

基于近场电磁扫描系统的电磁超透镜实验表征

陈晓东^{1,2} 雷霆锋¹ 陈鸿翔¹ 庞晓宁^{1,2} 董建文^{1,2} 赵福利^{1,2}

(¹ 中山大学物理学院; ² 物理学国家级实验教学示范中心(中山大学), 广东 广州 510275)

摘要 透镜是光学实验中常见的元件,也是成像系统中必不可少的一环。然而随着集成成像等新型光学成像技术的发展,传统光学透镜因其体积大等劣势难以实现微型化和集成化。近年来,超透镜作为平面光学元件,通过设计亚波长尺寸的单元结构可以实现对光的偏振、振幅、相位等方面的调控,这些独特的光学特性也使超透镜成为了近些年来微纳光学领域的研究热门。为了激发学生对前沿课题的研究兴趣,本文将介绍超透镜的工作原理,并设计了一种会聚型电磁超透镜,通过数值仿真与实验表征验证了超透镜的聚焦性能与反常色散特性,帮助学生更好地理解超透镜,推动教学与科研的结合。

关键词 超构光学;超透镜;近场电磁扫描系统

ELECTROMAGNETIC METALENSES BASED ON NEAR-FIELD ELECTROMAGNETIC WAVES SCANNING SYSTEMS

CHEN Xiaodong^{1,2} LEI Tingfeng¹ CHEN Hongxiang¹ PANG Xiaoning^{1,2} DONG Jianwen^{1,2} ZHAO Fuli^{1,2}

(¹ School of Physics, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275;

² National Demonstration Center for Experimental Physics Education, Guangzhou, Guangdong 510275)

Abstract Lenses are common components in optical experiments and are essential in imaging systems. However, with the development of new optical imaging technologies such as integrated imaging, traditional optical lenses face challenges in miniaturization and integration due to their large size. In recent years, meta-lenses, as planar optical elements, can manipulate light in terms of polarization, amplitude, phase, and other aspects by designing sub-wavelength units. These unique optical properties have also made meta-lenses a hot topic in the field of micro-nano optics in recent years. To inspire students' interest in researching cutting-edge topics, this paper introduces the working principle of meta-lenses and designs a converging electromagnetic meta-lens. Through numerical simulation and experimental characterization, the focusing performance and anomalous dispersion characteristics of the meta-lens are validated, helping students to better understand meta-lenses and promoting the integration of teaching and research.

Key words meta-optics; meta-lens; near-field electromagnetic waves scanning systems

收稿日期: 2024-05-31

基金项目: 粤疆藏区域联合光学虚拟教研共同体建设(GDSGGT2022003);2022年度广东省高校教学质量与教学改革工程项目-光学虚拟教研室(粤教高函[2023]4号)。

作者简介: 陈晓东,中山大学物理学院副教授,chenxd67@mail.sysu.edu.cn。

通信作者: 赵福利,中山大学物理学院教授,stsfl@mail.sysu.edu.cn。

引文格式: 陈晓东,雷霆锋,陈鸿翔,等. 基于近场电磁扫描系统的电磁超透镜实验表征[J]. 物理与工程, 2024, 34(5): 144-149.

Cite this article: CHEN X D, LEI T F, CHEN H X, et al. Electromagnetic metalenses based on near-field electromagnetic waves scanning systems[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(5): 144-149. (in Chinese)

近年来,随着光学成像技术在消费电子、医疗、智能驾驶等领域的应用,人们对光学元件提出了微型化、集成化的发展需求。作为成像系统的核心部件,透镜的主要功能就是对波前起到相位变换作用^[1]。光在透镜介质中传播时,会产生相位的积累,不同位置处的光波所积累的相位不同,从而产生了相位偏移,进而实现了光束聚焦的效果^[2]。然而,这也使得传统光学透镜的体积与厚度都比较大,不利于携带与集成,使整个成像系统趋于庞大、复杂。随着人工超材料的发展,在超构光学领域人们发现,通过在超表面中设计离散的相位梯度变化,所实现的超透镜可以在单一平面内实现光束聚焦^[3,4]。同时,超透镜体积小、与半导体制备工艺兼容等特点也使其在集成成像领域有着很好的应用前景。因此,为了帮助学生了解超构光学领域的研究近况,推动教学与科研的结合,我们基于近场电磁扫描系统设计了一种微波电磁超透镜,并对其进行了实验表征。

