

介质超透镜自动设计技术及软件研究

巴鹏飞^{1,2}, 李青芝², 伍景军², 陈骏², 唐烽^{2**}, 陈善俊^{1*}, 叶鑫², 郑万国²¹长江大学物理与光电工程学院, 湖北 荆州 434023;²中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 由于超透镜在光场相位调控、多功能复合、微纳集成等方面具备传统透镜无法比拟的优势,故其在许多领域具备极大的应用潜力。但是,超透镜的设计需要专业人员具备专业知识及丰富的经验,这使得非专业人员无法快速掌握,为此阻碍了超透镜的规模化制备。通过 MATLAB 和时域有限差分法(FDTD)的混合编程,研究了不依赖于预设物理模型的超透镜的设计过程,实现了介质超透镜的自动化设计。通过在 MATLAB 编写的软件界面上输入所需的超透镜参数,后台调用 FDTD 设计仿真程序来构建纳米结构,可以计算出结构的尺寸与相位和透过率的关系。根据所需的相位分布来构建超透镜,最后对超透镜进行数值模拟仿真及性能评估。所述的设计流程及软件能极大地方便非专业人员进行超透镜的设计。

关键词 光学设计; 超透镜; 设计软件; 压印材料; 自动化设计

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0722001

Automatic Design Technology and Software of Dielectric Metalens

Ba Pengfei^{1,2}, Li Qingzhi², Wu Jingjun², Chen Jun², Tang Feng^{2**}, Chen Shanjun^{1*},
Ye Xin², Zheng Wanguo²¹School of Physics and Optoelectronic Engineering, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China;²Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract Because of its incomparable advantages in light field phase control, multifunctional composite, micro-nano integration, and other aspects, metalens has great application potential in many fields. However, the design of metalens requires professional knowledge and rich experience, which makes it difficult for non-professionals to master it quickly, thus hinders the large-scale preparation of hyperlens. By means of MATLAB and finite difference time domain (FDTD) hybrid programming, the design process of dielectric metalens independent of preset physical model is studied, and the automatic design of dielectric metalens is realized. By inputting the required metalens parameters on the software interface written by MATLAB and calling FDTD design simulation program in the background to build the nanostructure, the relationship among the size of the structure, phase, and transmittance can be calculated. According to the required phase distribution, the superlens is constructed and its performance is evaluated by numerical simulation. The design process and software can greatly facilitate the design of metalens by non-specialists.

Key words optical design; metalenses; design software; imprint materials; automatic design

1 引言

超透镜是基于超表面原理设计的平面透镜,可

以将光学元件的厚度压缩到亚波长水平并实现对相位、振幅等的调控,而且在很多方面具备替代传统透镜的潜力。基于人为设计且具有各种奇异电磁特性

收稿日期: 2021-07-28; 修回日期: 2021-10-06; 录用日期: 2021-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(61705204,61705206)、中国工程物理研究院创新与发展基金(CX20200021)

通信作者: *csj@yangtzeu.edu.cn; **tangfengf3@caep.cn

的超透镜已经在传感^[1-3]、太阳能电池^[4-5]和成像全息^[6-7]等领域得到较多的应用。目前,几种典型的超透镜主要包括金属纳米天线谐振型超透镜、惠更斯型超透镜和 Pancharatnam-Berry (PB) 相位型超透镜等。通过相位排布可设计出具备不同功能的超透镜,衍生出各种新奇的多功能超透镜。例如消色差超透镜^[3],可用来消除聚焦透镜所产生的色差^[8-11];全息超透镜,应用自定义编码方案建立光谱选择性超透镜以实现全息成像^[9,12-14];多焦点聚焦透镜,利用类光学全息法设计超表面的相位调制分布^[15-18]。超透镜具有优异的性能及灵活的设计自由度,使其在材料科学和精密设备微型化等应用中具有广泛的应用前景。

