

槽栅型微结构用于红外色差校正的仿真与实验

孙艳军¹, 王君¹, 纪雪松², 王丽¹, 王越¹, 李哲¹

¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

² 辽沈工业集团有限公司, 辽宁 沈阳 110045

摘要 针对传统光学元件在红外波段色差校正方面存在系统结构复杂、光能损失严重、质量大等问题,以红外波段 4.8 μm 和 10.6 μm 存在的色差为例,将槽栅型表面微结构用于红外波段的色差校正;根据广义斯涅尔定律及时域有限差分(FDTD)理论计算微结构表面的相位分布,采用 FDTD Solution 软件仿真双方柱槽栅型微结构;设计两个槽栅型微结构宽度 $L_1=400\text{ nm}$ 、 $L_2=950\text{ nm}$,槽栅高度 $K=500\text{ nm}$;采用离心式涂胶法、电子束光刻、离子刻蚀等一系列工艺技术,制备双方柱槽栅型微结构样品,分析胶膜厚度、曝光图像质量、刻蚀槽型的影响因素。结果表明:改变 L_1 和 L_2 的大小可实现在 4.8 μm 和 10.6 μm 这两种波长下分别达到 $0\sim 1.5\pi$ 和 $0\sim 2\pi$ 范围的相位调制; $L_1=408\text{ nm}$ 、 $L_2=944\text{ nm}$ 、 $K=495.32\text{ nm}$,表面粗糙度为 16.32 nm,相关参数在误差允许范围之内;4.8 μm 和 10.6 μm 这两个红外波段的峰值透过率分别为 71% 和 64%;利用平行光位置色差测试原理测得两个红外波位置色差减小到 30%,从而验证了槽栅型微结构器件对红外色差的校正作用。

关键词 表面光学; 色差校正; 槽栅型微结构; 红外波段

中图分类号 TN214

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0724002

Simulation and Experiment of Grooved Grating Microstructure for Infrared Chromatic Aberration Correction

Sun Yanjun¹, Wang Jun¹, Ji Xuesong², Wang Li¹, Wang Yue¹, Li Zhe¹

¹ School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

² Liaoshen Industrial Group Co., Ltd., Shenyang, Liaoning 110045, China

Abstract For traditional optical components, there are some issues in chromatic aberration correction of infrared bands, such as complexity of system structure, great loss of light energy, large mass and so on. Taking the chromatic aberration of 4.8 μm and 10.6 μm infrared wavebands as an example, we study the chromatic aberration correction in the infrared band with the grooved grating surface microstructure. According to the generalized Snell law and the theory of finite difference time domain (FDTD), the surface phase distributions of the microstructures are calculated. The double square cylinders grooved grating microstructure is simulated with FDTD Solution software. The widths of the grooved grating microstructure are designed to be $L_1=400\text{ nm}$ and $L_2=950\text{ nm}$, and the height of the grooved grating is $K=500\text{ nm}$. Double square cylinders grooved grating microstructure samples are prepared by a series of other process technologies of centrifugal coating method, electron beam lithography, and ion etching. The influencing factors of photoresist thickness, exposure image quality, and etching groove type are analyzed. The results show that the phase modulation for ranges of 0 to 1.5π and 0 to 2π can be achieved under the condition of two kinds of wavelengths of 4.8 μm and 10.6 μm by changing L_1 and L_2 . $L_1=408\text{ nm}$, $L_2=944\text{ nm}$, $K=495.32\text{ nm}$, and surface roughness is 16.32 nm, which are within the allowable range of error. The peak transmittances of two infrared bands of 4.8 μm and 10.6 μm are 71% and 64%, respectively. Using the principle of parallel light measuring longitudinal chromatic aberration, we test the longitudinal chromatic aberration of the two infrared waves reduce by 30%, which proves the effect of the grooved grating microstructure device on the chromatic aberration correction.