本文从广义斯涅耳定律出发,介绍了光束在梯度相位变化的超表面结构上所发生的折反射现象,阐述超透镜聚焦光场的原理。接着以偏振不敏感的会聚型超透镜为例详细说明了超透镜的设计过程,利用不同直径的陶瓷柱构建了一个微波电磁超透镜。我们还通过 FDTD 仿真软件和微波近场电磁扫描系统对超透镜进行了模拟仿真与实验表征,验证了电磁超透镜的光场聚焦性能和反常色散的特性。本文的工作将有助于提升学生对复杂物理概念的可视理解,激发学生对超构光学领域前沿课题的研究兴趣,帮助学生理解和掌握超透镜的相关知识。

1 超透镜聚焦光场原理

超透镜是一种新型平面光学元件,具有较高的设计自由度与光场调控精度。人们利用亚波长尺寸的结构单元对电磁波的相位响应突变,有选择地排列超透镜的原用来操控入射光波的波前,进而实现光束聚焦。根据单元结构产生相位突变的不同机制,超透镜可以大致分为三类:传播相位型、几何相位型和共振相位型。本文中研究传播相位型超透镜,其原理是利用电磁波在不同的单元结构中传播的光程差,来产生传播相位的变化。

在基础光学课程中^[2],我们知道,利用费马定理可以推导出光的折射定律,也就是斯涅耳定律^[2]。在此基础上,人们改变透镜表面的曲率,制作出凸透镜,实现了光束聚焦效果。而超透镜作为一种二维的平面光学元件,可以用更小的体积同样实现光束的聚焦。然而,当我们考虑光在超透镜表面发生折射时,却难以用传统斯涅耳定律理解光束聚焦的现象,这是由于折射界面上存在相位梯度变化。为了从理论上理解超表面调控光波前的原理,2011年,哈佛大学的 Capasso 教授团队提出了广义斯涅耳定律,解释了具有相位梯度变化的界面处所发生的折反射现象^[3]。广义斯涅耳定律表达式如下

$$\sin\theta_r - \sin\theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi n_i} \frac{d\Phi}{dx} \quad (1)$$

$$n_i \sin\theta_t - n_i \sin\theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\Phi}{dx} \quad (2)$$

其中, n_i 为入射介质的折射率, n_t 为折射介质的折射率, θ_i 为入射角, θ_r 为反射角, θ_t 为折射角, λ_0 为入射波长, $d\Phi/dx$ 为界面处的相位梯度。式(1)为反射的情况,式(2)为折射的情况。不难发现,若边界处不存在梯度相位,即 $d\Phi/dx = 0$ 时,广义斯涅耳定律就变成了传统的折反射定律。利用广义斯涅耳定律设计超表面的相位梯度,就可以调制反射或折射光的出射角度,实现光束的发散或聚焦,甚至可以实现负反射、负折射^[3]等反常的光学现象。

2 会聚型电磁超透镜的设计

基于广义斯涅耳定律,我们可以设计超透镜。在设计之初,我们需要考虑器件工作的目标波段。如果要设计可见光频段下的超透镜,为实现光束聚焦,其单元结构需要达到亚波长尺寸,在样品制备环节就需要涉及光刻、刻蚀等复杂的微纳加工技术,十分不利于本科生学习。由于微波与可见光一样同属于电磁波,都满足惠更斯原理与麦克斯韦方程组。面向本科生教学,我们基于近场电磁扫描系统设计一个工作在 10GHz 附近的微波电磁超透镜。

超透镜的设计过程包括三个步骤^[5]:(1)设计目标相位分布;(2)构建结构相位库;(3)将目标相位分布与结构相位库相匹配。本文以会聚型超透

镜(即令入射到超透镜表面不同位置的光束会聚在焦点处)为例说明超透镜的设计过程。根据广义斯涅耳定律,结合几何推导,我们可以得到会聚型超透镜的理想聚焦相位分布公式^[6]

$$\varphi(x, y) = -\frac{2\pi}{\lambda_0}(\sqrt{x^2 + y^2 + f^2} - f) \quad (3)$$

结合实验条件,我们选取中心波长 $\lambda_0 = 30\text{mm}$, 焦距 $f = 300\text{mm}$, 由上式可以得到超透镜的目标相位分布。