虽然超透镜具有广泛的应用前景,但是其设计需要专业的知识储备及丰富的经验,超透镜主要基于电磁谐振、费马原理和 PB 相位调控原理等进行设计。在构建 PB 相位型超透镜的过程中,需要理解庞加莱球上电磁波的偏振态与几何相位的关系^[19-20],再利用琼斯矩阵来描述电磁波在超表面中的传输过程和几何相位的产生,该过程较为复杂。惠更斯型超透镜则是基于其纳米结构内部的电磁振荡效应^[21-23]进行设计的,为此需要设计者对电动力学和固体物理等专业知识有比较深刻的认识。鉴于该问题,急需超透镜自动化设计的方法及软件,以供非专业人员使用,从而促进超透镜的应用和发展。

本文基于 MATLAB 和时域有限差分(FDTD)法的混合编程方法,研究并实现了介质超透镜的自动化设计。首先明确了纳米结构单元及自动化设计软件的工作流程,研究了纳米结构尺寸与相位和透过率的关系,并通过相位调制函数构建了超透镜结构;最后通过超透镜仿真结果得到光束聚焦下的视场、电场分布、聚焦深度和聚焦效率等光学特性。该设计流程及软件可为设计人员提供极大的便捷,缩短设计与加工环节的周期,促进工业化生产。

2 原理与方法

光与物质相互作用的根本物理机制在于材料内部的电荷或感应电荷在外加电磁场驱动下的运动学过程。如果结构的尺寸缩小到亚波长量级,那么纳米结构的边界将对其内部电荷的运动过程起到明显的调制作用,从而实现可调控的等效介电常数或者等效磁导率,所以人们可以通过设计纳米结构的形状、边界和尺寸等参数来实现自然界中不存在的材

料折射率和磁导率。

2.1 构建结构单元

单周期的纳米结构单元如图 1(a)所示,纳米结构单元的半径为 R ,高度为 H ,结构周期为 P ,材料的折射率为 n 。由不同尺寸的超原子阵列组成孔径为 D 的超透镜,如图 1(b)所示。由于本文主要采用纳米压印加工超透镜^[24],可作为纳米压印胶的高分子材料有聚二甲基硅氧烷(PDMS)、环氧树脂和丙烯酸酯等,而本文选择广泛应用的有机高分子硅化物 PDMS^[25],当入射光波长为 632 nm 时,其折射率为 1.43。纳米结构的模拟区域由 x 轴和 y 轴方向的周期性边界,以及 z 轴方向的完美匹配层包围。所有结构、源和探测器都放在该模拟区域中。

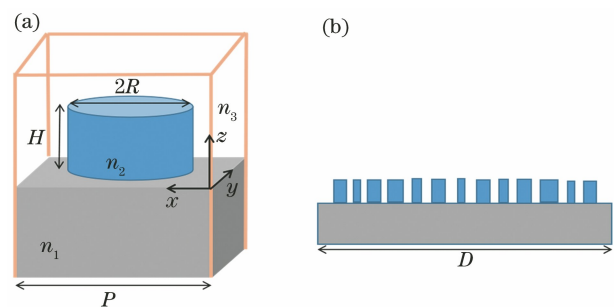


图 1 超透镜结构示意图。(a)单周期纳米结构;
(b)口径为 D 的超透镜侧视图

Fig. 1 Schematic of metalenses structure. (a) Single-period nanostructure; (b) side view of metalenses with aperture of D

2.2 仿真方法

超透镜的仿真流程如图 2 所示,目标是设计人员只需要输入所需的各项参数,软件就可以自动构建超透镜结构。软件会自动计算出纳米结构半径与相位的关系,根据纳米结构的相位周期性,只需要选择能够覆盖 $0 \sim 2\pi$ 相位的 8 个纳米结构就能实现纳米阵列的排布,最后构建整个超透镜并进行性能仿真,最终输出所设计超透镜的仿真结果。本文选用 MATLAB 软件编写可实现超透镜仿真的可执行界面化,通过 MATLAB 与 FDTD 软件可生成超透镜结构的可执行代码,生成超透镜后进行仿真,仿真采用 FDTD 算法。

