

基于伴随仿真的偏振复用超构透镜

刘永健 张飞 谢婷 蒲明博 赵泽宇 李雄 马晓亮 沈同圣 罗先刚

Polarization-multiplexed metalens enabled by adjoint optimization

LIU Yong-jian, ZHANG Fei, XIE Ting, PU Ming-bo, ZHAO Ze-yu, LI Xiong, MA Xiao-liang, SHEN Tong-sheng, LUO Xian-gang

引用本文:

刘永健, 张飞, 谢婷, 蒲明博, 赵泽宇, 李雄, 马晓亮, 沈同圣, 罗先刚. 基于伴随仿真的偏振复用超构透镜[J]. *中国光学*, 2021, 14(4): 754–763. doi: 10.37188/CO.2021–0035

LIU Yong-jian, ZHANG Fei, XIE Ting, PU Ming-bo, ZHAO Ze-yu, LI Xiong, MA Xiao-liang, SHEN Tong-sheng, LUO Xian-gang. Polarization-multiplexed metalens enabled by adjoint optimization[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(4): 754–763. doi: 10.37188/CO.2021–0035

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0035>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

分孔径红外偏振成像仪光学系统设计

Design of decentered aperture-divided optical system of infrared polarization imager

中国光学. 2018, 11(1): 92 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0092>

超颖表面原理与研究进展

The principle and research progress of metasurfaces

中国光学. 2017, 10(5): 523 <https://doi.org/10.3788/CO.20171005.0523>

基于电容分割的光子计数成像探测器读出阳极优化设计及仿真

Optimization and simulation for photon-counting imaging detector readout anode based on capacitance division

中国光学. 2019, 12(6): 1303 <https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1303>

傅立叶变换型线偏振干涉成像系统分析与设计

Analysis and design of Fourier transform polarization interference imaging system

中国光学. 2019, 12(3): 638 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0638>

太赫兹偏振测量系统及其应用

Polarization sensitive terahertz measurements and applications

中国光学. 2017, 10(1): 98 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0098>

海面太阳耀光背景下的偏振探测技术

Application of polarization detection technology under the background of sun flare on sea surface

中国光学. 2018, 11(2): 231 <https://doi.org/10.3788/CO.20181102.0231>

文章编号 2095-1531(2021)04-0754-10

基于伴随仿真的偏振复用超构透镜

刘永健^{1,2}, 张 飞¹, 谢 婷^{1,2}, 蒲明博^{1,2}, 赵泽宇^{1,2}, 李 雄^{1,2}, 马晓亮^{1,2,3}, 沈同圣³, 罗先刚^{1,2*}

(1. 中国科学院光电技术研究所 微细加工光学技术国家重点实验室, 四川 成都 610209;

2. 中国科学院大学 光电学院, 北京 100049;

3. 中国人民解放军军事科学院 国防科技创新研究院, 北京 100071)

摘要: 偏振成像技术在目标探测、生物医学等领域具有重要应用价值, 基于超构表面设计的偏振成像系统可以有效避免传统偏振成像系统存在的结构复杂、体积和质量大等问题, 有利于实现光学系统微型化、轻量化和集成化。然而, 传统超构表面设计方法忽略了超构表面结构的局部非周期性引起的近场电磁耦合, 在大数值孔径的条件下会严重影响器件的衍射效率。为了解决这个问题, 本文提出了一种基于边界优化的偏振复用超构透镜设计方法, 并由此设计了一种能对 x 和 y 偏振光独立调控的大数值孔径 (~ 0.94) 偏振成像超构透镜。在基于人工择优初始结构的优化设计中, 通过参数扫描、人工择优的传统设计方法得到超构透镜初始结构, 然后通过边界优化方法对超构透镜进行进一步的优化, 其衍射效率相比于优化前可以提高 20% 左右; 在基于均匀阵列初始结构的优化设计中, 通过 20 次左右的迭代, 超构透镜衍射效率可以达到 92% 左右。本文提出的优化设计方法可有效提高偏振复用超构表面器件效率, 并且能够简化多功能超构表面的设计步骤, 在偏振成像、光通信等领域具有应用前景。

关键词: 超构表面; 伴随优化; 边界优化; 偏振成像

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2021-0035

Polarization-multiplexed metalens enabled by adjoint optimization

LIU Yong-jian^{1,2}, ZHANG Fei¹, XIE Ting^{1,2}, PU Ming-bo^{1,2}, ZHAO Ze-yu^{1,2}, LI Xiong^{1,2},

MA Xiao-liang^{1,2,3}, SHEN Tong-sheng³, LUO Xian-gang^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Optical Technologies on Nano-Fabrication and Micro-Engineering,

Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2. School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. National Institute of Defense Technology Innovation, Academy of

Military Sciences PLA China, Beijing 100071, China)

* Corresponding author, E-mail: lxx@ioe.ac.cn

Abstract: Polarization imaging technology has important application value in target detection, biomedicine, and other fields, but traditional polarization imaging systems suffer from complex structures, large volume,

收稿日期: 2021-02-01; 修订日期: 2021-02-26

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (No. 2020M680153); 国家自然科学基金资助项目 (No. 61975210, No. U20A20217)

Supported by China Postdoctoral Science Foundation (No. 2020M680153); National Natural Science Foundation of China (No. 61975210, No. U20A20217)

and heavy weight. The polarization imaging system based on metasurfaces can avoid these problems effectively, which is conducive to the development of miniaturized, lighter and easily-integrated optical systems. However, the traditional design method for metasurfaces ignores near-field electromagnetic coupling caused by the local aperiodicity, which will seriously affect the diffraction efficiency of metalenses, especially if they have a large numerical aperture. To solve this problem, a general method for designing polarization-multiplexed metalenses based on boundary optimization is proposed in this paper, and a polarization imaging metalens with a large numerical aperture (~ 0.94) is designed, which can independently control x - and y -polarized light. For the optimization design with artificially optimal initial structures, the traditional design method of parameter scanning and manual selection was used to obtain the initial structure of the metalens, and then it was further optimized by the boundary optimization, resulting in about 20% improvement of the diffraction efficiency compared with that before optimization. For the optimization design with a uniform array as the initial structure, the diffraction efficiency can reach about 92% after about 20 iterations. The optimized design method proposed in this paper can effectively improve the efficiency of polarization-multiplexed metasurfaces, showing promising applications in polarization imaging, optical communication, and other fields.

