

高衍射效率偏振无关合束光栅的双层梯形槽形设计与分析

孙澳 王瑞鹏 孙雨琦 王新宇 李文昊 姜岩秀

Design and analysis of a double-layer trapezoidal groove of polarization-independent beam-combining gratings with high diffraction efficiency

SUN Ao, WANG Rui-Peng, SUN Yu-Qi, WANG Xin-Yu, LI Wen-Hao, JIANG Yan-Xiu

引用本文:

孙澳, 王瑞鹏, 孙雨琦, 王新宇, 李文昊, 姜岩秀. 高衍射效率偏振无关合束光栅的双层梯形槽形设计与分析[J]. *中国光学*, 2025, 18(1): 53–62. doi: 10.37188/CO.2024–0083

SUN Ao, WANG Rui-Peng, SUN Yu-Qi, WANG Xin-Yu, LI Wen-Hao, JIANG Yan-Xiu. Design and analysis of a double-layer trapezoidal groove of polarization-independent beam-combining gratings with high diffraction efficiency[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(1): 53–62. doi: 10.37188/CO.2024–0083

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2024–0083>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于衍射光栅的高精度干涉星敏感器的理论分析

High accuracy interferometric star tracker based on diffraction grating

中国光学 (中英文). 2021, 14(6): 1368 <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0051>

基于伴随仿真的偏振复用超构透镜

Polarization-multiplexed metalens enabled by adjoint optimization

中国光学 (中英文). 2021, 14(4): 754 <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0035>

基于液晶光波导的电控偏振旋转器

Electrically controlled polarization rotator based on liquid crystal optical waveguide

中国光学 (中英文). 2022, 15(3): 552 <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0213>

等周期变倾角干涉条纹复用法扩展增强现实耦合元件体光栅角度带宽

Expanding the angular bandwidth of augmented reality coupling element volume holographic grating by multiplexing equal-period and variable-inclination-angle interference fringes

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1157 <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0050>

基于非对称混合等离子体结构的双槽超紧凑偏振分束器

Double-slot ultra-compact polarization beam splitter based on asymmetric hybrid plasmonic structure

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1215 <https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022–0028>

基于偏振差分图像的海天线检测方法

Sea-sky-line detection method based on polarization difference images

中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 596 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0181>

文章编号 2097-1842(2025)01-0053-10

高衍射效率偏振无关合束光栅的双层梯形槽形设计与分析

孙澳^{1,2}, 王瑞鹏^{1,2}, 孙雨琦¹, 王新宇¹, 李文昊¹, 姜岩秀^{1*}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了满足强激光系统对于合束光栅的宽带、高衍射效率及偏振无关的需求, 本文提出了一种具有双层梯形结构的偏振无关合束光栅。首先, 基于严格耦合波理论, 建立了一种以粒子群优化算法为核心的偏振无关合束光栅设计模型, 通过随机生成特征波长实现效率特性寻优。然后, 详细分析了单层梯形和双层梯形结构光栅的槽深、占宽比、侧壁倾角等结构参数对光栅衍射效率及带宽的影响。最后, 对两种结构光栅的电场增强特性进行分析讨论。结果表明, 双层梯形结构偏振无关合束光栅在 51 nm(1038~1089 nm) 带宽范围内实现 99% 以上的理论衍射效率, 相比传统单层梯形结构具有更大的工艺容差, 容差范围内均满足 30 nm 带宽和 98% 的高衍射效率, 同时具有更低的光栅近场增强, 可以拥有更强的抗激光损伤能力。本文提出的宽带高衍射效率双层梯形结构光栅可以提高激光系统的输出功率, 在激光合束领域具有重大的应用价值。

关键词: 衍射光栅; 偏振无关; 工艺容差; 电场

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2024-0083 CSTR: 32171.14.CO.2024-0083

Design and analysis of a double-layer trapezoidal groove of polarization-independent beam-combining gratings with high diffraction efficiency

SUN Ao^{1,2}, WANG Rui-Peng^{1,2}, SUN Yu-Qi¹, WANG Xin-Yu¹, LI Wen-Hao¹, JIANG Yan-Xiu^{1*}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: jiangyanxiup@163.com

Abstract: In order to meet the needs of broad band, high diffraction efficiency, and polarization independ-

收稿日期: 2024-05-08; 修订日期: 2024-05-24

基金项目: 国家重点研发计划(No. 2023YFF0715802); 国家自然科学基金青年基金(No. 12105288, No. U21A20509);

中国科学院青年创新促进会项目(No. 2022218); 吉林省自然科学基金项目(No. 20210101139JC)

Supported by National Key R & D Program of China (No. 2023YFF0715802); National Natural Science Foundation of China (No. 12105288, No. U21A20509); Youth Innovation Promotion Association of the Chinese Academy of Sciences (No. 2022218); Natural Science Foundation of Jilin Province (No. 20210101139JC)

ence, a double-layer trapezoidal polarization-independent beam grating is proposed in this paper. Firstly, based on the strict coupled wave theory, a design model of polarization-independent combined beam grating based on a particle swarm optimization algorithm is established, and the efficiency characteristics are optimized by randomly generating characteristic wavelengths. Then, the effects of slot depth, width ratio, side angle, and other structural parameters on the diffraction efficiency and bandwidth of single-layer and double-layer trapezoidal grating are analyzed in detail. Finally, the electric field enhancement characteristics of the two structures are analyzed and discussed. The results show that the polarization independent beam combining grating with double-layer trapezoidal groove achieves a theoretical diffraction efficiency of more than 99% in the bandwidth range of 51 nm (1 038 nm–1 089 nm), and has a larger process tolerance than the traditional single-layer trapezoidal structure, which meets the bandwidth of 30 nm and the high diffraction efficiency of 98% in the tolerance range, and has lower near-field grating enhancement. It has a stronger resistance to laser damage. The proposed double-layer trapezoidal grating with wide band and high diffraction efficiency can improve the output power of laser systems, and has significant application value in the field of laser beam combination.

