宽带消色差超构透镜研究

吴一凡, 王漱明*

南京大学物理学院, 固体微结构国家重点实验室, 南京 210093

*联系人, E-mail: wangshuming@nju.edu.cn

收稿日期: 2021-09-28; 接受日期: 2021-11-22; 网络出版日期: 2022-02-17

国家自然科学基金(编号: 11621091, 11822406, 11834007, 11774164, 11774162)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2017YFA0303700)资助项目

摘要 超构表面因其存在丰富的物理内涵和应用价值, 可以被制作成各种光场调控器件. 为了优化宽带连续消色差的设计方法, 我们依靠超构表面的几何相位和共振相位实现对光学器件中波长不依赖的基础相位与波长依赖的色差相位的拆分, 设计出在近红外波段的消色差反射聚焦镜和反射板. 利用在可见光下透明的Ga_N纳米柱和槽结构, 制备了可见光频段的消色差透镜, 并首次取得了基于超构表面透镜的全彩成像和视频拍摄. 面对数值孔径和通光口径不能同时较大的问题, 我们引入超构透镜阵列的体系, 不仅获得了成像效果的提升, 还可以实现光场成像, 这极大地丰富了超构透镜成像的内容和功能. 近期, 将有相位调控能力的超构透镜阵列与非线性晶体相结合, 成功地实现了100个自发参量下转换过程的同时产生. 此量子光源可以实现高维路径纠缠光源和多光子源. 超构透镜为光学成像和量子光学等领域引入了新的体系和新的物理效应.

关键词 超构透镜, 消色差, 光量子信息技术

PACS: 42.15.Fr, 42.70.-a, 42.79.-e

不同的颜色使我们的世界得以区分且丰富多彩, 而如何将这个缤纷的世界更好地呈现出来, 始终是光学领域的一个最重要的课题, 其中色差是影响成像效果的最主要问题. 我们利用相位拆分原理, 将理想消色差所需要的复杂相位分解成相对简单的基础相位和色差相位, 成功制备出了宽带连续消色差超构表面器件. 由于超构表面这个蕴含丰富物理的体系可以完美地对应这两种需求, 我们由此能够得到描述对称性的几何相位实现基础相位, 以及电磁共振得到的共振相位实现色差相位, 将两者结合起来, 就可以获得宽带

连续消色差器件^[1-7]. 根据这个设计原理, 我们实现了在近红外波段的消色差反射聚焦镜和反射板^[8].

基于相位拆分原理, 我们创新地提出Ga_N半导体纳米棒和纳米槽相结合的设计方案, 这个方案可以得到更大的相位补偿, 成功实现了可见光频段(400–660 nm)的宽带连续消色差的超构透镜, 其带宽从之前近红外消色差工作的中心波长的1/3增大到中心波长的1/2, 平均工作效率也提高到40%–50%, 最高工作效率甚至接近70%. 此可见光频段的宽带消色差超构透镜可以实现高分辨率的白光照明成像, 可以看

引用格式: 吴一凡, 王漱明. 宽带消色差超构透镜研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52: 264221

Wu Y F, Wang S M. Research on broadband achromatic metalenses (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2022, 52: 264221, doi: 10.1360/SSPMA-2021-0274

清1951年美国空军(USAF)分辨率板的第7阶第6级结构, 其结构精度为 $2.19\ \mu\text{m}$, 接近此透镜的分辨率极限($\lambda/2\text{NA}$), 且不存在色差问题. 与普通的超构透镜(基于几何相位的非消色差超构透镜)的成像效果相比, 成像效果有显著的提升, 能够将非常明显的色差效应有效地抑制住. 使用这种宽带消色差超构透镜还可以实现可见光频段的全彩成像, 得到的图像与原图基本一致. 另外, 我们使用此透镜实现了动态彩色视频的拍摄, 并获得了良好的拍摄效果. 这个工作是有报道的首次使用超构透镜实现的可见光频段彩色成像和视频拍摄, 对超构透镜在彩色成像领域的应用有重要推动作用^[9].

