

文章编号: 1001-3806(2017)06-0807-05

基于狭槽天线超表面的复振幅光瞳滤波器

蒋孝鑫, 王吉明*, 黄鑫, 赫崇君, 刘友文
(南京航空航天大学 应用物理系, 南京 211106)

摘要: 为了产生具有特殊性质的聚焦矢量光场, 根据狭槽天线与线偏振片的相似性, 设计了刻蚀有多个不同方向狭槽天线环形阵列的超表面, 作为离散型复振幅光瞳滤波器使用。以径向偏振入射光为例, 经该滤波器并经大数值孔径透镜紧聚焦后, 可获得衍射受限的超长3维光管场。结果表明, 由于狭槽天线具有局域调控入射光场振幅和相位的特性, 各个环带上具有各自特定的透射率, 同时具有特定的二元相移($0/\pi$)分布, 可以用来实现具有特殊性质的矢量光场。这种结构的超表面对矢量光束的产生与调控提供了新途径。

关键词: 物理光学; 矢量光场; 光瞳滤波器; 超表面; 狭槽天线

中图分类号: TN713+.1 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.06.008

Complex amplitude pupil filters based on metasurface with subwavelength slot antenna

JIANG Xiaoxin, WANG Jiming, HUANG Xin, HE Chongjun, LIU Youwen

(Applied Physics Department, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: In order to generate vectorial focal field with special properties, according to the similarity between the slot antenna and linear polarizer, a metasurface with multiple subwavelength slot antenna arrays with different directions is investigated. It is used as a discrete pupil filter with complex amplitude. The incident radial polarized light passes through this filter and is focused by a high numerical aperture lens. Then the diffraction-limited ultra-long 3-D optical tube can be obtained in the focal region. Since the slot antenna can manipulate the amplitude and phase locally, every ring has its own transmittance and binary phase shift ($0/\pi$) so that it can be used to generate special vectorial focal field. This type of metasurface can guide us to find a new way for generation and manipulation of vectorial fields.

Key words: physical optics; vectorial field; pupil filter; metasurface; slot antenna

引言

近年来,随着微纳光子学的发展,光场偏振态的局域调控成为了研究热点^[1-6]。如柱矢量光场,由于其独特的光物理特性而得到了诸多关注,尤其是在深聚焦下呈现出的矢量特性,使其在粒子捕捉、近场探针、光学微加工、光学操纵等领域有着潜在的应用^[7-8]。其中,径向偏振光束和角向偏振光束是基本的柱矢量光场。径向偏振光在大数值孔径的聚焦下,在焦平面附近可以得到一个较强的纵向电场,也称为光针场,而角向偏振光在深聚焦的条件下可以得到一个中空聚焦光场,被称为光管场^[9-10]。研究发现,用标量场来产生的光管场会有很大程度的损耗^[11]。根据角向偏振光的

聚焦特性与磁偶极子辐射场反向聚焦的共同性,利用磁偶极子阵列天线的辐射场,可获取实现特殊聚焦空心光场所需的光瞳面连续光场分布模式^[12-13],在光瞳面处表现为具有不同相移和透射率的多个环带。进一步地,可以对连续分布的环带透射模式进行离散化处理,获得离散环带上的振幅透射率和相移,提供离散复振幅滤波器的结构参量。

超表面是一种2维的超材料,它由不同尺寸及形状的亚波长金属结构组成,能够在微波、红外乃至可见光区域调控电磁波。随着基于微纳光信息调控的新型超表面的发展,在超长的传播距离上,可实现透射光的相位跃变,从而可以调控光的相位、振幅及偏振态。由空间光共振器组成的超表面能够形成具有一定特性的局部散射场甚至整个矢量光场^[14-15]。目前,很多国内外的学者利用超表面来产生及控制偏振光。YI 等人在熔融石英上刻蚀空间变化的非周期光栅^[2],形成空间变化的双折射,从而对光场的偏振态空间分布进行调制。PFEIFFER 等人利用超表面控制矢量贝塞尔光

基金项目:中央高校基本科研业务费资助项目(NS2016072)

