

文章编号: 1005-5630(2023)06-0033-09

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.202302260028

基于 GaP 光子晶体的平板超透镜设计与研究

余 越, 申 桐, 张 馨 瀚, 郑 继 红

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 超透镜是基于超表面对光场调控的成像器件, 由于其具有体积小、工艺流程化的优势, 在器件轻量化、便携性方面具有很好的应用前景。针对当前市场对透镜的体积需求, 使用时域有限差分法模拟了一种新型结构的超透镜, 它是基于光子晶体的平板超透镜, 尺寸为长 $2\ \mu\text{m}$, 宽 $1\ \mu\text{m}$, 工作波长在 $717\ \text{nm}$ 可见光波段。该平板超透镜以 TiO_2 波导作为衬底, 由 Au 和 GaP 两组周期相同的光子晶体呈相切的结构共同蚀刻在 TiO_2 波导上, 模拟研究透镜成像效果。此外通过引入一系列不同形状的缺陷, 研究其对平板透镜成像结果的影响, 结果表明, 当缺陷结构为矩形尺寸: $L_x = 0.5\ \mu\text{m}$, $L_y = 0.8\ \mu\text{m}$ 时, 该平板超透镜呈现出最好的成像效果, 达到了 0.556λ 数值的超分辨, 极大地提高了成像质量。未来该平板超透镜在可便携的成像设备, AR, VR 以及小型医疗设备等各个领域具有极大的发展潜力。

关键词: 超透镜; 时域有限差分法; 超分辨; 光子晶体; 衍射极限

中图分类号: O 43 **文献标志码:** A

Design and research of plate superlens based on GaP photonic crystal

YU Yue, SHEN Tong, ZHANG Qinghan, ZHENG Jihong

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Superlens is an imaging device based on metasurface photoregulation. Due to its advantages of miniaturization and process, it has a good application prospect in the aspects of lightweight and portability. In order to meet the demand of lens volume in the current market, a new type of superlens is simulated by using the finite-difference time-domain method. It is a flat plate superlens based on photonic crystal. The size is $2\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$, and its working wavelength is in the visible light band of $717\ \text{nm}$. In this design, TiO_2 waveguide was used as the substrate for the plate superlens design. Two groups of Au and GaP photonic crystals with the same period are etched on the TiO_2 waveguide, and the imaging performance of the lens is simulated and studied. In addition, by introducing a series of defects with different shapes, the imaging performance of the plate lens is analyzed. The results show that when the defect structure is a rectangular size of $L_x = 0.5\ \mu\text{m}$,

收稿日期: 2023-02-26

基金项目: 国家自然科学基金(61975122)

第一作者: 余 越 (1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为超透镜图像处理。E-mail: 15902189172@163.com

通信作者: 郑继红 (1975—), 女, 教授, 研究方向为聚合物液晶和信息光学。

E-mail: ji-hongzheng@sina.com

$L_y=0.8 \mu\text{m}$, the plate superlens presents the best imaging performance and reaches the value of 0.556λ super-resolution, which greatly improves the imaging quality. The flat superlens has great potential in portable imaging devices, AR, VR, and small medical devices in the future.

Keywords: superlens; finite-difference time-domain method; super resolution; photonic crystal; diffraction limit

引 言

传统光学元件采用面形变化来实现特定的相位分布,从而实现相应的功能器件,系统体积和重量通常较大^[1]。伴随着工艺的发展与成熟,现在的光学系统对透镜的体积和分辨率有着更高的要求,随之一种新型透镜出现在人们的视野中。2000年, Pendry^[2]和 Zhang等^[3]提出了一块负折射率材料平板,该结构被称为超透镜。由于超透镜能够显著提高图像分辨率,在光学成像应用领域引起了广泛的关注。

超透镜是基于超表面的成像器件,具有平面化、轻量化、易集成等优点^[4]。在超透镜高清成像领域中,可以通过设计大数值孔径超构透镜,用油浸的方式,实现高分辨率的聚焦成像。2012年, Shen等^[5]提出了一种具有表面缺陷的蜂窝光子晶体(photonic crystal, PC)结构的平板透镜,并且使用频率为 $0.2996(2\pi c/a)$ 的点光源模拟该透镜亚波长成像的结果,证实了表面缺陷可以帮助提升光子晶体的成像质量。2014年, Zong等^[6]基于随机单分子定位技术,利用荧光分子确定其点扩散函数的中心,然后通过循环叠加提高显微镜的分辨率,将其应用在显微成像中。2014年, Digaum等^[7]发现了一种集成光子学的空间变化光子晶体结构,其中单元的排列作为位置的函数而变化,能够仅使用具有非常高偏振选择性的低折射率材料来引导光束,其中一种红外偏振光遇到该晶格结构时不会通过,而另一种偏振光直接通过空间变体光子晶体传播。2016年, Mahin等设计了一种硅纳米结构与空气相结合的平凹透镜,并结合 Au 耦合涂层,利用其超材料的特性最终实现了成像质量的提高以及超分辨聚焦^[8-10]。2016年,哈佛大学 Capasso 小组利用微纳米结构设计了一种超透镜阵列,通过控制其阵列可以实现对入射光的调制,实现了