Key words: metasurface; adjoint optimization; boundary optimization; polarization imaging

1 引言

偏振成像技术是成像技术与偏振分析技术的结合, 广泛应用于生物医学检测^[1]、水下目标探测^[2-3]和大气污染检测^[4]等重要领域。偏振成像系统利用各种偏振调控单元, 可以将入射光的各部分偏振分量进行分离, 然后利用探测器进行信息的收集, 获得各偏振分量的光强信息, 进而解析出入射光中的各部分偏振态信息。基于传统光学元件的偏振成像系统面临结构复杂、体积重量大等固有问题, 不利于光学系统朝着微型化、轻量化、集成化方向发展。

超构表面是一种由亚波长结构构成的低维电磁调控器件^[5-7], 其电磁特性通常由亚波长结构的几何形状与排列方式决定。其中, 每个单元结构都可以看作是一个调控单元, 通过对单元结构的精细设计, 超构表面能够在平面上灵活地操控光波的相位、振幅、偏振等参数, 为实现光学器件和系统的平面化、集成化提供了新的技术途径^[8-11]。由于其优异的光学性能和强大的电磁调控能力, 超构表面在光刻^[12-13]、光学成像^[14-16]、电磁伪装^[17-18]等领域均展现出巨大的应用潜力。近年来, 悬链线光学发展迅速, 已成为亚波长光学和亚波长电磁学的新研究方向^[19-21], 或将成为工程光学 2.0 的

重要部分^[22]。通过对介质悬链线结构中传输相位和几何相位的协同调控, 能够实现近完美的超广角连续波前调控, 由此实现了具有 178° 视场和衍射极限像质的平面单片式超构镜头^[23]。

通过传输相位和几何相位的复合调控, 单个超构表面器件可实现对任意正交偏振态相位和振幅的任意独立调控^[11, 24-26], 因此有能力突破传统偏振成像系统级联多个透镜和偏振片的设计范式^[11]。偏振复用超构表面已在光学全息显示^[27-28]、涡旋光束生成^[29-30]、偏振成像^[31]以及其它功能器件^[32]方面展现出较大的应用潜力。然而, 目前超构表面的优化设计主要采用参数扫描、人工择优的传统设计范式, 即首先根据周期性边界条件得到单元结构的电磁响应, 然后再按照一定规律排列单元结构, 最终完成超构表面器件的设计。这种设计方法面临耗时长、性能难以最优化等问题。以超构透镜为例, 当其数值孔径 (Numerical Aperture, NA) 较小时, 由于相位梯度较小, 其结构尺寸变化较为缓慢, 因此可以近似为周期性边界条件。然而, 当其 NA 较大时, 较大的相位梯度会使得临近的单元结构尺寸具有明显差异, 因此不能再近似为周期性边界条件, 导致器件性能与预期值存在较大差异^[33]。为了提高成像分辨力, 往往需要大 NA 超构透镜, 上述问题亟需解决。

为了实现高效率超构表面, 研究人员提出了

多种优化方法对超构表面器件内部的结构尺寸进行修正,比如遗传算法^[34]、粒子群优化算法^[35-36]等。然而这些算法单次迭代通常需要成百上千的种群数,存在计算量巨大、优化设计效率低等问题。伴随优化是一种基于梯度上升的优化方法,仅需要一次正向仿真和一次伴随仿真就能获得评价函数相对于整个参数优化空间的梯度信息,因此其计算量与参数维度无关。伴随优化可细分为拓扑优化和边界优化^[37]。通过拓扑优化得到的器件结构具有连续性、设计灵活性高等特点,已用于设计高效率偏折器件^[38]。拓扑优化的变量通常是针对介电常数分布,其初始解需要具有连续性,然后经过数百次迭代将连续介电常数分布逐步演化为具有实际意义的二值化分布,无规则的结构对修正加工误差提出了更高的要求。相反,边界优化直接优化器件结构边界(例如单元结构的长和宽),因此可以在已有二值化初始结构的基础上通过少量迭代进一步提升效率,且规则化的结构更易于修正工艺误差。目前,边界优化方法已用于优化设计偏振无关超构透镜^[39-40],为实现偏振成像超构透镜的优化设计提供了思路。

本文提出一种基于边界优化的大 NA、高效率偏振成像超构透镜的优化设计方法,并由此针对正交线偏振光设计了双焦点超构透镜,即分别将 x 和 y 偏振光聚焦到同一焦平面的不同位置,因此便可实现偏振成像^[31]。

2 边界优化方法原理及结构设计

2.1 边界优化方法原理

为了实现超构透镜聚焦效率的最大化,可以将焦斑电场强度最大化作为优化目标,将单元结构宽度作为优化参数。边界优化评价函数 F 可以定义为:

$$F = |E(x)|^2 = E(x)E^*(x) \quad (1)$$

其中, E 表示焦平面电场, $*$ 表示对复数求共轭。根据麦克斯韦方程组边界条件,该评价函数相对于纳米柱宽度的梯度可表达为^[37]:

$$\frac{\partial F}{\partial W} = j\omega(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \int_{\partial\Omega_m} E_{\parallel}^f \cdot E_{\parallel}^a + \frac{1}{\varepsilon_1 \varepsilon_2} D_{\perp}^f \cdot D_{\perp}^a ds \quad (2)$$

式中, ω 为角频率, ε_1 为纳米柱环境的介电常数,

ε_2 为纳米柱材料的介电常数, $\partial\Omega_m$ 为第 m 个亚波长结构的侧面, E_{\parallel}^f 和 E_{\parallel}^a 分别为正向场和伴随场中电场的切向分量, D_{\perp}^f 和 D_{\perp}^a 分别为正向场和伴随场中电位移矢量的法向分量。对于梯度上升优化,可以将公式 (2) 计算的梯度作为纳米柱边界上每一点沿其法向方向的变化量^[37]。为了保证优化后的结构仍然保持原有的基本形貌(比如长方形),并同时增加可调自由度,将结构某个面上梯度的平均值作为该面沿其法线方向的形变量。