作者简介:蒋孝鑫(1992-),男,硕士研究生,主要从事矢量光学方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail:jimingw@nuaa.edu.cn

收稿日期:2016-11-23;收到修改稿日期:2016-12-16

束^[3],证明了超表面可用来产生任意偏振态的光束。WANG 等人在超表面设计一种狭槽天线^[4],用其获得一个焦距为 5λ 的平顶纵向光针场,同时用混合的光学天线组成的金属-绝缘体-金属 (metal-insulator-metal, MIM) 反射型超表面来控制光针场的空间特性^[5]。RUI 等人利用一个螺旋桨式等离激元漩涡透镜组来控制光复合场的偏振态及光学奇点^[6]。

本文中根据预期聚焦光场,以离散复振幅光瞳滤波器的结构为参量,设计了基于狭槽天线环形阵列的超表面作为离散型复振幅光瞳滤波器使用,来实现特殊的聚焦矢量光场。

1 基于狭槽天线超表面的离散式复振幅光瞳滤波器的设计原理与方法

金属表面刻蚀的矩形狭槽天线,在适当的激发下可以满足偶极子共振,因此形成偏振方向与长轴正交的散射场。简单来说,一个环形电流是由在长轴的两边上放置两个符号相反的感应电荷而产生的,这个电流在周围的空气间隙中流动,形成磁偶极子^[16]。磁偶极子在系统中耦合,从而极大地增强了横向极化的散射场。因此,通过改变天线的尺寸可以控制偶极子的特性,进而可灵活地操作共振特性,这为复合场的调制提供了可能性。

通过研究发现,矩形狭槽天线像线偏振片一样,能够根据不同的方向调制光的相位及振幅,因此,每个环带上光的特性可以通过改变天线的方向进行调制^[4]。

如图 1a 所示,为从圆环阵列中提取出的单个狭槽天线, a 和 b 分别代表狭槽天线的长度与宽度; E_{inc} 为入射场强度,方向沿着 y 轴(径向)方向; E_{scat} 为预期散射场强度,方向沿着 x 轴(角向)反向,天线方向与 y 轴方向的夹角为 θ ,如果散射效率 η 定义为散射场与入射场之间的振幅比,可以得到沿着 x 轴散射场的表达式为 $E_{scat} = \eta E_{inc} \sin\theta \cos\theta$,此处,假设天线长轴方向的散射场被完全过滤掉。因此,对于超表面过滤器上不

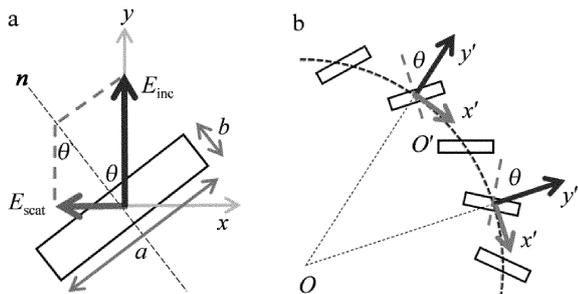


Fig. 1 Structure of slot antenna

a—single slot antenna in local coordinate b—antenna array arranged in a circle

同的圆环,可以设置不同的方向角来调制散射场的振幅及二元相位。图 1b 所示为天线方向与 y 轴方向夹角为 θ 的环形阵列。

在作者之前的研究中,设计了一种离散式的复振幅光瞳滤波器^[17],径向结构如图 2a 所示。右侧色条为归一化光强对比度,颜色越浅,光强越大。其特征在于,滤波器为多环带结构,每个环带上均匀刻蚀着小孔天线,该滤波器半径已归一化,透射环带和截止环带以离散式分布,截止环带透射率为 0,各透射环带一方面具有各自特定振幅透射率,径向的离散归一化振幅为 $0.07 \sim 1$,如图 2b 所示。横坐标 ρ 为归一化半径,纵坐标为归一化透射振幅。另一方面具有各自特定的二元相移($0/\pi$)分布,相邻透射环带间 π 反向。输入角向偏振矢量激光光束,经该滤波器滤波并经一大数值孔径透镜(数值孔径为 0.95)聚焦,可获得超长 3 维衍射受限光管场。该光管场为中空的全角向偏振矢量光场,光管半径能达到 0.31λ 。

