

文章编号:1001-5078(2026)02-0274-10

· 光学技术 ·

# 基于人工神经网络中红外超构透镜的设计研究

张晓冬<sup>1</sup>, 吴鑫鹏<sup>1</sup>, 朱雪<sup>1</sup>, 刘若涵<sup>2</sup>, 姜利英<sup>1,3</sup>

(1. 郑州轻工业大学 电子信息学院, 河南 郑州 450002; 2. 河南大学 物理与电子学院, 河南 郑州 450046;  
3. 郑州轻工业大学 量子科技研究院, 河南 郑州 450002)

**摘要:**基于人工神经网络设计了一款中红外波段的消色差超构透镜,其工作波段为3.6~3.8  $\mu\text{m}$ ,设计焦距为250  $\mu\text{m}$ 。在工作波段内采样20个频率点进行仿真,得到平均焦距为227.58  $\mu\text{m}$ ,平均聚焦效率为8.19%。超构单元衬底为二氧化硅,介质材料为两块纳米硅砖的组合,利用共振相位和几何相位实现超构单元的相位调控。训练后的人工神经网络可以利用超构单元任意的结构参数组合预测出对应的相位响应,网络模型的训练损失为 $2.54 \times 10^{-5}$ ,使用该模型进行相位响应的实部和虚部预测时间低于0.2秒,该工作为消色差超构透镜的设计研究提供了新的设计思路。

**关键词:**人工神经网络;中红外波段;消色差超构透镜

中图分类号:TN202;TP183 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2026.02.019

## Research on achromatic metalens in mid infrared band based on artificial neural networks

ZHANG Xiao-dong<sup>1</sup>, WU Xin-peng<sup>1</sup>, ZHU Xue<sup>1</sup>, LIU Ruo-han<sup>2</sup>, JIANG Li-ying<sup>1,3</sup>

(1. School of Electronic and Information, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;  
2. School of Physics and Electronics, Henan University, Zhengzhou 450046, China;  
3. Academy for Quantum Science and Technology, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** A chromatic aberration metalens with ideal focal length of 250  $\mu\text{m}$  at the mid infrared band 3.6~3.8  $\mu\text{m}$  is designed based on artificial neural networks method. Sample of 20 frequency points at the working band are collected, and an average focal length of 227.58  $\mu\text{m}$  and an average focusing efficiency of 8.19% are obtained. The substrate of the meta-unit is silicon dioxide, and the dielectric unit is a combination of two nano silicon bricks. The phase control of the meta-unit is achieved based on resonance phase and geometric phase. The trained artificial neural network can use any structural parameters of the meta-unit to predict the corresponding phase response. The training loss of the network model is  $2.54 \times 10^{-5}$ , and the prediction time of the real and imaginary parts of the phase response is less than 0.2 seconds under this model. This work provides a novel design approach for a new idea for the research and development of achromatic meta-lenses.

**Keywords:** artificial neural network; mid-infrared band; achromatic metalens

**基金项目:**国家留学基金委资助项目(No. 202409440003);河南省科技厅科技攻关项目(No. 232102211081);河南省重点研发项目(No. 231111220500);国家自然科学基金面上项目(No. 62477043);河南省科技研发计划联合基金项目(No. 225200810071);河南省重大科技专项项目(No. 231100220800)资助。

**作者简介:**张晓冬(1980-),男,博士,副教授,硕士生导师,主要研究领域为微纳光学、电磁学仿真。E-mail: zhangxiaodong@zzuli.edu.cn

**通讯作者:**姜利英(1981-),女,博士,教授,博士生导师,主要从事微纳传感等方面的研究。E-mail: jiangliying@zzuli.edu.cn

**收稿日期:**2025-05-12; **修订日期:**2025-06-18

## 1 引言

超表面 (Metasurfaces) 以其超薄的平板化结构特征和出色的相位操控能力成为研究的热点,其构成往往是由不同尺寸的亚波长单元结构按照拟定的规律进行二维阵列分布<sup>[1-4]</sup>。根据不同光学功能的报道可知超表面技术可以实现光束整形进而设计出功能性超表面<sup>[5-12]</sup>。超构透镜 (Metalens) 作为聚焦透镜的开发也验证了超表面巨大的技术潜力<sup>[13-17]</sup>,除了基本的聚焦功能外<sup>[18-22]</sup>,越来越多的光学参数被考虑进来,包括但不限于大景深、高数值孔径、消色差等<sup>[23-24]</sup>。高性能指标的探索往往会使超表面工程变得复杂且具有挑战性,所需数据的总量往往会指数级增长,以便更好地实现目标光学响应与超构单元结构参数之间的映射关系。例如消色差超构透镜作为解决色散的功能性超表面器件,其相位匹配复杂度随着目标设计波长的增多而增大,但是借助组合式超构单元出色的相位调控能力,南京大学祝世宁院士团队和哈佛大学 Capasso 教授团队分别在可见光和近红外波段实现了宽带的消色差超构透镜<sup>[16,25]</sup>。同样借助组合式超构单元出色的相位调控能力,还可以设计出大色散超构透镜应用于光谱检测方面。

神经网络<sup>[26]</sup> (Artificial Neural Network, 简称 ANN) 是一种模仿生物大脑的神经元的连接方式,数据经过人工神经单元传递,同时不断调整并记录每个结点处的权重值,这个过程就是 ANN 的学习训练过程。与基于公式或者基于某种规则的传统方法不同,ANN 可以从大量的数据中找到层与层之间的隐藏映射关系从而可以从输入数据映射到输出数据,故 ANN 可加速实现超构单元的仿真工作。例如使用已有的数据进行训练可得到超构单元结构参数到光学响应的映射关系,可以在原始超构单元的结构参数范围内快速预测到大量光学响应,节约了获取超构单元光学响应的时间,提高了设计效率。

中红外光谱区内存在两个热成像区域,用于军事目标检测、工业环境监测等领域<sup>[27]</sup>。基于超构透镜的自身物理尺寸的优势,由超构透镜组成的热成像装备可以大幅减小物理尺寸和重量。但是单波长的热成像采集主要是测量特定波长的热辐射来判断目标温度数值大小,而多波长热成像采集获取的信息更多,可以获取测量目标的材料特性或者目标发

