

# 正入射宽光谱宽入射角高效率偏振无关多层倾斜光栅

鲁云开<sup>1,2</sup>, 余俊杰<sup>1\*</sup>, 尹正坤<sup>1,2</sup>, 周常河<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

**摘要** 基于严格耦合波分析方法和模拟退火优化算法,设计了一种在正入射条件下具有宽入射波长和角度范围的偏振无关高效率多层倾斜光栅。为了提高衍射效率和带宽范围,提出了一种折射率渐变的四层三明治光栅结构。基于这种结构,设计了一种可见光波长范围内偏振无关异常反射光栅器件。数值结果表明,正入射下,该光栅具有130 nm(550~680 nm)的波长带宽,在此范围内-1级衍射效率均高于93%,同时偏振相关损耗均小于0.2 dB。此外,这种光栅结构还具有47°(-2°~45°)的入射角度带宽,以及较大的制造容差范围。因此,本文提出的这种多层斜光栅在虚拟现实和增强现实显示系统、基于超表面的器件,特别是可见光波段的超透镜等方面具有潜在的应用价值。

**关键词** 光栅; 倾斜光栅; 异常反射; 偏振无关; 正入射; 宽带

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1405001

## Polarization-Independent Multilayer Slanted Grating with High Efficiency and Broad Spectral and Angular Bandwidths Under Normal Incidence

Lu Yunkai<sup>1,2</sup>, Yu Junjie<sup>1\*</sup>, Yin Zhengkun<sup>1,2</sup>, Zhou Changhe<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Information Optics and Optoelectronics Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** An anomalously reflective polarization-independent high-efficiency multilayer slanted grating with broad spectral and angular bandwidths under normal incidence was designed by rigorous coupled wave analysis and using a simulated annealing algorithm. To enhance the efficiency and broaden the bandwidth, a four-layer sandwiched structure with a gradually changing refractive index was proposed. Based on the proposed structure, we designed a polarization-independent anomalously reflective grating structure in the visible band. It exhibits a spectral bandwidth of 130 nm (550–680 nm) with -1st efficiencies higher than 93% and polarization-dependent loss less than 0.2 dB. Moreover, simulation results suggest that the grating structure features an angular bandwidth of 47° (-2°–45°) and large range of fabrication tolerances. Therefore, the proposed multilayer slanted grating will attract great interest for its potential applications in virtual/augmented reality displays and metasurface-based devices, especially for metalenses in the visible range.

**Key words** grating; slanted gratings; anomalous reflection; polarization independence; normal incidence; broad bandwidth

**OCIS codes** 050.1950; 050.6624; 230.1950

## 1 引言

正如美国光学学会前主席、麻省理工学院 Harrison 教授指出<sup>[1]</sup>,“没有任何单个器件像衍射

光栅一样,能够对近代物理学的进步带来极大的促进作用”。衍射光栅是诸多光学器件与光学系统的基础和核心,如各种类型的光谱仪<sup>[2-3]</sup>、计量光栅尺<sup>[4-6]</sup>、大型超强超短激光中的脉冲压缩光栅<sup>[7-9]</sup>、光

收稿日期: 2020-03-04; 修回日期: 2020-04-07; 录用日期: 2020-04-13

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFF0216402)、中科院前沿科学重点研究计划项目(QYZDJ-SSW-JSC014)、上海市科委项目(17ZR1448100,19DZ2291102,19JC1415400)

\* E-mail: junjiey@siom.ac.cn; \*\* E-mail: chazhou@mail.shenc.ac.cn

谱合束激光武器<sup>[10-11]</sup>、波分复用光通信系统<sup>[12-13]</sup>等。除了上述经典应用之外,近年来衍射光栅在各种集成光子与平面光学器件中也变得越来越重要,例如基于异常折/反射的超表面元件<sup>[14-16]</sup>、用于虚拟现实和增强现实的近眼显示系统<sup>[17-18]</sup>,以及用于垂直腔面发射激光器(VCSEL)的反射镜<sup>[19]</sup>。对于这些新应用来说,除了经典的高效率、宽光谱范围等性能需求外,宽入射角度带宽以及偏振无关等性能也越来越得到人们的重视。在这种背景下,人们设计了各种新型的光栅元件。Hu等<sup>[20]</sup>提出一种金属反射层加介质光栅层的结构,该结构在横向电场(TE)和横向磁场(TM)偏振下,在740~860 nm的入射波长范围内,-1级反射效率达90%以上。Wang等<sup>[21]</sup>在Hu的基础上使用双层矩形光栅,在1376~1675 nm的波长范围内或33.05°~51.21°的入射角带宽内,-1级反射效率达到90%以上。Li等<sup>[22]</sup>采用多层介质膜加光栅层的结构,在1000~1085 nm范围内-1级反射效率高于94%。Ito等<sup>[23]</sup>利用双脊单层矩形光栅,在Littrow角入射的情况下-1级反射效率达到近100%。Bi等<sup>[24]</sup>介绍了一种基于单层倾斜光栅的反射光栅,在170 nm波长范围内在TE偏振下-1级反射效率超过98%,在没有金属层以及多层介质膜的情况下,同时实现了高反射效率和超宽光谱带宽。然而,以上报道的各种光栅都是在斜入射条件(如Littrow角)下设计的一级高反射效率,不能满足正入射时的应用需求。近年来,随着超表面技术的发展,异常折射/反射尤其是实现正入射下的大角度、高效率异常折射/反射在设计新型超表面器件方面表现出潜在的应用价值<sup>[25]</sup>,而这种从超表面技术发展出来的超颖光栅(Metagrating)往往基于高对比度材料,其绝对效率往往低于90%<sup>[26-27]</sup>。因此,研究正入射下一级高效率、同时拥有宽光谱和宽入射角度带宽的偏振无关光栅仍然是一个挑战。

