

环带离散化平面透镜的设计与研究

蒲欣欣 侯劲尧 郭文浩 孙雪平 谢一博 程进 周顺 刘卫国

Design and study of plane lens with band discretization

PU Xinxin, HOU Jinyao, GUO Wenhao, SUN Xueping, XIE Yibo, CHENG Jin, ZHOU Shun, LIU Weiguo

引用本文:

蒲欣欣, 侯劲尧, 郭文浩, 等. 环带离散化平面透镜的设计与研究[J]. 应用光学, 2025, 46(2): 269–275. DOI: 10.5768/JAO202546.0201005

PU Xinxin, HOU Jinyao, GUO Wenhao, et al. Design and study of plane lens with band discretization[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(2): 269–275. DOI: 10.5768/JAO202546.0201005

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0201005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

近红外偏振无关超透镜研究

Research on near-infrared polarization-independent metalens

应用光学. 2020, 41(3): 591–596 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0305001>

近红外超透镜的设计与制备

Design and fabrication of near-infrared metalens

应用光学. 2021, 42(6): 1102–1106 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0604002>

液体透镜的透射波前特性研究

Study on characteristics of transmission wavefront of liquid lens

应用光学. 2021, 42(2): 339–345 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0205002>

用于头盔显示液晶像源的透镜薄膜设计与制备

Lens film design and preparation for LC image source in helmet display

应用光学. 2021, 42(1): 182–187 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0105001>

金刚石复合折射透镜的设计及加工初探

Preliminary study on design and processing of diamond compound refractive lens

应用光学. 2023, 44(6): 1273–1279 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0610015>

一次透镜封装的单片集成LED光源

Monolithically integrated LED light source with encapsulation of primary optical lens

应用光学. 2022, 43(1): 137–143 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0105003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 02-0269-07

引用格式: 蒲欣欣, 侯劲尧, 郭文浩, 等. 环带离散化平面透镜的设计与研究 [J]. 应用光学, 2025, 46(2): 269-275.

PU Xinxin, HOU Jinyao, GUO Wenhao, et al. Design and study of plane lens with band discretization[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(2): 269-275.



在线阅读

环带离散化平面透镜的设计与研究

蒲欣欣, 侯劲尧, 郭文浩, 孙雪平, 谢一博, 程 进, 周 顺, 刘卫国

(西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021)

摘 要: 超透镜和多级衍射透镜 (multi-diffraction-lenses, MDL) 成像在聚焦应用中发挥着至关重要的作用, 但超透镜在大口径和加工方面受到限制, 且多级衍射透镜在透过率方面也无法实现真正意义上的高透过率。针对上述问题, 设计了单层环带离散型平面透镜, 通过超透镜的多个单元结构代替多级衍射透镜每一个环带的方式, 以高折射率材料 Si 作为相位调控单元和基底, 成功实现了多级衍射透镜的环带离散化; 另外, 对比分析了环带离散型平面透镜、超透镜和多级衍射透镜的结构特性和光学性能。最终的仿真结果表明: 环带离散型平面透镜不仅实现了光束聚焦, 同时具有 76% 的透过率, 相比于多级衍射透镜提升了 25.3%; 其结构的最大深宽比为 8.9 : 1, 相比超透镜降低了 50.5%, 在批量加工方面具有重要意义。环带离散型平面透镜同时具备超透镜和多级衍射透镜的优势, 在光学系统集成、红外成像、光学传感等领域中展现出广阔的应用前景。

关键词: 超透镜; 多级衍射透镜; 相位调控单元; 平面透镜

中图分类号: TN216; O439

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202546.0201005](https://doi.org/10.5768/JAO202546.0201005)

Design and study of plane lens with band discretization

PU Xinxin, HOU Jinyao, GUO Wenhao, SUN Xueping, XIE Yibo,
CHENG Jin, ZHOU Shun, LIU Weiguo

(School of Opto-Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: Metalenses and multi-diffraction-lenses (MDL) play a crucial role in focusing imaging applications. However, metalenses have their own limitations in terms of large aperture and processing, and MDL are unable to achieve truly high transmittance in terms of transmittance. Aiming at the above problems, a single-layer ring band discretized planar lens was designed by replacing each ring band of a MDL with multiple unit structures of a metalens, and the ring band discretisation of a MDL was successfully realised by using Si, a high refractive index material, as the phase modulation unit and the substrate. In addition, the structural properties and optical performances of the ring-band discretized planar lens, metalens and MDL were compared and analyzed. The results of simulation show that the ring-band discretized planar lens not only achieves beam focusing, but also has a high transmittance of 76%, which is 25.3% higher than that of the MDL. The maximum depth-to-width ratio of the structure is 8.9 : 1, which is 50.5% lower than that of the metalens, and it has certain advantages in batch processing. The band discretized planar lens has the advantages of both metalens and MDL, and shows a broad application prospect in optical system integration, infrared imaging,