Key words: diffraction grating; polarization independent; process tolerance; electric field

1 引 言

光纤激光器具有效率高、体积小、光束质量高、系统稳定及热管理方便等优势,目前广泛应用于高精度激光加工、激光医疗、光通信及国防建设等方面^[1-5],近年来成为高功率激光器的研究热点。尽管单光纤激光器在近几年得到大力发展,但其内部功率密度极高会引发受激布里渊散射(SBS)^[6-8],从而限制单纤激光器的输出功率。有研究指出单模宽谱光纤的输出功率极限约为 36.6 kW^[9-10]。光谱合束技术(SBC)是突破单纤激光器功率阈值、提高光纤激光器输出功率和光束质量的有效方法。SBC 可以将不同激光单元发出的不同波长的光束,经光栅衍射后以相同的方向输出,从而获得高质量和高功率的合成激光^[11-15]。多层介质膜光栅作为理想的核心衍射元件,被广泛应用到 SBC 系统中。基于衍射光栅的光谱合束技术是目前输出功率最高的光谱合束方案,国内外多家研究机构都对这一技术进行了深入研究,其中洛克希德·马丁公司、中国科学院上海光学精密机械研究所、中国工程物理研究院等相继实现了万瓦级的激光输出,标志着光谱合束技术已经具备实用化的条件^[16-18]。

SBC 系统要求合束光栅必须在较宽的光谱

带宽范围内实现较高的衍射效率,这样可以提高光谱合成的激光阵列数,减少激光在传输过程中的损耗,从而提高总输出功率。并且,SBC 系统要求合束光栅有尽可能大的角色散。根据光栅方程可知光栅的色散与刻线密度成正比,更高刻线密度的光栅也就具有更强的色散本领,大角色散有助于优化 SBC 系统中子光束光路的排布,使系统的结构更加紧凑^[19]。另外,较强的抗激光损伤能力对合束光栅也非常重要,因为在合束系统中,高能激光会使光栅材料受热而发生不可逆的损伤。

随着光谱合束技术的发展以及输出功率的提高,具有高损伤阈值、高衍射效率和宽带宽优点的多层介质膜(MLD)光栅近几年来成为光谱合束技术中的核心元件。由于光栅质量直接决定着激光系统的合束效率和稳定性,针对光谱合束系统中合束光栅的高衍射效率、宽带宽、高刻线密度等关键性能指标,国内外学者开展了一系列的研究。在光栅结构设计及制备方面,2012年,胡安铎等人利用金属及多层介质膜系研究了刻线密度为 1250 line/mm 的光栅,在 800 nm 的入射波长下,TE、TM 的衍射效率在 120 nm 带宽下超过 90%^[20]。2015年,清华大学申碧瑶等人设计并制备出刻线密度为 1200 line/mm 的多层介质膜光栅^[21],其在 1044~1084 nm 波长范围内,TE、TM 偏

振光的实测平均衍射效率分别为 89.7%, 93.8%。Chen 等人^[22]通过合并参数制作公差来分析不同成分膜系结构的相对制造难度, 制备出线密度为 1170 line/mm 的双层梯形光栅, 在 1020~1080 nm 波长范围内, 衍射效率测量值为 98%。Cao 等人^[23]设计了一种类似子弹形结构的偏振无关合束光栅, 刻线密度为 1111 line/mm, 并用简化模态方法解释了这种槽形的衍射机理。采用全息光刻及两步 ICP 刻蚀方法, 在 1040~1090 nm 波长范围内, 制备出衍射效率大于 91% 的光栅。Cho 等人^[24]设计并制备出刻线密度为 1200 line/mm, 深宽比为 0.56, 在 1030~1080 nm 波长范围内, 衍射效率大于 96.1% 的偏振无关合束光栅。

本文设计了一种双层梯形结构的偏振无关合束光栅, 相比单层梯形结构具有更高的设计自由度, 因此在实现宽带高衍射效率的同时还具有较大的工艺容差, 并且还具有更低的近场电场增强。采用严格耦合波方法(RCWA)与粒子群算法(PSO)^[25-27]相结合的方式, 对刻线密度为 1300 line/mm 的单层梯形和双层梯形两种合束光栅结构参数进行优化设计。经对比分析发现, 双层梯形光栅在 1038~1089 nm 波段范围内, TE 和 TM 偏振光的平均衍射效率大于 99%, 并且具有较大的工艺容差。利用 RCWA 计算了两种结构的光栅电场分布, 结果表明双层梯形结构相比单层梯形结构具有更低的光栅截面最大电场强度, 这说明本文设计的光栅具有更强的抗激光损伤能力。

2 随机生成波长的光栅设计模型

偏振无关合束光栅由基底、多层介质膜系及表面浮雕结构构成。多层介质膜系具有极高的反射率, 几乎可以将入射光全部反射。表面浮雕结构则起到衍射的作用, 将能量集中到某一级次。根据合束系统的需求, 通过对膜系结构参数(膜层数量、膜层厚度)和光栅结构参数(槽深、占宽比、侧壁倾角)进行选择最优参数, 实现光栅的设计。

对于多层介质膜光栅的高反膜系来说, 常用的低折射率材料为二氧化硅(SiO₂), 其透光性良好, 与其他材料的粘连性优秀, 抗激光损伤能力强。常用的高折射率材料为五氧化二钽(Ta₂O₅)

和二氧化铪(HfO₂), Ta₂O₅ 比 HfO₂ 的透过率更高, 抗激光损伤能力更强。由光学薄膜理论^[28]可知, Ta₂O₅ 与 SiO₂ 的膜系组合由于具有较大的折射率差值, 可以获得更高的高衍射效率带宽。