收稿日期: 2018-01-10; 收到修改稿日期: 2018-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(11474037, 11474041)

作者简介: 孙艳军(1978—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事先进光学系统设计与制造技术方面的研究。

E-mail: custsun@126.com

Key words optics at surfaces; chromatic aberration correction; grooved grating microstructure; infrared band
OCIS codes 240.3990; 050.1970; 230.4000

1 引言

依据广义斯涅尔定律,光学元器件对光的调制体现在角度和距离两方面。传统的光学设计严重依赖光学元器件的面型、厚度和材料,设计自由度小,系统体积大且质量大,不利于光学系统的微型化发展,尤其对于跨度略大的波段,折射率的差异会给光学系统带来较大色差。目前,红外波段色差的校正主要有两种方式,一种是采用多片不同折射率材料配合使用,如双胶合、三胶合透镜,这无疑增大了仪器的质量,且校正效果不佳^[1];另一种是依据衍射原理的金属介质膜光栅进行色差校正^[2],其凭借不同于常规光学元件的独特色散性能进行色差校正,可通过增加元件的台阶数来提升衍射效率,但由于结构中采用金属银等材料,因此对光能的损失较大,且在宽光谱或多波段光学系统中使用时色散较严重,衍射效率随着波长增加而急剧退化等使其应用范围受到限制。综上所述,使用胶合透镜组或衍射光学元件等虽能对色差起到一定的抑制作用,但对于中远红外波段,由于其波长跨度很大,因此色差校正极其困难。鉴于此,本文根据一些特殊二维表面微结构具备的光学传输特性^[3-4],探索其中远红外双波段色差校正方面的应用,这类器件不仅对入射红外波段的相位调控性能优异,还具有小型化和轻量化的潜力。

2 设计理论

对于一些复杂的散射结构,借助时域有限差分(FDTD)算法计算电磁波与散射结构的相互作用更准确。从本质上看,非规则结构散射特性求解是对麦克斯韦方程组进行求解^[5]:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}, \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \mathbf{J}_m, \quad (2)$$

式中: \mathbf{H} 为磁场强度; \mathbf{D} 为电通量密度; t 为时间; \mathbf{J} 为电流密度; \mathbf{E} 为电场强度; \mathbf{B} 为磁通量密度; \mathbf{J}_m 为磁流密度。

首先对计算空间进行离散化。离散网格中最常用的是Yee提出的Yee's网格,也称为Yee元胞。FDTD算法在离散的时间内取样,为了使计算结果更准确,Yee网格边长远小于入射波长,而且空间离

散间隔 Δx 、 Δy 、 Δz 和时间离散间隔 Δt 须满足数值稳定条件,即

$$c \Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}}, \quad (3)$$

式中: c 为光速。

离散化后,在每个网格节点上给出合适的电磁参数,包括介电常数 ϵ 、磁导率 μ 、电导率 σ 等。在FDTD算法中,需要将微分方程转化为差分形式。差分的表达式通过Taylor级数展开得到,包括前向差分、后向差分、中心差分等形式。这里使用二阶中心差分近似方法来替代微商建立差分方程,二阶中心差分的表达式为

$$\left. \frac{df(x)}{dx} \right|_{x=x_0} \approx \frac{f\left(x + \frac{\delta}{2}\right) - f\left(x - \frac{\delta}{2}\right)}{\delta}, \quad (4)$$

式中: $f(x)$ 为波函数; x 为 x 轴的位置; x_0 为 x 轴的初始位置; δ 为空间单元量。

选择合适的网格点,用二阶中心差分形式代替微商就能够得到直角坐标下的三维FDTD迭代方程。为了方便表达,将其记为

$$f_i(x, y, z, t) = f_i(m \Delta x, n \Delta y, p \Delta z, q \Delta t) = f_i^q[m, n, p], \quad (5)$$

式中: y 为 y 轴的位置; z 为 z 轴的位置; $m=1, 2, \dots$; $n=1, 2, \dots$; $p=1, 2, \dots$; $q=1, 2, \dots$ 。