数值孔径 $NA=0.8$, 并达到了较高的聚焦效率^[11]。2018年, Haxha等^[12]利用光子晶体内嵌入银棒,降低了光子晶体结构本身的色散,通过引入反射镜等因素,提高了成像质量,最终突破了衍射极限。2021年, 仇宫润等^[13]提出了一种工作在 800 nm (红外波段)的超透镜,它的主要结构是亚波长光栅,通过模拟后发现它的聚焦效率最高可达 84.1% 。通过克服光传播的经典衍射极限^[14],获得了分辨率超高的图像。基于光子晶体的相位调控特性来实现突破衍射极限的超分辨聚焦,红外波段的研究偏多,而对于红光的研究甚少,且着重于内凹结构中半圆形缺陷对超透镜成像影响的研究,与此同时,当下使用较多的点光源和线偏振光源两种光源中,以线偏振光源作为超透镜的输入光源方面的研究也比较少。因此,本文提出了一种工作在 717 nm (可见光红光波段,其输入光源为 TE 模式线偏振光)的超透镜,将光子晶体结构与波导进行了结合,利用波导可以将光限制在波导内传输,从而提高了光的利用率,加上光子晶体可以产生负折射率特性,从而该透镜实现了亚波长成像与纳米尺度的高分辨率^[15-17];并引入了圆形、半圆形、矩形 3 种典型的内凹缺陷因素,通过不断改变缺陷的尺寸,发现矩形缺陷的成像效果最好,半高全宽达到了 244.66 nm ,分辨率也达到了 0.556λ ,明显地提高了成像质量。

1 材料及方法

基于光子晶体的特性而产生的负折射率能够实现纳米尺度的高分辨率,本文提出了一种光子晶体平板超透镜(后文中统称为 PC 超透镜)。该 PC 超透镜的结构如图 1 所示,由 $R=0.2a$ (R 为光子晶体柱的半径), $a=0.1 \mu\text{m}$ (a 为光子晶体结构的晶格常数)的 Au 和 GaP 两种周期相

同、晶格常数相同、半径相同的光子晶体构成, 以两者相切的结构刻入 TiO_2 平板波导上。

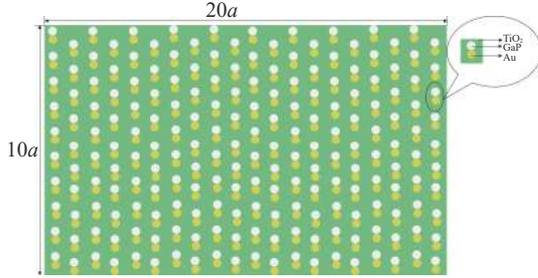


图 1 PC 超透镜结构

Fig. 1 PC superlens structure

1.1 材料

Au 在 FDTD 材料库中分为 Palik 和 CRC 两种模式^[18-19], 除此之外, 还有另外一种熟知材料库未有的模式——Drude 模型^[20]。Drude 模型是用类似于理想气体的一个模型来简化金属材料中这些传导电子的运动, Au 中大多数电子是自由的, 它们不与原子核结合, 回复力是微不足道的, 并且没有自然频率发生, 从而对光在 Au 中的色散采用 Drude 模型来解释。Lumerical 软件有官方的 Drude 模型的公式, 表达式为

$$\varepsilon_{\text{total}}(f) = \varepsilon - \frac{\omega_p^2}{2\pi f(iv_c + 2\pi f)} \quad (1)$$

式中: ε 为介电常数; ω_p 为等离子体共振频率; v_c 为等离子体碰撞频率; f 为频率。 ε_∞ 表示正离子核的净贡献: 对于理想的自由电子气体 $\varepsilon_\infty = 1$; 对于金属, 取决于带间响应^[12], $\varepsilon_\infty = 1 \sim 10$ 。

$$\omega_p = \sqrt{\frac{Ne^2}{\varepsilon_0} m^*} \quad (2)$$

式中: m^* 为电子的有效质量; N 为电子的密度; e 为单个电子携带的电荷量; ε_0 为真空中的介电常数。

在模拟中, 参数设置如表 1 所示。

GaP 光子晶体可以有效提高透镜的成像质量, 其主要是由于光子晶体本身的周期性结构对光的调制作用非常明显^[21]。衬底使用的是 TiO_2 波导, 目的是利用波导结构的全内反射使光能够有效进入到光子晶体结构中。

表 1 Drude 模型参数设置示意图
Tab. 1 Schematic diagram of Drude model parameter setting

参数	值
介电常数	1
等离子体共振频率/(rad/s)	0
等离子体碰撞频率/(rad/s)	0

1.2 方法

本研究是基于时域有限差分法 (finite difference time domain-method, FDTD) 对光子晶体与电场作用的仿真结果^[22-23]。网格使用 mesh 来细分, 精度定位 $dx = dy < \lambda/(10n)$, n 为材料中的最大折射率。本文中除能带图外所有的仿真都是建立在 $2D(x, y$ 平面) 范围内的仿真, 能带图 $3D$ 范围模拟如图 2 所示。