在构建结构相位库的环节中,有诸多因素需要考虑,包括超透镜单元结构的形貌、材料折射率等等,提供了极大的设计自由度。在这里,我们选择圆柱形结构作为超透镜的周期单元,以三角晶格周期排布组成二维光栅,并采用陶瓷柱($n \approx 3$)作为实验材料。为了方便实验操作,我们还利用打孔的聚甲基丙烯酸酯亚胺刚性泡沫板($n \approx 1$)来放置陶瓷柱。超透镜的单元结构与聚焦光束示意图如图 1 所示。

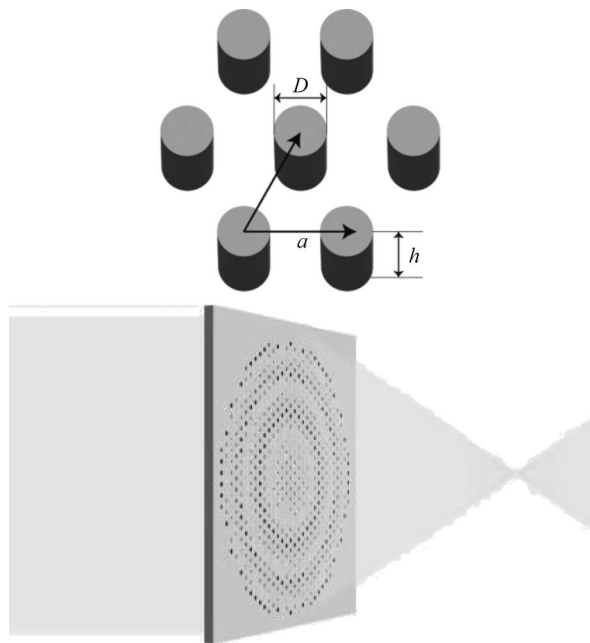


图 1 超透镜单元结构与聚焦光场示意图

接下来,我们还需要确定超透镜的晶格常数 a 、陶瓷圆柱的直径 D 和高度 h 。根据光栅方程

$$\sin\theta_m = \frac{m\lambda}{a} \quad (4)$$

为了满足在垂直入射条件下,只有零级衍射光入射,晶格常数需要满足 $a < \lambda/\sin\theta_1$, 即晶格常数应小于超透镜两侧的光波波长。我们使用 S4 数值仿真软件对上述二维光栅的晶格常数 a 、圆柱直

径 D 、圆柱高度 h 进行扫参,得到了不同参数下的二维光栅对应的透射谱和相位谱。以 $a = 18\text{mm}$ 时的扫参结果为例,如图 2 所示。图(a)为透射谱的扫参结果,图(b)为结构相位响应的扫参结果,横坐标表示陶瓷柱的高度 h ,纵坐标表示陶瓷柱的直径 d ,颜色坐标表示透射率、相位响应的归一