本文提出并设计了一种正入射条件下-1级高效率、同时拥有宽光谱和宽入射角度带宽偏振无关的异常反射倾斜光栅。该光栅结构采用折射率渐变的四层三明治结构<sup>[24,28]</sup>,既继承了单层倾斜光栅的各向异性的特性(异常反射),同时又增大了入射波长和角度的带宽范围。基于严格耦合波分析方法(RCWA)<sup>[29]</sup>和模拟退火算法<sup>[30-31]</sup>,采用多目标优化的方法设计了一种正入射条件下高效率、兼容宽光谱和入射角度带宽的四层偏振无关异常反射斜光栅。结果表明,在正入射条件下,这种偏振无关的光

栅结构在入射波长带宽为130 nm(550~680 nm)范围内,-1级反射效率 $\eta_{-1}$ 均高于93%,偏振相关损耗(PDL, $L_{PD}$ )均小于0.2 dB。同时入射角度带宽达到47°(-2°~45°)。此外,还对此光栅结构允许的制造容差范围进行了讨论。

## 2 多层倾斜光栅优化模型

图1为本文设计的四层偏振无关倾斜光栅的几何结构示意图。如图1所示,波长为 $\lambda$ 的非偏振平面波从熔融石英基底(折射率为 $n_2$ )垂直入射到光栅层上,入射角沿顺时针方向偏转定义为正,反方向则定义为负。光栅层由四层夹心的倾斜结构组成:第一层是折射率为 $n_{r1}$ 的 $Al_2O_3$ 层,厚度为 $h_1$ ;第二层是折射率为 $n_{r2}$ 的 $TiO_2$ 层,厚度为 $h_2$ ;第三层是折射率为 $n_{r3}$ 的Si层,厚度为 $h_3$ ;第四层是折射率为 $n_{r1}$ 的 $Al_2O_3$ 层,厚度为 $h_4$ 。其余参数如下:光栅倾角为 $\gamma$ ;占空比为 $f=b/d$ ,其中 $b$ 为脊宽, $d$ 为光栅周期。整个光栅结构是处于空气(折射率为 $n_1$ )中。

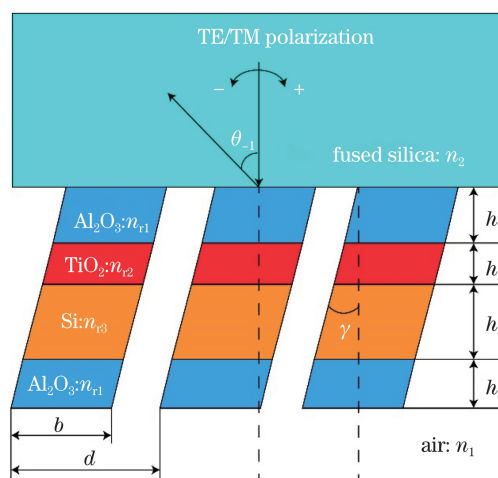


图1 四层倾斜光栅的结构示意图

Fig. 1 Schematic of a four-layer slanted grating

本文采用的计算程序(RCWAo)是基于RCWA基本理论编写的。为了验证自编程序的正确性和精度,首先利用这个程序验证Campbell等<sup>[32]</sup>已发表的工作。验证工作是基于单层倾斜光栅进行计算的,结构参数如下:入射波长 $\lambda=1$ ,入射角度 $\theta=30^\circ$ ,光栅周期 $d=1$ ,光栅槽深 $h=0.2$ ,光栅占空比 $f=0.5$ ,光栅倾角 $\gamma=10^\circ$ ,入射区域折射率 $n_1=1$ ,出射区域折射率 $n_2=1.45$ ;case A中, $n_r=1.5$ , $n_g=1$ ;case B中 $n_r=5$ , $n_g=1$ ;case C中 $n_r=0.22+i6.71$ , $n_g=1$ 。计算结果见表1,由表1可见计算结果都相互吻合。

表 1 基于本文 RCWAo 和 Campbell 文献中程序计算的衍射效率的结果对比

Table 1 Comparison of efficiencies calculated by Campbell's procedure and RCWAo procedure in this article

