝结反应,这种混合物就是“溶胶”,当溶胶完全均匀后,将其浇铸入模子中,继续进行水解和凝结反应,所产生的二氧化硅产物称为“凝胶”。随着凝结反应的深入,凝胶粘度逐渐增大变得坚硬,在模子内形成浮雕结构。在老化过程中,凝结反应继续生成网状结构的二氧化硅,凝胶逐渐具有一定的脱离模子和自由支撑强度且不易断裂。在干燥过程中将水解和凝结反应的其他产物除去,凝胶形成一块多孔的具有模子细节结构的实体。在密化过程中去掉凝胶中的多孔,这样便完成了复制过程。

## 2 各种光谱光学元件上衍射光学面的应用

### 2.1 衍射光学面在可见光光学元件中的应用

浙江大学设计并成功制作了衍射光学谐衍/折射混合光学系统<sup>[21-22]</sup>,替代了数值波面干涉仪中的标准球面镜组,工作中心波长为632.8 nm,处于可见光波段。衍射面以平凸透镜的平面为基底,透镜材料为ZF3光学玻璃,采用反应离子束刻蚀方法在其表面刻蚀多台阶微浮雕结构来逼近具有分段连续表面微浮雕结构的衍射透镜。

首先确定光学系统参数,而后进行掩模设计。应用CAD软件优化给出衍射面的相位函数,然后对函数位相压缩、量化分级,得到离散相位函数和掩模数据,对该数据进行重新分组,最终得到符合衍射要求的数据,谐衍射级数 $p=2$ ,用反应离子束对基片进行刻蚀,共套刻3次,台阶数为8。系统经数字波面干涉仪检测后, $P-V$ 值=0.020 6 wave,如图6所

示,满足瑞利判据,能够很好地适用于可见光波段。

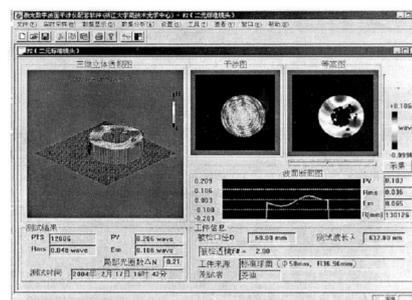


图6 系统的测试与分析结果

中科院西安光机所设计了用于可见光波段的3片式折/衍混合复消色差长焦物镜,如图7、图8所示,与全折射长焦物镜相比,简化了系统结构,校正了长焦物镜的像差,极大地降低了长焦系统的质量和复杂程度。图7为初始的全折射系统结构图,物镜由两个双胶合透镜、一个双分离透镜和一个负透镜组成,主要利用双胶合透镜和4种不同色散值的玻璃组合来实现复消色差。图8为折/衍混合可见光波段复消色差长焦物镜系统结构图,系统由两种材料组成,第一片为K9玻璃,第二片和第三片为TF3玻璃,其中第1面和第4面为高次非球面,第3面和第5面为衍射面,用来消色差、简化系统结构。



图7 全折射长焦物镜系统结构图



图8 折/衍混合可见光波段长焦物镜系统结构图

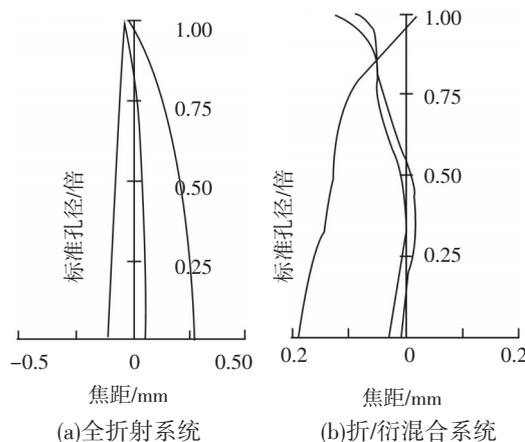


图9 长焦物镜系统位置色差曲线

图9为全折射和折/衍混合长焦物镜系统位置色差曲线,折/衍混合长焦物镜在轴上的点略过校正,在0.85倍孔径附近三种色光校正的差值都为0,实现了复消色差,全折射长焦物镜系统轴上的点位置色差大于0.25 mm,且系统的二级光谱没有得到很好校正。折/衍混合系统有效校正了长焦物镜的像差,使系统像差减小一个数量级,极大地降低了长焦系统的质量和复杂程度。