射率等重要信息。因此,中红外多波长消色差超构透镜成为了研究热点<sup>[28]</sup>。

本文设计了一款中红外宽带连续消色差超构透镜,基于深度学习来加速超构单元的仿真设计。超构透镜的衬底材料为 SiO<sub>2</sub>,超构单元由两个硅纳米砖组合而成,用来提高相位调控能力。基于几何相位调控原理对超构单元进行参数优化,设计出工作波段为 3.6~3.8 μm,半径为 50 μm,设计焦距为 250 μm 的消色差超构透镜。该研究结果为实现中红外宽带连续消色差超构透镜提供了新的设计思路。

## 2 超构透镜消色差原理

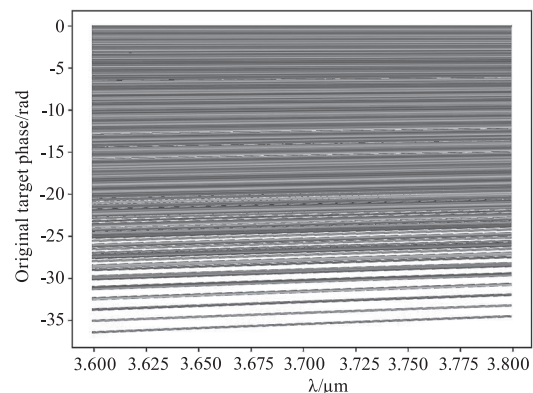
超构透镜作为平板化结构,基于光程相等的原理,要求超构透镜表面不同位置处出射的光在拟定焦点处聚集,故超构透镜的每个位置处都需要提供一个合适相位来进行相位补偿,其分布关系应满足:

$$\varphi(\lambda, x, y) = -\frac{2\pi}{\lambda}(\sqrt{x^2 + y^2 + f^2} - f) \quad (1)$$

式中,  $x$  和  $y$  表示每个超构单元中心位置的坐标值,  $\lambda$  表示超构透镜的入射波长,  $f$  表示超构透镜的焦距。由此可见,单波长超构透镜的相位设计仅需满足一个相位轮廓面即可,而当工作波长数量增加时,超构透镜表面的相位分布就需要同时满足每个波长处的相位补偿要求。将  $x^2 + y^2$  等效为  $r^2$  来代表超构单元距超构透镜中心的距离,得到设定波段内超构透镜的补偿相位分布:

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

基于公式(2)和拟定参数便可求得目标补偿相位数据,假设拟定工作波段为 3.6~3.8 μm,超构单元周期为 2 μm,超构透镜半径为 50 μm,焦距为 100 μm,可得出拟设计超构透镜上任一超构单元的中心坐标值。



(a) 由公式(2)计算的相位图

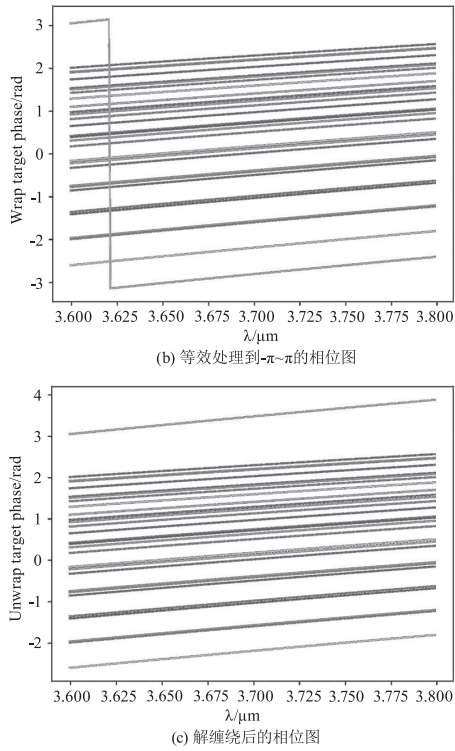


图 1 超构透镜补偿相位轮廓图

Fig. 1 Compensation phase contour map of metalens

经过计算得到的目标补偿相位分布图如图 1 (a) 所示;如图 1 (b) 所示,将目标补偿相位等效处理到  $-\pi \sim \pi$  之间(由于曲线过多会重叠影响展示效果,这里只取部分数据);对相位数据进行解缠绕处理,如图 1 (c) 所示。

### 3 超构单元设计

超构单元结构如图 2 所示,超构单元周期  $P = 1 \mu\text{m}$ ,硅纳米砖高度  $H = 1 \mu\text{m}$ , $\text{SiO}_2$  衬底厚度  $H_{\text{sub}} = 1 \mu\text{m}$ , $\text{Gap} = 0.15 \mu\text{m}$ , $L1$ 、 $L2$ 、 $W1$  和  $W2$  为变化参数。

由几何相位可知,相同结构的超构单元在变化不同的旋转角度时,相位曲线遵循上下平移的规律<sup>[25]</sup>。为了在每个位置尽可能准确地匹配到合适超构单元,有必要将每个超构单元进行尽可能多的旋转角度。如图 3 所示,超构单元是以两个硅纳米砖组合体的中心旋转,即  $\text{Theta}$  也为变化参数。使用传统电磁仿真软件扫描的参数如表 1 所示。