Case	Parameter	Diffraction order	TE polarization		TM polarization	
			Campbell	RCWAo	Campbell	RCWAo
A	Reflection	-1	0.0179	0.0179	0.0231	0.0231
		0	0.0137	0.0137	0.0011	0.0011
	Transmission	-1	0.0398	0.0399	0.0227	0.0227
		0	0.9286	0.9286	0.9531	0.9531
B	Reflection	-1	0.4179	0.4178	0.275	0.2749
		0	0.0562	0.0562	0.237	0.2356
	Transmission	-1	0.0229	0.0231	0.097	0.0957
		0	0.5030	0.5029	0.391	0.3938
C	Reflection	-1	0.2359	0.2358	0.2247	0.2224
		0	0.4267	0.4268	0.307	0.3092
	Transmission	-1	0.1646	0.1645	0.2075	0.2072
		0	0.1557	0.1557	0.241	0.2401

对于如图 1 所示的结构,为了达到正入射下高效率 and 宽带宽的目的,采用严格耦合波分析方法结合模拟退火算法进行优化和设计。由于本研究中的光栅具有多层倾斜结构,参与优化的光栅结构参数包括  $\{d, h_1, h_2, h_3, h_4, f, \gamma\}$ , 即光栅周期  $d$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  层的深度  $h_1$ ,  $\text{TiO}_2$  层的深度  $h_2$ ,  $\text{Si}$  层的深度  $h_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  层的深度  $h_4$ , 占空比  $f$  和光栅倾斜角  $\gamma$ 。目标函数表示为

$$F = \int_{\lambda_d}^{\lambda_u} \{w_1 [\eta_{-1}^{\text{TE}}(\lambda) - \bar{\eta}(\lambda)]^2 + [\eta_{-1}^{\text{TM}}(\lambda) - \bar{\eta}(\lambda)]^2\} + w_2 \{[1 - \eta_{-1}^{\text{TE}}(\lambda)]^2 + [1 - \eta_{-1}^{\text{TM}}(\lambda)]^2\} + (1 - w_1 - w_2) [\eta_{-1}^{\text{TE}}(\lambda) - \eta_{-1}^{\text{TM}}(\lambda)]^2 d\lambda, \quad (1)$$

式中:  $\lambda_u, \lambda_d$  分别是目标光谱范围的上下限;  $\eta_{-1}^{\text{TE}}(\lambda)$  是  $\lambda$  波长处 TE 偏振下的 -1 级反射效率;  $\eta_{-1}^{\text{TM}}(\lambda)$  是  $\lambda$  波长处 TM 偏振下的 -1 级反射效率;  $\bar{\eta}(\lambda)$  是  $\lambda$  波长处 TE、TM 偏振下的平均反射效率;  $w_1$  和  $w_2$  表示效率均匀性和总体效率对应的权重因子,  $0 < w_1 < 1, 0 < w_2 < 1$ 。文中后面提及的衍射效率均指反射 -1 级衍射效率,为了均衡效率和带宽的关系, (1) 式的目标函数中考虑了效率和偏振相关损耗等因素。偏振相关损耗可表示为

$$L_{\text{PD}} = 10 \times \lg[\max(\eta_{-1}^{\text{TE}}(\lambda), \eta_{-1}^{\text{TM}}(\lambda)) / \min(\eta_{-1}^{\text{TE}}(\lambda), \eta_{-1}^{\text{TM}}(\lambda))]. \quad (2)$$

优化过程中,光栅的优化带宽范围可以根据目标函数中设置的光谱范围上下限来控制,同时组成光栅的介质材料的色散也全部被考虑在内。本次设

计的光栅结构针对的波长带宽范围是 550~680 nm, 考虑到实际的制作问题,每个参数的优化范围的下限和上限分别设置为  $\{350 \text{ nm}, 50 \text{ nm}, 50 \text{ nm}, 50 \text{ nm}, 50 \text{ nm}, 0.2, 10^\circ\}$  和  $\{1 \mu\text{m}, 1 \mu\text{m}, 1 \mu\text{m}, 1 \mu\text{m}, 1 \mu\text{m}, 0.8, 75^\circ\}$ 。根据 (1) 式给出的目标函数,对效率均匀性和总体效率设置相等的权重因子,即  $w_1 = w_2 = 1/3$ , 由图 2 所示的模拟退火(SA)优化算法流程,最后得到了 550~680 nm 入射波长范围内的光栅结构参数最优解。具体参数为  $d = 699.3 \text{ nm}, h_1 = 531.7 \text{ nm}, h_2 = 547.7 \text{ nm}, h_3 = 972.4 \text{ nm}, h_4 = 814.9 \text{ nm}, f = 0.3388, \gamma = 71.64^\circ$ 。