图 1(a) 和 1(b) 分别展示了正向仿真和伴随仿真示意图。在正向仿真过程中,将平面波作为入射源,并从基底入射;在伴随仿真过程中,将 $\partial F/\partial E = E^*$ 作为入射源,并从结构上方入射。其中,伴随仿真的入射源可以直观地理解为将期望输出场的共轭场进行反向传输。由于期望的输出场是完美的汇聚球面波,因此伴随仿真的入射场则是从焦点处发散的球面波^[39]。

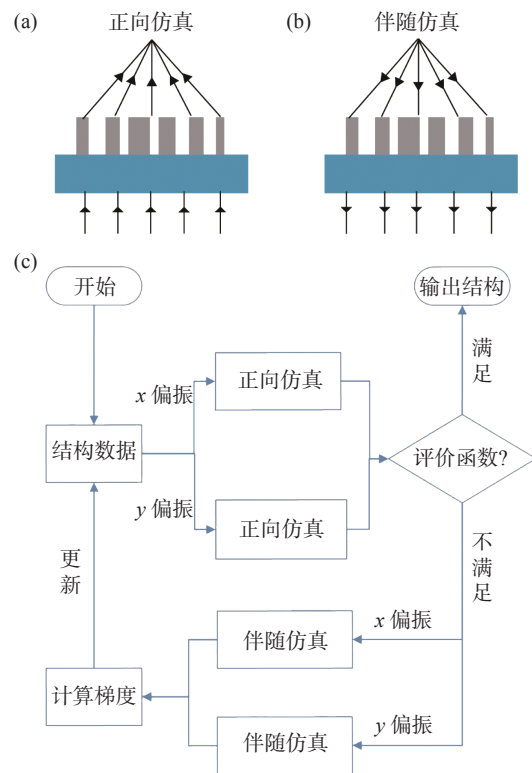


图 1 边界优化原理及流程示意图。(a) 正向仿真; (b) 伴随仿真; (c) 优化算法流程图

Fig. 1 Schematic diagram of boundary optimization principle and process. (a) Forward simulation. (b) Adjoint simulation. (c) Flow chart of the optimization algorithm

图 1(c) 为伴随优化步骤的流程图。为实现对 x 偏振光和 y 偏振光的独立调控,需对两种偏

振光分别进行正向仿真和伴随仿真,从而得到 x 偏振光和 y 偏振光分别对应的梯度信息。由于 x 偏振光对应的传输相位延迟对亚波长结构沿 x 方向的宽度更敏感,而 y 偏振光对应的传输相位延迟则对 y 方向的宽度更敏感,因此为了提高收敛速度,总变化梯度 G 可以设定为:

$$G = \frac{\eta_y G_x + \eta_x G_y}{\eta_x + \eta_y}, \quad (3)$$

式中, G_x 和 G_y 分别表示 x 偏振光和 y 偏振光入射的变化梯度, η_x 和 η_y 分别为两种偏振光对应的效率。通过公式 (3) 得到的梯度,可以使得每次更新迭代的梯度更倾向于效率较低者,从而保证器件对于 x 偏振光和 y 偏振光的性能基本一致。然后,利用计算得到的总梯度对纳米柱宽度进行更新,继续进行迭代计算,直到评价函数满足优化目标或者迭代次数达到设定值。另外,为了防止单次迭代形变过大,需要限定每次迭代形变量的平均值和最大值。

2.2 偏振成像超构透镜聚焦原理及结构设计

对于成像系统而言,聚焦透镜是其核心部件。入射光经过超构透镜调制后,会以汇聚球面波的形式出射。为了利用单个超构表面器件实现正交线偏振光的同时成像,需要利用亚波长结构对 x 和 y 偏振光产生不同的相位延迟,使 x 和 y 偏振光分别聚焦到同一焦平面的不同位置。超构透镜上每一点所需要的调制相位 φ 与该点所在坐标位置有如下关系:

$$\varphi = -\frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + f^2} - f \right), \quad (4)$$

其中, $\lambda=1550$ nm 为入射波长, f 表示焦距, (x, y) 表示位置坐标, (x_0, y_0) 表示焦点在焦平面上的位置坐标。通过对 x 和 y 偏振光设置不同的 (x_0, y_0) , 就可以将光斑聚焦到不同位置。

所设计的超构表面单元结构如图 2(a) 所示,其基底材料为氧化铝 (Al_2O_3), 纳米柱材料为晶硅 (Si)。单元结构周期 p 为 500 nm, 纳米柱高度 h 为 1400 nm, L 和 W 分别为纳米柱沿 x 和 y 方向的宽度。本文利用八阶传输相位实现了对 x 偏振光和 y 偏振光的独立调控,即需要通过参数扫描、人工择优遴选同时满足对 x 偏振光和 y 偏振光均能实现 0 到 2π 相位覆盖的 64 个单元结构,如

图 2(b) 所示。仿真结果表明,优化的 64 个单元结构可较好地满足 0 到 2π 相位覆盖要求,其中平均透射振幅为 0.9356。然后,基于 64 个单元结构的传输相位和公式 (4) 便可得到超构透镜的初始结构。

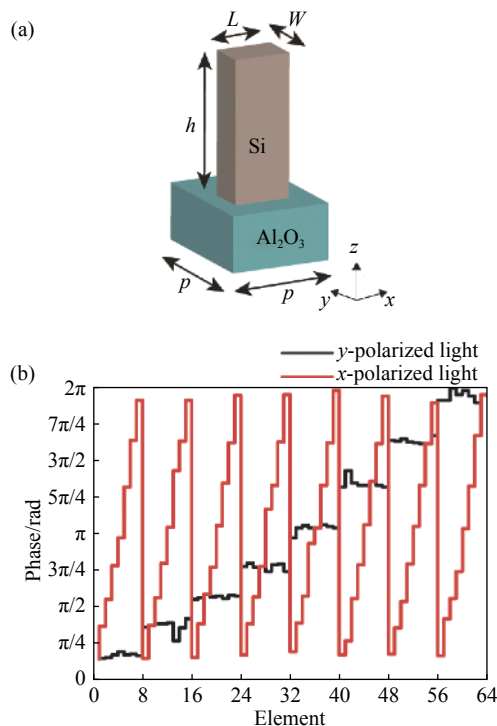


图 2 (a) 单元结构示意图; (b) 64 个单元结构的传输相位响应

Fig. 2 (a) Schematic diagram of a unit cell; (b) propagation phase responses of 64 unit cells