### 2.2 衍射光学面在红外光学元件中的应用

北京理工大学用金刚石车削的方法在锗材料上成功地加工了折/衍混合式红外光学系统<sup>[23-24]</sup>,是国内首个制作在曲面基底上的混合成像元件。该系统有效地减少了单片镜系统的色差,显著提高了系统的成像质量。

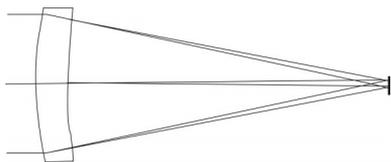
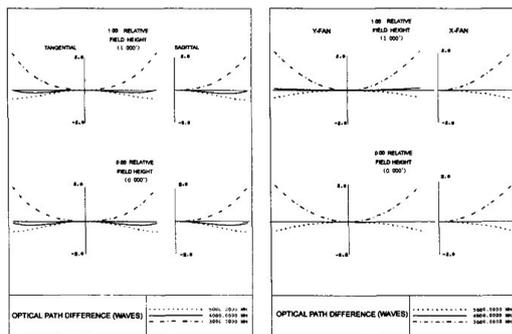
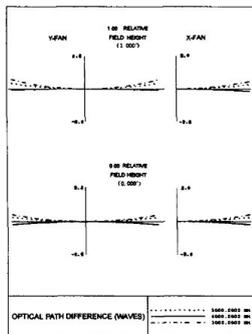