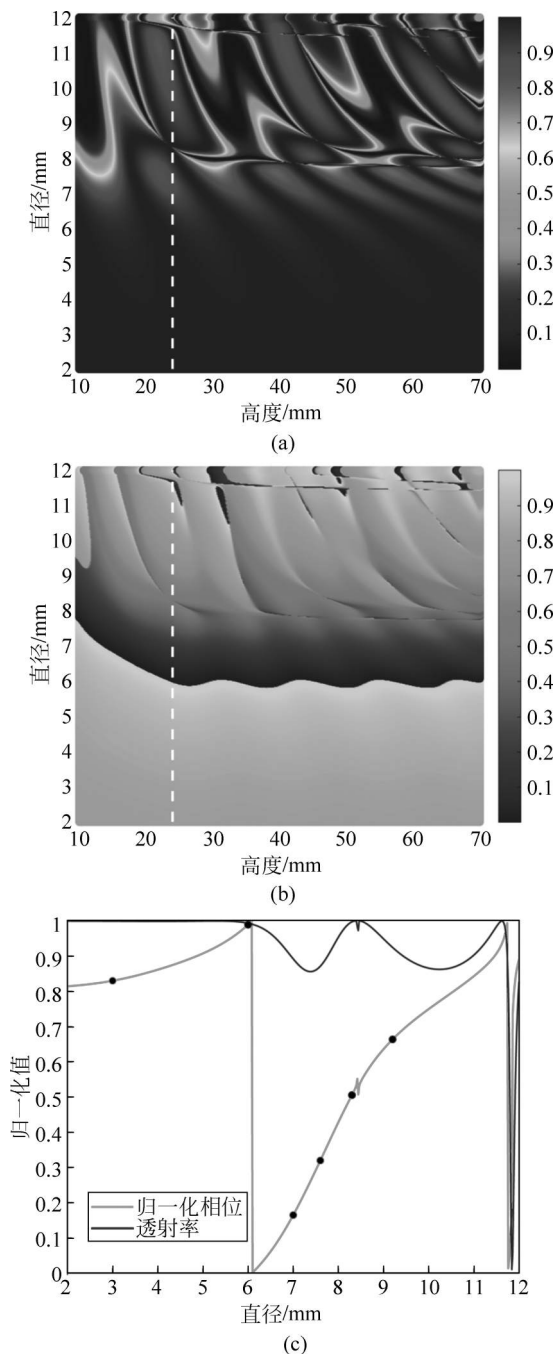


图 2 超透镜扫描参数设计流程

(a) 不同高度和直径下光栅的透射率; (b) 不同高度和直径下光栅的归一化相位响应; (c) 不同直径下光栅的透射率与归一化相位响应

化数值。超透镜要实现电磁波的聚焦,需要满足两个条件:一是设计的超透镜结构必须是具有高透射率的,对应于图 2(a)中的深色区域;二是要具有能够完整覆盖 $[0, 2\pi]$ 相位区间的单元结构相位库。在图 2(a)、(b)中选择一条垂直于 x 轴的线,也就是选定一个圆柱高度 h ,例如图中的竖直虚线,使其能够位于红色的高透射率区域,同时也能覆盖 $[0, 2\pi]$ 相位区间,这样的一组数据,就可以认为是一个单元结构相位库。竖直虚线所对应的一维线图如图 2(c)所示,深色线代表透射率,浅色线代表归一化相位响应。我们选择了 6 个圆柱直径参数:7mm、7.6mm、8.3mm、9.2mm、3mm、6mm,它们的归一化相位响应具有线性上升的特点,如图 2(c)中黑点所示。最后,通过将这 6 个具有不同相位响应的陶瓷柱,根据式(3)目标相位分布函数进行排列,我们就得到了设计的会聚型超透镜结构。如图 3 所示,其子图分别代表超透镜结构的二维示意图、样品实拍图和样品的局部放大图。样品的直径约为 530mm,利用公式 $NA = n_{\text{air}} \cdot \sin\left(\arctan \frac{D}{2f}\right)$,计算得到我们设计的超透镜的数值孔径约为 0.66。

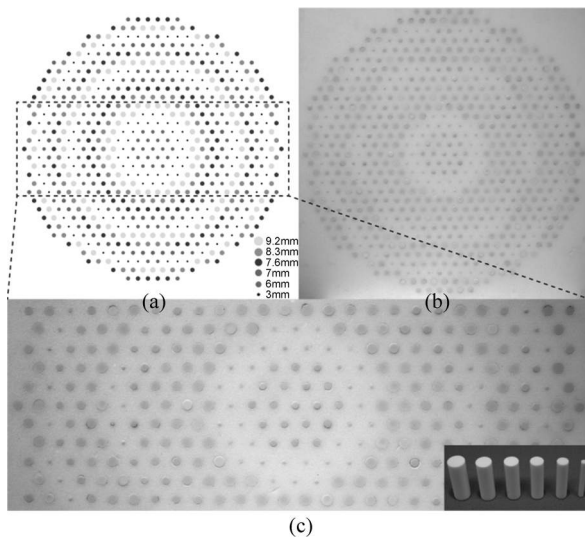


图 3 微波超透镜样品的平面结构与实拍图

(a) 微波电磁超透镜样品的二维结构示意图,不同颜色的圆点对应于不同直径的圆柱;(b) 微波电磁超透镜样品俯视图;(c) 样品局部放大图,其中右下角插图展示了实验所使用的 6 种不同直径的氧化铝陶瓷柱

3 电磁超透镜的模拟仿真与实验表征

为了验证设计的超透镜的聚焦性能,我们利

用 FDTD 仿真软件对超透镜整体结构进行了数值模拟,并利用近场电磁扫描系统进行了实验表征,实验装置如图 4 所示,由低副瓣透镜天线、三维平移机械臂、矢量网络分析仪、微波超透镜样品、线缆与探针等组成。我们将不同直径的陶瓷柱嵌入定制的打孔泡沫板中。低副瓣透镜天线作为平面波激发源放置在超透镜样品正前方,设超透镜所在的平面设置为 $z=0$ 平面,光束沿 z 轴正方向传播,电场接收探针固定在机械臂末端夹具上,可随机械臂沿 x 、 y 、 z 三个维度平移扫描。