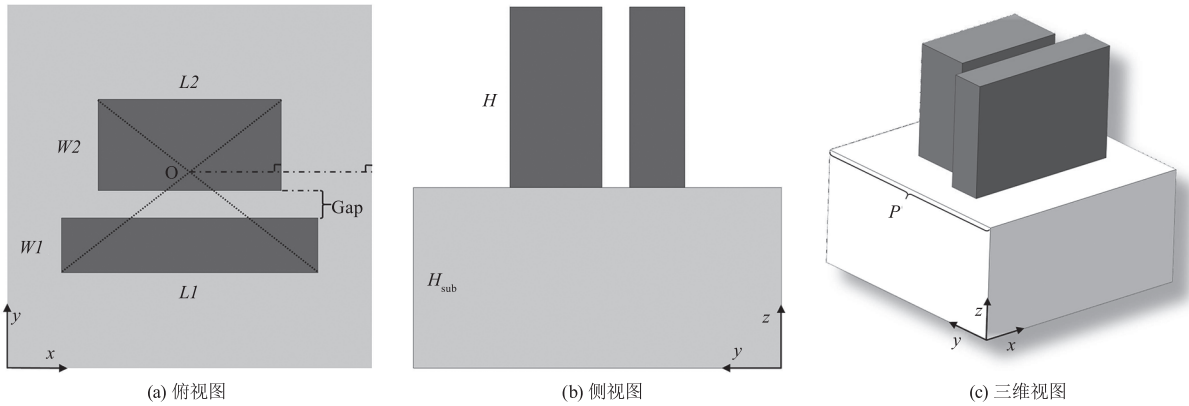


图 2 超构单元结构图

Fig. 2 Structure diagram of meta-unit

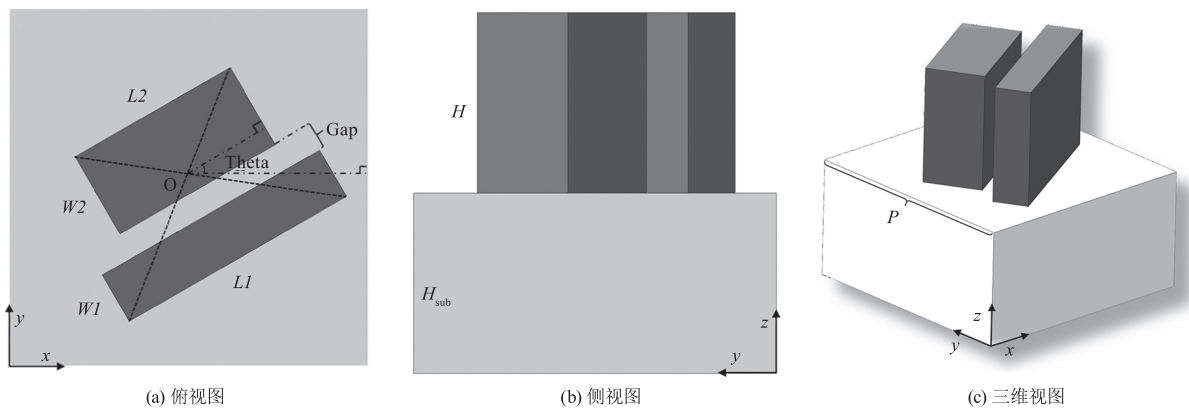


图 3 超构单元旋转时的结构图

Fig. 3 Structure diagram of the rotating meta-unit

表 1 超构单元结构参数变化范围  
Tab. 1 Range of structural parameter variation for meta-unit

结构参数		
名称	范围	间隔
L1/ $\mu\text{m}$	1.0 ~ 1.4	0.1
L2/ $\mu\text{m}$	1.0 ~ 1.4	0.1
W1/ $\mu\text{m}$	0.3 ~ 0.5	0.1
W2/ $\mu\text{m}$	0.3 ~ 0.5	0.1
Theta	0 ~ 180	10

4 ANN 设计

引入 ANN 训练基于传统电磁算法得到光学响应数据,将超构单元的结构参数作为数据输入、拟定波段内的光学响应数据作为数据输出,二者共同构建成数据库。另外将实部和虚部响应当作成不同的类别,并在与之相对应的超构单元结构参数前面添加标记“Type”,其数值为 1 或 0,其中 1 代表该结构参数对应的光学响应为实部数据,0 代表该结构参数对应的光学响应为虚部数据。

由于结构参数之间最大有着三个数量级之差,故对结构参数的预处理时单独按照各自参数的最大

最小值进行归一化预处理;而为了使输出的光学响应在纵向和横向上都保持缩放关系,故按照整体的最大最小值进行归一化预处理。归一化之后在对总数据集随机打乱,按照 70 %、15 %、15 % 的比例规则将总数据集划分为训练集、验证集、测试集。

ANN 运作过程如图 4 (a) 所示,数据从输入层 (Input Layer) 输入,经过一系列隐含层 (Hidden Layers) 的计算后从输出层 (Output Layer) 输出预测值,输入层包括 1 个响应种类 Type 和 5 个结构参数 L1、L2、W1、W2、Theta,共 6 个节点;隐含层共有 6 层,每层的节点数分别为 256、512、512、512、512、256;输出层共有 220 个节点,表示实部或虚部的响应;隐含层函数的具体设置可见图 4 (b),除输出层外每层均由 BN 批量归一化函数和 ReLU 激活函数以及 Linear 全连接函数组成,输出层由 Tanh 激活函数和 Linear 全连接函数组成;如图 4 (c) 所示,输出层“Type”值影响输出层的结果,若输入参数中的 Type 数值为 1,则该结构参数对应的输出为光学响应的实部数据;若输入参数中的 Type 数值为 0,则该结构参数对应的输出为光学响应的虚部数据;图 4 (d) 中显示的是经过训练后的 ANN 对新输入数据的预测过程。