收稿日期: 2024-04-17; 修回日期: 2024-05-11

基金项目: 国家外国专家项目 (G2023041018L); 陕西省教育厅专项科研项目 (22JK0415)

作者简介: 蒲欣欣 (1994—), 女, 博士研究生, 主要从事先进光学制造研究。E-mail: 674703579@qq.com

通信作者: 刘卫国 (1964—), 男, 博士, 二级教授, 主要从事先进光学制造、电子材料与元器件研究。E-mail: wgliu@163.com

optical sensing, and other important fields.

Key words: metalens; multi-diffraction-lenses; phase modulation unit; plane lens

引言

随着手机摄影、超短焦投影仪、航空航天观测等产业的快速发展,传统透镜已无法满足人们对光学系统轻型化、高集成化的要求^[1]。近年来,新兴的基于超材料的先进平面光学元件和衍射透镜弥补了传统光学元件的不足,在光学系统轻量化、微型化、集成化等方面展现出明显的优势^[2-8]。超透镜超薄化和高性能特性使其被广泛应用于微型化、集成化光学系统中,但受到结构单元尺寸和大深宽比的加工限制,费时且昂贵的电子束曝光加工方式极大地阻碍了超透镜批量化生产的可能,同时亚微米量级的对准精度鲁棒性较差也是导致无法大批量化生产的原因之一^[9-11]。大尺寸的超透镜往往包含数千万甚至上亿个单元结构,这将导致集成电路(graphic design system, GDSII)版图文件十分巨大,影响版图数据的存储和传输。除此之外,大尺寸超透镜的加工和成本问题也是商用化进程中亟待解决的关键问题^[12-15]。目前,最广泛的加工方案是EBL电子束刻蚀,但是该方案在制备大尺寸超透镜时成本和耗时都十分巨大,这与大批量商业化的初衷相违背。多级衍射透镜(即由多个离散表面高度组成的表面轮廓)与超透镜相比特征尺寸的直径较大,可采用微电子工业中常用的灰度光刻套刻进行大批量生产,但其透过率等光学性能方面受到环带限制,和超透镜相比无法实现真正意义上的高效率、高透过率。因此,在高集成化、微型化光学系统中受到了极大限制^[16-18]。中国科学院的郑书镛、范斌等人^[19]设计了一种多级衍射透镜,在入射波长分别为488 nm、532 nm、638 nm时衍射效率分别为56.38%、54.60%、56.42%;中山大学傅晓、梁浩文等人^[20]利用超透镜在405 nm、532 nm和660 nm波长下,超透镜的衍射效率分别为86%、73%和66%,超透镜的衍射效率显著高于MDL。但超透镜受到材料选择的限制,导致其具有较大的深宽比,极大地限制了其量产加工。因此,如何将多级衍射透镜和超透镜相结合,使其优势互补,成为当前平面透镜中有待解决的问题之一。

本文基于超透镜和多级衍射透镜的特点,将多级衍射透镜和超透镜相结合,在入射波长作用下,分别设计了超透镜和多级衍射透镜。同时,在保

证相位相同的条件下,利用超透镜多个结构单元替代多级衍射透镜的每一层环带的方法,成功实现了多级衍射透镜的环带离散化,并对设计的3种平面透镜进行了参数分析对比和仿真。仿真结果表明,设计的单层离散型平面透镜不仅保持了多级衍射透镜的大口径、易加工的特性,同时具备超透镜轻量化、微型化的优点。

1 透镜相位调控单元设计

光波的相位、偏振和振幅是实现电磁波调控的关键参量,通过对这些参量的精准控制,可以实现对光束的灵活操控,进而获得所需的功能。

1.1 超表面相位调控单元设计

本文设计的超透镜单元结构由Si基底上制备的Si纳米柱阵列组成,如图1(a)所示。整个相位调控单元由2层构成,选择在红外波段具有较大的折射率和透过率的Si作为相位调控单元和基底,图1(a)中 P 为单元结构周期, h 为调控单元高度, d 为调控单元直径。在入射波长($\lambda=8\text{ }\mu\text{m}$)作用下,基于惠更斯相位调控原理,通过对相位调控单元参数优化,可实现 $0\sim 2\pi$ 相位调控范围的完整覆盖。