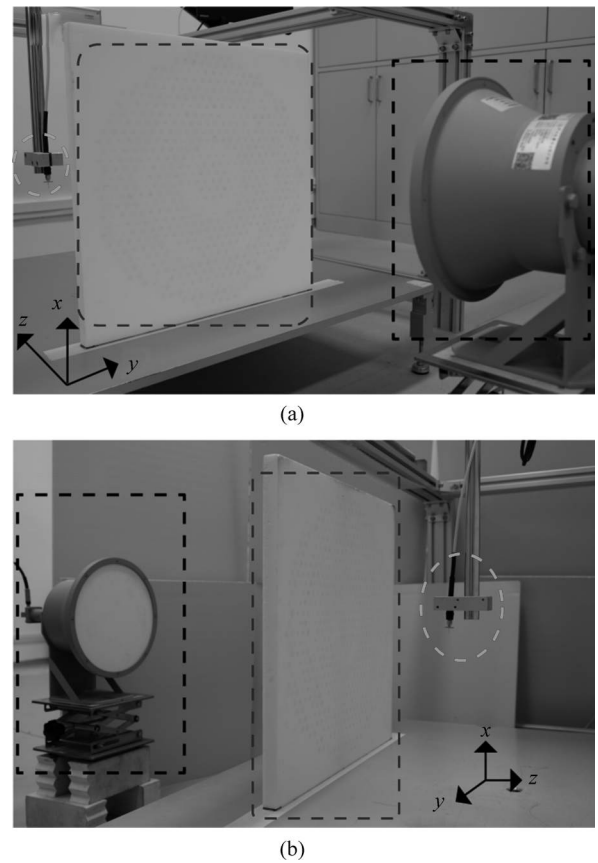


图 4 微波超透镜聚焦光场实验装置示意图

图 4(a)与 4(b)为不同角度的示意图。实验装置包括低副瓣透镜天线、微波超透镜样品、电场接收探针三部分

仿真和实验得到的 $Y-Z$ 平面的归一化电场分布如图 5(a)、5(b)所示,可以发现实验与仿真结果相近。电磁波经过超透镜后,在 $z=300\text{mm}$ 附近出现了场强极大值。沿 $y=250\text{mm}$ 的中轴线提取场强分布数据,可以得到如图 5(c)所示的线图,其中灰色虚线表示仿真结果,在 $z=302.5\text{mm}$ 处有场强极值;灰色实线表示实验结果,在 $z=300.5\text{mm}$ 处有场强极值。场强极值对应的 z 轴坐标就是超