本文选择规整膜系(HL)_n 对于作为高反膜系结构。依据多层介质膜的干涉理论知, 膜层对数 n 越大, 膜系的理论反射率也越高, 理论值可以无限接近 100%。然而, 在镀膜工艺中发现, 由于薄膜的散射和吸收特性, 多层膜系的反射率会随镀膜层数量的增加而降低, 并且膜层与膜层之间的压力会随之变大, 这就导致了脱落、破裂等现象的出现, 影响膜系的抗激光损伤能力, 使光栅的衍射性能下降。在波长为 1060 nm 的 TE 和 TM 偏振光入射时, 通过对膜系对数为 12、14、16、18 的组合进行反射率的计算, 发现当膜系对数为 14 时, TE 偏振光的反射率为 98.77%, 不符合所需的 99%, 对数不满足要求。当膜系的对数增加到 18 时, TE 偏振光与 TM 偏振光的反射率均接近 100%, 然而膜系厚度会增加到 5.6 μm, 加上匹配层和光栅层, 膜系的总厚度将会超过 6 μm, 引发的应力与吸收问题将对光栅性能产生影响。本文选择 16 对膜系, 其 TE 与 TM 反射率均大于 99%, 且 TE 偏振光反射率与 18 对时仅相差 0.3%, 膜系厚度也比较小, 更符合设计需要。

确定膜系结构后, 使用 RCWA 结合 PSO 对偏振无关合束光栅结构进行寻优, 选择式(1)作为评价函数, 使光栅-1 级衍射效率尽量高。

$$MF_0 = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{\lambda_i} [(100\% - R_{-1}(\lambda_i))^2 + (R_0(\lambda_i))^2] \right\}, \quad (1)$$

其中, λ_i 为生成的第 i 个随机波长, N 为随机波长总数, R_{-1} 和 R_0 分别为光栅反射-1 级和 0 级的衍射效率。在每一轮迭代过程中, 所选择的特征波长 λ_i 是在中心波长为 1060 nm, 带宽为 30 nm 时随机生成的。在迭代次数足够多的情况下, 最终收敛结果能够表征设计结果在整个工作波段内的效率特性。寻优过程如图 1(彩图见期刊电子版)所示。其中: 图 1(a)为带宽范围内随机波长的 TE、TM 以及平均衍射效率的实时分布; 图 1(b)为寻优迭代时评价函数值的收敛过程; 图 1(c)为粒子群算法寻优的粒子实时位置。通过在寻优过程中查看图 1 可以对寻优迭代策略进行实时调整。

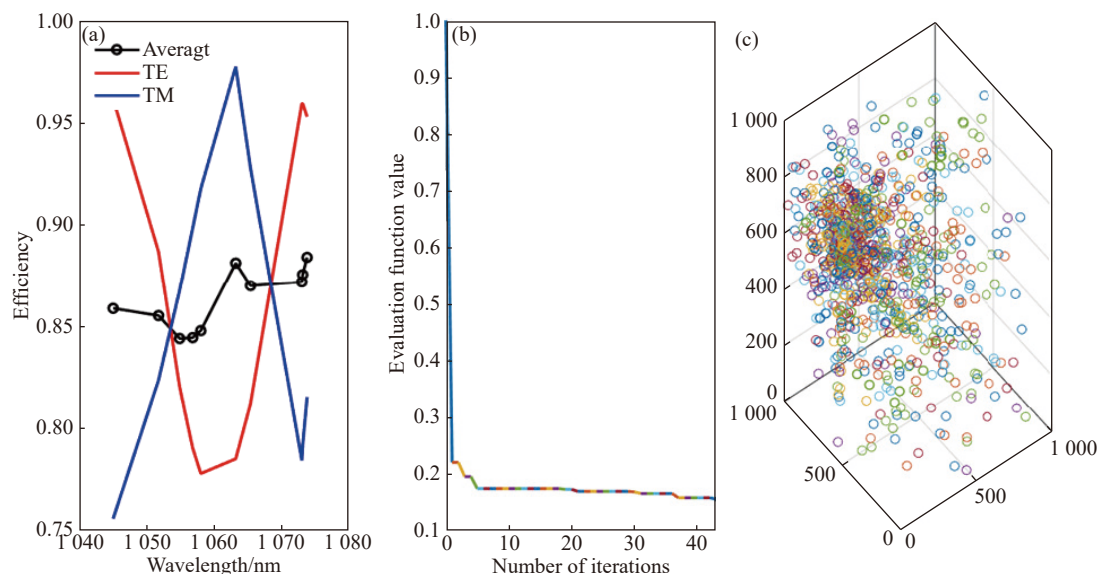


图 1 实时衍射效率和评价函数值以及寻优结构参数示意图。(a) 寻优时随机波长点的 TE、TM 以及平均衍射效率; (b) 寻优迭代时评价函数值的变化情况; (c) 寻优参数的粒子实时位置

Fig. 1 Real-time diffraction efficiency, evaluation function values and optimization structure parameters. (a) TE, TM, and average diffraction efficiency at random wavelength points during optimization; (b) the change of evaluation function value during optimization iterations; (c) real-time particle position during optimization

3 两种结构光栅的设计与容差分析

本节将开展对偏振无关合束光栅的结构设计与容差分析, 光栅的设计目标为: 中心波长 1060 nm, 光谱带宽 30 nm, 光栅刻线密度 1300 line/mm, 中心波长以-1 级 Littrow 角度入射时, 光谱带宽内 TE 偏振光和 TM 偏振光的-1 级衍射效率均大于 98%, 并具有足够的制作容差方便制作。

3.1 单层梯形结构

单层梯形是符合刻蚀光栅形貌的常见光栅设计结构, 首先对此结构进行设计与工艺容差分析。单层梯形偏振无关合束光栅结构如图 2(彩图见期刊电子版)所示, 所设计光栅的多层介质膜系为: S|(HL)₁₆BG|C, 其中 S 表示基底材料熔融石英, C 表示空气, G 表示顶层材料, B 表示匹配层材料, H 和 L 分别表示高低折射率材料, 即 Ta₂O₅ 和 SiO₂, d 代表光栅刻蚀深度, W 为光栅脊的宽度, P 为光栅周期, 光栅占宽比 f 即为 W/P , 根据刻蚀经验^[29-31], 光栅槽形采用底角为 80° 的梯形。

将顶层材料 G 设置为高折射率材料 Ta₂O₅, 因为更高折射率的相比低折射率对衍射光的调制效果更强, 更容易达到-1 级高衍射效率。对于匹配层材料 B 的选择, 考虑到其上下相连的介质材