使用同样的方案, 我们将宽带消色差的工作频段拓展到中红外和太赫兹频率. 在此条件下, 我们将超透镜设计于硅衬底上, 在 $8\text{--}12\ \mu\text{m}$ 的中红外波段, 其传输效率峰值达到了97.7%, 在整个工作带宽内平均效率约为60%^[10]. 而在太赫兹频域($0.3\text{--}0.8\ \text{THz}$)内, 同样基于硅, 设计并验证了带宽约为中心频率的91%, 具有峰值工作效率超过68%和相对较高的数值孔径(0.385)的超构透镜. 此透镜实现了大相位补偿, 且厚度仅为几百微米, 非常适合集成化和小型化, 这弥补了该频段光学材料缺乏的问题, 同时获得了很好的消色差效果^[11].

针对单个消色差超构透镜有限的通光口径和成像能力^[12–14], 我们引入消色差超构透镜阵列实现了毫米量级口径的超构透镜系统, 同时进一步增大了透镜系统数值孔径, 提高了成像分辨率. 使用这种复眼结构的成像体系, 还可以得到从多个视场角度观察景物的像, 实现光场成像——对视场中物体的三维信息(光场信息)的有效提取. 由于每个小透镜的尺寸只有几十微米, 使用传统体块光学的多片不同色散材料透镜叠加的消色差方法来消除色差对加工能力要求非常高, 几乎无法完成. 因此只有使用消色差超构透镜阵列才可以完成这样的功能. 我们制备了一个 60×60 的消色差超构透镜阵列. 此工作将消色差超构透镜成像功能拓展到了三维光场成像, 并提高了超构透镜的成像效果. 消色差超构透镜阵列形成各种子图像, 这些子图像具有感测平面处每个子透镜的四维传播信息的能力. 我们从每个子图像中提取出它们不同部分的信息, 结合在一起, 就可以得到不同深度成像场景的清晰成像. 如图1(e)–(g)所示, 图像由三个不同深度的物体(土星、火箭和地球)组成. 我们利用超构透镜阵列可以很

容易地获得不同深度物体的清晰图像. 深度信息可以从相邻子图像的深度差中导出. 将火箭设定为线性移动目标, 恒定移动速度为 $1\ \text{cm/s}$. 深度信息反演的动态视频也可以得到. 实验结果清楚地表明, 光场成像与消色差超构透镜阵列结合, 可以具有评估多个彩色物体深度的能力. 使用此透镜阵列首次得到了高质量的可见光消色差光场成像, 并通过对成像的数据反演, 得到运动物体的实时位置^[15].

量子信息是当今世界最先进, 也是最活跃的研究领域之一. 随着光量子信息技术的发展, 基于非线性光学过程的现有纠缠量子光源在维度扩展以及光子数增加方面正面临着集成度低、光子稳定性差、光学系统的复杂度较高等问题, 这限制了光学量子信息处理的大规模集成. 超构表面的研究和开发为量子光源和量子信息技术的发展带来了新的机遇^[16–19].

如图2所示, 将超构表面透镜阵列与 $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ (BBO)晶体粘贴在一起, 可以制备高集成度、稳定的量子光源. 一方面, 当泵浦光功率下降到只有一对光子产生时, 将不同超构表面透镜产生的光子进行合束, 此时无法区分单个光子产生于哪一个超构表面透镜, 这一对光子在路径自由度上实现了纠缠, 超构表面透镜阵列的数目决定了光子对路径纠缠维度的大小. 实验制备的双光子二维、三维以及四维路径纠缠态的保真度分别为98.4%, 96.6%, 95.0%. 与普通微透镜阵列相比, 超构表面透镜阵列在实现泵浦光聚焦的同时, 还可以编码泵浦光的相位, 这一编码功能可以用来产生不同量子态的纠缠光子对. 实验制备双光子二维路径的四种贝尔态的保真度均超过98%. 另一方面, 当泵浦光功率增大时, 该量子光源还可以制备高质量的四光子以及六光子量子光源. 实验中利用 $415\ \text{nm}$ 的飞秒激光作为泵浦源, 分别测量了由该系统制备的4光子和6光子的符合曲线, 并展示了4光子Hong-Ou-Mandel的干涉可见度为86.3%, 证明产生的多光子量子光源具有很好的性能. 该工作表明, 超表面结构可以为复杂量子态的产生和控制提供一条新的途径, 不仅可以增加量子系统的维数, 而且还允许对多个光子进行相干控制, 从而提供了一种紧凑实用的方法. 这突破了现有量子光源的技术瓶颈和信息编码维度限制, 对于发展具有更高信息容量和更高安全性的量子信息技术具有重要意义^[21].