对于常规矩形槽型光栅,结合常规光刻和半导体刻蚀工艺是比较容易制备的。对于本文设计的这种倾斜光栅,历史上也有不少工作对其制备工艺进行了研究。如:1996 年, Li 等<sup>[33]</sup>成功制作了光栅槽深为 400 nm, 倾角为  $50^\circ$  的倾斜光栅;1980 年, Boyd 等<sup>[34]</sup>通过特殊设计的法拉第腔制作了不同倾角的倾斜光栅,同时分析了刻蚀速率与光栅倾角的关系,其结果表明大角度倾斜光栅的制备具有可能性。对于这种倾斜光栅,其通用制作工艺流程如下:1)在基底上均匀涂覆合适厚度的光刻胶;2)经过全息或电子束直写曝光和显影得到光刻胶光栅图案,并通过等离子灰化工艺去掉光刻胶槽内的残胶;3)在整个图案上均匀镀上一层金属层(如 Cr),并利用剥离工艺将图案转移到金属层上;4)将金属光栅图案层作为刻蚀掩模,利用特殊设计的倾斜入射反应离子

束进行刻蚀,刻蚀到设计深度便完成了具有倾斜槽型的光栅结构向基底材料的转移;5)采用化学腐蚀方法去掉顶端金属层即可得到所设计的倾斜光栅结构。对于本文设计的多层倾斜光栅,需要预先在基底上根据设计的结构参数镀上四层膜层,然后通过特殊设计法拉第刻蚀腔<sup>[34]</sup>按照上述流程工艺,并选用相应的刻蚀气体,采用优化刻蚀工艺,实现这种四层倾斜光栅的制备。

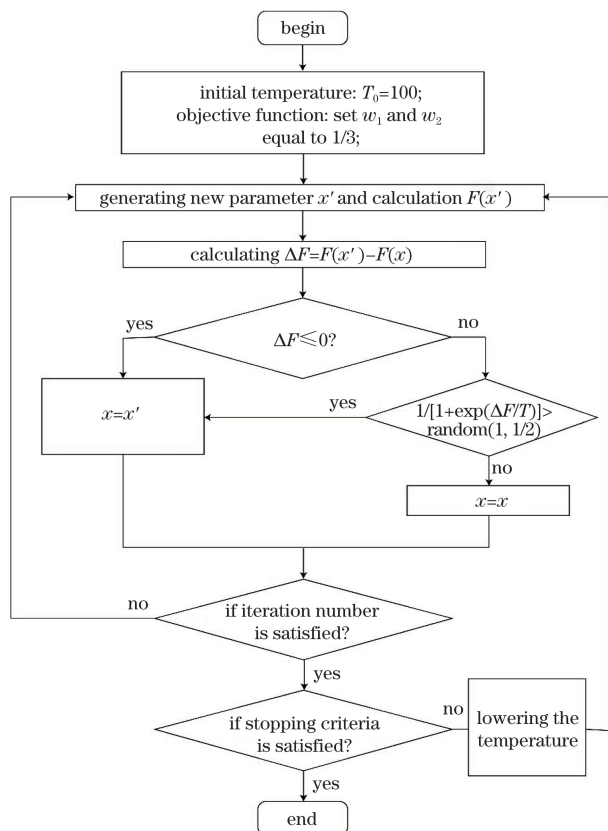


图 2 模拟退火算法流程图

Fig. 2 Flowchart of simulated annealing algorithm

### 3 结果分析及讨论

#### 3.1 带宽分析

图 3 给出了优化后的光栅结构在正入射的条件下,衍射效率和 PDL 随入射波长的变化趋势。图中上半部分的实线和虚线分别代表了 TE 偏振和 TM 偏振下的衍射效率随入射波长的变化;底部的曲线则表示了相应的 PDL 与入射波长之间的关系。在 130 nm(550~680 nm)的带宽范围内,两种偏振下的衍射效率均高于 93%,带宽内的平均衍射效率高于 95%;同时相应的 PDL 在波长范围内均小于 0.2 dB,平均 PDL 小于 0.1 dB。可以看出,该光栅在较大的带宽范围内同时具有高效率 and 低 PDL 的性能。

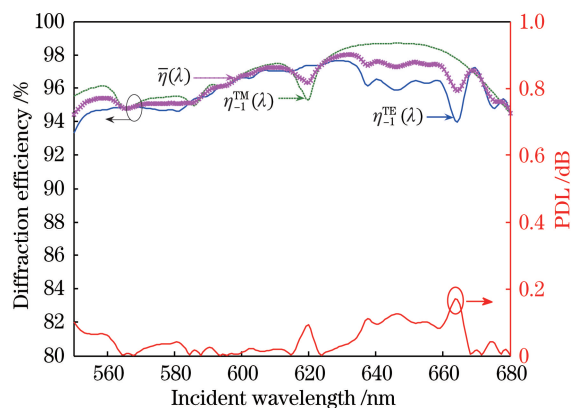


图 3 正入射下优化后的光栅结构的衍射效率和偏振相关损耗随入射波长的变化图

Fig. 3 Diffraction efficiencies and polarization dependent loss of optimized grating versus incident wavelength under normal incidence