料不相同, 因此选择了与这两种材料均不一样的 HfO₂ 材料, 以增加设计的自由度。

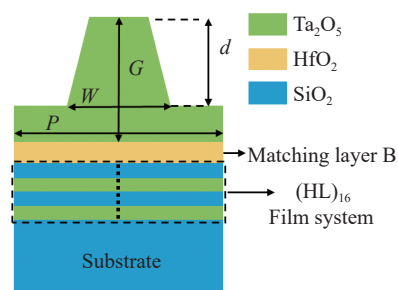


图 2 单层梯形结构偏振无关合束光栅

Fig. 2 Polarization-independent combined beam grating with single-layer trapezoidal structure

寻优结果如下: 顶层材料 G 的厚度为 591 nm, 匹配层 B 的厚度为 275 nm, 高折射率膜系材料 H 厚度为 396 nm, 低折射率膜系材料 L 厚度为 192 nm。在刻蚀深度为 355 nm、占宽比 (W/P) 为 0.69 时, 其带宽和 1060 nm 波长入射时的容差如图 3(彩图见期刊电子版)所示。可以看出, 在 1045~1075 nm 波长范围内, TE 和 TM 的平均衍射效率均大于 98%, 但是在 99% 以上的带宽很窄, 不足 10 nm。图 4(彩图见期刊电子版)为在 1060 nm 中心波长入射时, TE 和 TM 平均衍射效率随占宽比和刻蚀深度的变化。首先, 当占宽比大于 0.72 时, 衍射效率在 98% 以上的刻蚀深度容差较大,

约有 30 nm; 随着占宽比的减小, 槽深容差逐渐缩小, 不足 20 nm。考虑到所应用合束系统对带宽的需求, 单一波长的容差分析无法体现出带宽的实际情况, 因此还对单波长效率在 98% 以上的光栅参数进行了 1045 nm-1075 nm 的带宽计算, 发现能够满足全波段范围内效率为 98% 以上的工艺容差区间会变的很小, 槽深容差不足 10 nm, 如此小的工艺容差十分不利于实际制备。

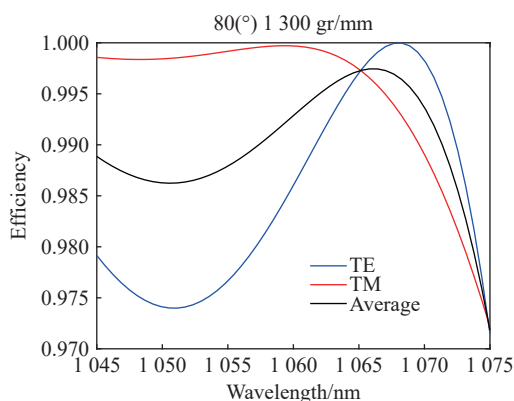


图 3 单层梯形光栅在中心波长反射-1 级自准直入射时的理论衍射效率

Fig. 3 Theoretical diffraction efficiency of a single-layer trapezoidal grating at the center wavelength reflected -1 order autocollimation incident

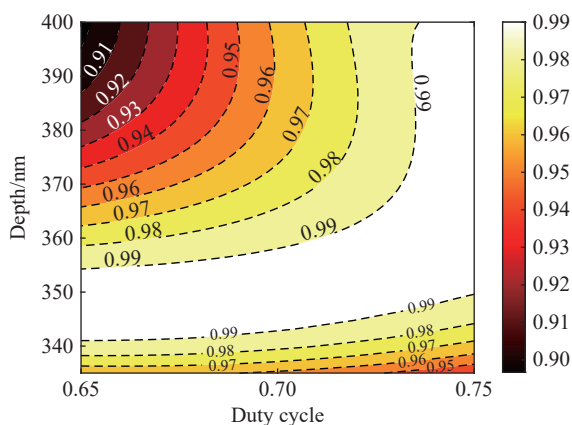


图 4 槽深及占宽比变化对单层梯形光栅结构 TE 和 TM 平均衍射效率的影响

Fig. 4 Effect of slot depth and duty cycle on the average diffraction efficiency of TE and TM for single-layer trapezoidal grating

3.2 双层梯形结构

为了进一步提升衍射效率和带宽, 将单层梯形结构更改为双层梯形结构, 通过在光栅结构中使用双层介质, 提升光栅设计的自由度并改变光栅材料, 使设计结果更接近最优解, 从而为带宽及效率提升提供可能性。双层梯形结构的偏振无关

合束光栅结构如图 5(彩图见期刊电子版)所示, 需要使用分层近似计算方法。所设计光栅的多层介质膜系为: S|(HL)₁₆BGT|C, 其中, T 表示顶层材料 Ta₂O₅, G 表示次顶层材料 SiO₂, 其余字母所代表的材料与单层梯形结构相同, 使用上节光栅设计模型对光栅进行设计。

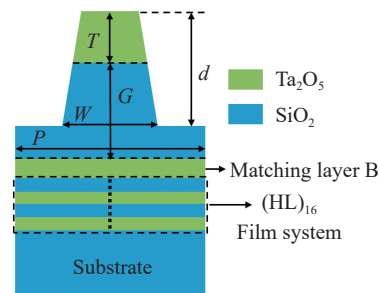


图 5 双层梯形结构偏振无关合束光栅

Fig. 5 Polarization-independent combined beam grating with double-layer trapezoidal structure