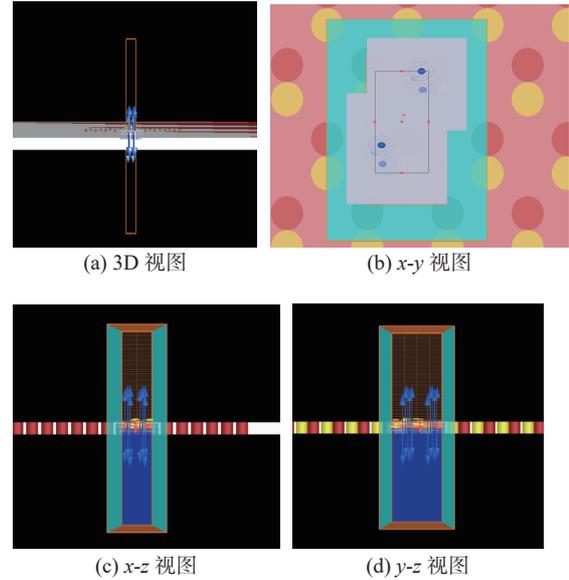


图 2 能带图模拟 3D 视图

Fig. 2 Simulation of 3D view of band structure

2 数值模拟与分析

2.1 结构设计与光源分析

本文研究了 Au 和 GaP 组合构成的平板 PC 超透镜结构对于光波长的选择性以及不同形状的缺陷对透镜成像质量的影响, 该 PC 超透镜

的长为 20 个周期，宽为 10 个周期，光被限制在 TiO₂ 平板波导内传播。为了观测其结构，在空间内放置了折射率监视器，然后得到结构折射率(见图 3)。从折射率监视器上可以很明显地观察到三部分不同的折射率，分别是 Au 光子晶体(下方圆柱)，GaP 光子晶体(上方圆柱)和 TiO₂ 平板波导(衬底)，Au 光子晶体和 GaP 光子晶体在 TiO₂ 平板波导上相切，半径用 R 表示， $R = 0.02 \mu\text{m}$ ，晶格常数用 a 来表示， $a = 0.1 \mu\text{m}$ 。

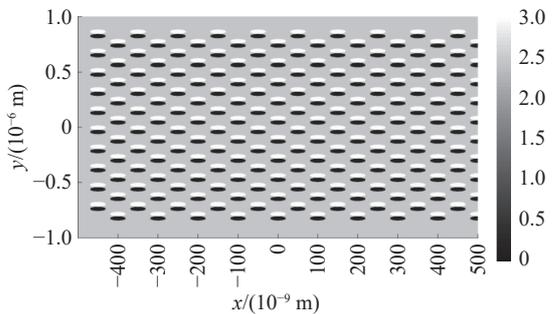


图 3 结构折射率图

Fig. 3 Structural refractive index

本文采用六角晶格状结构的 PC 透镜设计，结构具有高度对称性，对其进行 TE 模式光的能带分析如图 4 所示。

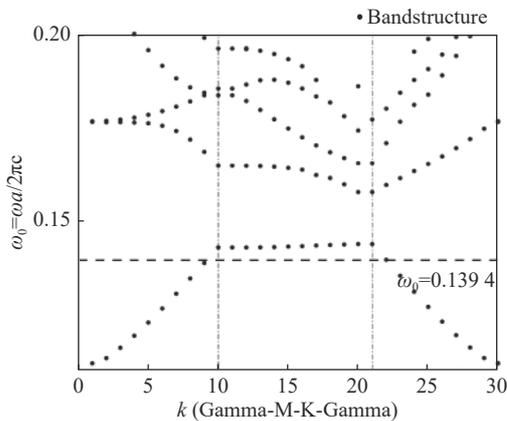


图 4 TE 模式能带图

Fig. 4 TE mode band structure

从能带图中可以分析出：有效负折射率是在当归一化角频率 $\omega_0 = 0.1394$ ，波长 $\lambda = 0.717 \mu\text{m}$ 时，在这种情况下，能带的梯度指示电磁波以负群速度传播，可以支持以倏逝波的形式来提高图像分辨率^[24]。