图10 混合式红外光学透镜光路图



(a)球面

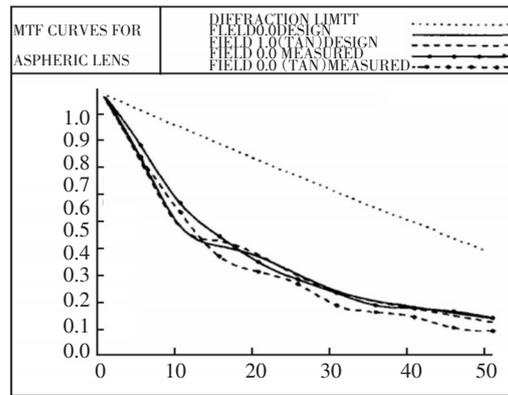
(b)非球面



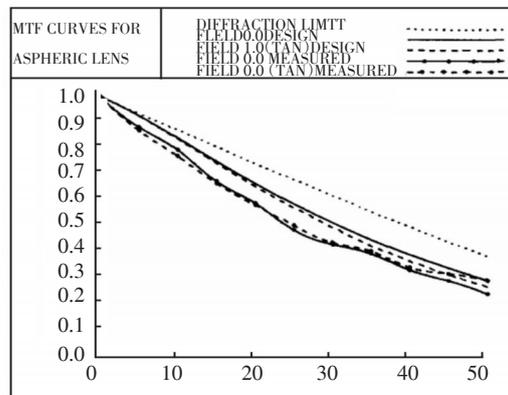
(c)非球面为基底的衍射面

图11 当第二光学面为球面、非球面、以非球面为基底的衍射面时,透镜的波像差曲线

图10为设计系统光路图,单透镜材料为锗,工作波段为3~5 μm,视场角为±1°。第一面为球面,第二面为以非球面为基底的衍射面。首先利用CODEV对浮雕衍射元件进行优化,得到衍射面型位相函数,将位相分布转化为曲面的矢高分布,最高用到8次非球面系数,将衍射面的面型方程输入金刚石车床的数控程序,用刀口半径为0.2 mm的刀具完成了衍射面的加工。从图11可以看出,当第二面是以非球面为基底的衍射面时,相对于前两种单纯采用球面和非球面的方案不仅消除了球差的影响,而且还有效地校正了系统色差。图12a所示的非球面对比透镜传递函数的设计值和实测值都不高,而混合透镜加入了衍射环带,有效地减小了工作波段上的色差,图12b中的传递函数曲线在各个空间频率上对比透镜都有很大的提高,利用衍射元件校正红外系统中的色差是一种切实可行的方案。



(a)折衍混合透镜



(b)传递函数设计值和实测值

图12 非球面透镜

苏州大学成功研制了中波红外大相对孔径非

制冷热像仪光学系统,在匹兹伐物镜的前组引入衍射元件,减少了一片大尺寸的折射透镜,减轻了系统质量,不仅在常温下成像质量良好,并可以在较宽温度范围内保持良好的成像质量。图 13 为系统光路图,工作波段为 3~5  $\mu\text{m}$ ,第一块和第三块透镜材料为硅,第二块透镜材料为锗,衍射面加工在第 4 面,共 10 个环带。

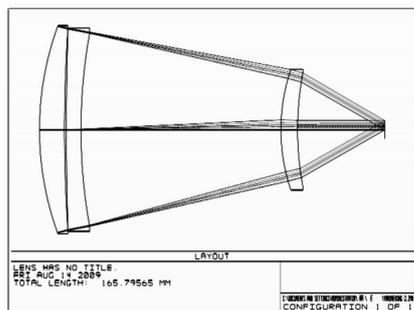


图 13 系统光路图

首先,结合实际需求确定了光学系统的具体参数,根据衍射元件的像差特性和各种材料的热色差特性选取 Ge 材料为基底加工衍射面,并完成了光焦度的分配,而后进行像差分析,求解出系统的初始结构,利用光学 ZEMAX 优化设计,得到系统结构参数和光路图。设计使系统满足要求后,再进行公差分析和计算,获得了易于加工实现的设计结果。将优化后的位相函数转化为车削加工的工艺参数,结合衍射面球面基底给出衍射面总的矢高表示,计算出通光口径内共有 12 个不完整环带,最小特称尺寸为 2 mm,该尺寸易于用单点金刚石车削加工技术

实现。加入衍射面后系统色差得到校正,轴向像差控制在焦深范围之内,能量集中度达到 90%,MTF 随温度变化的曲线在温度变化范围内波动较小,系统成像质量稳定。图 14 为实际加工成型的衍射面,与设计面型接近,加工误差较小,面型误差 P-V 值, RMS 值分别为 0.265  $\mu\text{m}$ , 0.025 2  $\mu\text{m}$ , 优于公差设计的要求。对物镜的透过率进行测试,多次测量的平均透过率为 84%,衍射面的最低衍射效率为 86.6%。使用 Optiko 公司生产的光学传递函数测试仪对此系统进行测试,测试结果如图 15 所示,在温度变化为 15°范围内,MTF 在特征频率处数值变化的最大值仅为 0.04,能够保持稳定良好的成像质量,实现了光学被动消热差。