凭借这些理论, 我们首先实现了具有宽带消色差

图 1 (网络版彩图)基于超透镜阵列的光场成像. (a) 超透镜阵列光场成像和渲染图像的示意图. 物镜用于收集消色差超透镜阵列上的圆偏振光, 并在消色差超透镜阵列前面形成中间图像. 消色差超透镜阵列由 60×60 个单独的超透镜组成, 每个超透镜单元所设计的焦距为 $f=49 \mu\text{m}$, 直径为 $d=21.65 \mu\text{m}$, 数值孔径为 $\text{NA}=0.2157$. LCP, 左旋圆偏振光. (b) 消色差超透镜阵列的SEM图像. (c) 排布GaN基纳米柱和反结构的单个超透镜(b)的红色正方形的放大扫描电子显微镜(SEM)图像. (d) GaN纳米柱的侧视图放大图像. (e)–(g) 地球、火箭和土星组合场景的深度估计. 渲染的图像聚焦在火箭上, 深度为50 (e), 54 (f)和66.5 cm (g). (h)–(j) 由消色差超透镜形成的全彩翠鸟((i), (j)). 颜色校正前(j)后(i)从消色差透镜捕获的图像. (a)–(g) 已获得使用授权^[15], Copyright 2019, Nature Nanotechnology. (h)–(j) 已获得使用授权^[9], Copyright 2018, Nature Nanotechnology

Figure 1 (Color online) Light-field imaging with a metalens array. (a) Schematic diagram of light-field imaging with metalens array and rendered images. An objective is used to collect the circularly polarized light on the achromatic metalens array and form an intermediate image in front of the achromatic metalens array. The achromatic metalens array consists of 60×60 individual metalenses with a designed focal length $f=49 \mu\text{m}$, $d=21.65 \mu\text{m}$ and $\text{NA}=0.2157$. LCP, left-handed circular polarization. (b) SEM image of achromatic metalens array. (c) Zoomed-in SEM image of a single metalens (red square in (b)) with nanopillars and inverse GaN-based structures. (d) Tilted-view zoomed-in image of GaN nanopillars. (e)–(g) Depth of the combined scene of the Earth, a rocket and Saturn. Rendered images focusing on the rocket with depths of 50 (e), 54 (f) and 66.5 cm (g). (h)–(j) Full-color Alcedinidae ((i), (j)) images formed by the achromatic metalens. Captured images from achromatic metalens before (j) and after (i) color correction. (a)–(g) Reproduced with permission [15], Copyright 2019, Nature Nanotechnology. (h)–(j) Reproduced with permission [9], Copyright 2018, Nature Nanotechnology.