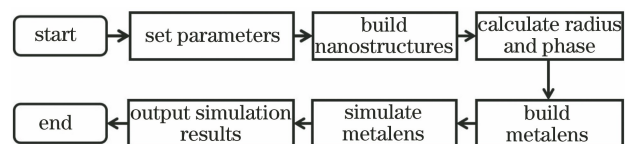


图 2 超透镜设计仿真软件的流程图

Fig. 2 Flowchart of metalenses design simulation software

3 超透镜设计与仿真

针对纳米压印类高分子材料,本文研究了不依赖于预设物理模型的超透镜设计过程,对比了基于等效介质理论和传统纳米结构仿真得到的相位和透射率与纳米结构半径的关系^[26]。基于等效介质理论构造的超表面则是利用两种或多种介质(通常有一种是高折射率介质)在单元结构内的比例差,实现结构对电磁折射率的调制^[27-29]。当纳米结构的高度设置为一个定值时,可以通过计算周期内等效介质的折射率来计算出半径与相位的关系,设置纳米结构半径的大小,最后构成超透镜阵列。

传输相位型超透镜通过电磁波在传输过程中产生的光程差来实现相位调控^[30-31]。假定介质的折射率为 n , 波长为 λ 的电磁波在该均匀介质中传输一定距离 d , 则电磁波积累的传输相位可表示为

$$\varphi = nk_0 d, \quad (1)$$

式中: $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为自由空间波矢的大小, 可以通过改变 d 或 n 来调节相位。根据(1)式可以实现基于折射率的空间调制来构建传输相位型超表面。利用不同占空比的纳米结构可以使等效折射率存在差异, 能够实现传输相位的调节, 从而设计超透镜。对于这种方式设计的超透镜, 当其等效折射率较大时, 可以大大降低超透镜的厚度。源代码设计中, 基底和纳米结构的折射率被设置为同一值。超透镜不同位置处的相位不同, 所以不同周期内等效折射率也有差异, 故纳米结构的尺寸不同, 纳米结构的半径与相位的关系如图 3 所示。因此, 本文通过求解等效折射率来控制其相位排布。一阶等效折射率公式为

$$n = \sqrt{(1 - \eta)n_2^2 + \eta n_1^2}, \quad (2)$$

式中: η 为占空比因子; n_1 为基底折射率; n_2 为包覆层的介质折射率(这里设置空气折射率为 1)。根据图 1 可输入的超透镜参数, 将(2)式写成以下形式

$$n = \sqrt{[\pi R^2 n_1^2 + (p^2 - \pi R^2) n_2^2] / p^2}. \quad (3)$$

由(1)式和(3)式可以计算出相位 φ 与半径 R 的关系, 但是等效介质理论只有在材料折射率低、纳米结构边界效应不明显时才适用, 所以本文对等效介质理论和传统超原子仿真方法的仿真结果进行对比。纳米结构的周期为入射波长的 $1/2$, 高度为 2106 nm, 材料折射率为 1.45, 入射光波长为 623 nm。对选取的纳米结构参数进行仿真, 得到 FDTD 仿真和等效介质理论计算的透射率和相位与半径的关系, 如图 3 所示。

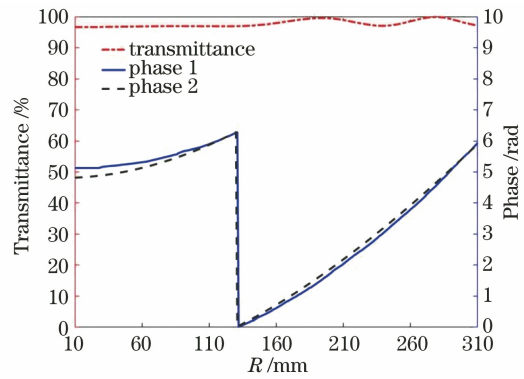


图 3 单元结构的尺寸与相位和透射率的关系
Fig. 3 Relationship among size of element structure, phase, and transmittance