为了计算结构对光的散射作用,计算中必须以合适的方式加入入射光,需要在一次仿真中得到宽波段响应,因此可以根据需要进行选择。可以采用一个不包含直流分量的脉冲源,即Ricker小波,它是高斯脉冲的二阶导数,不包含直流分量,并且可以根据需要选择能量最大的频率,其时域表达式为

$$f_r(t) = \{1 - 2[\pi f_p(t - d_r)]^2\} \times \exp\{-[\pi f_p(t - d_r)]^2\}, \quad (6)$$

式中: f_p 为尖峰频率; d_r 为单位延迟。这样,根据FDTD进行二维微结构设计的过程可归纳为5个步骤:1)问题的提出;2)计算目标波面;3)根据广义斯涅尔定律计算微结构表面的相位分布;4)根据FDTD求解结构单元对入射光的调制作用;5)筛选结构单元,组合形成二表面微结构。

根据以上分析,针对口径为20 mm、焦距为50 mm的硒化锌柱透镜在4.8 μm 和10.6 μm 这两个红外波段间存在的色差^[6-7],采用FDTD算法仿

真槽栅型微结构的光相位调制特性,设计红外波段色差校正的槽栅型表面微结构。

3 槽栅型微结构仿真

根据广义斯涅尔定律,增加单元内槽栅的数量

会增大散射,提高衍射效率^[8]。因此,尝试在一个单元周期内设计两种不同宽度的槽栅型微结构,单元结构如图1所示。相对于一种槽型结构,设计的槽栅型微结构增大了设计的自由度,容易实现全相位调制。

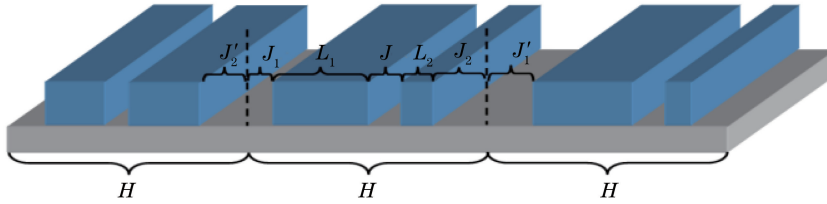


图1 槽栅型微结构

Fig. 1 Grooved grating microstructure

将每个结构单元的宽度设为一个固定值 $H = 2.5 \mu\text{m}$,每个单元中两个槽型的宽度分别设为 L_1 和 L_2 ,槽型的高度设为 K ,每个单元内两个槽型之间距离和其两侧留白的宽度分别为 J, J_1, J_2 ,这些变量满足:

$$L_1 + L_2 + J + J_1 + J_2 = H. \quad (7)$$

相邻两个单元之间的距离为

$$\begin{cases} M = J'_2 + J_1 \\ M' = J_2 + J'_1 \end{cases}, \quad (8)$$

式中: M 为第一组槽栅间距; M' 为第二组槽栅间距; J'_2 为槽栅外空白区。 J_1, J_2 的大小由 L_1, L_2 和 J 决定,设计的变量仅有4个,即 L_1, L_2, J 和 K 。

将槽栅型微结构单元输入到 FDTD Solution

软件中进行仿真计算,波长分别为 $4.8 \mu\text{m}$ 和 $10.6 \mu\text{m}$ TM 模式的总场散射场(TFSF)光源从结构一侧入射方柱结构,对出射场进行观测。优化选取槽型宽度 L_1 和 L_2, L_1 和 L_2 的变化范围分别为 $200 \sim 700 \text{ nm}$ 和 $600 \sim 1100 \text{ nm}$,步长为 20 nm 。图2所示为经过计算得到的相位调制,其中 z 轴表示对应参数结构对入射光的相位延迟, x 轴和 y 轴分别表示 L_1 和 L_2 的大小,曲面以颜色的深浅反映相位延迟随参数的变化,标尺的刻度单位为 π ,并且在 xy 平面加入了曲面的投影。由图2可知,改变 L_1 和 L_2 的大小可以实现在 $4.8 \mu\text{m}$ 和 $10.6 \mu\text{m}$ 这2种波长条件下分别达到 $0 \sim 1.5\pi$ 和 $0 \sim 2\pi$ 范围的相位调制。