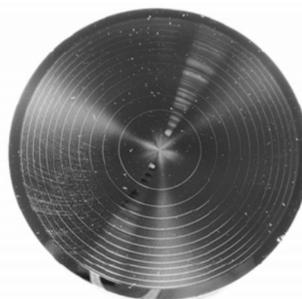


图 14 加工后的衍射面

### 2.3 衍射光学面在紫外光学元件中的应用

浙江大学在蓝宝石透镜中部引入衍射光学元件<sup>[25-26]</sup>,有效地校正了色差和球差,同时利用衍射设计,使可见/紫外双波段共用同一衍射光学元件,

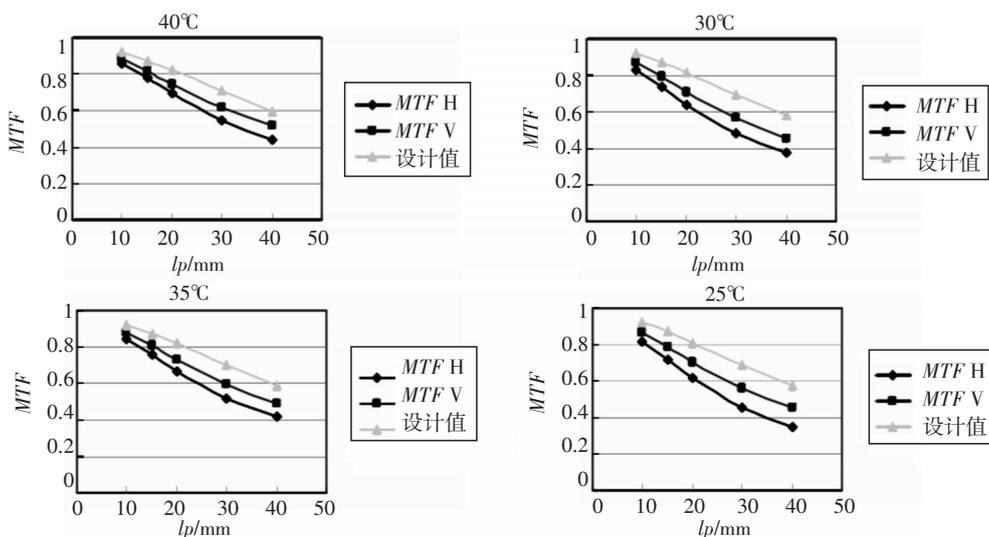


图 15 中心视场不同温度范围内的 MTF

并完成了在蓝宝石平面基底上八台阶衍射光学元件的制作,有效校正了色差及球差,提高了透镜的成像质量,使球透镜在大视场,大相对口径的光学系统中充分发挥其小型化的优势。

图16为可见/紫外双波段光学系统结构图。球透镜分为左半球、平片及右半球三部分,并将二元面加工在平片的前表面上,衍射元件通过掩模套刻反应离子束刻蚀方法完成,共套刻三次,最后利用紫外胶胶合形成二元球透镜,所形成的像面为球面,有效地校正了场曲,两波段的像面存在一定的焦移,用光纤面板来补偿。图17为紫外波段波长等于 $0.35\ \mu\text{m}$ 的中心能量分布图,80%能量光斑半径为 $28.5\ \mu\text{m}$ ,在整个紫外波段,光斑半径可控制在 $30\ \mu\text{m}$ 以内。经测试,球透镜在焦面上可分辨 $10\ \mu\text{m}$ 的线条宽度,已完全达到弥散斑小于 $60\ \mu\text{m}$ 的设计要求。

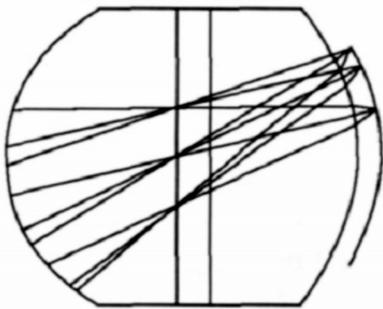


图16 双波段光学系统结构图

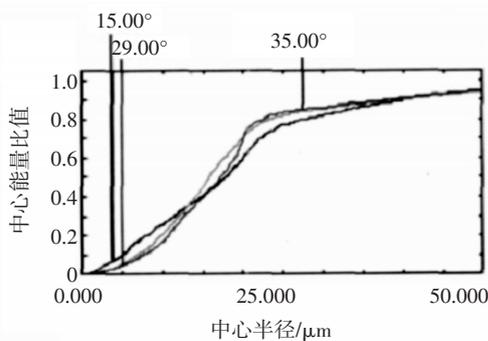


图17 波长 $0.35\ \mu\text{m}$ 中心能量分布图

上海理工大学采用标量衍射理论设计了一种用于 $128\times 1$ 日盲型紫外探测器的衍射微透镜阵列,并采用组合多层镀膜和剥离的工艺完成了元件的制备,实现了一定的衍射效率,整体性能满足了微透镜阵列与之外焦平面阵列的单片集成要求,提高了紫外焦平面的填充因子,通过微透镜的汇聚作