由图 3 可以看出, 通过 FDTD 仿真得到的相位-半径曲线与通过等效介质理论计算的相位-半径曲线基本一致, 所以基于等效介质理论来构造传输相位型超透镜是具有指导意义的, 与传统的 FDTD 仿真一样都可以适用于纳米压印材料的数值仿真计算。FDTD 在数值计算方面比等效介质理论准确, 但是等效介质理论易于非专业人员理解, 比较适合仿真初始参数的确定。图 4 描绘了单个纳米结构的电磁响应图, 其中 E 为电磁场强度, H 为磁场强度。从图 4 可以看到, 电场效应在纳米柱周围比较强, 磁场效应在纳米柱内部比较强。

由于超透镜的相位分布函数可以由每个纳米结构独立控制, 所以可以在构成目标光束波前的每个点上执行独立的相位操控^[32], 因此可以根据所选的纳米结构设计任意的相位函数。为了实现聚焦功能, 超透镜需要为透射波提供一个相位轮廓, 其空间相位分布为

$$\varphi(r, \lambda) = -\frac{2\pi}{\lambda}(\sqrt{r^2 + f^2} - f) + \varphi_0(\lambda), \quad (4)$$

式中: $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 为每个单元格到透镜中心的距离; f 为焦距; $\varphi_0(\lambda)$ 为任意相位。所需的相位轮廓 $\varphi(r, \lambda)$ 可以通过改变纳米结构的半径来调节。通过等效介质理论得到的超透镜如图 5(a) 所示, 超透镜的聚焦效果如图 5(b) 所示。从图 5 可以看到, 光聚焦效果较好, 焦斑比较小。

4 软件系统设计及仿真结果

本文仿真设计的 MATLAB 程序界面如图 6 所示, 纳米结构尺寸根据设计需求直接输入, 输入的参数包括超透镜的口径、焦距、周期和材料折射率等。根据输入的参数计算单周期内结构的等效折射率,

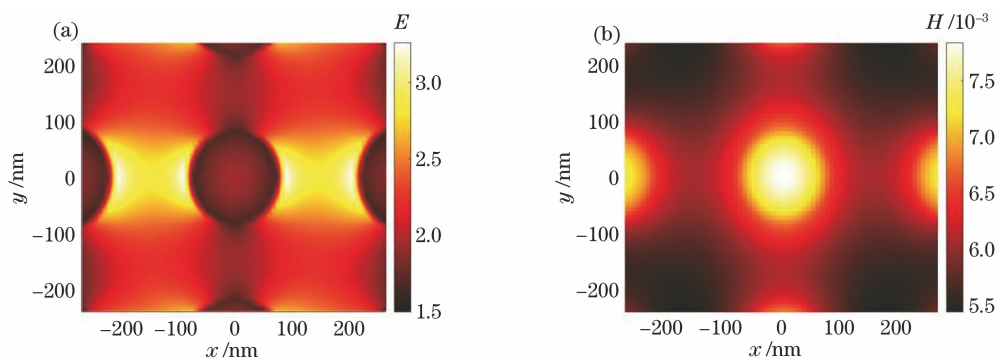


图 4 单个纳米结构的电磁响应图。(a)单个纳米结构俯视图的电场分布;(b)单个纳米结构俯视图的磁场分布
Fig. 4 Electromagnetic response diagram of single nanostructure. (a) Electric field distribution of top view of single nanostructure; (b) magnetic field distribution of top view of single nanostructure