双层梯形结构寻优得到的结果为: 顶层材料 T 的厚度为 340 nm, 次顶层材料 G 的厚度为 192 nm, 匹配层 B 的厚度为 342 nm, 高折射率膜系材料 H 厚度为 130 nm, 低折射率膜系材料 L 厚度为 213 nm。如图 6(彩图见期刊电子版)所示, 在刻蚀深度为 380 nm, 占宽比(W/P)为 0.8 时, 光栅在 51 nm(1038 nm-1089 nm)带宽范围内实现 99% 以上的平均衍射效率(TE/TM 衍射效率 \geq 99%)。这是非常好的结果, 并且带宽范围包含了所需的 1045~1075 nm 波段。可以看出, 双层梯形结构相比单层梯形结构, 在衍射效率和波长带宽上的提升效果非常明显。即便理论衍射效率和带宽均很高, 然而实际制备光栅的衍射效率与理论值仍会有差距, 因此仍需评估其工艺容差是否足够。如图 7(彩图见期刊电子版)所示, 计算不同槽深和占宽比条件下光栅 TE 和 TM 平均衍射效率。可以看出, 衍射效率在 99% 以上的工艺容差区间很大, 在占宽比为 0.81 时, 槽深容差超过 60 nm。另外, 双层梯形结构满足 1045~1075 nm 全波段光栅 TE/TM 衍射效率在 98% 以上的工艺容差区间相比单层梯形结构也较大, 在黑色实线范围内的占宽比和刻蚀深度参数均满足 30 nm 波长带宽的要求。通过观察满足要求的工艺容差区间可以发现, 占宽比为 0.76-0.86 均有满足带宽要求的刻蚀深度区间, 这也更符合实际制备时的规律。因为在实际制备时, 需要先得到一定占空比要求的掩模再对其进行刻蚀, 因此根据掩模的占宽比随时确定刻蚀的深度及容差, 更便于实际制作。

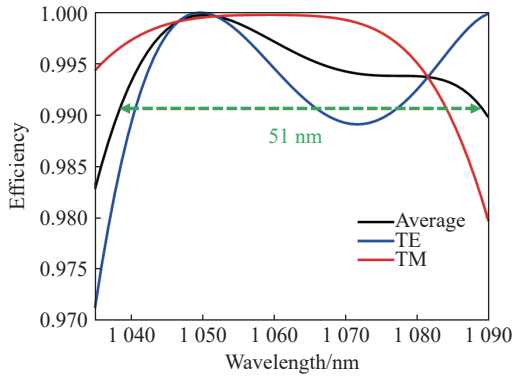


图 6 双层梯形光栅在中心波长反射-1级自准直入射时的理论衍射效率

Fig. 6 Theoretical diffraction efficiency of the double-layer trapezoidal grating at center wavelength reflection -1 auto-collimation incident

另外,在刻蚀过程中,侧壁的倾角总会变化,因此对侧壁倾角的容差也进行了分析,如图 8(彩图见期刊电子版)所示。如图 8(a)是刻蚀深度为

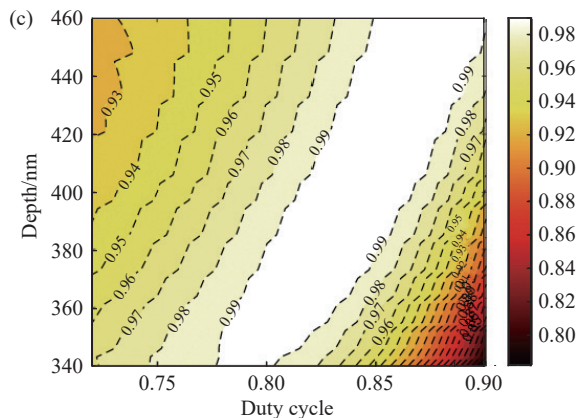
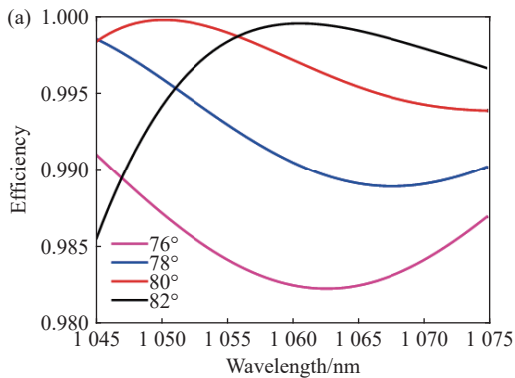


图 8 侧壁倾角变化对光栅全波段 TE 和 TM 偏振平均衍射效率的影响以及不同侧壁倾角下光栅的占宽比和槽深容差。(a) 不同侧壁倾角的全波段平均衍射效率, (b) 76°, (c) 78°, (d) 82°的刻蚀深度和占宽比容差

Fig. 8 The influence of sidewall angle variation on the average diffraction efficiency of TE and TM polarizations across the entire spectral range for gratings, as well as the width-to-period ratio and groove depth tolerances of gratings at different sidewall angles. (a) The average diffraction efficiency across the entire spectral range for different sidewall angles; (b) 76° etch depth and specific width tolerance; (c) 78° etch depth and specific width tolerance; (d) 82° etch depth and specific width tolerance.

380 nm、占宽比为 0.8,槽形为对称梯形时,光栅侧壁倾角变化对 1045~1075 nm 全波段衍射效率的影响。

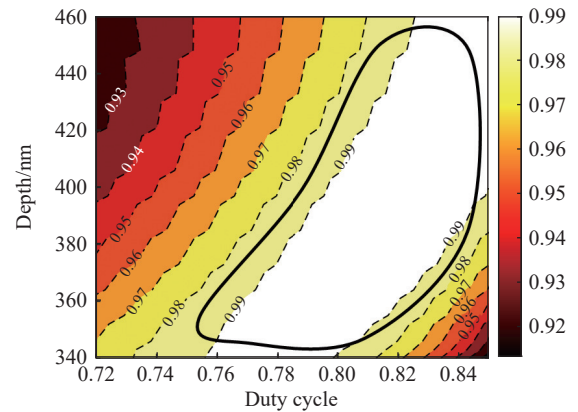


图 7 槽深及占宽比变化对双层梯形光栅结构 TE 和 TM 平均衍射效率的影响

Fig. 7 Effect of groove depth and duty cycle on the average diffraction efficiency of TE and TM for double-layer trapezoidal grating