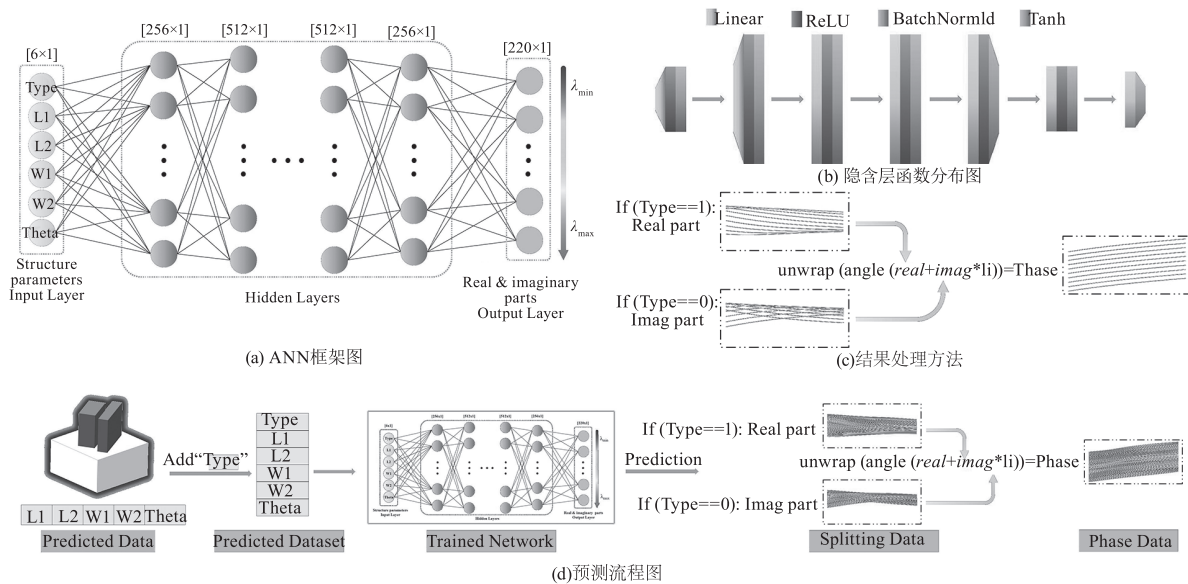


图 4 ANN 示意图

Fig. 4 Artificial neural network schematic diagram

使用 Anaconda 与 Pycharm 搭建训练环境,训练基于 Pytorch 框架,支持 GPU 训练,Python 版本为 3.9.18。在实际训练的过程中,为了更好的训练效果,设置了 4 个学习率 (learning rate) 和 4 个权重衰减值 (weight decay),分别为 lr<sub>1</sub> = 0.001, lr<sub>2</sub> =

0.0001, lr<sub>3</sub> = 0.00001, lr<sub>4</sub> = 0.000001, wd<sub>1</sub> = 4 × 10<sup>-5</sup>, wd<sub>2</sub> = 3e<sup>-5</sup>, wd<sub>3</sub> = 2 × 10<sup>-5</sup>, wd<sub>4</sub> = 1 × 10<sup>-5</sup>。

设置批次大小 batch\_size = 256 对 ANN 进行 800 轮次的训练用时约 355 s,引入 nn.MSELoss() 函数在每一轮次中计算均方误差损失 (Mean Squared Error

Loss), 训练过程的损失图如图 4 所示, 训练集的最小损失为  $2.5369825 \times 10^{-5}$ , 保存训练集损失最小的 ANN 模型和最后一次训练的 ANN 模型。

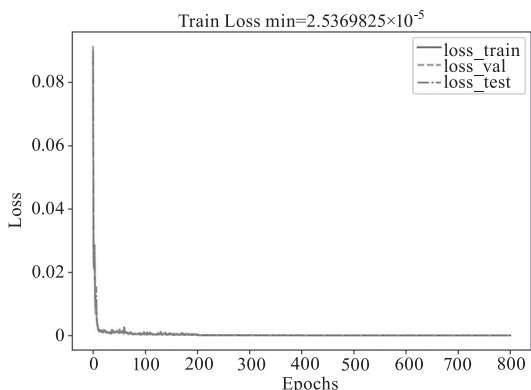


图 5 训练损失

Fig. 5 Training loss diagram

依据需求将结构参数中的角度 Theta 的步进改为 1, 其余参数不变, 构成新的输入集, 按照实部虚部分开得到两个样本数均为  $625 \times 181 = 113125$  的新结构数据, 使用训练过程中训练损失值最低的模型对新结构数据进行预测, 预测二者的时间均小于 0.2 s, 相比于传统电磁仿真软件数天起步的仿真时间, 极大地提高了设计效率。值得注意的是, 调用训练好的网络进行数据预测并不会像训练时对 GPU 的性能有所要求, 可以使用性能不高的 GPU 进行预测, 这在时间上并不会增加太多, 这也说明了后期可以先在高性能工作站进行网络预测工作, 待网络训练好后就可以将网络移植到普通个人电脑进行新结构数据的预测处理。

图 6(a) 为部分数据范围内的原始响应数据图, 图 6(b) 为该范围内的预测响应数据图, 图 6(c) 为在该范围内得出的解缠绕后的结构色散相位分布图。将所有预测结果计算得到的结构色散相位记为 ANN 相位数据库, 对应的预测输入记为 ANN 结构数据库。

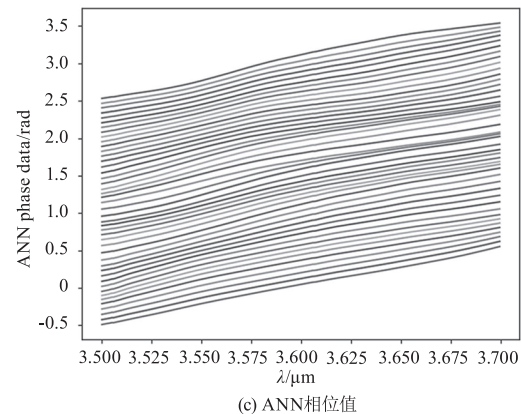
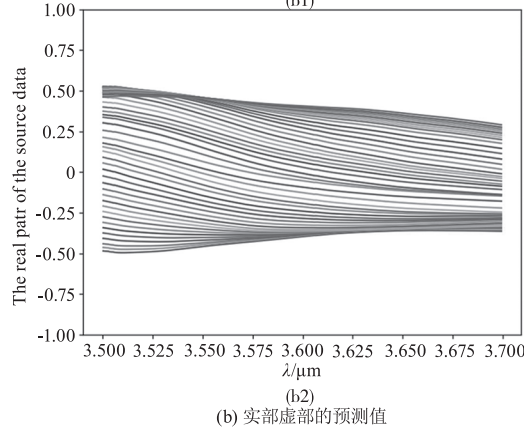
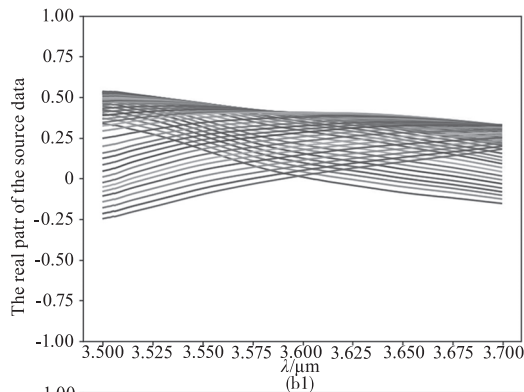
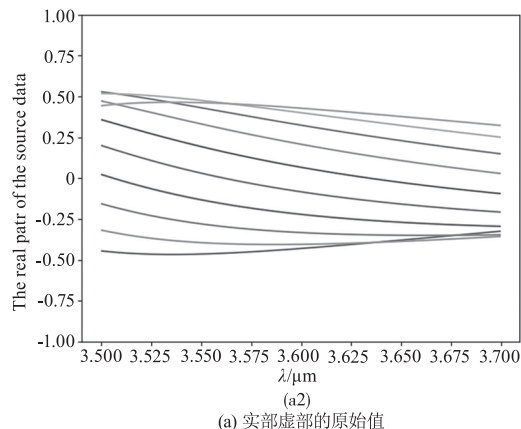
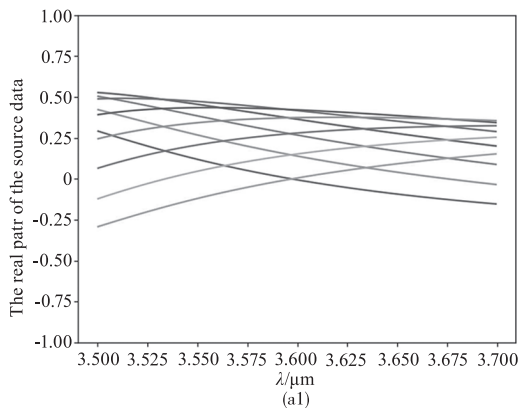