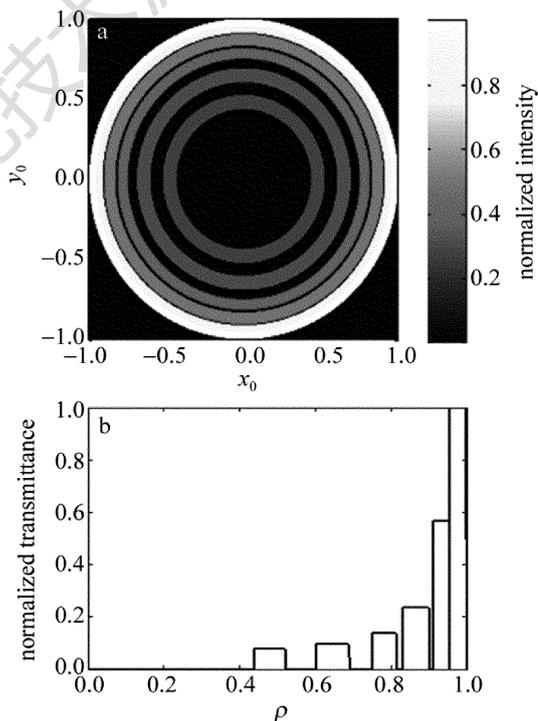


Fig. 2 Transmittance structure of discrete complex amplitude pupil filters a—transmissivity intensity distribution of pupil filters b—discrete transmissivity distribution

本文中,作者根据上述参量,设计了具有多个离散环形狭槽天线阵列的超表面。在研究中发现,由于最内的两个环带对整个散射场的贡献很小,为节约计算,仅选取了第 3 环~第 5 环带作为本次模拟对象,并按顺序重新命名,表现为在超表面刻蚀 3 组具有空间复合透射率的矩形狭槽天线的环形阵列结构。

2 基于狭槽天线超表面的离散式复振幅光瞳滤波器的实验分析

本文中利用 COMSOL Multiphysics 数值模拟软件, 对上述离散化光瞳滤波器进行了模拟。采用的环带结构参量如表 1 所示。

Table 1 Parameters design of different annular rings of metasurface

order of zone	1	2	3
radius $R/\mu\text{m}$	2.0 ~ 3.0	3.5 ~ 4.5	5.0 ~ 6.0
amplitude	0.1359	0.2365	0.5668
phase/rad	π	0	π
orientation $\theta/(\circ)$	93.91	6.84	107.26

以共振波长的径向偏振光为入射光 (incident field, INC), 沿 z 轴从衬底一侧入射超表面 (metasurface, MS), 经过一个正交于径向偏振的角向检偏器 (azimuthal polarization analyzer, AP), 得到预期的散射光场 (scattered field, SCA), 并通过大数值孔径透镜 (high numerical aperture lens, HNAL), 在焦点场区可以获得 3 维的光管场。利用超表面滤波来获得 3 维衍射受限光管场的光路结构图如图 3 所示。

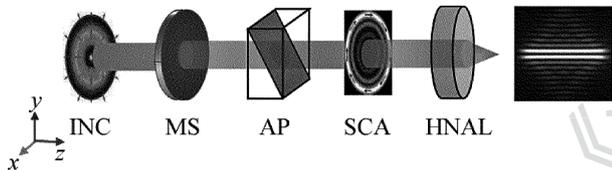


Fig. 3 Generation of diffraction-limited 3-D optical tube field from metasurface

当共振波长选择 1064nm 时, 矩形狭槽天线的长度 $a = 280\text{nm}$, 宽度 $b = 60\text{nm}$, 周期为 500nm, 100nm 厚的金膜被沉积在玻璃衬底上, 整个超表面的半径 $R = 6.0\mu\text{m}$, 每个环带的宽度为 $1.0\mu\text{m}$, 间隔为 $0.5\mu\text{m}$ 。相邻环带之间有 π 相位差。图 4a 为超表面的表面结构图, 从图中可以看出, 超表面透射区为 3 个环带, 每个环带上采用两层天线结构。图 4b 为极坐标下各环带 ($R_1 \sim R_3$) 不同方向的狭槽天线结构图。