用,将光汇聚到探测器的光敏面上,增加了光能利用率。

此衍射元件的制备使用了薄膜沉积法,首先用光刻技术直写在背照式紫外焦平面芯片的光入射面制备光刻掩模图形;采用JC500-3/D型磁控溅射镀膜设备在衬底温度不超过 $80^\circ$ 的条件下在具有光刻掩模图形的表面沉积膜层,多层镀膜材料为GaIn,各层的厚度为235、118、59 nm;将具有膜层的芯片浸入去胶剂中,浸泡3~5 min;通过摇晃或超声振动将光刻胶上的膜层和光刻胶去除干净,即完成二台阶的表面浮雕结构;重复以上步骤可获得8台阶的表面浮雕结构;最终将具有衍射微透镜的紫外焦平面阵列芯片用去离子清洗1~2 min,再用高纯氮气吹干。

图18为实际加工出来的用于 $128\times 1$ 衍射微透镜阵列的显微照片,其中焦距为 $40\ \mu\text{m}$ ,中心距为 $80\ \mu\text{m}$ ,台阶数为8,中心波长为 $400\ \text{nm}$ ,虽然存在一定的线宽误差和对准误差,但经测试后,衍射效率达到87%,满足设计要求。

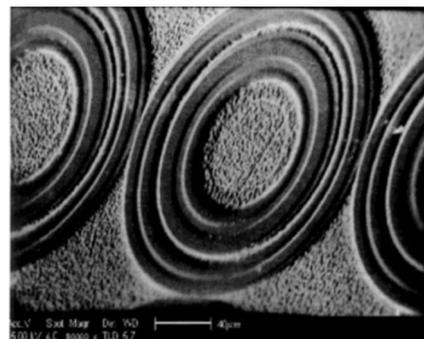


图18 衍射微透镜阵列显微照片

### 3 结论

详细论述了衍射光学元件的各种加工工艺,并分析了各种工艺的特点。由于衍射元件光热膨胀系数与材料折射率无关,仅依靠其表面微结构的变化产生光学效果,具有负热差和负色差特性,与传统光学元件结合可以很好地消色差和消热差,因此被广泛应用在混合系统中。文中列举了衍射元件在红外、紫外及可见光谱范围内的应用实例,给出了具体系统结构图与像质评价图,通过引入衍射面取得了良好的成像效果,说明衍射光学元件可以增加设计自由度,使系统趋于轻量化和小型化,改善像差,提高系统成像质量。(下转第65页)

系,使得产品的电源兼容性、安全性、电磁兼容性得到极大提高,具有广泛的应用价值。

### 参考文献

- [1] 童诗白,华成英.模拟电子技术基础[M].北京:高等教育出版社,2001:20-24.
- [2] 阎石.数字电子技术基础[M].北京:高等教育出版社,2001:62-67.
- [3] 张毅坤.单片微型计算机原理及应用[M].西安:西安电子科技大学出版社,1998.
- [4] 樊昌信.通信原理[M].北京:国防工业出版社,2001:34-42.
- [5] 谭浩强.C程序设计[M].北京:清华大学出版社,2003:12-34.
- [6] 周明德.微型计算机系统原理及应用[M].北京:清华大学出版社,2002:317-319.
- [7] 孙涵芳,徐爱卿.单片机原理及应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,2002:396-397.
- [8] 李培建.基于单片机的FSK信号发生器[J].光电技术应用,2011,26(5):65-66.
- [9] 张毅坤.单片微型计算机原理及应用[M].西安:西安电子科技大学出版社,1998.