图 6 相位预测数据

Fig. 6 Phase prediction data diagram

### 5 相位匹配

对超构透镜表面上某一位置的目标补偿相位曲

线匹配,具体做法是从 ANN 相位数据库中找到一条与其无限接近的相位曲线。匹配后对误差曲线分析,如图 7 所示,横坐标代表的是超构透镜上若干个超构单元位置,纵坐标代表最优解的误差值,从整体的趋势来看,在拟定半径和焦距的消色差超构透镜中,越远离中心位置,相位匹配的结果更好。

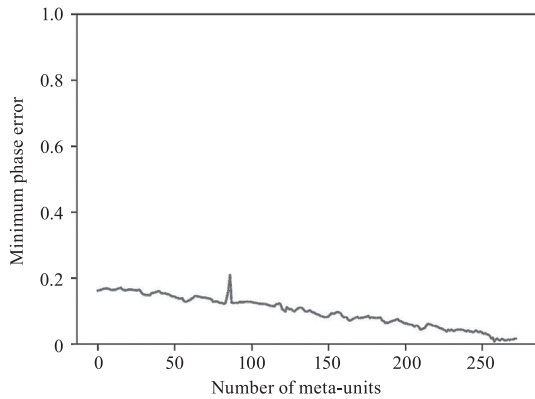


图 7 超构透镜上每个位置处相位匹配的误差情况

Fig. 7 Error of phase matching at each position on the metalens diagram

## 6 数据分析

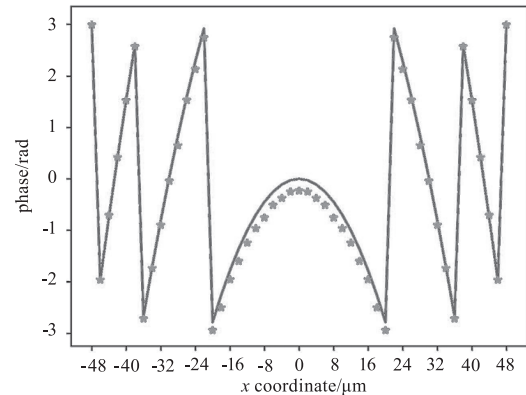
根据相位匹配的结果,在工作波长内等间隔选取 6 个取样点,查看超构透镜对角线上的相位匹配情况,匹配结果如图 8 所示,其中直线为目标补偿相位曲线,散点为匹配到的 ANN 预测出来的结构色散相位,可知靠近中心波长( $3.7 \mu\text{m}$ )的匹配效果更佳。

基于 ANN 预测的相位数据,本文设计了一个工作在三色光波段( $3.6 \sim 3.8 \mu\text{m}$ ),半径为  $50 \mu\text{m}$ ,焦距为  $250 \mu\text{m}$  的消色差超构透镜。为了检测超构透镜的性能,基于有限时域差分法 (FDTD) 对超构透镜的透射强度、焦距、焦距误差、聚焦效率、FWHM、NA 等参数进行仿真测试。

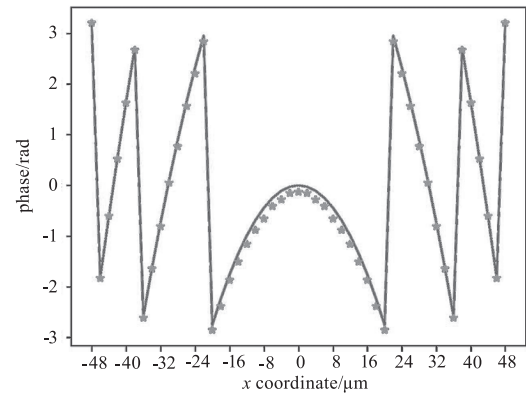
首先分析 Z 轴上右旋圆偏振光的电场强度,如图 9 所示,每个波长处的 Z 轴电场强度在工作波段内,仿真聚焦焦距整体上一致,随波长变化不大,但是能量强度大小却随着波长的增大而减小。

分析 XZ 面的数据,如图 10 所示,每个波长处的能量均汇聚到各自的焦点附近,从 XZ 面的数据也能看出来能量的汇集点略低于设定焦距  $250 \mu\text{m}$ ,能量的大小也符合随着波长的增大而减小的规律。