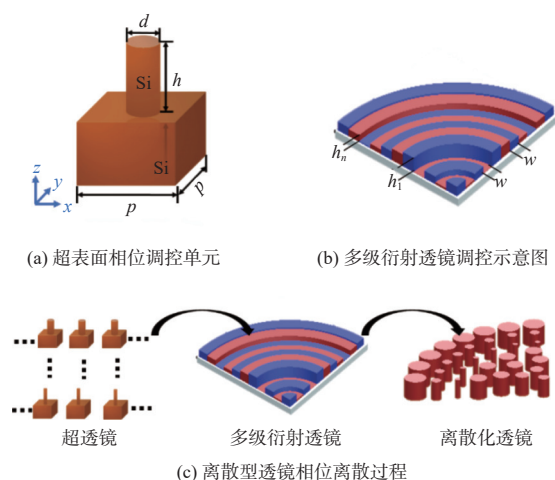


图1 不同透镜的相位调控单元

Fig. 1 Phase modulation unit for different lenses

为了实现相位要求的Si纳米柱结构,我们利用时域有限差分软件FDTD,研究了不同Si纳米柱结构参数以及不同单元结构周期下的透过率特性。寻找可实现 $0\sim 2\pi$ 相位调控范围的单元结构,对结构参数进行优化后,得到了一个可精准满足

相位要求的结构。其中 Si 纳米柱的高为 $7.5\ \mu\text{m}$, 直径范围为 $0.4\ \mu\text{m} \sim 2\ \mu\text{m}$, 单元结构周期为 $3\ \mu\text{m}$, 在相位调控单元参数调控下, 相位分布实现了 $0 \sim 2\pi$ 。当入射光波经过相位调控单元, 在不同位置处产生的相位延迟也不相同, 从而引起出射光波阵面改变, 入射光经该平面透镜后, 出射光在一定位置处发生会聚。平面微结构造成的相位延迟差满足波前重构方程:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \left(f - \sqrt{x^2 + y^2 + f^2} \right) \quad (1)$$

式中: f 为焦距; x 和 y 为位置坐标; λ 为工作波长。通过理论计算, 得到相位延迟差和每一位置处匹配的硅圆柱直径大小, 对不同直径的硅圆柱进行排列, 使出射光在设计的焦距处实现聚焦。

1.2 多级衍射透镜相位调控单元设计

衍射透镜通常被视为纯相位型衍射光学元件, 通过相位调制函数来实现对光场的控制。根据相位调制函数刻录了一系列同心圆环形状的微纳结构, 以此弥补不同径向位置的相位滞后。在傍轴近似条件下, 衍射透镜的相位调制函数可表示为

$$\varphi(r) = \sum_{i=1}^N A_{2i} r^{2i} \quad (2)$$

式中: r 为衍射透镜的径向坐标; N 为相位函数的级数; A_{2i} 为第 $2i$ 次项的系数。在衍射透镜设计过程中, 通常把相位区间压缩在 $[0, 2\pi]$, 在材料和入射波长一定的前提条件下, 基于衍射光学理论对多级衍射透镜进行设计。相位和高度满足以下关系式:

$$\Delta\phi_{\text{MDL}} = \frac{2\pi(n-1)}{\lambda} h \quad (3)$$

式中: n 为材料折射率; h 为环带高度; λ 为工作波长。入射波长、环带宽度以及透镜材料确定条件下, 利用粒子群优化算法得到每一环带的高度分布。高度的变化可引起相位变化, 给定的高度最大值可以根据 $h_{\text{max}} = \lambda/(n-1)$ 确定, 这一数值相较于折射透镜小了几个数量级, 使得衍射光学系统的体积和质量都远小于传统光学系统。当入射光波长为 $8\ \mu\text{m}$, 材料为 Si 时, $h_{\text{max}} = 3.2\ \mu\text{m}$ 。当入射光经过多级衍射透镜, 出射面相位由于环带高度不同也发生了变化。在环带宽度 $w = 3\ \mu\text{m}$ 条件下, 入射光波经过设计的不同环带高度 h 的多级衍射透镜时, 在每一环带上的相位延迟发生变化, 从而实现操控入射光波的目的, 如图 1(b) 所示。多级衍射透镜不同环带的高度分布如表 1 所示。