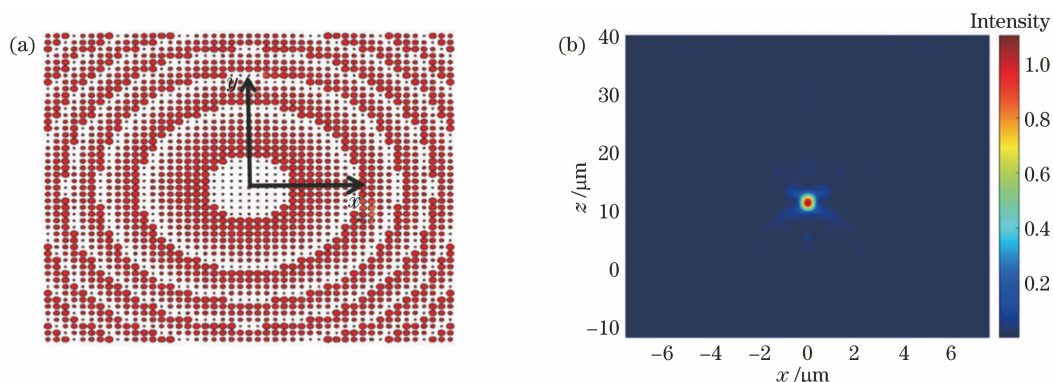


图 5 超透镜的构造和性能仿真。(a)口径 $D=15\ \mu\text{m}$ 、焦距 $f=10\ \mu\text{m}$ 的超透镜阵列俯视图;(b) $y=0, x-z$ 平面上透射光焦点
Fig. 5 Construction and performance simulation of metalens. (a) Top view of metalens array with aperture $D=15\ \mu\text{m}$ and focal length $f=10\ \mu\text{m}$; (b) $y=0, x-z$ plane