3 基于人工择优初始结构的优化设计

通过上述方法,设计了一个焦距为 5 μm 、口径为 30 μm 的柱面超构透镜。其中, x 和 y 偏振光对应的焦点坐标分别为 (5 μm , 0 μm) 和 (-5 μm , 0 μm), 等效 NA 约为 0.94。由于焦点不在超构透镜中心轴上,因此等效 NA 定义如下:

$$NA = n \cdot \sin \left[\frac{1}{2} \left(\arctan \frac{R+r_0}{f} + \arctan \frac{R-r_0}{f} \right) \right], \quad (5)$$

式中, n 为超构透镜与焦点之间介质的折射率, r_0 为焦点到超构透镜中心轴的距离, R 为超构透镜半径, f 为焦距。

本文利用时域有限差分 (FDTD) 计算超构透

镜的电场分布和效率。图 3(a)~3(b) 展示了优化前后超构透镜沿 x 方向的 60 个纳米柱的长度和宽度变化情况。其中 L_0 和 W_0 分别表示初始结构沿 x 方向和 y 方向的宽度, L_1 和 W_1 则表示优化后的宽度。为了更加直观地展示优化前后结构变化情况, 图 3(c) 给出了局部几个纳米柱的变化情况, 其中红色和深绿色分别代表优化前后的结构, 而浅绿色为两组结构重叠的部分。可以看到, 优化后的结构参数与优化前明显不同, 并且优化的边长不是对称变化的。这是由于为了给超构表面单元结构设计提供更高的自由度, 所以对纳米柱的 4 条边长给予独立的形变。通过这样的调控方式, 还可以使纳米柱中心发生平移, 因此能够实现更高的效率。

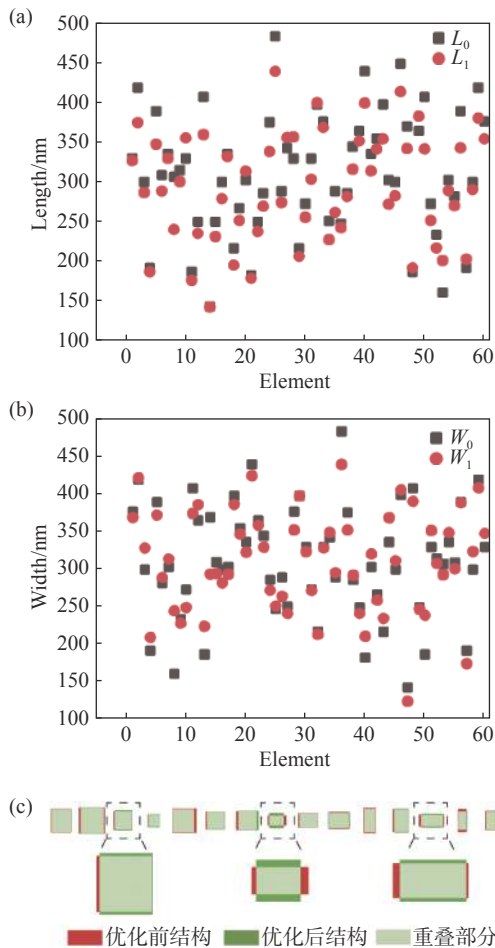


图 3 优化前后纳米柱沿 (a) x 方向和 (b) y 方向的宽度变化; (c) 部分纳米柱优化前后对比图

Fig. 3 Width changes of nanofins along the (a) x -direction and (b) y -direction before and after optimization. (c) Comparison of part of nanofins before and after optimization

图 4 展示了两种偏振态的入射光在 xz 平面的光强分布图, 其中图 4(a) 和 4(b) 分别为优化前 x 和 y 偏振光入射下的光强分布, 图 4(c) 和 4(d) 分别为优化后 x 和 y 偏振光入射下的光强分布, 图 4(e) 和 4(f) 分别为优化前 x 和 y 偏振光入射下焦点处的归一化强度图, 图 4(g) 和 4(h) 分别为优化后 x 和 y 偏振光入射下焦点处归一化强度图。从这些结果中可以看到, 优化后的焦斑旁瓣明显被抑制, 电场强度最大值也得到显著提高。为了更好地对优化前后的效果进行对比, 给出了优化前后的相位分布图, 如图 5 所示。可以看出, 由于周期性边界条件的破坏使得优化前的相位分布比较杂乱, 优化后两种偏振光入射下的相位分布均变得更加平滑和均匀, 波前畸变得到了很好的校正。

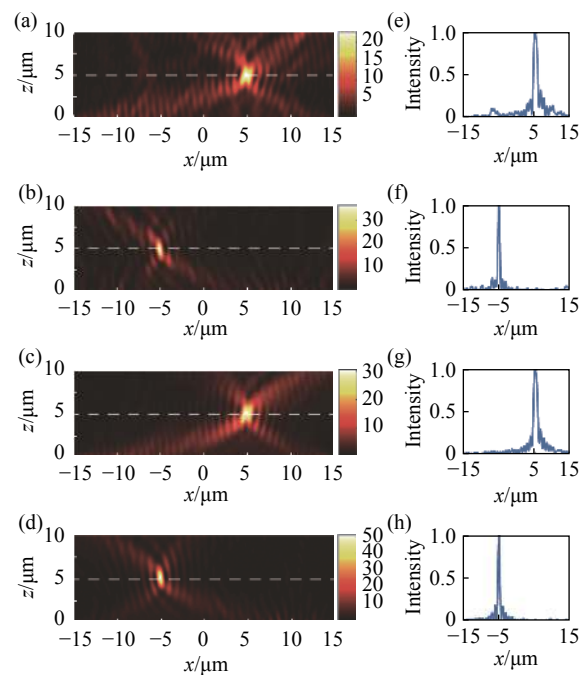


图 4 优化前 (a) x 偏振光和 (b) y 偏振光入射下的 xz 平面光强分布; 优化后 (c) x 偏振光和 (d) y 偏振光入射下的 xz 平面光强分布; (e)~(h) 沿着 (a)~(d) 中虚线绘制的归一化强度分布