表 1 多级衍射透镜环带高度

Table 1 Annular band height of multi-diffraction-lenses

环带数 N	1	2	3	4	5	6	7
半径/ μm	0	3.287 0	3.240 6	3.163 3	3.055 4	2.916 9	2.748 3
环带数 N	8	9	10	11	12	13	14
半径/ μm	2.549 6	2.321 4	2.064 0	1.777 9	1.463 5	1.121 3	7.519 6
环带数 N	15	16	17	18	19	20	21
半径/ μm	3.559 6	3.236 4	2.788 9	2.316 7	1.820 3	1.300 5	7.578 9

1.3 离散型透镜相位调控单元设计

通过上述两种透镜的相位设计, 表明本文设计离散型透镜的基本思路是, 将多级衍射透镜的每一环带用超透镜的相位调控单元来表示。首先, 通过计算得到多级衍射透镜每一层环带所构建的相位参数; 其次, 基于超透镜的相位分布, 选择合适参数的相位调控单元进行相位相同的环带替代, 其中每一层环带上分布的相位调控单元参数完全相同。因此, 在相位调控单元的周期 P 和环宽 w 相同条件下, 即环带形成的相位可以用相位调控单元实现, 离散型透镜的设计过程如图 1(c) 所示。根据式 (3) 计算多级衍射透镜中不同高度条件下对应的相位延迟差, 将计算结果带入式 (1), 得到不同高度下的相位延迟差与不同直径相位调控单元产生的相位延迟差一一对应。

将两种透镜相位延迟差保持一致的相位调控单元放置在不同环带位置处, 可实现单元结构和环带的成功替代。本文设计的离散化衍射透镜如图 1(c) 所示。从图 1(c) 可以看出, 多级衍射透镜中每一个不同高度的环带可以用离散化相位调控单元表示, 不同直径的相位调控单元可提供每一环带所需的相位延迟差, 实现超透镜和多级衍射透镜的成功结合。

在周期 p 、高度 h 一定的条件下, 通过调节相位调控单元的直径参数实现相位调控, 离散化透镜的局部相位调控单元如图 2 所示。图 2 中环宽即为相位调控单元的周期 p , 不同环带上的相位调控单元高度 h 保持一致。通过式 (1) 和式 (2) 计算, 得到离散型平面透镜的整体相位分布, 如图 3 所示。不同高度环带时离散型平面透镜相位如表 2 所示, 相位分布范围为 $0.21\pi \sim 1.99\pi$ 。当超表面相位调控单元参数, 即环宽为 $3\ \mu\text{m}$, 高度为 $7.5\ \mu\text{m}$, 环带数 $N = 21$ 时, 每一层环宽上的的相位调控单元

半径如表 3 所示。由此可见,利用算法成功实现了对不同半径的相位调控单元在环带上的分布。

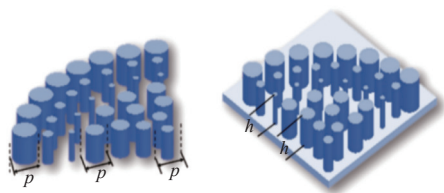


图 2 离散型透镜局部相位调控单元图

Fig. 2 Diagram of local phase modulation unit for discretized planar lens

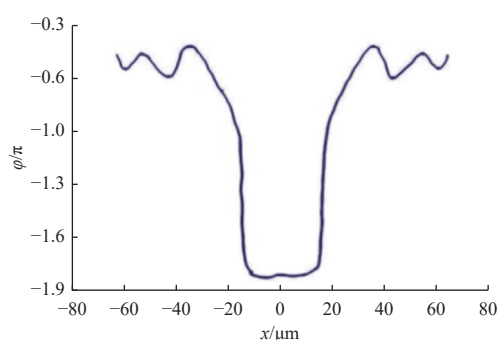


图 3 离散型透镜相位分布

Fig. 3 Phase distribution of discretized planar lens

表 2 离散型平面透镜相位

Table 2 Annular band phase of discretized planar lens

环带数 N	1	2	3	4	5	6	7
相位/ π	0	1.990	1.962 5	1.915 7	1.850 3	1.766 5	1.664 3
环带数 N	8	9	10	11	12	13	14
相位/ π	1.544 0	1.405 8	1.249 9	1.076 7	0.886 2	0.679 0	0.455 3
环带数 N	15	16	17	18	19	20	21
相位/ π	0.215 5	1.959 9	1.689 0	1.403 0	1.102 4	0.787 6	0.459 0