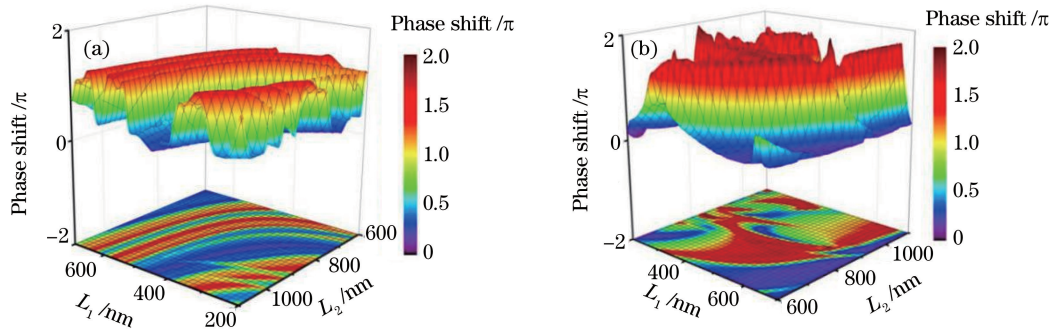


图2 波长为(a) $4.8 \mu\text{m}$ 和(b) $10.6 \mu\text{m}$ 时槽栅型微结构的相位调制图谱

Fig. 2 Phase modulation spectra of grooved grating microstructure with wavelengths of (a) $4.8 \mu\text{m}$ and (b) $10.6 \mu\text{m}$

波长为 $4.8 \mu\text{m}$ 和 $10.6 \mu\text{m}$ 时各结构参数条件下的透过率如图3所示。由图3可知, xy 平面中红色部分散射效率较高的区域很大,波长为 $4.8 \mu\text{m}$ 时散射效率峰值达到 0.9 ,波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 时透过率峰值达到 0.94 。

仿真结果说明了槽栅型微结构用于色差校正的可行性。单个单元的仿真结果还存在片面性,还须

验证由单元构成的表面周期阵列的效果。原则上,在单一波长的情况下,一组栅型结构数据对应一个相位延迟量,可从图1所示的槽栅型微结构排布中选取10组数据,每组数据在波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 处的相位延迟值为 $\pi/5$,将10组槽栅结构横向排列成梯度,使出射光形成一个柱面波^[9]。相位延迟分布如图4所示,出射场能量分布如图5所示,其中 h 为 z

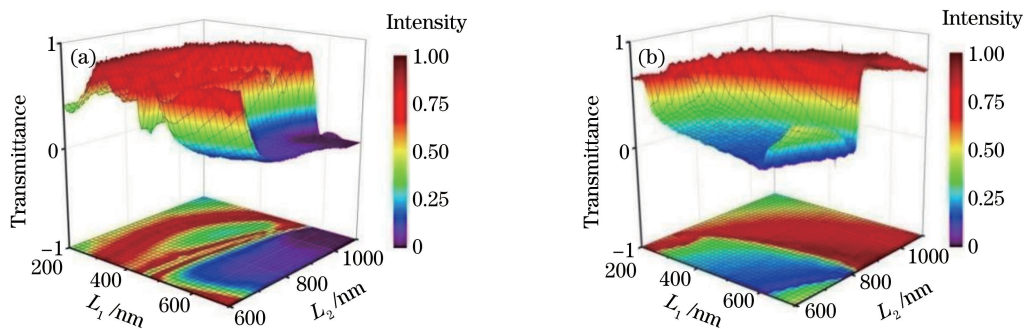


图 3 波长为(a) 4.8 μm 和(b) 10.6 μm 时槽栅型微结构的透过图谱

Fig. 3 Transmittance spectra of grooved grating microstructure with wavelengths of (a) 4.8 μm and (b) 10.6 μm