Fig. 4 Intensity distributions in the xz plane before optimization under the illumination of (a) x -polarized light and (b) y -polarized light. Intensity distributions in the xz plane after optimization under the illumination of (c) x -polarized light and (d) y -polarized light. (e)~(h) Normalized intensity profiles along the dashed lines are shown in (a)~(d)

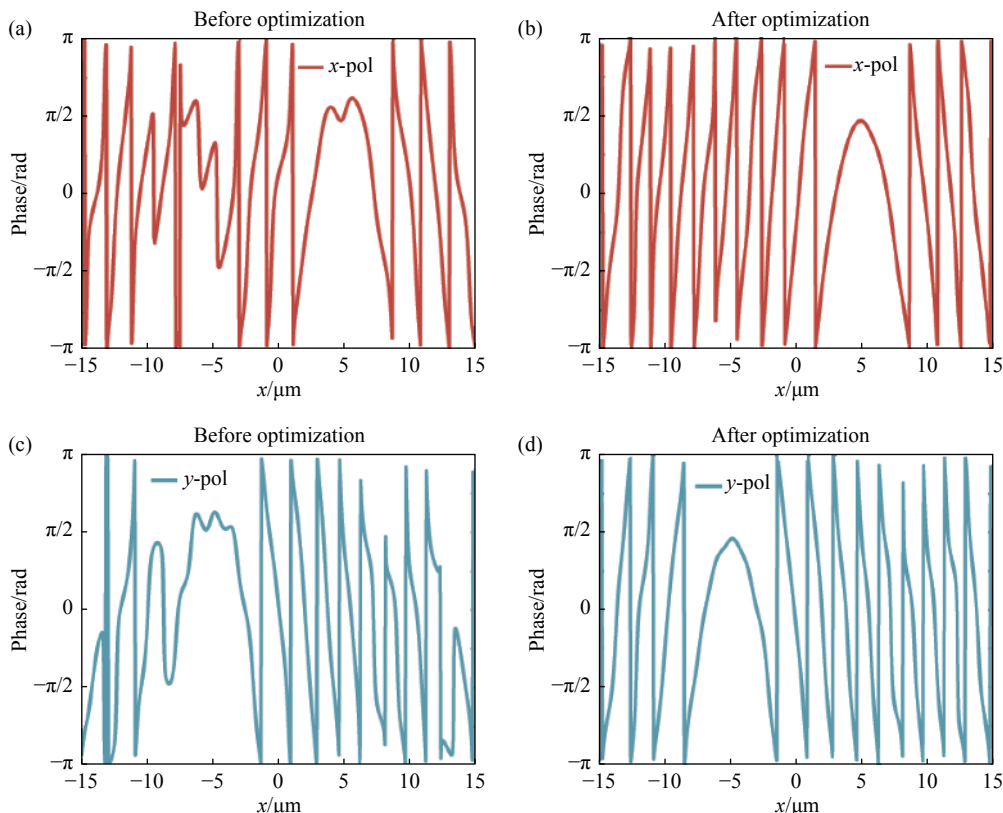


图 5 x 偏振光入射时, (a) 优化前和 (b) 优化后的相位分布; y 偏振光入射时, (c) 优化前和 (d) 优化后的相位分布

Fig. 5 The phase distributions (a) before and (b) after optimization for the incident of x -polarized light. The phase distributions (c) before and (d) after optimization for the incident of y -polarized light

在仿真中设置迭代次数为 100 次, 随着迭代次数的增加, 绝对效率与衍射效率都有了明显提高, 如图 6(a) 和 6(b) 所示。 x 偏振光对应的绝对效率由 $\sim 51.66\%$ 增加到了 $\sim 68.69\%$, 相比于优化前提高了 $\sim 32.97\%$; y 偏振光对应的绝对效率由 $\sim 48.22\%$ 增加到 $\sim 64.65\%$, 相比于优化前提高了 $\sim 34.07\%$ 。 x 偏振光对应的衍射效率由 $\sim 67.76\%$ 增加到 $\sim 80.36\%$, 相比于优化前提高了 $\sim 18.60\%$;

y 偏振光对应的衍射效率由 $\sim 72.95\%$ 增加到 $\sim 88.25\%$, 相比于优化前提高了 $\sim 20.97\%$ 。其中, 绝对效率(衍射效率)定义为 3 倍半高全宽范围内的能量与入射总能量(焦平面总能量)之比, 然后归一化理想相位分布对应的理论值。所提高的百分比定义为优化前后的效率之差与优化前的效率之比。

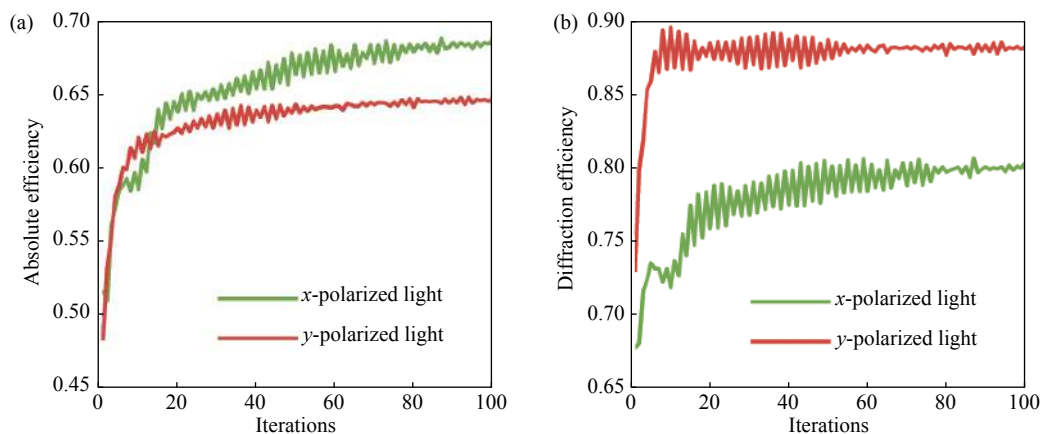


图 6 优化过程中超构透镜的 (a) 绝对效率和 (b) 衍射效率

Fig. 6 (a) Absolute efficiency and (b) diffraction efficiency of the optimized metatens during optimization