表 3 离散型平面透镜环带半径

Table 3 Annular band radii of discretized planar lens

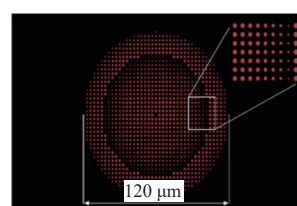
环带数 N	1	2	3	4	5	6	7
半径/ μm	0.133 4	0.985 7	0.969 6	0.947 4	0.924 2	0.904 0	0.888 5
环带数 N	8	9	10	11	12	13	14
半径/ μm	0.875 7	0.860 8	0.837 9	0.802 5	0.753 2	0.688 4	0.595 8
环带数 N	15	16	17	18	19	20	21
半径/ μm	0.427 7	0.968 3	0.891 6	0.860 5	0.808 5	0.723 9	0.597 6

离散化相位调控单元的周期 p 和环宽 w 相等,即在设计透镜时周期 p 和 w 保持一致。这种

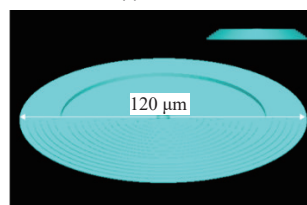
透镜同一环带上的相位调控单元参数均相同,而不同环带上的相位调控单元高度 h 相同,直径不同。由于相位调控单元是完全对称图形,这里不考虑入射光的偏振态,则出射光的偏振状态不受影响。

2 透镜设计及聚焦性能

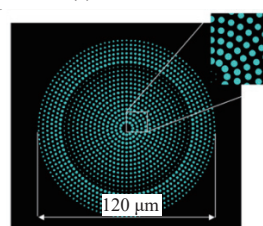
本文通过 FDTD 软件对口径均为 $120\text{ }\mu\text{m}$ 的 3 种平面透镜进行了仿真模拟,仿真结果显示,设计的 3 种平面透镜均可在出射面 $120\text{ }\mu\text{m}$ 位置处实现光束会聚,且和设计焦距基本吻合。3 种平面透镜示意图如图 4 所示。从图 4 可以看出,入射光在经过平面透镜之后,出射光可以在设计位置处发生会聚。



(a) 超透镜



(b) 多级衍射透镜



(c) 离散型透镜

图 4 平面透镜示意图

Fig. 4 Schematic diagram of plane lens

利用时域有限差分方法在设计焦距处放置 xy 和 yz 平面监视器,监视器获取的超透镜、多级衍射透镜和离散化透镜的聚焦情况如图 5(a)、5(b)和 5(c)所示。图 5 中左图为 xz 面的聚焦示意图,右图为 xy 平面的聚焦示意图,且 3 种透镜焦距分别为 $f_{\text{metalens}}=120\text{ }\mu\text{m}$ 、 $f_{\text{MDL}}=120.8\text{ }\mu\text{m}$ 、 $f=118\text{ }\mu\text{m}$ 。从图 5 可以看出,3 种平面透镜均实现了聚焦功能且仿真结果和设计结果吻合,但离散化透镜存在