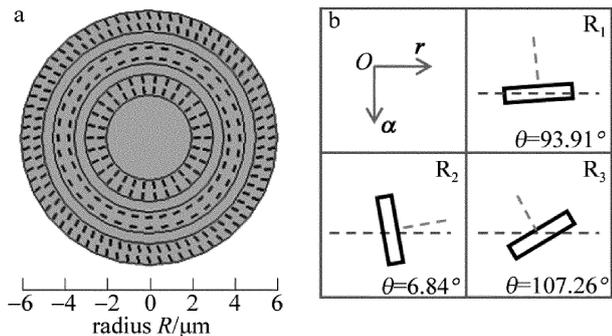


Fig. 4 Structure of metasurface

a—structure of metasurface b—slot antenna with different orientation for different rings in polar coordinate

波长 1064nm 径向偏振的入射光经过超表面上的狭槽天线, 实现了振幅及相位的转变, 再经过一个正交于径向偏振的角向偏振检偏器, 过滤掉了径向分量并消除了入射场的影响, 得到了角向偏振的散射场, 其横向光场分布模式如图 5 所示。其中, 图 5a 为归一化的光强分布图, 纵横坐标的 x 和 y 代表超表面的尺寸, 单位为 μm 。最外侧环带光强最大, 最内侧环带光强最弱。为了验证这个散射场是否为角向偏振, 让其通过一个 y 轴方向的线偏振片, 得到如图 5b 所示场分布。在方位角为 0° 和 180° 的位置处, 偏振态与线偏振片方向一致, 透射光强最大, 基本完全透射; 方位角为 90° 与 270° 的位置处, 偏振态与线偏振片方向垂直, 透射光强为零。同时, 根据图 5a, 给出了横向散射光场的 1 维径向分布图, 即 3 个环带的归一化振幅透射率, 如图 5c 所示, 其中虚线为理论值, 实线为计算值。从

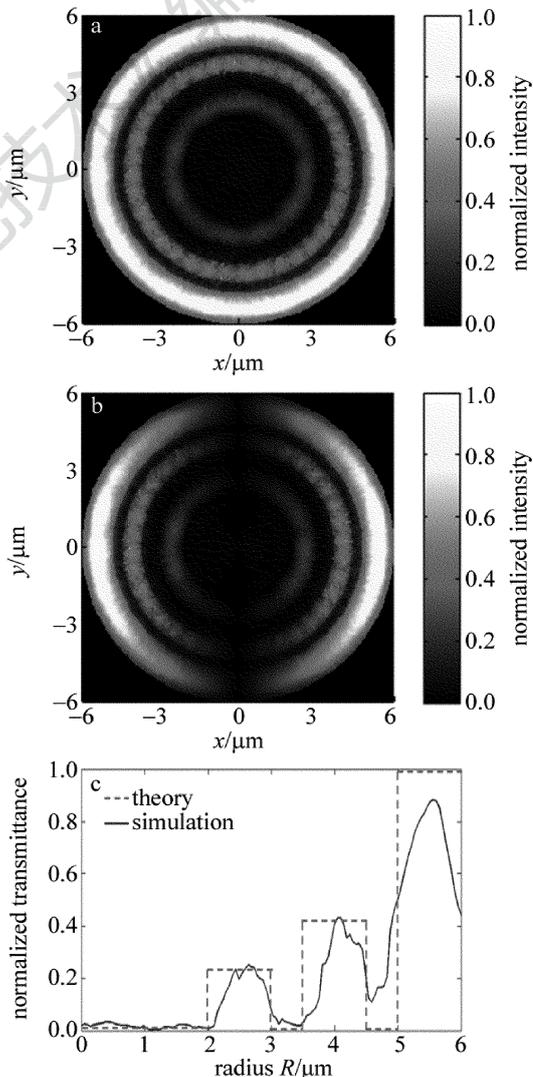


Fig. 5 Scattering field distribution of radially polarized light passing through the ultra surface

a—transversal intensity distribution b—transversal intensity distribution after linear polarizer of y axis c—normalized amplitude transmittance of the metasurface