功能的反射型超构表面器件, 以及可见光波段的超透镜成像. 并在此基础上, 制备出了超透镜阵列以实现全彩色的光场成像和基于超透镜阵列的高维度

多光子量子光源, 更进一步在实验上定量地实现了可调控的量子探测器的相干性表征. 以上研究成果能够进一步推动超构表面物理在经典和量子光学中的发

图 2 (网络版彩图)量子超透镜阵列的示意图和表征. (a) 基于超透镜阵列的量子源示意图. (b) 超透镜阵列的显微镜图像. GaN超透镜的SEM图像: (c) 顶视图; (d) 侧视图. (e) 泵浦光焦平面的显微镜图像. (f) EMCCD记录的SPDC光子对阵列的图像. 插图: 由蓝色虚线框指示区域的放大图像. 红色虚线框显示由一个超透镜产生的一对光子. (a)–(f) 已获得使用授权^[21], Copyright 2020, Science

Figure 2 (Color online) Schematic and characterization of the quantum metalens array. (a) Schematic of the quantum source based on a metalens array. (b) Microscopy image of the metalens array. Scanning electron microscopy image of the GaN metalens in top view (c) and side view (d). (e) Microscopy image of the focal plane of the pump light. (f) Image of the SPDC photon pair array recorded by EMCCD. Inset: Magnified image of the area indicated by the blue dashed box. The red dashed box shows one pair of photons generated by one metalens. (a)–(f) Reproduced with permission [21], Copyright 2020, Science.

展, 并寄希望于超构表面器件在高分辨率彩色成像和多光子源的量子芯片中发挥巨大的作用.

总而言之, 我们回顾了基于超透镜色散处理的最新发展. 为了在不同波长范围内实现多波长消色差、窄带消色差和宽带消色差, 人们提出了各种消除超透镜色差的方法, 这些成果对于带宽要求高的超透镜设计具有重要意义. 另一方面, 我们还可以利用色散来实现特殊功能, 如光谱仪、光学相干断层扫描技术、多色全息图等. 相信随着超透镜色散的进一步应用, 将会有越来越多新的研究出现. 例如: 光谱成像相机通常由几个光学元件组成, 如掩模、光栅(或棱镜)、

透镜等, 而色散工程超透镜可以在一个单一的部分完成这些元件的功能, 这样可以大大缩小系统的尺寸. 在其他情况下, 如全彩AR和VR系统、生物检查和检测等, 也非常需要超透镜的色散处理, 若设计得便可促进超透镜步入实际应用. 除此之外, 超透镜作为一种具有精确控制能力的平面透镜, 在可预见的未来, 在与传统光学透镜的组合中也有着广阔的应用前景, 比如说用于校正传统镜头的残余像差, 补偿色差, 实现更完美的光学成像效果. 我们相信超透镜将推动具有特殊需求的集成光学器件的发展, 例如太空与海洋探索、手机镜头和可穿戴设备.

参考文献

- 1 Yu N, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: Generalized laws of reflection and refraction. *Science*, 2011, 334: 333–337
- 2 Huang L, Chen X, Mühlenbernd H, et al. Dispersionless phase discontinuities for controlling light propagation. *Nano Lett*, 2012, 12: 5750–5755
- 3 Khorasaninejad M, Chen W T, Devlin R C, et al. Metalenses at visible wavelengths: Diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging. *Science*, 2016, 352: 1190–1194
- 4 Khorasaninejad M, Shi Z, Zhu A Y, et al. Achromatic metalens over 60 nm bandwidth in the visible and metalens with reverse chromatic