在实际应用中,有些情况不仅需要宽的入射波长带宽,同时还需要良好的入射角度带宽。图 4(a)和图 4(b)展示了优化后的光栅结构的波长和角度带宽,图 4(c)是相应的入射角和入射波长下对应的-1级衍射角的分布图,图 4(d)是 TE 和 TM 偏振下的平均衍射效率分布图。如图 4(a)所示,图中给出的是 TE 偏振下的光栅-1 级衍射效率随入射波长和角度变化的等高线图。当入射角从 $-5^\circ$ 变化到 $50^\circ$ 时,入射波长在 550 nm 到 680 nm 的范围内,TE 偏振衍射效率高 90%。图 4(b)给出了 TM 偏振下的光栅-1 级衍射效率随入射波长和角度变化的等高线图。当入射角从 $-2^\circ$ 到 $45^\circ$ 变化时,入射波长在 550 nm 到 680 nm 的范围内,TM 偏振衍射效率高 90%。结合图 4(c)可以看出,所设计的光栅衍射主要能量级次在熔融石英基底内对应的出射角在 $50^\circ$ 内,其衍射效率保持在 90%以上。图 4(d)结果表明,在光谱宽度为 130 nm(550~680 nm)、入射角谱宽度为 $47^\circ(-2^\circ\sim 45^\circ)$ 的范围内,该光栅的平均衍射效率均保持在 90%以上。上述结果表明,在入射角度变化的同时,光栅保持了良好的入射波长带宽,而不仅仅只是在某个波长处才有宽入射角度的特性,这说明此偏振无关光栅结构在很宽的入射波长和角度范围内均具有高衍射效率,可满足较宽入射角度和波长范围的应用需求。

#### 3.2 容差分析

为了评估这种结构的制作难度,分析了这种四层斜光栅结构的工艺容差。考虑到实际制作中光栅的周期和槽深可以相对容易地精确控制,而占空比难以控制(光刻工艺显影过程决定),本文着重分析



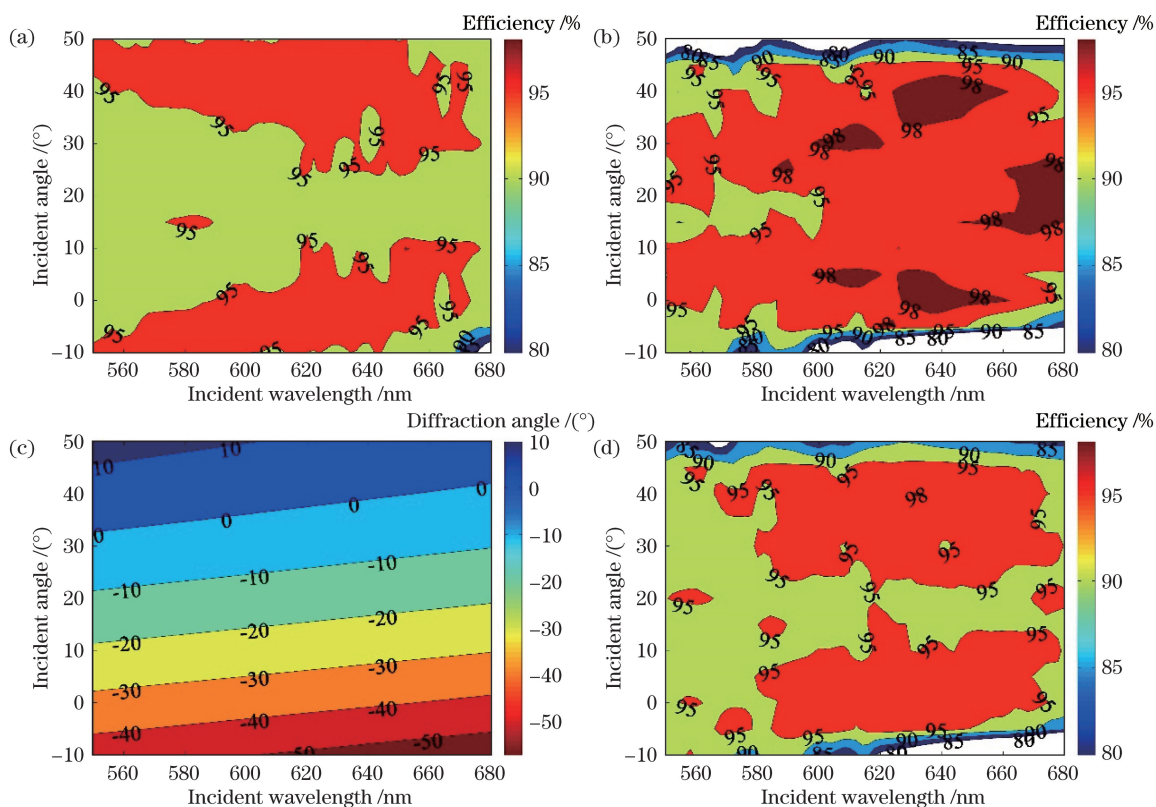


图 4 优化后的偏振无关四层倾斜光栅的波长和角度带宽分析。(a) TE 偏振下和(b)TM 偏振下衍射效率随入射波长和角度变化的等高线图;(c)入射波长和角度对应的-1 级衍射角;(d) TE 和 TM 偏振下的平均衍射效率图