因此本次研究中选用光源波长为 $0.717 \mu\text{m}$ 的 TE 偏振光，如图 5 所示。光源在 y 方向上的

范围为 $2 \mu\text{m}$ ，与 PC 透镜在 y 方向上的长度相同，厚度为 $2a$ ，从而可以使透镜达到最好的聚焦效果。

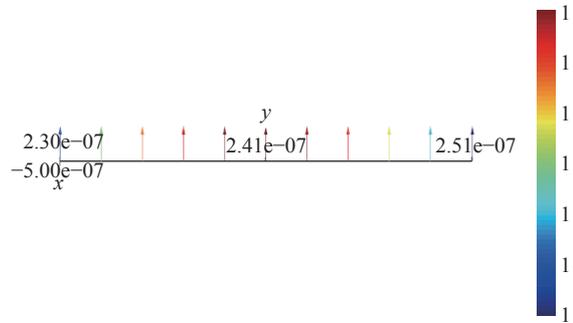


图 5 TE 模式光源图

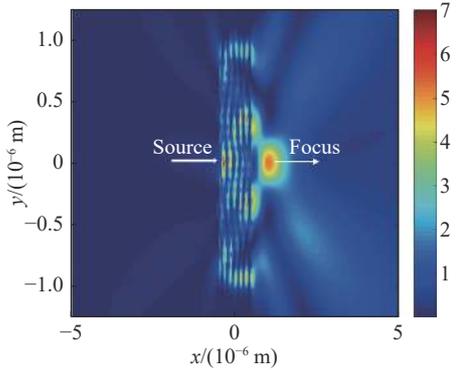
Fig. 5 TE mode light source

将光源置于 PC 结构左侧 $0.5 \mu\text{m}$ 处(即紧贴光子晶体波导结构)，并在结构右侧放置一个监视器，用这个监视器检测光强，本次模拟全部采用的都是近场成像(光源距离成像器件小于等于一个波长的距离称为近场成像)，且光的传播方向全部都是由 $-x$ 到 x 方向传播，本次评定成像质量的好坏是根据光在图像上呈现的焦斑大小以及其电场强度大小。强度越高，焦斑越小，成像质量越好。将 Au 光子晶体移除前后，其成像结果如图 6 所示。

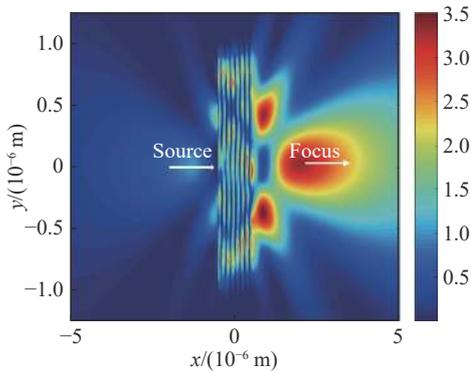
从图 6(a)中可以看出，将 Au 光子晶体移除前，光源只有少部分被反射回来，大部分通过结构之后形成一个圆点，即焦点。从图 6(a)和(b)的现象以及表 2 的对比，可以清楚地观测到加了 Au 光子晶体之后，焦斑范围减小，强度增大，成像质量也随之有效提高。

2.2 不同形状缺陷对结构成像质量的影响

光子晶体具有光子局域的特性，缺陷的属性决定了光子局域的性能和特性，光子晶体中加入面缺陷时，面缺陷相当于一块完全的反射镜，光波完全被局域限制在平面缺陷内。在光子晶体缺陷模式(频率处于完全禁带或模式禁带内的缺陷结构本征电磁模式)，和缺陷带(所有缺陷模式覆盖的禁带频率范围)，那么频率处于缺陷带的光波可以被长时间(低损失)地强局域在光子晶体中的缺陷结构中。当在光子晶体中引入缺陷介质时可以获得较大的透射光强，缺陷的位置选择



(a) 移除 Au 光子晶体前



(b) 移除 Au 光子晶体后

图 6 移除 Au 光子晶体前后对比图

Fig. 6 The comparison chart before and after the removal of Au photonic crystal

表 2 图 6 中焦点处最大强度对比

Tab. 2 Comparison of maximum intensity at the focus in fig.6

Fig	Fig.6(a)	Fig.6(b)
Maximum intensity	0.927	0.445

要综合考虑平板的对称性, 以此来提高成像的分辨率^[16]。

为了研究不同形状的缺陷对 PC 结构成像的影响, 本文讨论了 3 种形状的缺陷。

当缺陷为圆形结构时, 将透镜右侧做成内凹圆形结构(即移除一部分 Au 棒和 GaP 光子晶体以形成内凹缺陷), 且圆形缺陷外侧与结构右侧相切, 圆形缺陷的半径: $r = 0.3 \mu\text{m}$, 结构如图 7 所示。