4 基于均匀阵列初始结构的优化设计

上述超构表面器件的设计需要人工优化单元结构, 然后再用边界优化方法对结构进行优化, 但优化单元结构(尤其是用于偏振复用的单元结构)非常耗时, 且需要大量的经验。事实上, 利用边界优化方法对均匀阵列的初始结构进行优化也可以使超构表面器件达到较高的衍射效率。对此本文也进行了仿真验证, 使用均匀正方形纳米柱作为初始结构进行了 5 组仿真验证, 其宽度分别为 210、240、270、300 和 330 nm。通过多次迭代, 都达到了很好的效果, 其绝对效率与衍射效率如图 7 所示。其中图 7(a) 和 7(b) 分别为 x 和 y 偏振光入射时的绝对效率, 图 7(c) 和 7(d) 分别为

x 和 y 偏振光入射时的衍射效率。在迭代次数为 20~40 次时, 两种偏振光对应的绝对效率与衍射效率基本收敛。并且可以看到, 两种偏振光对应的衍射效率为 85% 左右, 绝对效率为 73% 左右。与先寻找单元结构的设计方法相比, 该设计过程省去了人工优化单元结构的繁琐步骤, 并且可以获得更好的效果。这是因为在基于人工择优初始结构的优化设计中, 需要先给出一组满足特定条件的初始结构(通常通过参数扫描、人工择优得到), 导致它停留在一个有限的局部设计参数空间, 从而限制了边界优化对提高效率的实质性作用^[41]。而基于均匀阵列初始结构的优化设计可能会减少这种情况的影响, 从而获得更好的优化效果。

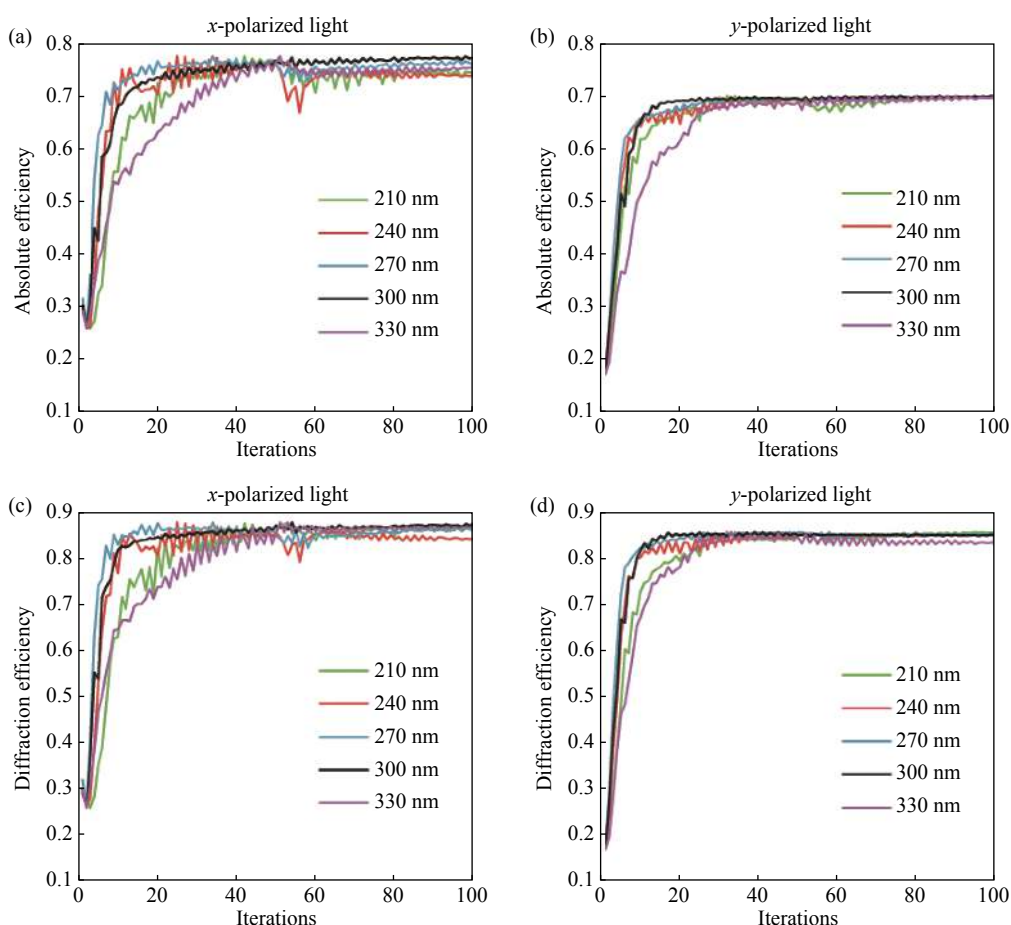


图 7 (a) x 偏振光和 (b) y 偏振光入射下, 不同初始结构的超构透镜的绝对效率; (c) x 偏振光和 (d) y 偏振光入射下, 不同初始结构的超构透镜的衍射效率

Fig. 7 Absolute efficiency of five metalenses with different initial structures during optimization under illumination of (a) x -polarized light and (b) y -polarized light. Diffraction efficiency of five metalenses with different initial structures during optimization under illumination of (c) x -polarized light and (d) y -polarized light

为了更好地说明基于均匀阵列初始结构优化设计的优越性, 进一步使用该方法设计了一个二维聚焦超构透镜。考虑到计算量的问题, 超构透镜尺寸设计为 $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$, 焦距为 $5\ \mu\text{m}$ 。 x 和 y 偏振光对应的焦点坐标分别为 $(2.5\ \mu\text{m}, 0\ \mu\text{m})$ 和 $(-2.5\ \mu\text{m}, 0\ \mu\text{m})$, 等效 NA 约为 0.89。随后, 将边长为 $270\ \text{nm}$ 正方形纳米柱阵列作为超构透镜

初始结构, 迭代次数仍设为 100 次。仿真结果如图 8 所示, 其中, 图 8(a) 和 8(b) 分别为绝对效率和衍射效率, 图 8(c) 和 8(d) 分别为 x 和 y 偏振光入射下焦平面上的光强分布。从仿真结果可以看出, 迭代 20 次左右之后基本收敛, 最终超构透镜的衍射效率为 92% 左右, 绝对效率为 82% 左右。