图 5c 中可以看出,经超表面后的振幅透射率,与理论曲线对应的预期离散透射率基本吻合,满足设计需要。

为进一步验证超表面的振幅和相位调制特性,又分别以线偏振光及圆偏振光入射该超表面,研究了其散射场的分布。当用线偏振光入射超表面时,在超表面后加了一个与入射偏振方向垂直的线偏振片,过滤掉入射光,留下散射场。从图 6a 可以看出,散射场的强度分布图为 3 个具有不同旋转方向的四叶环,其旋转方向与狭槽天线的方向有关。入射线偏振的方向为 x 轴,用虚线标记。如果以入射线偏振的方向作为参照,当方位角 $\alpha = m\pi/4 - \theta$ 时,为散射场的光强最大值处(其中 θ 为每个环狭槽天线的初始方向角, $m = 1, 3, 5, 7$)。因此,对于不同的环来说,它们光强分布满足 $|\sin 2(\alpha + \theta)|^2$ 。

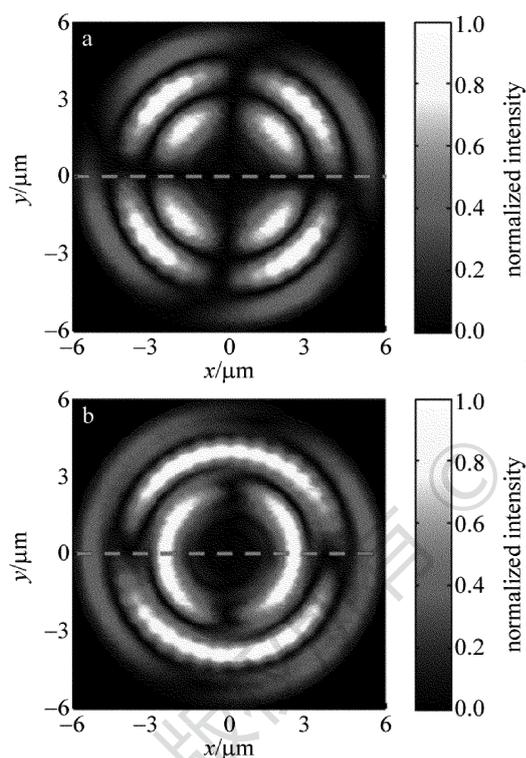


Fig. 6 Intensity distribution of incident light at different polarization states a—intensity distribution for linear polarization incidence b—intensity distribution for elliptical polarization incidence

由于线偏振入射很难区分相邻环之间的 π 相位差,为了证明超表面能够进行相位调制,用一个椭圆率为 30° 的椭圆偏振光入射超表面,同时,在超表面后放置一个与主轴方向正交的线偏振片来消除背景场的影响。如图 6b 所示,其中水平方向虚线为入射椭圆偏振的主轴方向。散射场表现为相邻环带之间存在 90° 的角向旋转。例如说,在第 1 个环带达到光强最大处的方位上,第 2 个环带的光强几乎为零,而在第 1 个环带光强趋于零的方位上,第 2 个环带光强几乎达到最大。当然,偏差是由于两个环上狭槽天线的初始方向角 θ

不同而产生的。

从以上径向偏振光、线偏振光和椭圆偏振光作为入射光的情况看,基于狭槽天线环形阵列的超表面均可用来对散射场的相位、振幅、偏振态进行调制,可通过改变不同环带上狭槽天线的方向来得到所期望的散射场。以径向偏振光作为入射光,经超表面滤波后,变为复振幅离散分布的角向偏振光,通过高数值孔径透镜聚焦后,可以获得 3 维衍射受限光管场。这种方法不仅能够自由的控制光管场的光强分布,而且更有效地克服了产生过程中的低损耗问题。