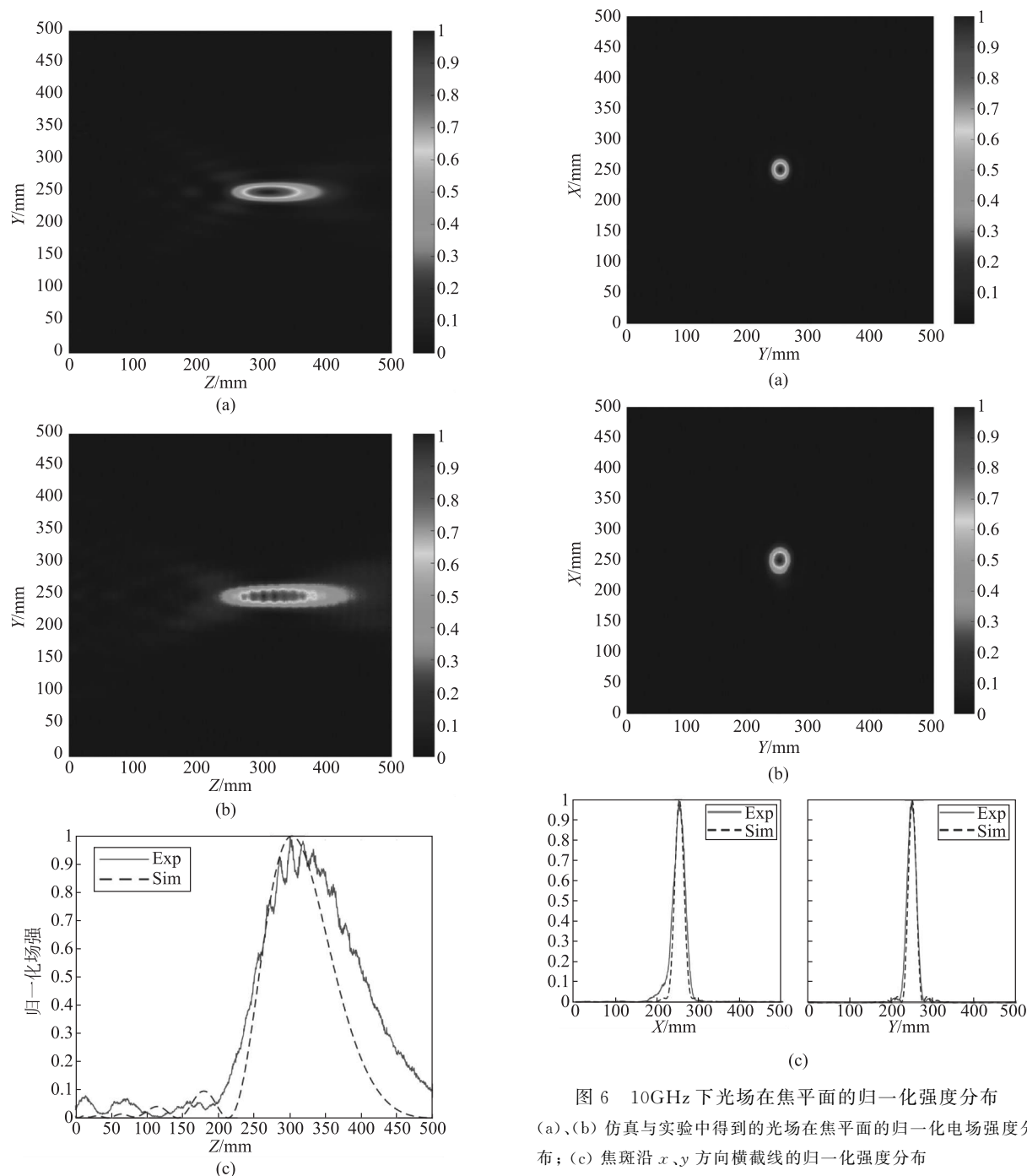


图5 10 GHz下光场沿传播方向的归一化强度分布
(a)、(b) 仿真与实验中得到的光场在YZ平面的归一化电场强度分布；(c) 光场沿波矢方向中轴线(对应图(a)、(b)中的对称轴 $Y=250\text{mm}$)的归一化强度分布

透镜的焦距,上述结果与设计的300mm焦距,基本吻合,误差在1%以内。

随后,我们对超透镜的焦平面进行了数值模拟与实验扫描,得到了如图6(a)、(b)所示的焦平面归一化场分布,可以发现在焦平面的中心处出

图6 10GHz下光场在焦平面的归一化强度分布
(a)、(b) 仿真与实验中得到的光场在焦平面的归一化电场强度分布；(c) 焦斑沿 x 、 y 方向横截线的归一化强度分布

现了艾里斑状的亮斑。沿图6(a)、(b)中的对称轴做截线,可得如图6(c)所示的焦斑沿 x 、 y 方向横截线的归一化强度分布。测量曲线的半高宽,可以得到焦斑沿 x 方向中轴线的半高宽约为26mm(仿真)、32mm(实验);沿 y 方向中轴线的半高宽约为22mm(仿真)、25mm(实验)。半高宽的大小与波长大小相当,体现出超透镜优异的聚焦性能。

在实验过程中,我们发现超透镜具有与传统

光学透镜相反的色散特性,如图7所示。图7(a)展示了不同频率的平面波入射时,样品在Y-Z平面中的场分布;图7(b)(c)则分别展示了仿真与实验下沿波矢方向中轴线的归一化场强分布。