由图 8 可以看出, 侧壁倾角在 $76^\circ\sim 82^\circ$ 范围内, TE 和 TM 平均衍射效率始终保持在全波段 98% 以上, 图 8(b)、8(c) 和 8(d) 分别为侧壁倾角为 76° 、 78° 和 82° 时, 光栅的刻蚀深度以及占宽比对 TE/TM 平均衍射效率的影响结果。可以看出, 假设实际光栅刻蚀过程中, 刻蚀的侧壁倾角偏离设计值 80° 时, 通过优化刻蚀深度以及占宽比参数, 仍可以得到满足 1045~1075 nm 波段范围内衍射效率大于 98% 的工艺容差区间。这说明本文所设计的光栅在刻蚀时具有较大的侧壁倾角容差。

4 光栅近场分析

合束光栅的能量承载能力由光栅孔径和光栅表面的激光损伤阈值(LIDT)决定, 可以用下面的简单公式表示^[32]:

$$E = \frac{\cos^2\theta}{EFI} \cdot L_{\text{MAX}}^2 \cdot \text{LIDT}_{\text{int}} \quad (2)$$

式中 L_{MAX} 为光栅的最大孔径, LIDT_{int} 为材料固有的损伤阈值, θ 为光的入射角, 定义 $\cos^2\theta/EFI$ 为能量比例因子, EFI 为光栅结构截面中的最大电场强度。在这里, L_{MAX} 和 LIDT_{int} 通常随所选材料和制造条件而定。可以看出, 高能激光系统的抗激光损伤能力与光栅结构中局部最大近电场强度密切相关, 且 EFI 越大, 光栅所能承载的激光能量越小, 因此其抗损伤能力越弱。

本文中光栅的近场计算通过 RCWA 方法实现^[33-35]。RCWA 的具体公式在本文中不再赘述, 本文只列出 RCWA 中涉及光栅近场计算的关键步骤。在 RCWA 中, 光栅区第 l 层结构的切向电场 S 和磁场 U 在 z 方向上的空间谐波如下:

$$S_{l,yi}(z) = \sum_{m=1}^n w_{l,i,m} \{ c_{l,m}^+ \exp(-k_0 q_{l,m}(z-D+d_l) + c_{l,m}^- \exp[k_0 q_{l,m}(z-D)] \} \quad (3)$$

$$U_{l,xi}(z) = \sum_{m=1}^n v_{l,i,m} \{ -c_{l,m}^+ \exp(-k_0 q_{l,m}(z-D+d_l) + c_{l,m}^- \exp[k_0 q_{l,m}(z-D)] \} \quad (4)$$

其中, d_l 为光栅区第 l 层的厚度, D 为光栅区域的总厚度, k_0 为真空中的波矢, $w_{l,i,m}$ 和 $q_{l,m}$ 分别为光栅第 l 层求解特征方程时产生的特征向量矩阵

W 的元素和特征值, $v_{l,i,m}$ 是矩阵 $V = WQ$ 的第 i, m 个元素, 其中 Q 是对角元素为 $q_{l,m}$ 的对角矩阵, 上述矩阵均可从 RCWA 中直接导出。 $c_{l,m}^+$ 、 $c_{l,m}^-$ 是由边界条件确定的常数, 由增强矩阵透射法可求解。在光栅结构中, 每一层电场的 y 分量与磁场的 x 分量均可以展开为空间谐波的形式:

$$E_{l,gy} = \sum_i S_{l,yi}(z) \exp(-jk_{xi}x) \quad (5)$$

$$H_{l,gx} = -j \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{1/2} \sum_i U_{l,xi}(z) \exp(-jk_{xi}x) \quad (6)$$

其中, k_{xi} 为光在 x 方向的波矢。求解得到 S 和 U 之后, 可通过上式在 x 和 z 方向上建模计算光栅近场的电场与磁场分量。在近场计算建模过程中, 将光栅结构分为三部分, 分别为入射空间、光栅结构和基底, 如图 9 所示。对光栅结构进行分层计算即可, 对入射介质和基底同样可以作为光栅结构进行处理, 并对其分一定的层数。这里需要注意的是, 对分层后的结构还需进行再次分层, 因为场计算的精度与衍射效率的计算精度不同, 对于入射空间和基底, 可以适当减小计算时的层数。

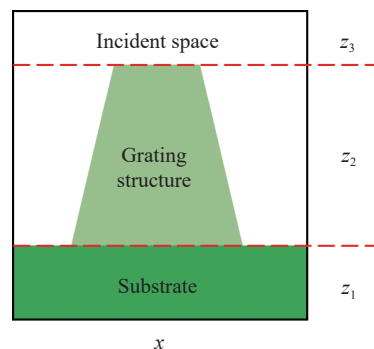


图 9 光栅近场计算模型

Fig. 9 Near-field calculation model of grating

利用上述近场计算模型, 对上节寻优好的单层梯形和双层梯形结构光栅进行近场计算。图 10 及图 11(彩图见期刊电子版)所示分别为单层梯形结构和双层梯形结构的 E_y 分量的振幅值。从图中可以看出, 在入射介质中有非常明显的向后方向衍射的驻波, 说明衍射光的能量几乎全部集中在 -1 级。另外, 两种结构的高电场强度均主要集中于光栅脊部分, 但是双层梯形结构在中心波长 1060 nm、TE 偏振光入射下光栅截面处