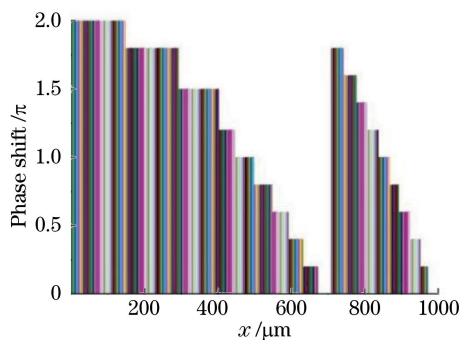


图 4 相位延迟分布

Fig. 4 Distribution of phase retardation

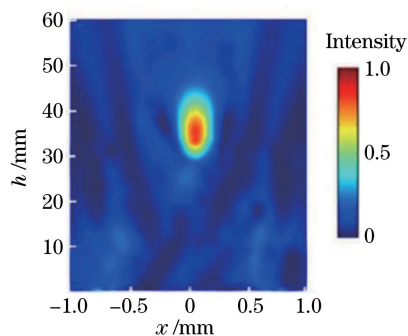


图 5 出射光场分布

Fig. 5 Distribution of output light field

轴的位置。由图 4 和图 5 可知,由微结构单元组成的周期阵列可以对出射波面进行调制。

4 槽栅型微结构参数设计

针对硒化锌基片材料的特点,设计符合其特性的色差补偿微结构。设计中需要按照相位延迟值和透过率的结果进行筛选,依据如下:1)排除 4.8 μm 处透过率小于 50%和相位延迟大于 π/4 的微结构;2)排除 10.6 μm 处透过率小于 50%的微结构。按照以上依据获得满足要求的槽栅型微结构单元的参数如表 1 所示。

表 1 槽栅型微结构单元的参数

Table 1 Parameters of grooved grating microstructure unit

Number	L_1/nm	L_2/nm	Height of square cylinder K/nm	Phase mutation value at 10.6 μm / π	Phase mutation value at 4.8 μm / π
1	400	875	500	0.25	0.22
2	400	1050	500	0.50	0.17
3	400	950	500	0.75	0.05
4	450	1050	500	1.00	0.12
5	400	775	500	1.25	0.07
6	700	900	500	1.50	0.23
7	400	950	500	1.75	0.16
8	350	825	500	2.00	0.08

为了对设计进行验证,利用 ZEMAX 软件,保持 4.8 μm 光波相位不变,10.6 μm 光波相位变化达到与设计槽栅型微结构色差校正效果相同时,计算透镜的色差。

图 6 所示为无槽栅型微结构和加入槽栅型微结构时硒化锌透镜的色差曲线。纵坐标表示孔径,一条曲线对应一个波长,两条曲线的横向差值即为对应孔径的轴向色差。

由图 6(a)可知,硒化锌透镜的色散较强,轴向色差最大值达到 1 mm 左右。由图 6(b)可知,轴向色差在理论上可校正为 0。

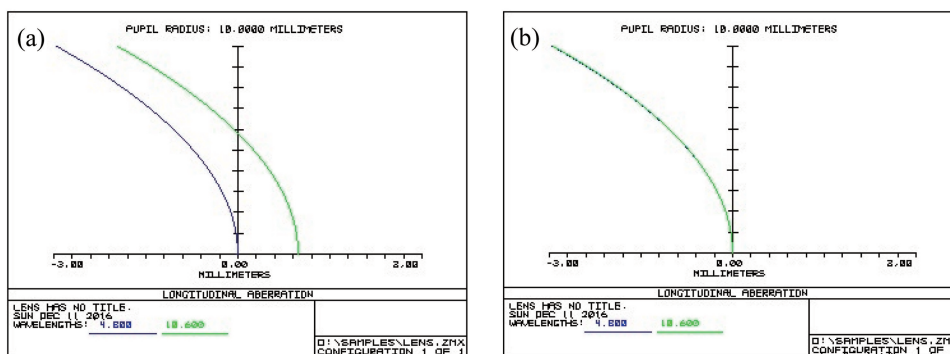


图 6 (a)无槽栅型微结构和(b)加入槽栅型微结构时硒化锌透镜的色差曲线

Fig. 6 Chromatic aberration curves of ZnSe lens (a) without and (b) with grooved grating microstructure