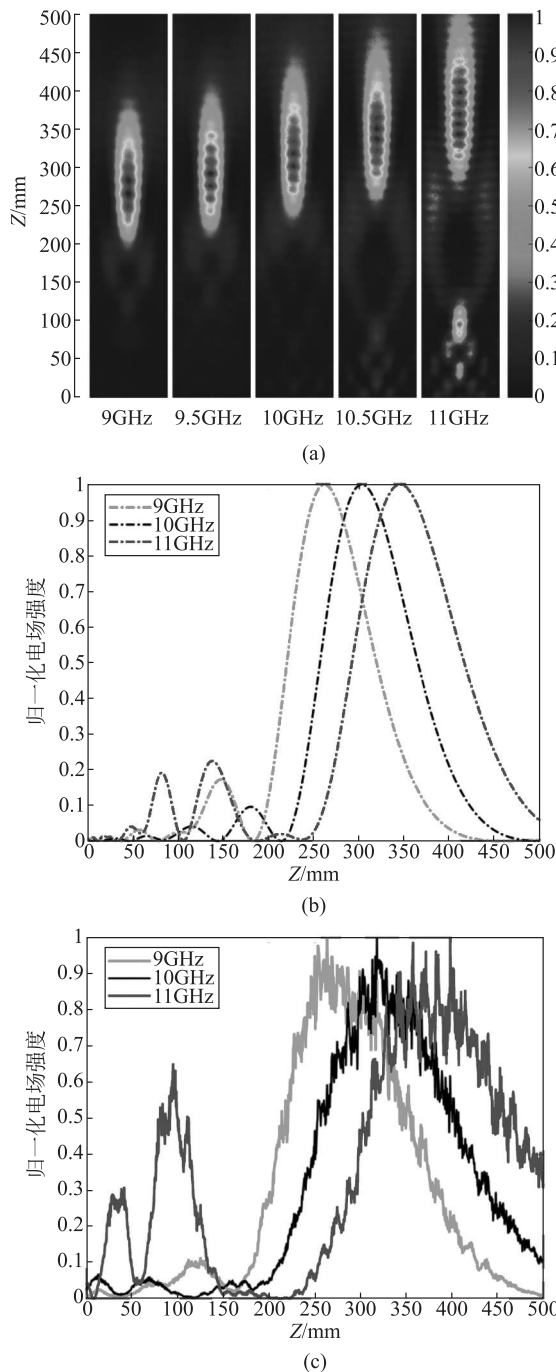


图7 焦距随频率的变化关系

(a) 实验测得的不同频率下光场在Y-Z平面中心的分布变化;
(b)、(c) 仿真与实验中得到的不同频率下光场沿波矢方向中轴线的强度分布变化

从图中可以明显地发现随频率的变化,场强极值沿 z 方向发生偏移,即超透镜的焦距随频率增大而增加,证明了超透镜的反常色散性质。而当11GHz的平面波入射时,在 $z=100\text{mm}$ 前后出现了一个次焦点,则说明入射光频率的偏移会导致超透镜聚焦性能的下降。

4 总结

本文基于近场电磁扫描系统设计了一种会聚型电磁超透镜,通过数值仿真和实验表征展示了其优异的聚焦性能和独特的反常色散特性。该超透镜利用亚波长尺寸的陶瓷柱结构,实现了对电磁波的有效调控。与传统光学透镜相比,超透镜在微型化和集成化方面具有显著优势,为光学成像技术的发展提供了新思路。本文将帮助学生更好地理解超透镜的原理,激发学生对前沿课题的研究兴趣,推动教学与科研的深度融合,为超透镜在光学成像技术中的应用与发展做出贡献。

参考文献

- [1] 余向阳. 信息光学[M]. 广州: 中山大学出版社, 2015.
YU X Y. Information optics[M]. Guangzhou: Sun Yat-sen University Press, 2015. (in Chinese)
- [2] 陈敏, 赵福利, 董建文. 光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2018.
CHEN M, ZHAO F L, DONG J W. Optics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2018. (in Chinese)
- [3] YU N, 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.
- [4] FAN Z B, SHAO Z K, XIE M Y, et al. Silicon nitride metalenses for close-to-one numerical aperture and wide-angle visible imaging[J]. Physical Review Applied, 2018, 10(1): 041005.
- [5] PAN M, FU Y, ZHENG M, et al. Dielectric metalens for miniaturized imaging systems: progress and challenges[J]. Light: Science & Applications, 2022, 11(1): 195.
- [6] 董建文, 范智斌, 陈晓东, 等. 基于FDTD的超透镜聚焦光场仿真[J]. 物理与工程, 2022, 32(6): 127-131.
DONG J W, FAN Z B, CHEN X D, et al. Focusing field simulation of metalens based on FDTD[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(6): 127-131. (in Chinese)