- dispersion. *Nano Lett*, 2017, 17: 1819–1824, arXiv: [1701.06696](#)
- 5 Arbabi E, Arbabi A, Kamali S M, et al. Controlling the sign of chromatic dispersion in diffractive optics with dielectric metasurfaces. *Optica*, 2017, 4: 625–632, arXiv: [1701.07178](#)
- 6 Li Z, Palacios E, Butun S, et al. Visible-frequency metasurfaces for broadband anomalous reflection and high-efficiency spectrum splitting. *Nano Lett*, 2015, 15: 1615–1621
- 7 Liu L, Zhang X, Kenney M, et al. Broadband metasurfaces with simultaneous control of phase and amplitude. *Adv Mater*, 2014, 26: 5031–5036
- 8 Wang S, Wu P C, Su V C, et al. Broadband achromatic optical metasurface devices. *Nat Commun*, 2017, 8: 187
- 9 Wang S, Wu P C, Su V C, et al. A broadband achromatic metalens in the visible. *Nat Nanotechnol*, 2018, 13: 227–232
- 10 Li L, Yuan Q, Chen R, et al. Chromatic dispersion manipulation based on metasurface devices in the mid-infrared region. *Chin Opt Lett*, 2020, 18: 082401
- 11 Cheng Q, Ma M, Yu D, et al. Broadband achromatic metalens in terahertz regime. *Sci Bull*, 2019, 64: 1525–1531
- 12 Pégard N C, Liu H, Antipa N, et al. Compressive light-field microscopy for 3D neural activity recording. *Optica*, 2016, 3: 517
- 13 Bok Y, Jeon H G, Kweon I S. Geometric calibration of micro-lens-based light field cameras using line features. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 2017, 39: 287–300
- 14 Jin X, Liu L, Chen Y, et al. Point spread function and depth-invariant focal sweep point spread function for plenoptic camera 20. *Opt Express*, 2017, 25: 9947
- 15 Lin R J, Su V C, Wang S, et al. Achromatic metalens array for full-colour light-field imaging. *Nat Nanotechnol*, 2019, 14: 227–231
- 16 Wang J, Paesani S, Ding Y, et al. Multidimensional quantum entanglement with large-scale integrated optics. *Science*, 2018, 360: 285–291
- 17 Wang H, Qin J, Ding X, et al. Boson sampling with 20 input photons and a 60-mode interferometer in a 10^{14} -dimensional hilbert space. *Phys Rev Lett*, 2019, 123: 250503, arXiv: [1910.09930](#)
- 18 Poullos K, Keil R, Fry D, et al. Quantum walks of correlated photon pairs in two-dimensional waveguide arrays. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 143604, arXiv: [1308.2554](#)
- 19 Tang H, Lin X F, Feng Z, et al. Experimental two-dimensional quantum walk on a photonic chip. *Sci Adv*, 2018, 4: eaat3174, arXiv: [1704.08242](#)
- 20 Niu X L, Huang Y F, Xiang G Y, et al. Beamlike high-brightness source of polarization-entangled photon pairs. *Opt Lett*, 2008, 33: 968
- 21 Li L, Liu Z, Ren X, et al. Metalens-array-based high-dimensional and multiphoton quantum source. *Science*, 2020, 368: 1487–1490

Research on broadband achromatic metalenses

WU YiFan & WANG ShuMing^{*}

National Laboratory of Solid State Microstructures, School of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Nowadays, metasurfaces can be made into various classical and non-classical devices due to their plentiful physical connotation and application value. To optimize the design method of broadband continuous achromatism, we rely on the geometric phase and resonance phase of the metasurface to realize the separation of the wavelength-independent basic phase and the wavelength-dependent chromatic aberration phase in the optical device, and design the achromatic reflection focusing mirror and reflector in the near-infrared band. Next, we use the GaN nanopillars and its inverse structure which is transparent under visible light to prepare an achromatic metalens in the visible light frequency band, and for the first time achieve full-color imaging and video shooting based on metalenses. Faced with the problem that the numerical aperture and the clear aperture cannot be large at the same time, we bring in the system of metalens array, which not only obtains the improvement of the imaging effect, but also realizes the light field imaging, which greatly enriches the imaging of the metalens content and function. Recently, by integrating a metalens array with a nonlinear crystal, we demonstrate a 100-path spontaneous parametric down-conversion photon-pair source in a 10×10 array, which shows promise for high-dimensional entanglement and multiphoton-state generation. This quantum light source can realize both high-dimensional entanglement and multiphotons. The metalens has introduced new systems and new physical effects in the fields of optical imaging and quantum optics.

metalens, achromatism, quantum photonic information technology

PACS: 42.15.Fr, 42.70.-a, 42.79.-e

doi: [10.1360/SSPMA-2021-0274](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2021-0274)