3 结 论

本文中研究了基于狭槽天线环形阵列的超表面作为离散式复振幅光瞳滤波器的工作原理。通过改变狭槽天线不同的方向角,可以实现对散射光场的振幅、相位及偏振态进行调制。如果更换入射光波长,可以通过改变狭槽天线的开孔尺寸来实现相应的光场调制。这种具有多个不同方向狭槽天线环形阵列的超表面,可以作为新型复振幅光瞳滤波器使用,通过光场调控来实现特殊的聚焦矢量光场。这种类型的超表面为矢量光场的产生及调控提供了新的途径。随着现代精细加工和纳米技术的快速发展,亚波长尺度的金属微纳结构更易于加工,这种作为离散复振幅滤波器的超表面有望在超分辨显微术、粒子捕获与光学操纵、光学微加工等领域获得更广泛的应用。

参 考 文 献

- [1] ZHAN Q. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications[J]. Journal of Systems Science & Complexity, 2014, 27(5):899-910.
- [2] YI X N, LING X H, ZHANG Zh Y, et al. Generation of cylindrical vector vortex beams by two cascaded metasurfaces[J]. Optics Express, 2014, 22(14):17207-17215.
- [3] PFEIFFER C, GRBIC A. Controlling vector Bessel beams with metasurfaces[J]. Physical Review Applied, 2014, 2(4):044012.
- [4] WANG Sh Y, ABEYSINGHE D C, ZHAN Q W. Generation of vectorial optical fields with slot-antenna-based metasurface[J]. Optics Letters, 2015, 40(20):4711-4714.
- [5] WANG Sh Y, ZHAN Q W. Hybrid reflection type metasurface of nano-antennas designed for optical needle field generation[J]. Proceedings of the SPIE, 2016, 9359:93590L.
- [6] RUI G H, ZHAN Q W, CUI Y P. Tailoring optical complex field with spiral blade plasmonic vortex lens[J]. Scientific Reports, 2015, 5(1):13732.
- [7] CHEN W B, ZHAN Q W. Numerical study of an apertureless near field scanning optical microscope probe under radial polarization illumination. [J]. Optics Express, 2007, 15(7):4106-4111.
- [8] HENTSCHEL M, WEISS T, BAGHERI S, et al. Babinet to the half: coupling of solid and inverse plasmonic structures. [J]. Nano Letters, 2013, 13(9):4428-4433.
- [9] YOUNGWORTH K S, BROWN T G. Focusing of high numerical ap-

- erture cylindrical-vector beams[J]. *Optics Express*, 2000, 7(2):77-87.
- [10] DORN R, QUABIS S, LEUCHS G. Sharper focus for a radially polarized light beam[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 91(23):233901.
- [11] CIZMÁR T, DHOLAKIA K. Tunable Bessel light modes: engineering the axial propagation[J]. *Optics Express*, 2009, 17(18):15558-15570.
- [12] WANG J M, CHEN W B, ZHAN Q W. Engineering of high purity ultra-long optical needle field through reversing the electric dipole array radiation[J]. *Optics Express*, 2010, 18(21):21965-21972.
- [13] WANG J M, CHEN W B, ZHAN Q W. Three-dimensional focus engineering using dipole array radiation pattern[J]. *Optics Communications*, 2011, 284(12):2668-2671.
- [14] LIN J, GENEVEY P, KATS M A, *et al.* Nanostructured holograms for broadband manipulation of vector beams[J]. *Nano Letters*, 2013, 13(9):4269-4274.
- [15] YU N F, GENEVEY P, KATS M A, *et al.* Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 2011, 334(6054):333-337.
- [16] HENTSCHEL M, WEISS T, BAGHERI S, *et al.* Babinet to the half: coupling of solid and inverse plasmonic structures[J]. *Nano Letters*, 2013, 13(9):4428-4433.
- [17] WANG J M, LIU Q L, LIU Y W, *et al.* Discrete complex amplitude filter for ultra long optical tube[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2011, 8097:809722.

版权所有 © 《激光技术》编辑部

版权所有 ©