焦移现象, 计算出的焦距与目标值 $120\ \mu\text{m}$ 有些偏离。主要原因是离散化透镜映射透镜半径上 2π 变

化的纳米棒数量较少, 因此增加镜头尺寸有助于改善结果以及优化其他参数(例如周期)。

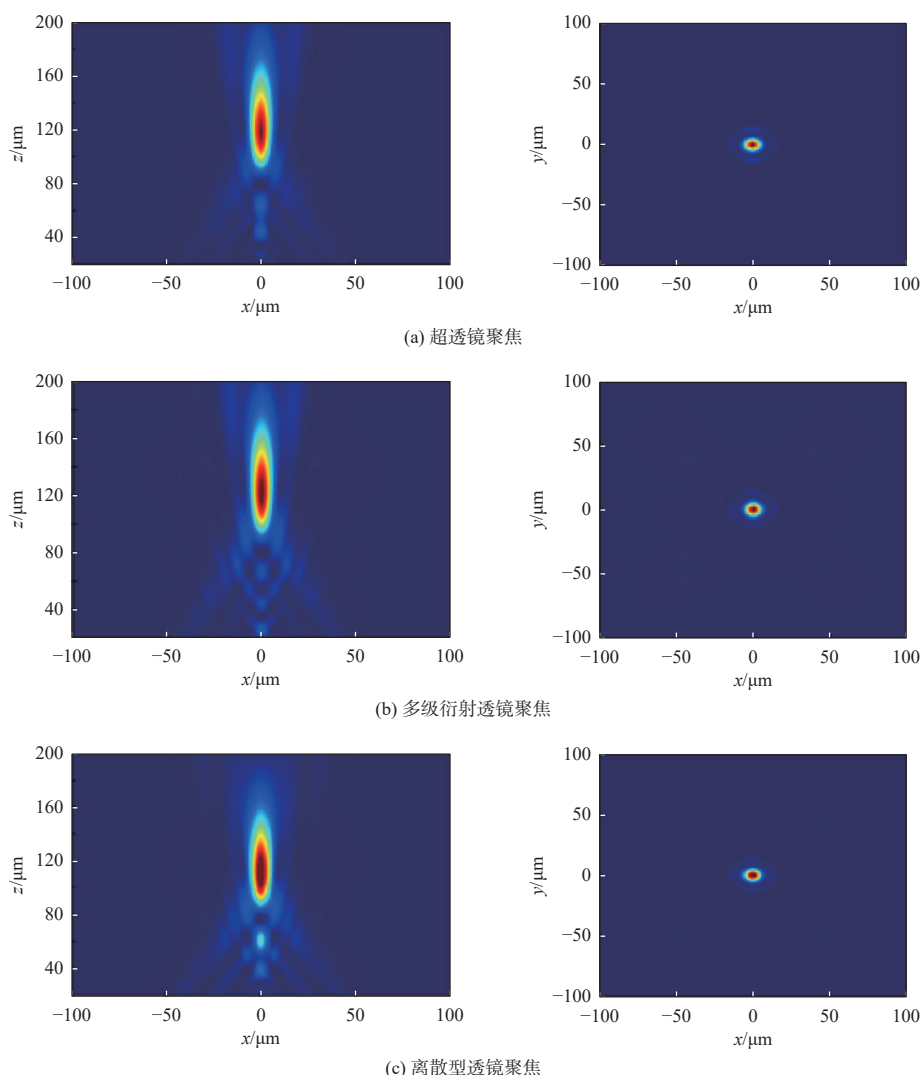
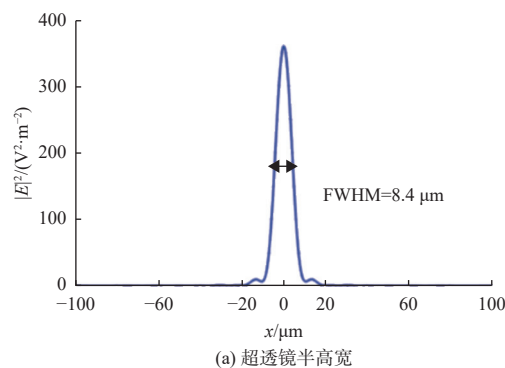


图5 仿真聚焦示意图

Fig. 5 Schematic diagram of simulated focus

多级衍射透镜和离散型平面透镜的焦距与设计焦距未完全匹配, 这是因为在粒子群优化过程中, 多级衍射透镜的高度分布优化不够精准, 以及离散型透镜单元结构之间存在耦合作用导致发生焦移现象。监视器获得的3种透镜在 x 截面上的半高宽如图6所示。从图6可以看出, 超透镜和多级衍射透镜相结合的离散衍射透镜仍具有良好的聚焦性能, 焦平面处光束的半高宽 (full width at half maxima, FWHM) 分别为 $8.4\ \mu\text{m}$ 、 $8.16\ \mu\text{m}$ 、 $8.2\ \mu\text{m}$ 。FWHM 是以最高光强点为中心, 在强度降低 50% 的 2 个点之间测量光束直径, 半高宽越窄, 意味着光能量分辨率越高, 即焦斑直径和质量越好。本文设计的离散型透镜和超表面相比, 半高宽减小

了 $0.2\ \mu\text{m}$, 和多级衍射透镜相比增加了 $0.04\ \mu\text{m}$, 即离散型透镜结合了超表面和多级衍射透镜的优势且分辨率几乎未受影响。因此, 用离散相位调控单元表征不同高度的环带可以实现功能性透镜的目的。