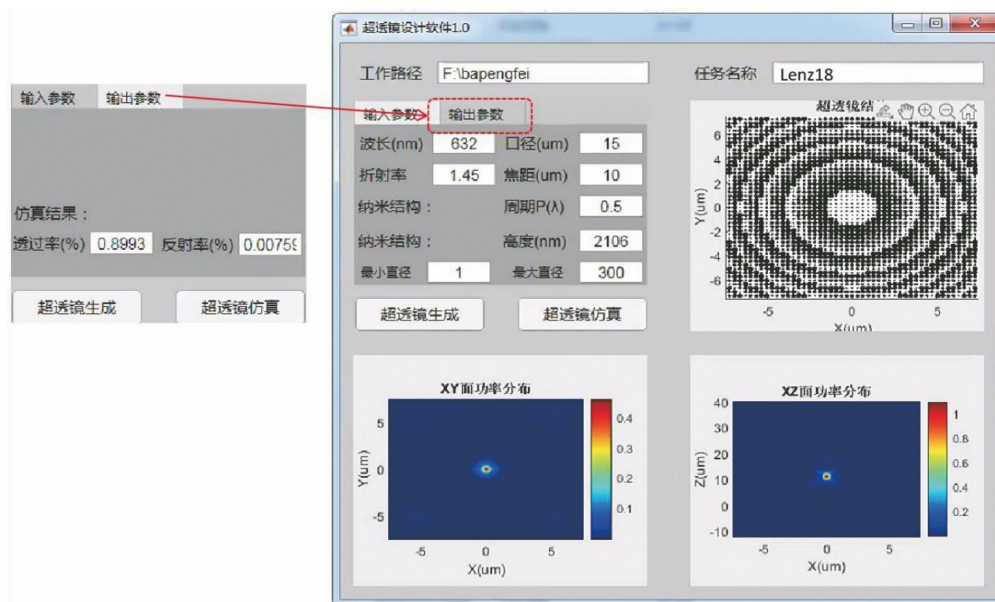


图 6 软件界面图及仿真结果图

Fig. 6 Software interface diagram and simulation result diagram

通过等效折射率得到超透镜的相位排布,构造超透镜后进行仿真。

本文选用的纳米结构和基底均为 PDMS 材料,输入光波长设置为 632 nm,材料折射率设为 1.45,

超透镜的口径为 $15\ \mu\text{m}$, 焦距为 $10\ \mu\text{m}$, 纳米结构周期为光波长的 $1/2$, 高度为 $2106\ \text{nm}$ 。通过等效介质理论对预估参数进行验证, 再根据自动化设计软件生成超透镜, 设计结果显示在软件界面上的超透镜结构框图中, 如图 6 所示。通过 MATLAB 生成 FDTD 程序并进行仿真, 得到的仿真结果显示在软件界面上 XY 面和 XZ 面的功率分布框图中, 输出参数包括仿真结束后得到的透射率和反射率, 根据本次设计的参数, 设计的超透镜的透过率为 89.93% , 反射率为 0.75% 。

5 结 论

本文利用 MATLAB 和 FDTD 的混合编程, 研究了不依赖于预设物理模型的超透镜, 实现了介质超透镜的自动化设计。本文基于等效介质理论计算了相位与纳米结构尺寸的关系, 同时用传统的 FDTD 仿真得到了相位与纳米结构尺寸的关系, 并将它们进行对比, 验证了等效介质理论在构造超透镜方面的可行性。等效介质理论易于理解, 可以预估初步设计的参数, 加快仿真设计进程。根据程序运行结果, 可以直观了解超透镜结构及其聚焦性能, 验证了本次软件设计的可行性。同时本次设计的软件实用便捷, 操作简单, 在工业生产上有极大的优势, 为促进超透镜的大规模工业化生产提供技术支持。

参 考 文 献

- [1] Cen C L, Zhang Y B, Liang C P, et al. Numerical investigation of a tunable metamaterial perfect absorber consisting of two-intersecting graphene nanoring arrays[J]. *Physics Letters A*, 2019, 383(24): 3030-3035.
- [2] Yi Z, Liang C P, Chen X F, et al. Dual-band plasmonic perfect absorber based on graphene metamaterials for refractive index sensing application[J]. *Micromachines*, 2019, 10(7): 443.
- [3] Li X, Chen L, Li Y, et al. Multicolor 3D meta-holography by broadband plasmonic modulation[J]. *Science Advances*, 2016, 2(11): e1601102.
- [4] Ye X, Shao T, Sun L, et al. Plasma-induced, self-masking, one-step approach to an ultrabroadband antireflective and superhydrophilic subwavelength nanostructured fused silica surface[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(16): 13851-13859.
- [5] Wu J, Ye X, Sun L, et al. Growth mechanism of one-step self-masking reactive-ion-etching (RIE) broadband antireflective and superhydrophilic structures induced by metal nanodots on fused silica[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1361-1374.
- [6] Zhao W, Jiang H, Liu B, et al. Dielectric Huygens' metasurface for high-efficiency hologram operating in transmission mode[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 30613.
- [7] Yifat Y, Eitan M, Iluz Z, et al. Highly efficient and broadband wide-angle holography using patch-dipole nanoantenna reflectarrays[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(5): 2485-2490.
- [8] Zhou Y, Kravchenko I I, Wang H, et al. Multilayer noninteracting dielectric metasurfaces for multiwavelength metaoptics[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(12): 7529-7537.
- [9] Chen X Z, Chen M, Mehmood M Q, et al. Longitudinal multifoci metalens for circularly polarized light [J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(9): 1201-1206.
- [10] Zhao Z, Pu M, Gao H, et al. Multispectral optical metasurfaces enabled by achromatic phase transition [J]. *Science Reports*, 2015, 5: 15781.
- [11] Chen X, Huang L, Mühlenbernd H, et al. Dual-polarity plasmonic metalens for visible light [J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 1198.
- [12] Walther B, Helgert C, Rockstuhl C, et al. Spatial and spectral light shaping with metamaterials [J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(47): 6300-6304.
- [13] Zhang X, Jin J, Pu M, et al. Ultrahigh-capacity dynamic holographic displays via anisotropic nanoholes[J]. *Nanoscale*, 2017, 9(4): 1409-1415.
- [14] Huang L L, Chen X Z, Mühlenbernd H, et al. Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2808.
- [15] Pang H, Gao H, Deng Q, et al. Multi-focus plasmonic lens design based on holography [J]. *Optics Express*, 2013, 21(16): 18689-18696.
- [16] Xiang M, Kuang D F, Gu P C, et al. Multi-wavelength multifocal metasurface with polarization multiplexing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1113001.
向梦, 匡登峰, 古盼春, 等. 多波长偏振复用多焦点超表面[J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1113001.
- [17] Zhu Q, Wang D, Zheng X, et al. Optical lens design based on metallic nanoslits with variant widths[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(13): 1879-1883.
- [18] Zhu Q F, Ye J S, Wang D Y, et al. Optimal design of SPP-based metallic nanoaperture optical elements by using Yang-Gu algorithm [J]. *Optics Express*, 2011, 19(10): 9512-9522.
- [19] Berry M V. The adiabatic phase and Pancharatnam's