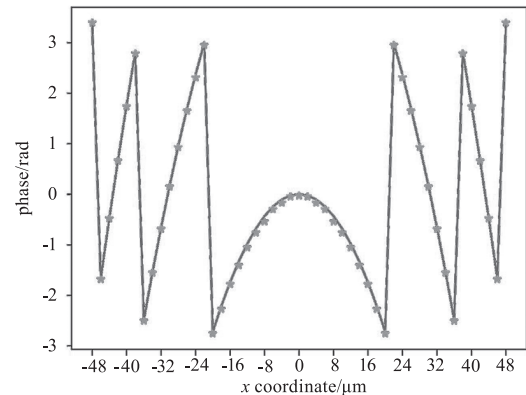
分析平均仿真焦距处 XY 面的远场数据,如图 11 所示,每个波长处的能量均汇聚到面中心,从能量的大小角度分析,也符合波长越大汇聚的能量越小的规律。



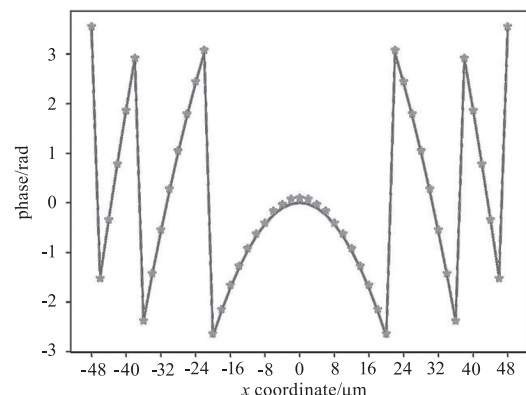
(a)  $\lambda \approx 3.60 \mu\text{m}$



(b)  $\lambda \approx 3.64 \mu\text{m}$



(c)  $\lambda \approx 3.68 \mu\text{m}$



(d)  $\lambda \approx 3.72 \mu\text{m}$

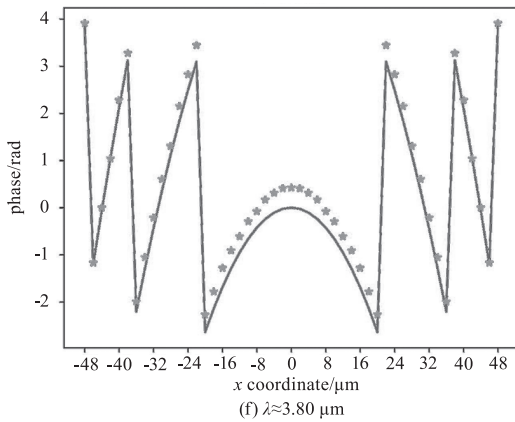
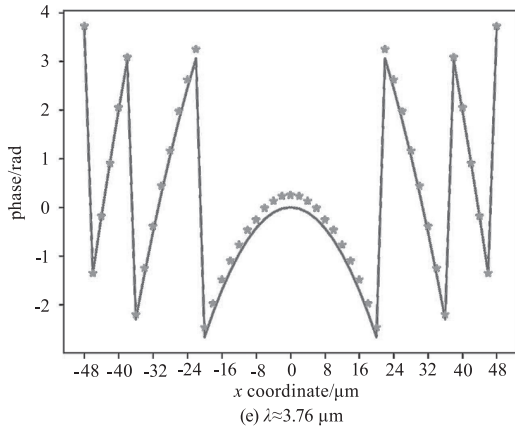


图 8 超构透镜对角线上的相位匹配情况

Fig. 8 Phase matching on the diagonal of a metalens diagram

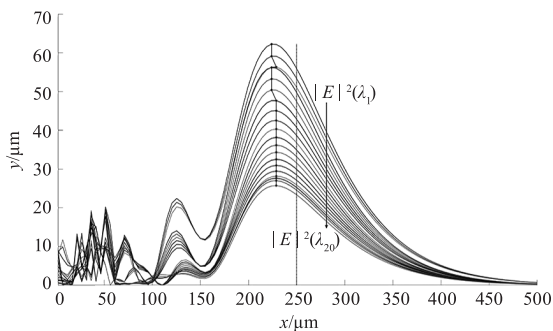


图 9 Z 轴电场强度

Fig. 9 Z-axis electric field intensity diagram

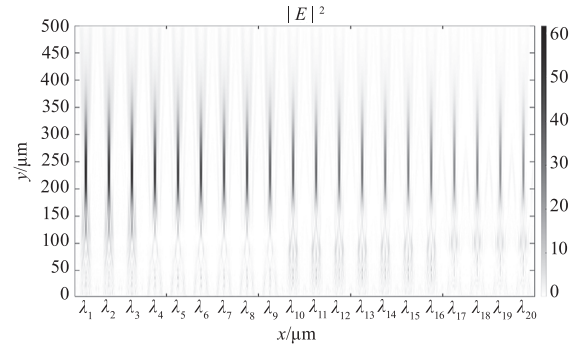


图 10 XZ 面电场强度

Fig. 10 XZ surface electric field intensity diagram

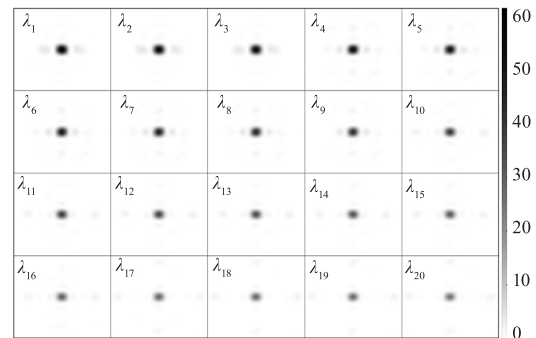


图 11 XY 面电场强度

Fig. 11 XY surface electric field intensity diagram

根据仿真焦距计算焦距误差,方法为:(仿真焦距 - 理论焦距)/理论焦距 × 100%,具体数值见表 2;根据公式  $NA = n \times \sin\alpha$ 、仿真焦距和超构透镜半径计算仿真数值孔径,其中  $n$  为传播介质的折射率, $\alpha$  是孔径角  $2\alpha$  一半。根据 XY 面的电场数据、超构透镜表面的近场电场数据以及透过率计算聚焦效率,公式为(汇聚能量/所场能量) × 透过率 × 100%。其中汇聚能量定义为焦平面上三倍 FWHM 范围内的能量,近场能量和近场透过率由近场面监视器得到,各个波长对应的 FWHM 数值见表 3。