(a) 超透镜半高宽

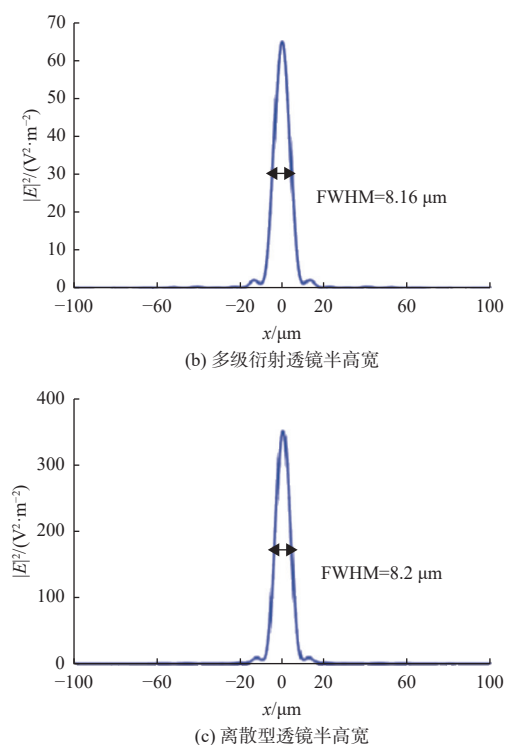


图 6 不同透镜的半高宽示意图

Fig. 6 Schematic diagram of FWHM of different lenses

3 种透镜的性能参数对比如表 4 所示。从表 4 可知, 3 种透镜的仿真值和理论值基本吻合, 但离散型透镜产生了焦移现象, 焦距误差为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 。产生此误差的原因是: 一方面, 由于相位调控单元之间距离过近, 产生耦合作用, 发生焦移现象。相邻单元结构示意图如图 7 所示。本文对离散型透镜相邻 4 个相位调控单元进行了构建及仿真分析, 在周期一定的条件下, 相邻单元结构之间距离过小, 光波会在相邻结构之间受到磁偶极子和电偶极子的共振效应影响, 产生耦合作用, 从而使光波被束缚在结构之间进行相互作用, 影响透镜的透过率, 导致焦移现象的发生。为减小耦合作用对聚焦效果的影响, 可以通过对相位单元的半径、高度、周期等参数进一步优化, 达到减小耦合作用的目的。另一方面, 由于多级衍射透镜的相位延迟未实现完整的一个周期 2π 覆盖, 离散后的平面透镜相位覆盖范围仅实现了 1.7π 的相位覆盖, 造成离散型透镜的相位误差增大。可以通过增大离散型透镜的尺寸, 使整个透镜实现一个周期的完整覆盖, 从而减小相位带来的误差, 改善焦移现象。

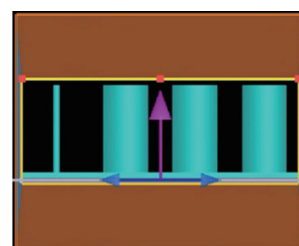
与超透镜相比, 在半高宽、透过率基本吻合的条件下, 离散型透镜的深宽比明显减小, 由之前的 $18:1$ 降低至 $8.9:1$, 降低了 50.5% 。离散型透镜与多级衍射透镜相比, 两种透镜的半高宽基本吻

合, 但多级衍射透镜的透过率仅有 56.77% , 离散型平面透镜的透过率可以达到 76% , 透过率提升了 25.3% 。

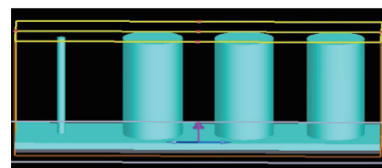
表 4 超表面、多级衍射透镜、离散化平面透镜性能参数

Table 4 Performance parameters of metasurface, MDL and discrete planar lenses

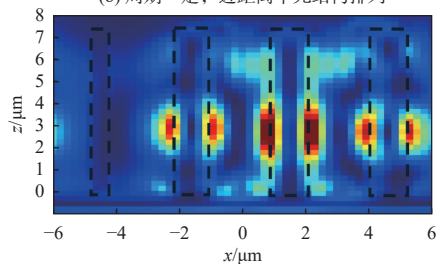
参数	$f/\mu\text{m}$	FWHM	h/d	$T/\%$
超表面	120	8.4	$18:1$	85
多级衍射透镜	120.8	8.16	$1.06:1$	56.77
离散化平面透镜	118	8.2	$8.9:1$	76



(a) 周期一定, 远距离单元结构排列



(b) 周期一定, 近距离单元结构排列



(c) 近距离相邻单元结构发生耦合作用

图 7 相邻单元结构示意图

Fig. 7 Structure diagram of adjacent units

3 种透镜均能够实现聚焦功能, 超透镜和多级衍射透镜的缺点被离散型衍射透镜弥补。用离散化的相位调控单元表示环带, 在降低深宽比的同时实现了透过率的提升。离散型衍射透镜中通过降低相位调控单元的鲁棒性和单元结构之间的相互作用, 使每一环带都由具有相同参数的相位调控单元组成。同时, 较低的深宽比会在一定程度上降低加工难度, 为批量化生产提供可能。