加入圆形缺陷之后, 模拟得到的成像示意图如图 8 所示。

相比于图 6(a)、图 8 焦点光斑形成在内凹缺陷内部, 小且亮, 表 3 中图 8 强度对比有所变



图 7 圆形缺陷示意图

Fig. 7 Schematic diagram of circular defect

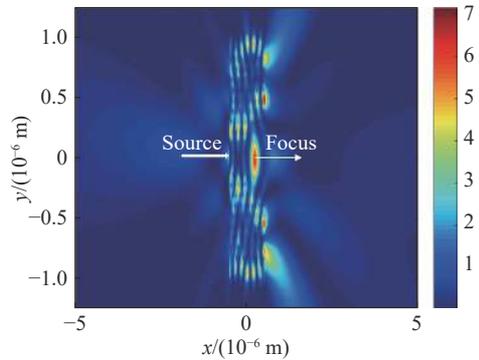


图 8 加入圆形缺陷 $r = 0.3 \mu\text{m}$ 之后的成像示意图

Fig. 8 Schematic diagram after adding circular defect $r = 0.3 \mu\text{m}$

表 3 图 6(a)、图 8 焦点处最大强度对比

Tab. 3 Comparison of maximum intensity at the focus in fig.6(a) and fig.8

Fig	Fig.6(a)	Fig.8
Maximum intensity	0.927	1.123

强, 说明结构形成内凹缺陷后可以有效提高成像质量。为了观察缺陷半径对成像情况的影响, 通过移除金棒和 GaP 光子晶体, 形成不同半径的内凹圆形缺陷。将半径减小至 $0.2 \mu\text{m}$, 发现虽然被反射回去的光很少, 但是在图像上并没有很明显的聚焦现象, 成像质量并没有达到明显的提升; 然后将半径减小至 $0.1 \mu\text{m}$, 成像如图 9 所示。

图 8、图 9 和表 4 对比可以发现, 当圆形缺陷尺寸 r 从 $0.3 \mu\text{m}$ 逐渐减小至 $0.1 \mu\text{m}$ 的过程中, 成像质量下降十分明显, 继续将 r 减小至 $0.05 \mu\text{m}$, 发现成像质量并没有很明显地升高, 因此得出: 当圆形缺陷半径 r 从 $0.3 \mu\text{m}$ 逐渐减小时, 成像质量并没有提高, 而呈现下降状态。

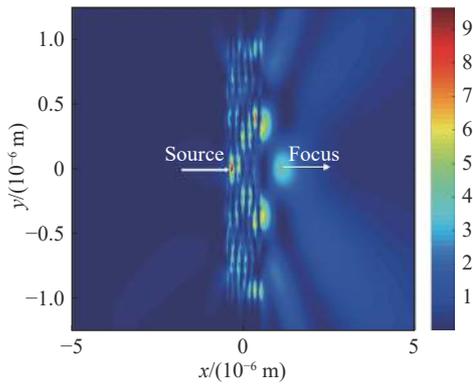


图 9 圆形缺陷半径 $r = 0.1 \mu\text{m}$ 时的成像示意图

Fig. 9 The Imaging diagram when the Circular defect radius $r = 0.1 \mu\text{m}$

将圆形半径增大，在增大的过程中发现：焦点亮度并没有增强，甚至在逐步减弱，所以增大圆形半径也并没有明显提高成像质量。综上所述，圆形缺陷半径 $r = 0.3 \mu\text{m}$ 时，成像质量最高。

表 4 图 8、图 9 焦点处最大强度对比

Tab. 4 Comparison of maximum intensity at the focus in fig.8 and fig.9

Fig	Fig.8	Fig.9
Maximum intensity	1.123	0.971

当缺陷结构为矩形时，设置长 L_x 为 $0.5 \mu\text{m}$ ，宽 L_y 为 $1 \mu\text{m}$ ，右边与 PC 透镜相切，结构示意图如图 10 所示，成像结果如图 11 所示。

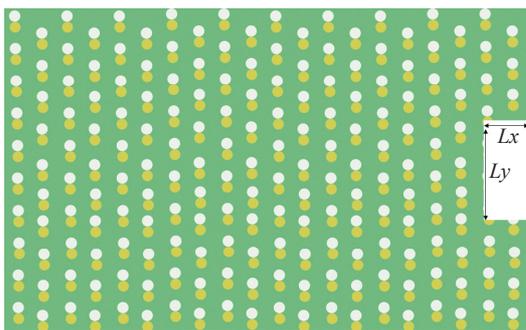


图 10 矩形缺陷结构示意图

Fig. 10 Schematic diagram of rectangular defect structure

从图 11 可以看出该矩形缺陷相比于 $r = 0.3 \mu\text{m}$ 圆形缺陷来说，焦斑也是成像在缺陷内部，焦斑变得圆且亮，表 5 对比最大强度时，图 11 有所减弱。改变矩形缺陷的尺寸， L_x 保持不变， L_y 增大至 $2 \mu\text{m}$ ，相当于减少光子晶体 x 方向上的周期数，成像如图 12 所示。

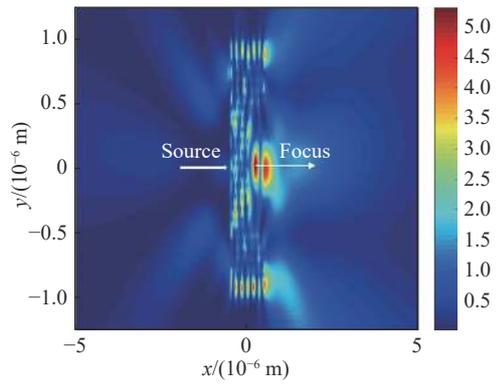


图 11 矩形缺陷 $L_x = 0.5 \mu\text{m}$ ， $L_y = 1 \mu\text{m}$ 时的成像示意图

Fig. 11 The imaging diagram when rectangular defect $L_x = 0.5 \mu\text{m}$ ， $L_y = 1 \mu\text{m}$