表 2 超构透镜性能参数

Tab. 2 Performance parameters of metalenses

波长序号	仿真焦距/ $\mu\text{m}$	焦距误差/%	仿真 NA	FWHM/ $\mu\text{m}$	聚焦效率/%
1	223. 8812	10. 4475	0. 2180	4. 75294	12. 1224
2	223. 8812	10. 4475	0. 2180	4. 75294	11. 5540
3	228. 8119	8. 4752	0. 2135	4. 75294	11. 0378
4	223. 8812	10. 4475	0. 2180	4. 5549	10. 7025
5	223. 8812	10. 4475	0. 2180	4. 5549	10. 2009
6	223. 8812	10. 4475	0. 2180	4. 5549	9. 7139
7	228. 8119	8. 4752	0. 2135	4. 5549	9. 2451

(续表)

波长序号	仿真焦距/ $\mu\text{m}$	焦距误差/%	仿真 NA	FWHM/ $\mu\text{m}$	聚焦效率/%
8	228.8119	8.4752	0.2135	4.5549	8.7919
9	228.8119	8.4752	0.2135	4.5549	8.3456
10	228.8119	8.4752	0.2135	4.5549	8.1165
11	228.8119	8.4752	0.2135	4.5549	7.7362
12	228.8119	8.4752	0.2135	4.5549	7.3977
13	228.8119	8.4752	0.2135	4.5549	7.0782
14	228.8119	8.4752	0.2135	4.5549	6.7520
15	228.8119	8.4752	0.2135	4.5549	6.4666
16	228.8119	8.4752	0.2135	4.5549	6.1998
17	228.8119	8.4752	0.2135	4.5549	5.8432
18	228.8119	8.4752	0.2135	4.5549	5.7501
19	228.8119	8.4752	0.2135	4.5549	5.5482
20	228.8119	8.4752	0.2135	4.5549	5.2874

如图 12 所示,左 y 轴表示焦距误差和聚焦效率,右 y 轴表示理论 NA 和仿真 NA。从图中的数据可知,随着波长的增大,聚焦效率逐渐减小,从 12.1224 % 减少到 5.2874 %。和图 8、图 9 中电场强度变化规律一致。虽然仿真焦距和理论焦距有着

约小于 10 % 的误差,但是在该工作波段内,仿真焦距变化不大,主要为 228.8119  $\mu\text{m}$ 。从 NA 曲线可以看出,NA 主要为 0.2135,从表 2 数据中看出,FWHM 主要为 4.5549,故本文设计的超构透镜实现了消色差功能。

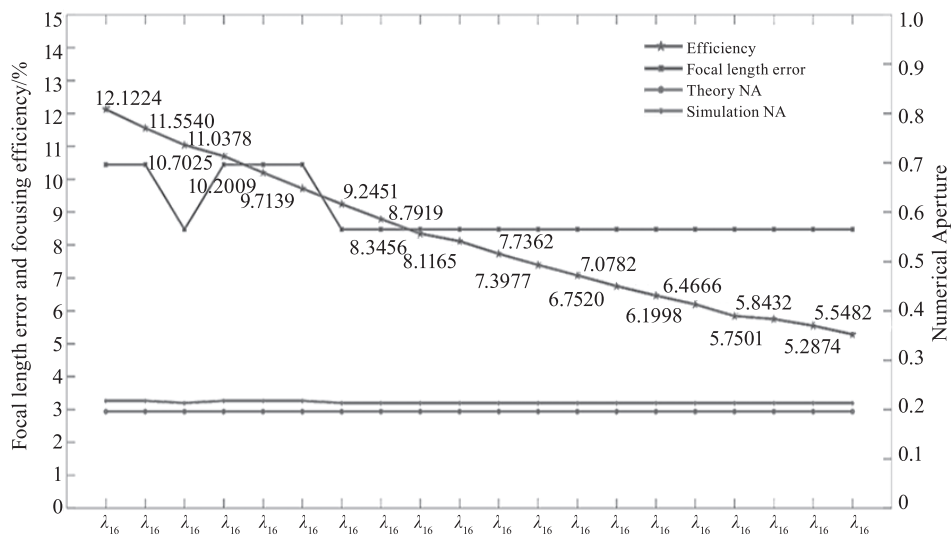


图 12 焦距误差、聚焦效率、NA

Fig. 12 Focal length error, focusing efficiency NA diagram

### 7 结论

本文将两块纳米砖组合成超构单元,设计了以二氧化硅为衬底的透射式消色差超构透镜,超构透镜工作在 3.6 ~ 3.8  $\mu\text{m}$  的中红外波段,半径为 50  $\mu\text{m}$ ,通过仿真计算得到平均焦距为 227.58  $\mu\text{m}$ ,

平均聚焦效率为 8.19 %, NA 约为 0.21, FWHM 约为 4.55 等参数。在前期的工作中引入 ANN 提高设计效率,节省了我们大量的仿真优化时间。故此本文设计的超构透镜实现了消色差功能,但是也需要进一步提高聚焦效率,因此下一步工作的重点就是

优化超构单元的结构,实现提高极化传输效率的同时能提供变化更加明显的相位响应。本文的设计方法能够为后期设计大尺寸中红外消色差超构透镜提供技术方案。为中红外消色差超构透镜的前期设计与优化提供了一种思路,为发展高效、轻量化中红外成像设备提供潜在技术支持。