3 结论

本文设计了一个融合超透镜和多级衍射透镜

优势的单层离散型衍射透镜。该透镜在环宽(周期)相同条件下,同一环带都用相同尺寸的相位调控单元所替代,在精确调控光场的同时,融合了超透镜高透射率和多级衍射透镜易加工的优点。设计的平面透镜,使深宽比降低为 8.9 : 1,为透镜的批量化生产提供了依据,在实现大口径、轻量化、微型化平面透镜方面展现出巨大的潜力,并且在光学性能聚焦(118 μm)和透过率(76%)方面明显优于多级衍射透镜,在轻、薄、高集成化光学系统,远红外成像以及激光雷达等领域具有重要的应用价值。

参考文献:

- [1] LALANNE P, CHAVEL P. Metalenses at visible wavelengths: past, present, perspectives[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, 11(3): 1-11.
- [2] HUANG K, QIN F, LIU H, et al. Planar diffractive lenses: fundamentals, functionalities, and applications[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(26): e1704556.
- [3] WAN X, SHEN B, MENON R. Diffractive lens design for optimized focusing[J]. *Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science, and Vision*, 2014, 31(12): B27-33.
- [4] KEDEM R O, OPATOVSKI N, XIAO D, et al. Near index matching enables solid diffractive optical element fabrication via additive manufacturing[J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12(10): 2187-2198.
- [5] LI Q T, DONG F, WANG B, et al. Polarization-independent and high-efficiency dielectric metasurfaces for visible light[J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 16309.
- [6] KHORASANINEJAD M, CHEN W T, DEVLIN R C, et al. Metalenses at visible wavelengths: diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging[J]. *Science*, 2016, 352(6290): 1190-1194.
- [7] ENGELBERG J, LEVY U. The advantages of metalenses over diffractive lenses[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 323320.
- [8] 蒲欣欣, 周顺, 肖相国, 等. 近红外偏振无关超透镜研究[J]. *应用光学*, 2020, 41(3): 591-596.
PU Xinxin, ZHOU Shun, XIAO Xiangguo, et al. Research on near-infrared polarization-independent metalenses[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(3): 591-596.
- [9] YAN J, GUO Y H, PU M B, et al. High-efficiency multi-wavelength metasurface with complete independent phase control[J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(5): 05003.
- [10] PRESUTTI F, MONTICONE F. Focusing on bandwidth: achromatic metalens limits[J]. *Optica*, 2020, 7(6): 624-631.
- [11] 仇官润, 赵峰, 王琨. 近红外超透镜的设计与制备[J]. *应用光学*, 2021, 42(6): 1102-1106.
QIU Gongrun, ZHAO Feng, WANG Kun. Design and fabrication of near-infrared metalens[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(6): 1102-1106.
- [12] 陈奎先, 王宇, 何桃桃, 等. 基于超表面材料的扇出衍射光学元件[J]. *应用光学*, 2019, 40(2): 306-310.
CHEN Kuixian, WANG Yu, HE Taotao, et al. Metasurface fan-out diffractive optical elements[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(2): 306-310.
- [13] LIANG H, LIN Q, XIE X, et al. Ultrahigh numerical aperture metalens at visible wavelengths[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(7): 4460-4466.
- [14] YOON G, JANG J, MUN J, et al. Metasurface zone plate for light manipulation in vectorial regime[J]. *Communications Physics*, 2019, 2(1): 156.
- [15] KHORASANINEJAD M, CAPASSO F. Metalenses: versatile multifunctional photonic components[J]. *Science*, 2017, 358(6367): 8100.
- [16] SWEENEY D W, SOMMARGREN G E. Harmonic diffractive lenses[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(14): 2469-2475.
- [17] LEVY U, MAROM E, MENDLOVIC D. Thin element approximation for the analysis of blazed gratings: simplified model and validity limits[J]. *Optics Communications*, 2004, 229(1-6): 11-21.
- [18] HE Q, SUN S, XIAO S, et al. High-efficiency metasurfaces: principles, realizations, and applications[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(19): 1800415.
- [19] 郑伊迪, 雷柏平, 何一苇, 等. 一种工作在红外波段的大视场衍射透镜的设计方法: CN114624877B [P]. 2023-03-31.
ZHENG Yidi, LEI Baiping, HE Yiwei, et al. A design method of large field diffractive lens working in infrared band: CN114624877B [P]. 2023-03-31.
- [20] FU X, LIANG H, LI J. Metalenses: from design principles to functional applications. *Front*[J]. *Optoelectron*, 2021, 14(2): 170-186.