5 实验与测试

5.1 制作实验及关键工艺

双方柱槽栅型微结构的制备工艺流程可分为 6 个步骤,即基片预处理、感光胶涂布、电子束曝光、显影与坚膜、离子刻蚀、去除胶膜及测试。感光胶的厚度和均匀性与后续曝光、刻蚀关系密切。实验获得的 ZEP520 感光胶的涂布特性曲线如图 7 所示。由图 7 可知,在温度恒定的情况下,厚度随着感光胶黏度的增大而增大,随着旋转速度的增大而减小。

采用 Raith 公司的 Elphy plus 型图形发生器,结合 HVP8000 型电子束束闸开关,在 Zeiss 扫描电子显微镜(SEM)上完成感光胶曝光。电子束曝光系统的效率较低,原因是为了保证曝光的精度,单次

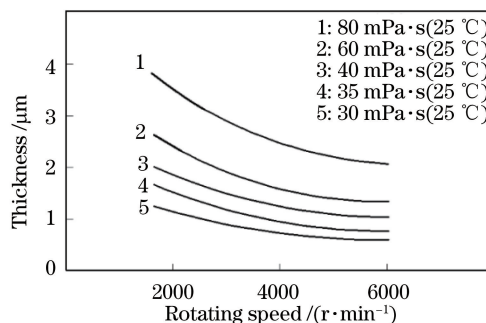


图 7 ZEP520 感光胶的涂布特性

曝光区域都很小。为了保证微结构的质量,实验中将曝光主场分割为若干小的主场,即子场。子场的测试与拼接如图 8 所示。由图 8 可知,较小的主场可以获得更高精度的曝光图形。

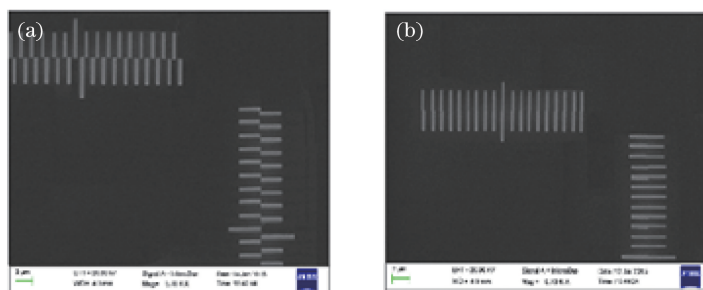


图 8 子场的测试与拼接。(a) 1 mm×1 mm 的主场错位;(b) 200 μm×200 μm 的主场错位

Fig. 8 Testing and stitching of sub-field. (a) Home field offset of 1 mm×1 mm; (b) home field offset of 200 μm×200 μm

感光胶的感光深度与电子束能量、电子加速电压有直接的关系,如图 9(a)所示。加速电压为 5, 10, 15, 20 kV 时都可以实现 200 nm 抗蚀剂层的完全曝光;随着加速电压增大,所需曝光剂量增加,原因是高压电子束的穿透能力强,前向散射相应减小。结合实验条件可知,采用 20 kV 的加速电压和 40 μC/cm² 的曝光剂量可以实现高质量图形,如图 9

(b)所示。

为了将得到的感光胶结构转移到基片上,实验中采用 ICP801B 型等离子刻蚀机结合侧壁沉积钝化层工艺获得垂直的边壁。刻蚀气体采用 SF₆, 钝化气体采用 C₄F₈。刻蚀工艺参数如下:刻蚀气体体积流量为 20 cm³/min,刻蚀周期为 2 s;钝化气体体积流量为 40 cm³/min,刻蚀周期为 5 s。

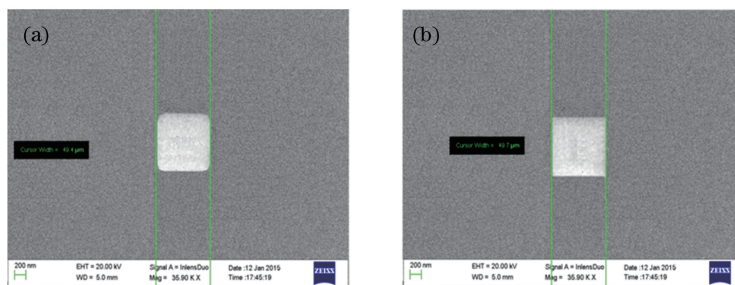


图 9 不同曝光参数下图形质量的对比。(a)曝光不足;(b)曝光完全

Fig. 9 Comparison for graphic quality at different exposure parameters. (a) Insufficient exposure; (b) sufficient exposure