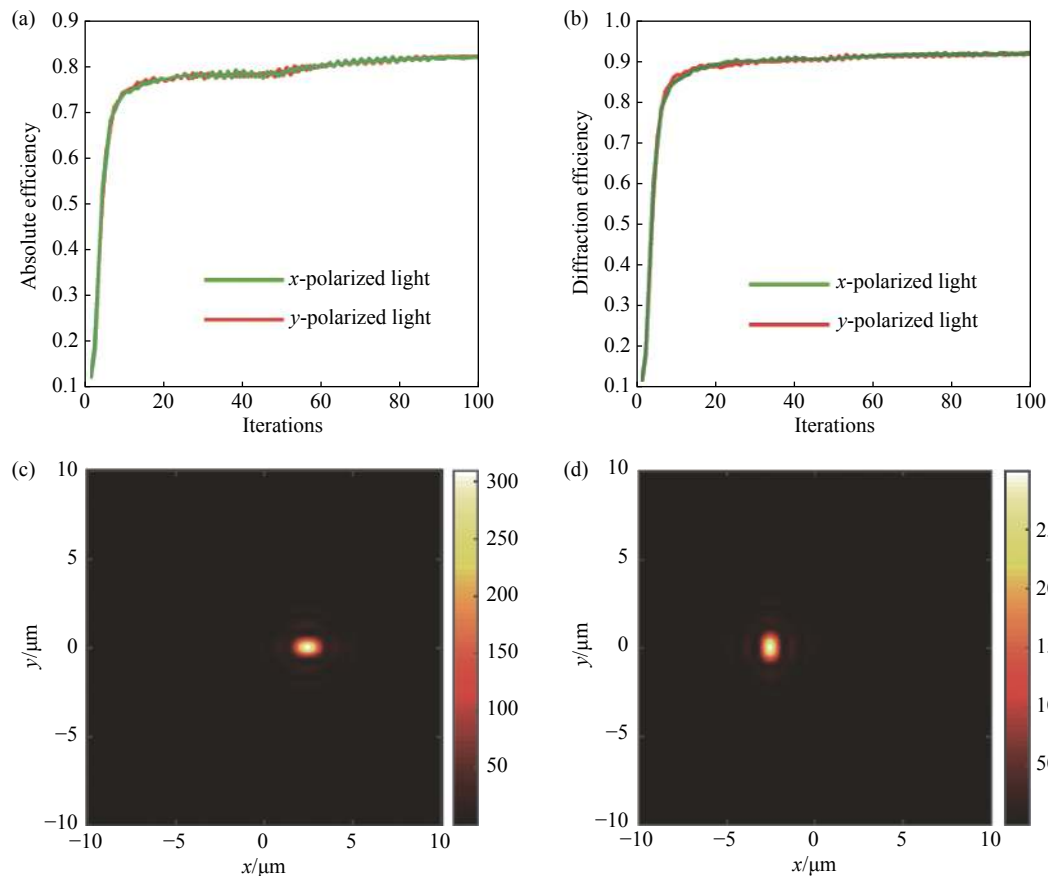


图 8 优化过程中超构透镜的 (a) 绝对效率和 (b) 衍射效率; (c) x 偏振光和 (d) y 偏振光入射下焦平面光强分布

Fig. 8 (a) Absolute efficiency and (b) diffraction efficiency of the optimized metalens during optimization. Intensity distributions in the focal plane under illumination of (c) x -polarized light and (d) y -polarized light

5 结 论

本文提出了一种基于伴随仿真和边界优化的多功能超构透镜的设计方法, 并由此设计了可以实现 x 和 y 正交偏振光独立调控的大数值孔径、高效率的偏振成像超构透镜。该透镜可以将 x 和 y 偏振光分别聚焦到不同位置, 其等效数值孔径约为 0.94。在基于人工择优初始结构优化设

计中, x 和 y 偏振光的衍射效率分别为 80.36% 和 88.25% 左右, 相比于优化前提高了 20% 左右。基于均匀阵列初始结构优化设计的二维聚焦超构透镜的等效数值孔径约为 0.89, x 和 y 偏振光对应的衍射效率为 92% 左右。综上所述, 本文设计的大数值孔径、高效率超构表面器件在偏振成像、光通信等领域具有较大的应用潜力, 同时为设计多波长、多功能集成以及其它复杂条件下的高效率超构表面器件提供了新的思路。

参考文献:

- [1] SALOMATINA-MOTTS E, NEEL V A, YAROSLAVSKAYA A N. Multimodal polarization system for imaging skin