表 5 图 8、图 11 焦点处最大强度对比

Tab. 5 Comparison of maximum intensity at the focus in fig.8 and fig.11

Fig	Fig.8	Fig.11
Maximum intensity	1.123	0.808

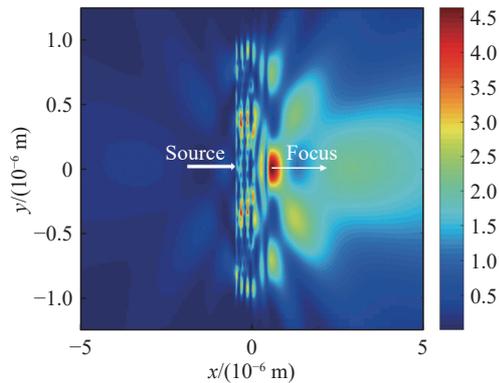


图 12 矩形缺陷 $L_x = 0.5 \mu\text{m}$ ， $L_y = 2 \mu\text{m}$ 时的成像示意图

Fig. 12 Schematic diagram when rectangular defect $L_x = 0.5 \mu\text{m}$ ， $L_y = 2 \mu\text{m}$

逐渐改变 L_y 的大小，多次模拟之后可以发现， L_y 从 $1 \mu\text{m}$ 到 $2 \mu\text{m}$ 的过程中，焦点亮度和强度(表 6)都不如往前；尝试减小 L_y ，观察成像效果，减小至 $L_y = 0.8 \mu\text{m}$ 时，如图 13 与表 7，发现成像质量最好。

表 6 图 11、图 12 焦点处最大强度对比

Tab. 6 Comparison of maximum intensity at the focus in fig.11 and fig.12

Fig	Fig.11	Fig.12
Maximum intensity	0.808	0.746

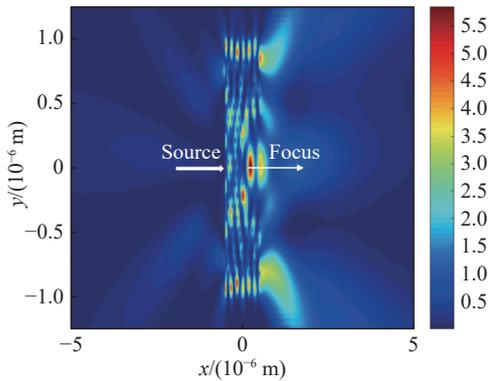


图 13 矩形缺陷 $L_x = 0.5 \mu\text{m}$, $L_y = 0.8 \mu\text{m}$ 时的成像示意图

Fig. 13 Schematic diagram when rectangular defect $L_x = 0.5 \mu\text{m}$, $L_y = 0.8 \mu\text{m}$

表 7 图 11、图 13 焦点处最大强度对比

Tab. 7 Comparison of maximum intensity at the focus in fig.11 and fig.13

Fig	Fig.11	Fig.13
Maximum intensity	0.808	1.175

保持 $L_y = 0.8 \mu\text{m}$ 不变, 将 L_x 进行一些放大或者缩小, 观察其现象。经过多次重复模拟, 发现改变对于成像质量的提高并没有很明显的作

用, 甚至还会降低成像质量。综上, 矩形缺陷尺寸为 $L_x = 0.5 \mu\text{m}$, $L_y = 0.8 \mu\text{m}$ 时成像质量最高。



图 14 半圆形缺陷示意图

Fig. 14 Schematic diagram of a semicircular defect

首先设定半圆缺陷的半径为 $0.23 \mu\text{m}$, 成像效果如图 15 所示, 从图像中可以观察到明显的聚焦现象, 且焦斑半径较小, 成像质量较好。

调节半圆缺陷的半径, 多次仿真之后, 发现当半圆缺陷的半径为 $0.23 \mu\text{m}$ 时, 成像质量最高。通过多次重复模拟实验, 将 3 种形状的缺陷

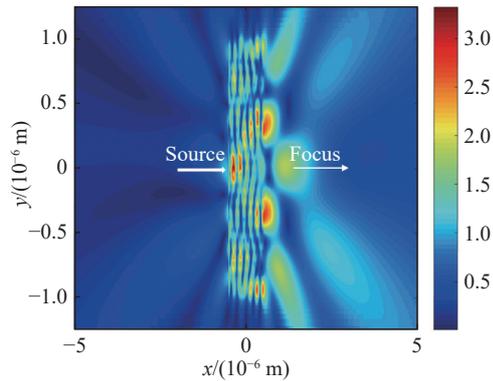


图 15 半圆形缺陷 $r = 0.23 \mu\text{m}$ 时的成像示意图

Fig. 15 Schematic diagram when semicircular defect $r = 0.23 \mu\text{m}$

进行最终成像效果对比: 发现当矩形缺陷为 $L_x = 0.5 \mu\text{m}$, $L_y = 0.8 \mu\text{m}$ 时, 焦斑呈现出来的效果最好, 且光强最高。表 8 列出了各个缺陷时的半高全宽(full width at half maximum, FWHM), 图 16 画出了表 8 中对应各种结构的半高全宽图。