#### 参考文献:

- [1] Holloway C L, Kuester E F, Gordon J A, et al. An overview of the theory and applications of metasurfaces: the two-dimensional equivalents of metamaterials [J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2012, 54(2): 10–35.
- [2] Li T Y, Huang L L, Wang Y T. The principle and research progress of metasurfaces [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(5): 523–540, 701. (in Chinese)  
李天佑, 黄玲玲, 王涌天. 超颖表面原理与研究进展 [J]. *中国光学*, 2017, 10(5): 523–540, 701.
- [3] Li X Y, Zhou Y, Ge S Y, et al. Experimental demonstration of optical trapping and manipulation with multifunctional metasurface [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(4): 977–980.
- [4] Yu F L, Chen J, Zhao Z Y, et al. A forward calculation method to quickly realize the achromatic metasurface for arbitrary polarization control [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2022, 41(4): 792–798. (in Chinese)  
郁菲茏, 陈金, 赵增月, 等. 一种实现任意偏振调控中波红外消色差超表面的正向计算方法 [J]. *红外与毫米波学报*, 2022, 41(4): 792–798.
- [5] Ren H R, Briere G, Fang X Y, et al. Metasurface orbital angular momentum holography [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 2986.
- [6] Yang Y M, Wang W Y, Moitra P, et al. Dielectric meta-reflectarray for broadband linear polarization conversion and optical vortex generation [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(3): 1394–1399.
- [7] Zhang X D, Kong D P, Liu S J, et al. All-dielectric metasurface with multi-function in the near-infrared band [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2020, 37(11): 1731–1739.
- [8] Zhang X D, Kong D P, Zhao Y, et al. Generation of scalar/vectorial vortex beams by using the plasmonic metasurfaces [J]. *Applied Optics*, 2022, 61(25): 7336–7342.
- [9] Deng J H, Li G X. Nonlinear photonic metasurfaces [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(14): 147803.
- [10] Li S Q, Wang G X, Li X Y, et al. All-dielectric metasurface for complete phase and amplitude control based on pancharatnam-berry phase and fabry-pérot resonance [J]. *Applied Physics Express*, 2018, 11(10): 105201.
- [11] Zhang L, Chen X Q, Liu S, et al. Space-time-coding digital metasurfaces [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 4334.
- [12] Liu X D, Zhu Y M. Metalens for polarization-switchable multi-functions multiplexing in multiple channels [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2024, 43(3): 371–376. (in Chinese)  
刘小东, 朱亦鸣. 超表面透镜偏振可切换的多通道功能复用 [J]. *红外与毫米波学报*, 2024, 43(3): 371–376.
- [13] Jiao T, Lin Y, Wang C M, et al. Topology optimization-based research of metalens at endface of fiber bundle [J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(12): 1897–1902. (in Chinese)  
焦通, 林雨, 王承邈, 等. 基于拓扑优化的光纤束端面超构透镜研究 [J]. *激光与红外*, 2023, 53(12): 1897–1902.
- [14] Wang Y J, Chen Q M, Yang W H, et al. High-efficiency broadband achromatic metalens for near-IR biological imaging window [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 5560.
- [15] Liu F F, Wang D Y, Zhu H, et al. High-efficiency metasurface-based surface-plasmon lenses [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(7): 2201001.
- [16] Wang S M, Wu P C, Su V C, et al. Broadband achromatic optical metasurface devices [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 187.
- [17] Wang C H, Xu H X, Pang Z C, et al. 3D-printed conformal metasurface invisibility cloak with arbitrary boundary [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2022, 41(1): 210–217. (in Chinese)  
王朝辉, 许河秀, 逢智超, 等. 基于3D打印技术的任意曲面共形超表面隐身衣 [J]. *红外与毫米波学报*, 2022, 41(1): 210–217.
- [18] Khorasaninejad M, Capasso F. Metalenses: versatile multifunctional photonic components [J]. *Science*, 2017, 358(6367): eaam8100.
- [19] Lalanne P, Chavel P. Metalenses at visible wavelengths: past, present, perspectives [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, 11(3): 1600295.
- [20] Banerji S, Meem M, Majumder A, et al. Imaging with flat optics: metalenses or diffractive lenses? [J]. *Optica*, 2019, 6(6): 805–810.
- [21] Shrestha S, Overvig A C, Lu M, et al. Broadband achromatic dielectric metalenses [J]. *Light-Science & Applications*, 2018, 7(1): 85.
- [22] Li H, Liu X F, Yao X R, et al. Multiblock compressed sensing imaging in real time [J]. *Journal of Infrared and*

- Millimeter Waves, 2023, 42(1): 61–71. (in Chinese)  
李虎, 刘雪峰, 姚旭日, 等. 多块合并压缩感知实时成像[J]. 红外与毫米波学报, 2023, 42(1): 61–71.
- [23] Li Z H, Pan Y Q. Design and optimization of bilayer composite nanostructured achromatic metalenses[J]. Laser & Infrared, 2025, 55(2): 281–287. (in Chinese)  
李昭慧, 潘亚晴. 双层复合纳米结构消色差超透镜设计与优化[J]. 激光与红外, 2025, 55(2): 281–287.
- [24] Li Z H, Lyu Y H. Automatic design of achromatic metalens based on particle swarm and genetic algorithm[J]. Laser & Infrared, 2024, 54(2): 267–273. (in Chinese)  
李昭慧, 吕怡豪. 基于粒子群与遗传算法的消色差超透镜自动设计[J]. 激光与红外, 2024, 54(2): 267–273.
- [25] Chen W T, Zhu A Y, Sanjeev V, et al. A broadband achromatic metalens for focusing and imaging in the visible[J]. Nature Nanotechnology, 2018, 13(3): 220–226.
- [26] Liu J, Li X G, Wu W. Application of the neural network to mmw stepped-frequency radar signal processing[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2002, 21(4): 266–268. (in Chinese)  
刘静, 李兴国, 吴文. 神经网络在毫米波频率步进雷达信号处理中的应用[J]. 红外与毫米波学报, 2002, 21(4): 266–268.
- [27] Wu X P, Zhang X D, Zhu X, et al. Research on the optimal focal length of metalens in the mid-infrared band[J]. Laser & Infrared, 2024, 54(11): 1751–1758. (in Chinese)  
吴鑫鹏, 张晓冬, 朱雪, 等. 中红外波长超构透镜最优焦距的研究[J]. 激光与红外, 2024, 54(11): 1751–1758.
- [28] Lu R G, Lin R, Shen L M, et al. 3  $\mu\text{m}$  mid-infrared polarization-independent and CMOS-compatible graphene modulator[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2021, 40(3): 297–301. (in Chinese)  
陆荣国, 林瑞, 沈黎明, 等. 3  $\mu\text{m}$  中红外偏振无关且 CMOS 兼容的石墨烯调制器[J]. 红外与毫米波学报, 2021, 40(3): 297–301.