- cancer[J]. *Optics and Spectroscopy*, 2009, 107(6): 884-890.
- [2] DUBREUIL M, DELROT P, LEONARD I, *et al.*. Exploring underwater target detection by imaging polarimetry and correlation techniques[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(5): 997-1005.
- [3] HUANG B J, LIU T G, HU H F, *et al.*. Underwater image recovery considering polarization effects of objects[J]. *Optics Express*, 2016, 24(9): 9826-9838.
- [4] DEUZÉ J L, BRÉON F M, DEVAUX C, *et al.*. Remote sensing of aerosols over land surfaces from POLDER-ADEOS-1 polarized measurements[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(D5): 4913-4926.
- [5] YU N F, 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.
- [6] LUO X G. Principles of electromagnetic waves in metasurfaces[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015, 58(9): 594201.
- [7] LUO X G. Subwavelength artificial structures: opening a new era for engineering optics[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(4): 1804680.
- [8] YU N F, CAPASSO F. Flat optics with designer metasurfaces[J]. *Nature Materials*, 2014, 13(2): 139-150.
- [9] ZHANG F, XIE X, PU M B, *et al.*. Multistate switching of photonic angular momentum coupling in phase-change metadevices[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(39): 1908194.
- [10] 张飞, 郭迎辉, 蒲明博, 等. 基于非对称光子自旋—轨道相互作用的超构表面[J]. *光电工程*, 2020, 47(10): 200366.
ZHANG F, GUO Y H, PU M B, *et al.*. Metasurfaces enabled by asymmetric photonic spin-orbit interactions[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(10): 200366. (in Chinese)
- [11] ZHANG F, PU M B, LI X, *et al.*. All-dielectric metasurfaces for simultaneous giant circular asymmetric transmission and wavefront shaping based on asymmetric photonic spin-orbit interactions[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(47): 1704295.
- [12] LUO X G, ISHIHARA T. Surface plasmon resonant interference nanolithography technique[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(23): 4780-4782.
- [13] GAO P, YAO N, WANG CH T, *et al.*. Enhancing aspect profile of half-pitch 32 nm and 22 nm lithography with plasmonic cavity lens[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(9): 093110.
- [14] DOU K H, XIE X, PU M B, *et al.*. Off-axis multi-wavelength dispersion controlling metalens for multi-color imaging[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2020, 3(4): 190005.
- [15] HUO P CH, ZHANG CH, ZHU W Q, *et al.*. Photonic spin-multiplexing metasurface for switchable spiral phase contrast imaging[J]. *Nano Letters*, 2020, 20(4): 2791-2798.
- [16] SCHLICKRIEDE C, KRUK S S, WANG L, *et al.*. Nonlinear imaging with all-dielectric metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2020, 20(6): 4370-4376.
- [17] MA X L, PU M B, LI X, *et al.*. All-metallic wide-angle metasurfaces for multifunctional polarization manipulation[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2019, 2(3): 180023.
- [18] GHOSH S K, DAS S, BHATTACHARYYA S. Transmittive-type triple-band linear to circular polarization conversion in THz region using graphene-based metasurface[J]. *Optics Communications*, 2021, 480: 126480.
- [19] PU M B, LI X, MA X L, *et al.*. Catenary optics for achromatic generation of perfect optical angular momentum[J]. *Science Advances*, 2015, 1(9): e1500396.
- [20] LUO X G. *Catenary Optics*[M]. Singapore: Springer, 2019.
- [21] LUO X G, PU M B, GUO Y H, *et al.*. Catenary functions meet electromagnetic waves: opportunities and promises[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(23): 2001194.
- [22] LUO X G. *Engineering Optics 2.0: A Revolution in Optical Theories, Materials, Devices and Systems*[M]. Singapore: Springer, 2019.
- [23] ZHANG F, PU M B, LI X, *et al.*. Extreme-angle silicon infrared optics enabled by streamlined surfaces[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(11): 2008157.
- [24] ZHANG F, PU M B, LUO J, *et al.*. Symmetry breaking of photonic spin-orbit interactions in metasurfaces[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(3): 319-325.
- [25] BALTHASAR MUELLER J P, RUBIN N A, DEVLIN R C, *et al.*. Metasurface polarization optics: independent phase control of arbitrary orthogonal states of polarization[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(11): 113901.

- [26] FAN Q B, LIU M Z, ZHANG CH, *et al.*. Independent amplitude control of arbitrary orthogonal states of polarization via dielectric metasurfaces[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(26): 267402.
- [27] ZHOU H Q, SAIN B, WANG Y T, *et al.*. Polarization-encrypted orbital angular momentum multiplexed metasurface holography[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(5): 5553-5559.
- [28] ZHANG CH, DIVITT S, FAN Q B, *et al.*. Low-loss metasurface optics down to the deep ultraviolet region[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 55.
- [29] YAN CH, LI X, PU M B, *et al.*. Generation of polarization-sensitive modulated optical vortices with all-dielectric metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(3): 628-633.
- [30] ZHANG S, HUO P CH, ZHU W Q, *et al.*. Broadband detection of multiple spin and orbital angular momenta via dielectric metasurface[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(9): 2000062.
- [31] YAN CH, LI X, PU M B, *et al.*. Midinfrared real-time polarization imaging with all-dielectric metasurfaces[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(16): 161904.
- [32] FAN Q B, ZHU W Q, LIANG Y ZH, *et al.*. Broadband generation of photonic spin-controlled arbitrary accelerating light beams in the visible[J]. *Nano Letters*, 2019, 19(2): 1158-1165.
- [33] ARBABI A, ARBABI E, MANSOUREE M, *et al.*. Increasing efficiency of high numerical aperture metasurfaces using the grating averaging technique[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 7124.
- [34] LIU CH X, MAIER S A, LI G X. Genetic-algorithm-aided meta-atom multiplication for improved absorption and coloration in nanophotonics[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(7): 1716-1722.
- [35] LI Y, HONG M H. Diffractive efficiency optimization in metasurface design via electromagnetic coupling compensation[J]. *Materials*, 2019, 12(7): 1005.
- [36] SONG CH T, PAN L ZH, JIAO Y H, *et al.*. A high-performance transmitarray antenna with thin metasurface for 5g communication based on PSO (Particle Swarm Optimization)[J]. *Sensors*, 2020, 20(16): 4460.
- [37] MILLER O D. Photonic design: from fundamental solar cell physics to computational inverse design[D]. Berkeley: University of California at Berkeley, 2012.
- [38] YANG J J, SELL D, FAN J A. Freeform metagratings based on complex light scattering dynamics for extreme, high efficiency beam steering[J]. *Annalen der Physik*, 2018, 530(1): 1700302.
- [39] MANSOUREE M, KWON H, ARBABI E, *et al.*. Multifunctional 2.5D metastructures enabled by adjoint optimization[J]. *Optica*, 2020, 7(1): 77-84.
- [40] MANSOUREE M, MCCLUNG A, SAMUDRALA S, *et al.*. Large-scale parametrized metasurface design using adjoint optimization[J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(2): 455-463.
- [41] YANG J J, FAN J A. Topology-optimized metasurfaces: impact of initial geometric layout[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(16): 3161-3164.

作者简介:



刘永健(1995—),男,山东烟台人,2018年于山东科技大学获得学士学位,现为中国科学院光电技术研究所硕士研究生,主要从事微纳器件的设计与制造方面的研究。E-mail: yongjianliu1995@163.com



罗先刚(1970—),男,四川苍溪人,博士,研究员,博士生导师,中国工程院院士,2001年于中国科学院获得博士学位,主要研究方向包括微纳光学、表面等离子体光子学、亚波长电磁学和悬链线光学。E-mail: lxx@ioe.ac.cn