Fig. 4 Analysis of incident wavelength and angular bandwidth of the polarization-independent four-layer slanted grating with optimized grating parameters. (a) Diffraction efficiency contour versus incident wavelength and angle for TE polarization; (b) diffraction efficiency contour versus incident wavelength and angle for TM polarization; (c) corresponding -1st diffraction angle; (d) average diffraction efficiency map under TE and TM polarizations

占空比偏离设计值对光栅性能的影响。图 5 中的容差分析均基于优化后的光栅结构参数值进行仿真,图中给出正入射下,光栅占空比在 0.25~0.38 范围内变化时对-1 级衍射效率、入射波长带宽范围以及偏振相关损耗的影响,图中平行于横轴的虚线对应占空比为优化设计值  $f = 0.3388$ 。图 5(a)和图 5(b)所示为 TE 和 TM 偏振下衍射效率图随光栅占空比和入射波长的变化趋势。从图 5(a)可以看出,在占空比为 0.25~0.38、入射波长为 550~680 nm 的矩形区域内,TE 偏振的衍射效率均高于 90%。对于 TM 偏振,由图 5(b)可以看出,在图中整个区域中同样-1 级衍射效率均大于 90%。图 5(c)则给出了相应 PDL 的变化,当占空比和入射波长分别在 0.25~0.38 和 550~680 nm 范围内变化时,PDL 始终小于 0.25 dB,当占空比在区间 0.25~0.35 时,PDL 小于 0.2 dB。从以上分析可知,此光栅结构具有很大的占空比制作容差范围,对实际制作和应用具有重要意义。

下面进一步考察光栅槽深在设计值附近变化引

入的光栅-1 级衍射效率和 PDL 在入射波长带宽 550~680 nm 范围内的影响,由此观察光栅参数的制造容差对光栅性能的影响。根据优化结果,可知光栅几何参数的设计值分别为  $d = 699.3$  nm,  $h_1 = 531.7$  nm,  $h_2 = 547.7$  nm,  $h_3 = 972.4$  nm,  $h_4 = 814.9$  nm,  $f = 0.3388$ ,  $\gamma = 71.64^\circ$ 。光栅周期可以控制到皮米精度<sup>[35]</sup>,因此表中给出的是光栅周期不变时光栅槽深在优化设计值的  $\pm 5\%$  的范围内的变化,由此观察镀膜及刻蚀误差等制造误差对 550~680 nm 的入射波长带宽范围中 TE 和 TM 偏振下的衍射效率以及 PDL 值的影响,见表 2,表中  $\eta_1^{\text{TE}}(\lambda)$ 、 $\eta_1^{\text{TM}}(\lambda)$  分别指 550~680 nm 波长范围内 TE 偏振和 TM 偏振下-1 级衍射效率的变化范围,  $L_{\text{PD,max}}$  则是相对应的 PDL 的最大值。由表 2 可以看出,在设计值的  $\pm 5\%$  范围内,无论光栅槽深怎么变化,衍射效率均高于 88%,同时 PDL 均小于等于 0.25 dB。从中可以进一步看出,在保证第一层  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的镀膜厚度  $h_1$  的情况下,衍射效率高于 92%,PDL 小于 0.2 dB。这说明该光栅结构的衍射效率对第一层  $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜厚

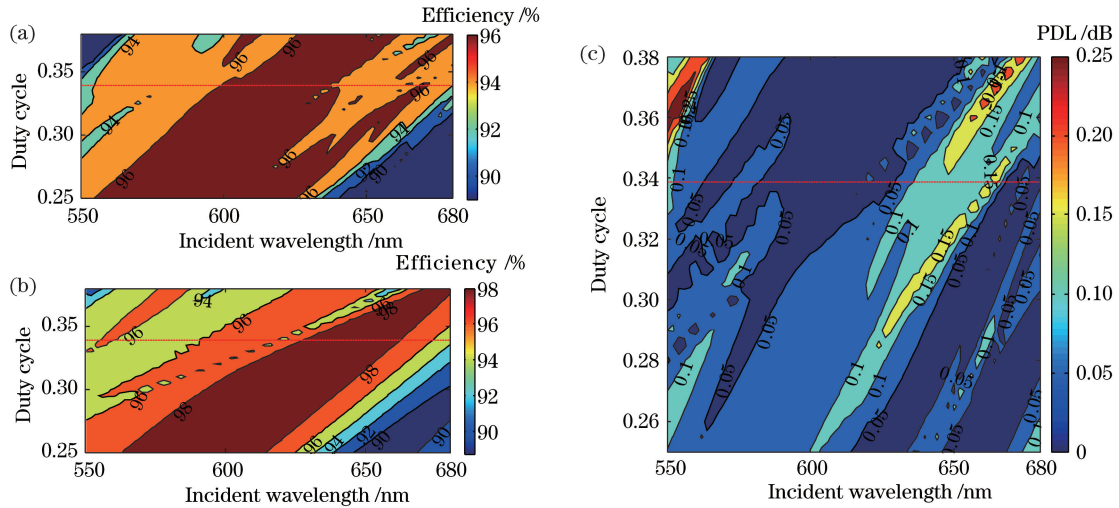


图 5 光栅占空比的容差分析。(a) TE 偏振下和(b)TM 偏振下衍射效率随入射波长和光栅占空比变化的等高线图；  
(c)相应的偏振相关损耗随入射波长和占空比变化的等高线图