表 8 原结构以及 3 种缺陷成像质量最好时对应的半高全宽

Tab. 8 The full width at half maximum to the original structure and the three defects with the best imaging quality

Defects	The original structure	Radius of semicircle $r = 0.23 \mu\text{m}$	Rectangle $L_x = 0.5 \mu\text{m}$, $L_y = 0.8 \mu\text{m}$	Radius of circular $r = 0.3 \mu\text{m}$
FWHM/nm	1028	303.46	244.66	322.57

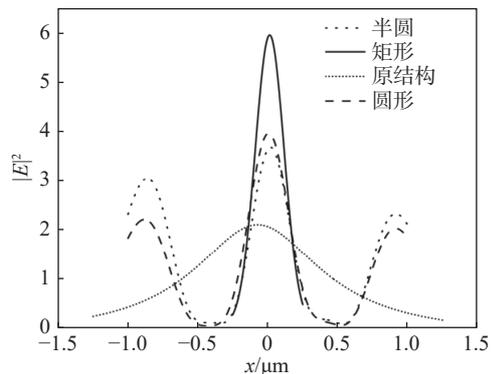


图 16 原结构、半圆缺陷、圆形缺陷、矩形缺陷的半高全宽图

Fig. 16 The full width at half maximum diagram of original structure, half-circle defect, circular defect, rectangular defect

为了分析和获得更高质量的分辨率, 模拟中保持光源的厚度不变(厚度为 $2a$), 在 PC 结构

左侧放置两个相互平行的线光源(两个光源的厚度相同,初相位相同,频率相同,且相位差恒定,保证可以产生干涉),由于光源在空间中只要相遇就会产生干涉,所以在出口处放置一个监视器,用来观测两个光源的干涉情况,两者之间的距离 $d = 0$ 时(见图 17)。

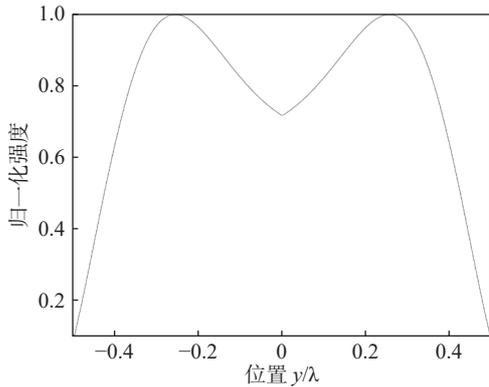


图 17 两光源之间的距离 $d = 0$ 时的干涉情况

Fig. 17 The interference situation when the distance between the two light sources is $d = 0$

逐渐改变两光源之间的距离,可以发现,当 $d = 0.399 \text{ nm}$,也就是 0.556λ 时,两个光源恰好可以被分辨出来,成像如图 18 所示,干涉情况示意图如图 19 所示。

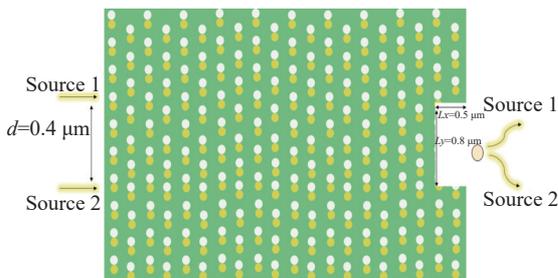


图 18 两光源之间的距离 $d = 0.556\lambda$ 的成像示意图

Fig. 18 Schematic diagram of the distance $d = 0.556\lambda$ between two light sources

3 结 论

本文提出了一种新型结构的 PC 超透镜,由 Au/TiO₂/GaP 构成,能够有效地将平板波导和光子晶体结合在一起,并且研究了结构内部产生不同形状的缺陷以及缺陷的数据改变对结构整体成像质量的影响,经过能带图的整体分析发现该 PC 超透镜整体结构对于 717 nm 光波(即红光)

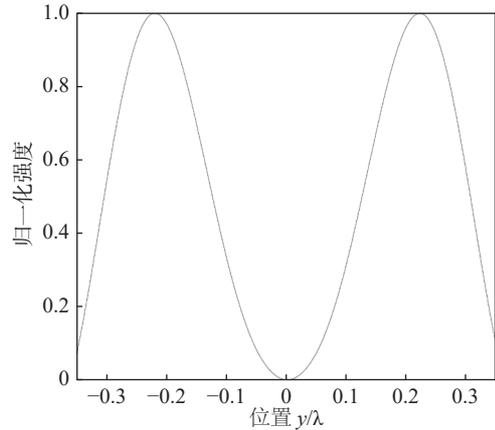


图 19 两光源之间的距离 $d = 0.556\lambda$ 时的干涉情况

Fig. 19 The interference situation when the distance between the two light sources is $d = 0.556\lambda$