的最大电场强度为 2.4, 而单层梯形结构的最大电场强度为 2.6。对于 TM 偏振, 双层梯形结构的最大电场强度为 4.2, 而单层梯形达到了 5.2。

结果表明, 双层梯形结构相比单层梯形具有更低的近场电场增强, 在合束时可以承载更高的激光能量。

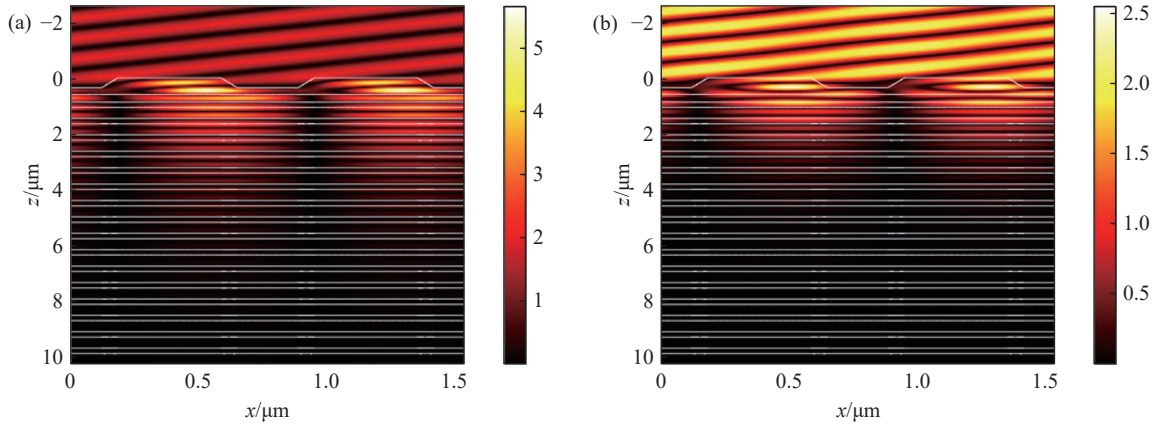


图 10 单层梯形结构 E_y 分量的振幅值。(a) TM; (b) TE

Fig. 10 Amplitude value of E_y component of grating with single-layer trapezoidal structure. (a) TM; (b) TE

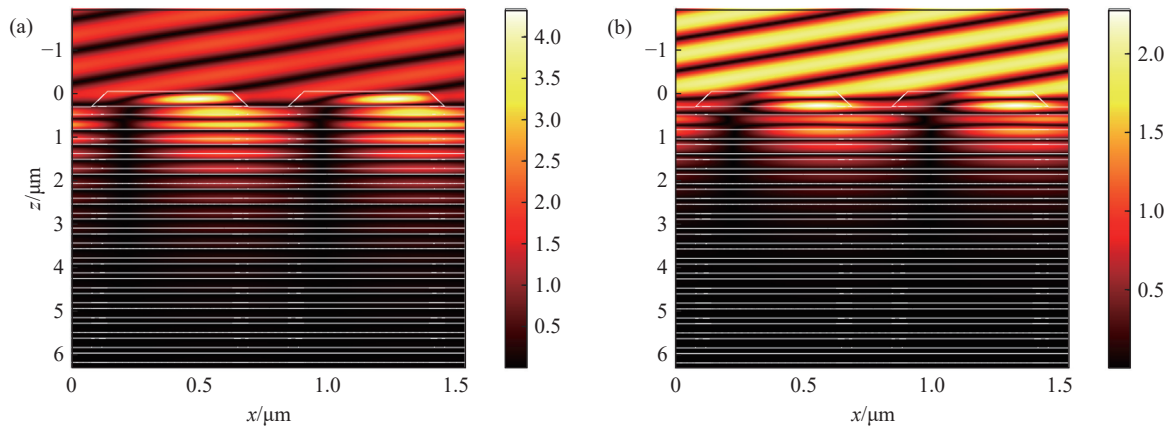


图 11 双层梯形结构 E_y 分量的振幅值。(a) TM; (b) TE

Fig. 11 Amplitude value of E_y component of grating with double-layer trapezoidal structure. (a) TM; (b) TE

5 结 论

本文提出了一种双层梯形偏振无关合束光栅, 在具有宽带高衍射效率的同时, 还具有更低的近场电场增强, 并且具有较大的制备工艺容差, 可以应用于高能激光合束系统中。首先, 基于严格耦合波理论, 建立了一种以粒子群优化算法为核心的

偏振无关合束光栅设计模型, 通过随机生成特征波长实现效率特性寻优。然后, 对单层梯形和双层梯形两种结构的合束光栅进行设计与工艺容差分析。最后, 对两种结构的近场电场强度进行分析和计算。结果表明, 本文所设计的双层梯形结构偏振无关合束光栅在超过 51 nm 波长带宽范围内具有 99% 以上的平均衍射效率, 相比单层结构, 具有更低的近场电场增强和更大的工艺容差。

参考文献:

- [1] 游道明, 谭满清, 郭文涛, 等. 光纤光栅外腔激光器光学薄膜的研制[J]. 中国光学(中英文), 2023, 16(2): 447-457. YOU D M, TAN M Q, GUO W T, *et al.*. Design and fabrication of an optical film for fiber bragg grating external cavity diode lasers[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(2): 447-457. (in Chinese).