(上接第38页)

### 参考文献

- [1] 孙艳军,陈宇,曹子维,等.二元光学器件光刻掩模的设计与制作[J].长春理工大学学报,2007,30(4).
- [2] 孔令彬,易建新,王典洪,等.光刻胶在衍射光学元件制作工艺中的行为研究[J].中国激光,2002,29:418-420.
- [3] 张羽.被动热补偿型折衍混合红外光学系统的研制[D].W武汉:华中科技大学,2005.
- [4] 李思涛,叶嘉雄,阮玉,等.衍射光学元件的制作及其误差分析[J].光电子技术与信息,2000,13(5):24-29.
- [5] 张羽,杨坤涛,杨长城.衍射光学元件的制作技术与进展[J].光学仪器,2005,27(2):80-85.
- [6] 李红军,卢振武,廖江红,等.薄膜沉积法制作菲涅耳透镜[J].微细加工技术,2000(4):40-44.
- [7] 王多书,罗崇泰,马勉军,等.激光直写制作衍射光学元件掩模研究[J].应用激光,2004,24(4):213-216.
- [8] 陈林森,邵洁,王雪辉,等.一种二元整形元件激光直写方法的实验研究[J].光子学报,2005,34(3):343-349.
- [9] 张景和,廖江红,刘伟,等.衍射光学元件激光直写设备的研制[J].仪器仪表学报,2001,22(2):154-157.
- [10] 王鹏.衍射光学元件设计及金刚石单点车削技术研究[D].长春:长春理工大学,2005.
- [11] 巩岩,赵磊.单点金刚石车床及其在光学工程领域的应用[J].中国光学,2011,4(6):537-545.
- [12] 梁旭,王军华,徐敏,等.折衍光学镜片的单点金刚石车削与检测[J].激光与光电子学进展,1993.
- [13] 康战,聂凤明,刘劲松,等.单点金刚石精密数控车削加工技术及发展前景分析[J].光学技术,2010,36(2):163-167.
- [14] 楼祺洪,章琳.准分子激光微细加工[J].杭州师范学院学报,2002,1(1).
- [15] 朱效立.准分子激光微细加工工艺和加工机理研究[D].北京:北京工业大学,2005.
- [16] 魏仁选,姜德生.准分子激光直写二维图形加工[J].应用激光,2003,23(3):144-146.
- [17] 肖啸.用灰阶编码掩模制作折/衍混合微光学元件[J].光学与光电技术,2005,3(2):48-50.
- [18] 粟敬钦,姚军,杜惊雷,等.灰阶编码掩模制作微光学元件[J].光学学报,2001,21(1):97-100.
- [19] 辛企明.衍射光学元件[J].光学技术,1993(4):38-42.
- [20] 金国藩,严瑛白,邬敏贤.二元光学[M].北京:北京国防工业出版社,1998.
- [21] 娄迪,白剑,侯西云,等.用于可见光波段的二元光学混合光学系统的设计与应用[J].光电子·激光,2006,17(1):45-49.
- [22] 闫佩佩,樊学武,邹刚毅,等.用于可见光波段的折衍混合复消色差长焦物镜设计[J].激光与光电子学进展,2010:09220121.
- [23] 刘莉萍,王涌天,李荣刚,等.制作在非球面基底上的红外衍射光学元件[J].红外与毫米波学报,2004,23(40):308-312.
- [24] 刘琳.中波红外大相对孔径非制冷热像仪光学系统的研究[D].苏州:苏州大学,2010.
- [25] 白剑,尉志军,牛爽,等.二元球透镜可见紫外双波段光学系统[J].红外与激光工程,2009,38(6):1068-1071.
- [26] 张伟,李毅,张虎,等.紫外衍射微透镜阵列的设计与制备[J].上海理工大学学报,2011,33(2).