可以呈现有效负折射率,并且 Au 光子晶体的添加确实有效提高了 PC 超透镜整体的成像质量;不同的缺陷形状以及数据改变过程中,其中矩形缺陷 $L_x = 0.5 \mu\text{m}$, $L_y = 0.8 \mu\text{m}$ 时,成像质量最高,半高全宽最小;利用具有矩形缺陷的 PC 超透镜整体来对两个平行光源进行干涉成像时,将两个光源之间的距离从 0 到 0.556λ 不断变化,通过曲线图可以有效地观测到两个光源的干涉情况, $d = 0.556\lambda$ 时,两个光源恰好可以被区分开。经过此次模拟,提出了一种超透镜的新型组成方式,对于现在的工艺来说可以实现,实现的过程也并不是特别复杂,精细程度上也可以达到要求,有望达到实体化;该 PC 超透镜在二维平面(x 和 y)内达到了成像中的可见光控制,可以应用于精细医疗设备、可携带设备等小型成像器件方面。

参考文献:

- [1] 李雄, 马晓亮, 罗先刚. 超表面相位调控原理及应用[J]. 光电工程, 2017, 44(3): 255 – 275.
- [2] PENDRY J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(18): 3966 – 3969.
- [3] ZHANG N P, WU R. Break through the diffraction limit of the super lens[J]. *Journal of Xianning University*, 2011, 31(6): 4 – 5,29.
- [4] FU X, LIANG H W, LI J T. Metalenenses: from design principles to functional applications[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2021, 14(2): 170 – 186.

- [5] SHEN Y F, WU F F, WANG Y C, et al. Imaging enhancement of a photonic crystal superlens due to a surface mode with a specific dispersion[J]. *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, 2012, 10(4): 485 – 492.
- [6] ZONG W J, ZHAO J, CHEN X Y, et al. Large-field high-resolution two-photon digital scanned light-sheet microscopy[J]. *Cell Research*, 2015, 25(2): 254 – 257.
- [7] DIGAUM J L, PAZOS J J, CHILES J, et al. Tight control of light beams in photonic crystals with spatially-variant lattice orientation[J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 25788 – 25804.
- [8] NASERPOUR M, ZAPATA-RODRÍGUEZ C J, DÍAZ-AVIÑÓ C, et al. Metacoatings for wavelength-scale, high-numerical-aperture Plano –concave focusing lenses[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2016, 33(10): 2120 – 2128.
- [9] 汤世伟, 朱卫仁, 赵晓鹏. 光波段多频负折射率超材料[J]. *物理学报*, 2009, 58(5): 3220 – 3223.
- [10] KANG M, CHEN J, LI S M, et al. Optical spin-dependent angular shift in structured metamaterials[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(19): 3942 – 3944.
- [11] 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.
- [12] HAXHA S, ABDELMALEK F, OUERGI F, et al. Metamaterial superlenses operating at visible wavelength for imaging applications[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 16119.
- [13] 仇宫润, 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.
- [14] 卢美枝. 瑞利判据与光学系统的分辨本领[J]. *开封教育学院学报*, 2013, 33(4): 196 – 197.
- [15] 杜银霄, 张又林, 麻华丽, 等. 各向异性晶体的平板负折射成像研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0616001.
- [16] 刘逢芳, 朱兆杰, 童元伟. 光子晶体负折射材料中缺陷对成像质量的影响[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0416004.
- [17] OUERGI F, ABDELMALEK F, HAXHA S, et al. Nanophotonic sensor based on photonic crystal structure using negative refraction for effective light coupling[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(15): 3269 – 3274.
- [18] HEAVENS O S. Handbook of optical constants of solids II[J]. *Journal of Modern Optics*, 1992, 39(1): 189.
- [19] GRIFFITHS E. Handbook of chemistry and physics a ready-reference pocket book of chemical and physical data[J]. *Nature*, 1922, 109(2734): 369 – 370.
- [20] 陈秉乾, 王稼军, 程福臻. Drude 的金属经典电子论(1900)与超导体的 London 方程(1935)[J]. *大学物理*, 2007, 26(11): 8 – 10.
- [21] NODA S. Manipulation of photons by photonic crystals[J]. *MRS Bulletin*, 2009, 34(10): 751 – 755.
- [22] YEE K. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1966, 14(3): 302 – 307.
- [23] YANG H L, ZENG X Y, WU X Y. An approach to solving Maxwell's equations in time domain[J]. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 2023, 518(1): 126678.
- [24] 张硕实, 何辛涛, 陈晓东, 等. 拓扑光子晶体与超构光子学(特邀)[J]. *光子学报*, 2022, 51(5): 0551305.

(编辑: 张 磊)