Fig. 5 Tolerance analysis of grating duty cycle. (a) Diffraction efficiency contour versus incident wavelength and grating duty cycle for TE polarization; (b) diffraction efficiency contour versus incident wavelength and angle for TM polarization; (c) corresponding PDL contour versus incident wavelength and grating duty cycle

相对敏感,对其他三层厚度不敏感,这为实际光栅制备提供了参考。上述容差分析说明此光栅结构具有很好的工艺容差,对制作和应用有着现实的指导意义。

表 2 光栅槽深的制造容差对光栅性能的影响

Table 2 Dependence of grating performance on fabrication tolerances of the grating depths

Variable	Variable change of depth	$\eta_{TE}^1(\lambda) / \%$	$\eta_{TM}^1(\lambda) / \%$	$L_{PD,max} / \text{dB}$
$h_1$	+5%(558 nm)	90.5–97.0	88.6–97.5	0.25
	-5%(505 nm)	93.7–96.7	93.0–99.6	0.24
$h_2$	+5%(575 nm)	92.6–97.6	94.3–98.7	0.17
	-5%(520 nm)	92.9–97.8	93.2–99.0	0.16
$h_3$	+5%(1021 nm)	92.9–97.9	94.4–98.9	0.19
	-5%(924 nm)	93.4–97.5	94.4–98.8	0.14
$h_4$	+5%(856 nm)	93.3–97.7	94.5–98.7	0.17
	-5%(774 nm)	93.5–97.6	94.5–98.7	0.17

## 4 结 论

提出一种在较宽的入射波长和角度带宽范围内偏振无关高效率的异常反射四层倾斜光栅。基于严格耦合波分析方法和模拟退火算法,在正入射的条件下,130 nm(550~680 nm)入射波长带宽范围内,PDL 均小于 0.2 dB,平均 PDL 小于 0.1 dB,TE 和 TM 偏振下的效率均高于 93%,平均衍射效率高于 95%。另外这种光栅结构具有  $47^\circ(-2^\circ\sim 45^\circ)$  的入

射角度带宽,同时表现出了较好的工艺容差性。光栅占空比在 0.25~0.38 区间内时,正入射下偏振无关光栅的衍射效率、带宽范围以及偏振相关损耗都能得到保证;在 0.25~0.35 区间内时,偏振相关损耗能保证小于 0.2 dB;光栅槽深在设计值附近  $\pm 5\%$  范围内变化时,同样保证了良好的效率、带宽和偏振相关损耗。此外,针对不同应用目的,通过调节优化目标之间的权重因子或选择不同的目标函数和优化波段范围,可以得到超高效率的窄带光栅、高效率的宽带光栅和低 PDL 的宽带光栅等。因此,该偏振无关四层倾斜光栅在波导耦合光栅、近眼显示系统、光通信系统以及新型光谱仪等方面具有重要的应用前景。同时,本文提出的多层倾斜光栅结构对设计新型异常反射的超表面器件具有重要的借鉴意义。

## 参 考 文 献

[1] Harrison G R. The production of diffraction gratings I. Development of the ruling art[J]. Journal of the Optical Society of America, 1949, 39(6): 413-426.  
 [2] Lord R C, McCubbin T K. Infrared spectroscopy from 5 to 200 microns with a small grating spectrometer[J]. Journal of the Optical Society of America, 1957, 47(8): 689-697.  
 [3] Kong S H, Wijngaards D D L, Wolffenbittel R F. Infrared micro-spectrometer based on a diffraction grating [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2001, 92(1/2/3): 88-95.  
 [4] Deng J L, Yan X N, Wei C L, et al. Eight fold