- [2] 田思聪, 佟存柱, 王立军, 等. 长春光机所高速垂直腔面发射激光器研究进展[J]. *中国光学(中英文)*, 2022, 15(5): 946-953.
TIAN S C, TONG C ZH, WANG L J, *et al.*. Research progress of high-speed vertical-cavity surface-emitting laser in CIOMP[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(5): 946-953. (in Chinese).
- [3] 吴玲, 娄岩, 侯欣宜, 等. 2- μm MOPA 结构全光纤激光器输出特性研究[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(2): 399-406.
WU L, LOU Y, HOU X Y, *et al.*. Output characteristics of an all-fiber laser with a 2- μm MOPA structure[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(2): 399-406. (in Chinese).
- [4] LIU J Q, ZENG L F, WANG X L, *et al.*. Optimization and demonstration of a bidirectional output linear-cavity fiber laser with a record high power of 2 \times 4 kW[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 169: 110031.
- [5] LI S CH, XU J M, LIANG J R, *et al.*. Multi-wavelength random fiber laser with a spectral-flexible characteristic[J]. *Photonics Research*, 2023, 11(2): 159-164.
- [6] HUANG B, WANG J Q, SHAO X P. Fiber-based techniques to suppress stimulated Brillouin scattering[J]. *Photonics*, 2023, 10(3): 282.
- [7] CHEN CH W, NGUYEN L V, WISAL K, *et al.*. Mitigating stimulated Brillouin scattering in multimode fibers with focused output via wavefront shaping[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 7343.
- [8] LIU ZH J, WANG Q, ZHANG W SH, *et al.*. Suppression of stimulated Brillouin scattering by multicolor alternating-polarization bundle light in inertial confinement fusion[J]. *Physics of Plasmas*, 2023, 30(3): 032703.
- [9] DAWSON J W, MESSERLY M J, BEACH R J, *et al.*. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power[J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 13240-13266.
- [10] DONG L, BALLATO J, KOLIS J. Revising power scaling limits of diffraction-limited fiber amplifiers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2024, 12865: 128650H.
- [11] COOK J, SINCORE A, VAIL N, *et al.*. 100 W, tunable in-band thulium fiber amplifier pumped by incoherently combined 1.9 μm fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2023, 31(18): 29245-29254.
- [12] GAO Q, LI ZH, ZHAO W, *et al.*. Spectral beam combining of fiber lasers with 32 channels[J]. *Optical Fiber Technology*, 2023, 78: 103311.
- [13] LI J Y, YANG ZH D, WANG Y Y, *et al.*. A novel non-confocal two-stage dish concentrating photovoltaic/thermal hybrid system utilizing spectral beam splitting technology: optical and thermal performance investigations[J]. *Renewable Energy*, 2023, 206: 609-622.
- [14] ZHANG Q S, WU ZH, CAI W, *et al.*. Spectral-combined beam characteristics based on external cavity feedback diode laser array[J]. *Optical Engineering*, 2023, 62(5): 056101.
- [15] YU X Y, YANG W J, SHEN CH Y, *et al.*. Polarization beam combining by fused silica subwavelength grating[J]. *Optics Communications*, 2024, 554: 130135.
- [16] HONEA E, AFZAL R S, SAVAGE-LEUCHS M, *et al.*. Advances in fiber laser spectral beam combining for power scaling[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9730: 97300Y.
- [17] 马毅, 颜宏, 彭万敬, 等. 基于多路窄线宽光纤激光的 9.6 kW 共孔径光谱合成光源[J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0901009.
MA Y, YAN H, PENG W J, *et al.*. 9.6 kW Common aperture spectral beam combination system based on multi-channel narrow-linewidth fiber lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(9): 0901009. (in Chinese).
- [18] 郑也, 杨依枫, 赵翔, 等. 高功率光纤激光光谱合成技术的研究进展[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201002.
ZHENG Y, YANG Y F, ZHAO X, *et al.*. Research progress on spectral beam combining technology of high-power fiber lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201002. (in Chinese).
- [19] 晋云霞, 韩显行, 曹红超, 等. 近红外强激光与反射式全息平面衍射光栅的交织发展[J]. *中国激光*, 2024, 51(11): 1101028.
JIN Y X, HAN Y X, CAO H CH, *et al.*. Intertwined development of near-infrared high-power lasers and reflective holographic surface-relief diffraction gratings[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(11): 1101028. (in Chinese).
- [20] HU A D, ZHOU CH H, CAO H CH, *et al.*. Polarization-independent wideband mixed metal dielectric reflective gratings[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(20): 4902-4906.
- [21] 申碧瑶, 曾理江, 李立峰, 等. 多层介质膜偏振无关光栅的研制[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(11): 111013.

- SHEN B Y, ZENG L J, LI L F, *et al.*. Fabrication of polarization independent gratings made on multilayer dielectric thin film substrates[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(11): 111013. (in Chinese).
- [22] CHEN J M, ZHANG Y B, WANG Y L, *et al.*. Polarization-independent broadband beam combining grating with over 98% measured diffraction efficiency from 1023 to 1080 nm[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(19): 4016-4019.
- [23] CAO H CH, 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.
- [24] CHO H J, KIM S J, KIM K D, *et al.*. Simply structured polarization-independent high efficiency multilayer dielectric gratings[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(28): 8446-8453.
- [25] 朱春霖, 焦庆斌, 谭鑫, 等. 应用于亚波长角向偏振金属光栅设计的快速收敛粒子群算法优化[J]. *光学学报*, 2019, 39(7): 0705002.
- ZHU CH L, JIAO Q B, TAN X, *et al.*. Fast convergent particle swarm optimization algorithm for subwavelength azimuthally polarized metal grating design[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(7): 0705002. (in Chinese).
- [26] FANG J ZH, LIU W B, CHEN L W, *et al.*. A survey of algorithms, applications and trends for particle swarm optimization[J]. *International Journal of Network Dynamics and Intelligence*, 2023, 2(1): 24-50.
- [27] NAYAK J, SWAPNAREKHA H, NAIK B, *et al.*. 25 Years of particle swarm optimization: flourishing voyage of two decades[J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2023, 30(3): 1663-1725.
- [28] 唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.
- TANG J F, GU P F, LIU X, *et al.*. *Modern Optical Thin Film Technology*[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. (in Chinese).
- [29] 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.
- [30] MAO X Y, LI CH M, QIU K Q, *et al.*. Design and fabrication of 1300-line/mm polarization-independent reflection gratings for spectral beam combining[J]. *Optics Communications*, 2020, 458: 124883.
- [31] HANG W, LI W H, ZHANG T, *et al.*. A large-size and polarization-independent two dimensional grating fabricated by scanned reactive-ion-beam etching[J]. *Nanophotonics*, 2022(11): 4649-4657.
- [32] HAN Y X, CAO H CH, KONG F Y, *et al.*. All- and mixed-dielectric grating for Nd: glass-based high-energy pulse compression[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2023, 11: e60.
- [33] MOHARAM M G, POMMET D A, GRANN E B, *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.
- [34] LALANNE P, JUREK M P. Computation of the near-field pattern with the coupled-wave method for transverse magnetic polarization[J]. *Journal of Modern Optics*, 1998, 45(7): 1357-1374.
- [35] GAO F H, WANG CH CH, TANG X G, *et al.*. Near field analysis for periodic diffractive gratings using Fourier modal method[J]. *Microelectronic Engineering*, 2006, 83(4-9): 1062-1066.

作者简介:



姜岩秀(1987—),女,吉林舒兰人,博士,副研究员,2015年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事变栅距全息光栅设计与制作技术研究。E-mail: jiangyanxiup@163.com