5.2 结构及光学性能测试

5.2.1 槽栅型微结构测试

采用德国 Zeiss 公司的 Merlin Compact 型扫描电镜(SEM)观察槽型微结构的二维形貌,结果如图 10 所示。采用 Dektak XT 型台阶仪测量台阶高度,结果如图 11 所示。样品的表面粗糙度为 16.32 nm, $L_1 = 408$ nm, $L_2 = 944$ nm, 槽栅高度 $K = 495.32$ nm, 误差很小,在允许的范围內。

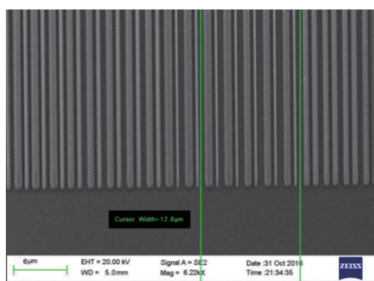


图 10 SEM 下样品的表面形貌

Fig. 10 Surface morphology of sample from SEM

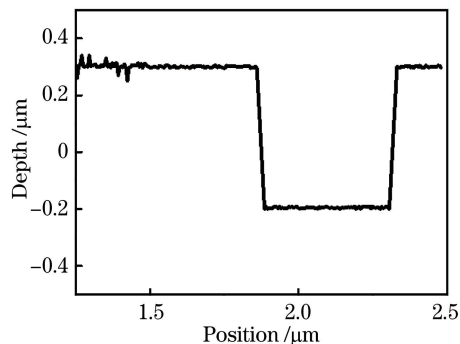


图 11 槽栅型微结构高度的测试结果

Fig. 11 Measured height of grooved grating microstructure

5.2.2 红外透过率测试

采用 TJ270-30A 型分光光度计测试槽栅型微结构的红外透过性能,结果如图 12 所示。由图 12 可知,器件的红外透过性能较高,原因是加工误差小。波长为 $4.8 \mu\text{m}$ 的峰值透过率达到 71%, 波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 的峰值透过率也达到了 64%。

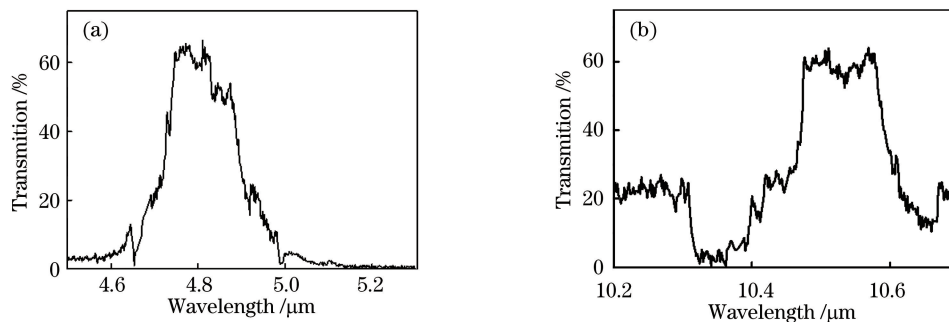


图 12 波长为(a) $4.8 \mu\text{m}$ 和(b) $10.6 \mu\text{m}$ 的红外光谱性能

Fig. 12 Infrared spectroscopy performance with wavelengths of (a) $4.8 \mu\text{m}$ and (b) $10.6 \mu\text{m}$

5.2.3 色差校正测试

为了验证槽栅型微结构器件的色差校正作用,利用平行光色差测试原理进行测试,测试数据如表 2 所示。由表 2 可知,槽栅型微结构能够实现对位置色差的校正,加入槽栅型微结构样件后,色差减小