- optical encoder with high-density grating[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(10): 2366-2375.
- [5] Tamiya H, Mitera Y, Taniguchi K, et al. Development of a three-dimensional encoder for highly accurate positioning[J]. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 2019, 85(10): 891-895.
- [6] Li M K, Xiang X S, Zhou C H, et al. Two-dimensional grating fabrication based on ultra-precision laser direct writing system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 0905001.  
李民康, 向显嵩, 周常河, 等. 基于超精密激光直写系统制作二维光栅[J]. *光学学报*, 2019, 39(9): 0905001.
- [7] Treacy E. Optical pulse compression with diffraction gratings[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1969, 5(9): 454-458.
- [8] Cao H C, Wu J, Yu J J, et al. High-efficiency polarization-independent wideband multilayer dielectric reflective bullet-like cross-section fused-silica beam combining grating[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(4): 900-904.
- [9] Cotel A, Villier B, Gombaudo C. Meter-size gratings for multi-petawatt lasers[C]// *Conference on Lasers and Electro-Optics*. Washington, D. C.: OSA, 2016, SM2M: SM2M.2.
- [10] Madasamy P, Jander D R, Brooks C D, et al. Dual-grating spectral beam combination of high-power fiber lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(2): 337-343.
- [11] Yu N, Zhou C H, Wei C L, et al. Narrow-wavelength-spread spectral combining laser with a reflector for a double pass with a single grating[J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(7): 071402.
- [12] Laude J P, Lerner J M. Wavelength division multiplexing/demultiplexing (WDM) using diffraction gratings[J]. *Proceedings of SPIE*, 1984, 0503: 22-28.
- [13] Wang B, Zhou C H, Wang S Q, et al. Polarizing beam splitter of a deep-etched fused-silica grating[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(10): 1299-1301.
- [14] Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaev V M. Planar photonics with metasurfaces[J]. *Science*, 2013, 339(6125): 1232009.
- [15] Khorasaninejad M, Capasso F. Broadband and multifunctional efficient meta-gratings based on dielectric waveguide phase shifters[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(10): 6709-6715.
- [16] Wang J G, Shao Z K, Wen Y H, et al. All-dielectric metasurface grating for on-chip multi-channel orbital angular momentum generation and detection[J]. *Optics Express*, 2019, 27(13): 18794-19802.
- [17] Liu Z Y, Pan C, Pang Y J, et al. A full-color near-eye augmented reality display using a tilted waveguide and diffraction gratings[J]. *Optics Communications*, 2019, 431: 45-50.
- [18] Jeong Y J. Diffraction grating 3D display optimization[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(5): A21-A25.
- [19] Czyszanowski T, Gebiski M, Dems M, et al. Subwavelength grating as both emission mirror and electrical contact for VCSELs in any material system[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 40348.
- [20] Hu A D, Zhou C H, Cao H C, et al. Polarization-independent wideband mixed metal dielectric reflective gratings[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(20): 4902-4906.
- [21] Wang B, Chen L, Lei L, et al. Performance investigation of incident bandwidth based on reflective two-layer grating with high efficiency[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 56: 372-374.
- [22] Li L X, Liu Q, Chen J M, et al. Polarization-independent broadband dielectric bilayer gratings for spectral beam combining system[J]. *Optics Communications*, 2017, 385: 97-103.
- [23] Ito K, Iizuka H. Highly efficient-1st-order reflection in Littrow mounted dielectric double-groove grating[J]. *AIP Advances*, 2013, 3(6): 062119.
- [24] Bi Q Y, Zheng J J, Sun M Z, et al. Design of ultrabroadband internal reflection gratings with high efficiency[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(8): 1431-1433.
- [25] Phan T, Sell D, Wang E W, et al. High-efficiency, large-area, topology-optimized metasurfaces[J]. *Light, Science & Applications*, 2019, 8: 48.
- [26] Popov V, Yakovleva M, Boust F, et al. Designing metagratings via local periodic approximation: from microwaves to infrared[J]. *Physical Review Applied*, 2019, 11(4): 044054.
- [27] Rabinovich O, Kaplon I, Reis J, et al. Experimental demonstration and in-depth investigation of analytically designed anomalous reflection metagratings[J]. *Physical Review B*, 2019, 99(12): 125101.
- [28] Kong F Y, Huang H P, Wang L L, et al. Femtosecond laser induced damage of pulse compression gratings[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 97: 339-345.
- [29] Moharam M G, Gaylord T K, Pommet D A, et al. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1995, 12(5): 1077-1086.
- [30] Goffe W L, Ferrier G D, Rogers J. Global optimization

- of statistical functions with simulated annealing [J]. Journal of Econometrics, 1994, 60(1/2): 65-99.
- [31] Taghizadeh M R, Wilson J I B, Turunen J, et al. Optimization and fabrication of grating beam splitters in silicon nitride[J]. Applied Physics Letters, 1989, 54(16): 1492-1494.
- [32] Campbell S, Botten L C, McPhedran R C, et al. Modal method for classical diffraction by slanted lamellar gratings[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2008, 25(10): 2415-2426.
- [33] Li M. Experimental study of waveguide grating couplers with parallelogramic tooth profiles[J]. Optical Engineering, 1996, 35(11): 3101-3106.
- [34] Boyd G D, Coldren L A, Storz F G. Directional reactive ion etching at oblique angles [J]. Applied Physics Letters, 1980, 36(7): 583-585.
- [35] Xiang X S, Jia W, Xiang C C, et al. Long-range *in situ* picometer measurement of the period of an interference field[J]. Applied Optics, 2019, 58(11): 2929-2935.