- phase for polarized light [J]. *Journal of Modern Optics*, 1987, 34(11): 1401-1407.
- [20] Pancharatnam S. Generalized theory of interference, and its applications [J]. *Resonance*, 2013, 18(4): 387-389.
- [21] Jia S L, Wan X, Bao D, et al. Independent controls of orthogonally polarized transmitted waves using a Huygens metasurface [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, 9(5): 545-553.
- [22] Kuester E F, Mohamed M A, Piket-May M, et al. Averaged transition conditions for electromagnetic fields at a metafilm [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2003, 51(10): 2641-2651.
- [23] Wong J P S, Selvanayagam M, Eleftheriades G V. Polarization considerations for scalar Huygens metasurfaces and characterization for 2-D refraction [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2015, 63(3): 913-924.
- [24] Guo L J, Cheng X, Chou C F. Fabrication of size-controllable nanofluidic channels by nanoimprinting and its application for DNA stretching [J]. *Nano Letters*, 2004, 4(1): 69-73.
- [25] Armani D, Liu C, Aluru N. Re-configurable fluid circuits by PDMS elastomer micromachining [C]// *Technical Digest. IEEE International MEMS 99 Conference. Twelfth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (Cat. No. 99CH36291)*, January 21-21, 1999, Orlando, FL, USA. New York: IEEE Press, 1999: 222-227.
- [26] Zhu B O, Zhao J, Feng Y. Active impedance metasurface with full 360° reflection phase tuning [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 3059.
- [27] West P R, Stewart J L, Kildishev A V, et al. All-dielectric subwavelength metasurface focusing lens [J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 26212-26221.
- [28] Lalanne P, Astilean S, Chavel P, et al. Blazed binary subwavelength gratings with efficiencies larger than those of conventional *échelette* gratings [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(14): 1081-1083.
- [29] Khorasaninejad M, Zhu A Y, Roques-Carmes C, et al. Polarization-insensitive metalenses at visible wavelengths [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(11): 7229-7234.
- [30] Zhao F, Chen X N, Wang D C. Metalens design and simulation for simultaneous focusing of orthogonal circularly polarized light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(10): 1024001.
赵峰, 陈向宁, 王得成. 正交圆偏振光同时聚焦的超透镜设计与仿真 [J]. *光学学报*, 2020, 40(10): 1024001.
- [31] Hu Z, Xu T, Tang R, et al. Geometric-phase metasurfaces: from physics to applications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(20): 202408.
胡中, 徐涛, 汤蓉, 等. 几何相位电磁超表面: 从原理到应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(20): 202408.
- [32] Shang S H, Tang F, Ye X, et al. High-efficiency metasurfaces with 2π phase control based on aperiodic dielectric nanoarrays [J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(2): 250.