到 30%。

在实际应用中,色差校正可根据波面形状进行设计,因此样品除了能够对位置色差产生抑制作用外,理论上对小视场倍率色差也可以起到作用,这将在后续工作中展开相关研究。

表 2 位置色差测量数据

Table 2 Test data of longitudinal chromatic aberration

Item	Convergent position at wavelength of 4.8 μm /mm	Convergent position at wavelength of 10.6 μm /mm	Longitudinal chromatic aberration /mm
No sample	0	1.13	1.13
Adding sample	0.24	0.58	0.34

6 结 论

根据广义斯涅尔定律理论仿真并设计了槽栅型表面微结构。采用 FDTD Solution 软件对槽栅型表面微结构进行仿真,仿真结果表明,调整槽栅型微结构的栅距和宽度可实现 4.8 μm 和 10.6 μm 波长 $0\sim 1.5\pi$ 和 $0\sim 2\pi$ 范围的相位调制,同时可以实现两个波段的较高透过率。采用电子束光刻和离子刻蚀完成槽栅型微结构制备实验,获得了离心式涂胶中 ZEP520 感光胶膜厚度与其黏度、转速的关系,同时获得了感光胶曝光深度与加速电压、曝光剂量的关系,验证了侧壁沉积钝化层工艺中钝化气体 C_4F_8 对提高刻蚀各向异性的作用,为槽栅型微结构制作提供了一定的技术积累。测试数据显示,槽栅型微结构能够实现对位置色差的校正,加入槽栅型微结构样件后色差减小到 30%,与传统消色差方法相比提高了 2%~5%,但对系统整体结构及质量的影响很小。虽然与理论值 0 尚有一定差距,但随着微纳结构的进一步设计与优化,以及微纳结构加工精度的提高,校正效果会进一步改善。随着制作技术的成熟,该方法将具有广阔的应用前景。根据计算与仿真结果可知,该槽栅型微结构并非最佳消色差微结构,采用二维多台阶微结构可使消色差效果更佳,但本研究的目的主要是验证该方法的效果及可行性,从实验难度的角度考虑,选择了一维槽栅结构。该方法可为红外波段色差校正提供一个新的参考方向。

参 考 文 献

- [1] Li C, Guo B H, Sun Z. Optical system design of multispectral achromatic imaging flow cytometer[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0922002.
李灿, 郭帮辉, 孙竹. 多光谱消色差成像流式细胞仪的光学系统设计[J]. 光学学报, 2016, 36(9):

0922002.

- [2] Li N, Kong W J, Ji S Y, *et al.* Broadband achromatic phase retarder based on subwavelength metal dielectric gratings [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0205001.
李娜, 孔伟金, 季淑英. 基于亚波长金属介质膜光栅的宽光谱消色差相位延迟器[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0205001.
- [3] Yu N, Genevet P, Kats M A, *et al.* Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. Science, 2011, 334(6054): 333-337.
- [4] Cheng J R, Mosallaei H. Truly achromatic optical metasurfaces: a filter circuit theory-based design[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2015, 32(10): 2115-2121.
- [5] Holloway C L, Kuester E F, Gordon J A, *et al.* An overview of the theory and applications of metasurfaces: the two-dimensional equivalents of metamaterials [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2012, 54(2): 10-35.
- [6] Monticone F, Estakhri N M, Alù A. Full control of nanoscale optical transmission with a composite metascreen[J]. Physical Review Letters, 2013, 110(20): 203903.
- [7] Yu N F, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces[J]. Nature Materials, 2014, 13(2): 139-150.
- [8] Sun Y J, Liu S R, Wang Z N, *et al.* Study of cylindrical optical micro-structure technology used in infrared laser protection [J]. Proceedings of the SPIE, 2016, 10154: 101540E.
- [9] Zhu P, Xie X L, Zhu J Q. Influence of chromatic aberration from spatial filters for 5 PW ultra-short pulses on temporal contrast[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(9): 0914005.
朱坪, 谢兴龙, 朱健强. 5 PW 超短脉冲空间滤波器色差对时间信噪比的影响[J]. 光学学报, 2017, 37(9): 0914005.