

文章编号: 1001-3806(2017)05-0644-05

利用超表面天线阵列产生太赫兹涡旋光束

李 瑶, 莫伟成, 杨振刚, 刘劲松, 王可嘉*

(华中科技大学 武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

摘要: 为了研究1阶和2阶模式下的非连续性相位L型天线的超表面阵列特性,采用异常透射的散射场理论,设计了一种L型天线结构,控制天线的几何参量,选取阵列单元组,使得其覆盖相位超过 2π 。并根据不同的拓扑荷,设计1阶和2阶涡旋相位板,产生不同阶数涡旋光束。结果表明,用太赫兹线偏光垂直入射时,天线单元垂直偏振透射方向的模拟仿真效率达到55%左右;相位覆盖 $0\sim 2\pi$ 和 $0\sim 4\pi$ 时,其线性阵列的异常透射角不同,分别为 -14.7° 和 -30° ,其结果与广义斯涅耳定理一致。此研究对太赫兹涡旋光束的器件研究有重要的应用价值。

关键词: 散射; 太赫兹; 超表面; 异常透射; 涡旋光束

中图分类号: O436.2 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.05.035

Generation of terahertz vortex beams base on metasurface antenna array

LI Yao, MO Weicheng, YANG Zhengang, LIU Jinsong, WANG Kejia

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to study characteristics of metasurface array of discontinuous phase L-shaped antenna in the 1st and 2nd order modes, by using the theory of scattering field with anomalous transmission, a L-shaped antenna structure was designed. By controlling the geometric parameters of the antenna and selecting the array element group, the coverage phase exceeded 2π . According to different topological charges, the vortex phase plates of the 1st order and the 2nd order were designed to produce different order vortex beams. The simulation results show that the simulation efficiency of the vertical polarization direction of the antenna element is about 55% when the incident wave is polarized vertically. When the phase covered $0\sim 2\pi$ and $0\sim 4\pi$, the anomalous transmission angles of the linear array are different, -14.7° and -30° respectively. The results are consistent with the generalized Fresnel theory. This study has the important application value in the research of terahertz vortex beam devices.

Key words: scattering; terahertz; metasurface; anomalous transmission; vortex beam

引 言

传统光学器件通过在传播路径上的相位或者偏振累加效应对入射光进行波前调制,实现了光束聚焦、偏振转换、全息成像等光学功能^[1-2]。这样的工作原理要求器件本身的尺寸必须大于入射光波长。随着光学集成度的需求逐渐提高,大尺寸和质量的传统光学元件已经不能满足设计要求,因此,小尺寸和轻质量的光学元件研究成为当今光学领域的一个研究热点,其中光学超表面材料就是其中一个重要方向。超表面材料指的是厚度小于入射光波长的一类人工超材料,相对于

入射光波长尺寸,超表面可以视为是一种2维结构。超表面通常是由周期性亚波长散射体结构或者是光学薄膜结构组成,对入射光进行波前调制的原理是基于界面处相位突变^[3-4]。哈佛大学CAPASSO小组在2011年首先提出了光学超表面的概念,设计出了基于V型金属天线超表面结构,实现了红外波段的相位调制^[5]。自此基于超表面的新型光学器件成为了研究热点,即打开了一扇在2维平面内而不是3维空间中调控光强度、相位分布和偏振的大门,例如异常透射现象、光学波片、光学透镜、光学全息^[6-8]和涡旋光束产生器^[4,9-11]等。

涡旋光束首先由ALLEN等人于1992年实现^[12]。最近的研究显示,利用超表面材料可以有效产生和调控涡旋光束,例如使用V型天线阵列超表面^[9-10]或者全介质棒状天线超表面^[4,11]。

需要注意的是,这些研究绝大多数都是利用超表面产生和调控1阶涡旋光束,很少出现高阶模式的研究^[3-11]。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11574105; 61475054; 61405063; 61177095);湖北省科技条件资源开发资助项目(2015BCE052)

作者简介:李 瑶(1991-),女,硕士研究生,主要从事太赫兹超表面器件的研究。

* 通讯联系人。E-mail: wkjtoe@sina.com

收稿日期:2016-11-18;收到修改稿日期:2017-01-01

使用 V 型天线阵列在界面处产生相位突变,实现各种功能的超表面是一类比较流行的设计方法。V 型天线的几何尺寸,例如臂长、张角和开口方向等,决定了天线的电磁波散射特性。从样品加工的角度来看,基本单元越简单,自由度越少,加工难度越小。例如对于 V 型天线而言,开口方向较难控制。L 型金属天线是一类特殊的 V 型天线,其自由度只有臂长和臂宽两个自由度,这两个自由度在实际加工过程很容易控制,而且 L 型金属天线也避免了开口方向这个比较难控制的自由度。因此这一类的天线散射单元具有研究价值,例如研究 L 型天线单元的透射的偏振转化特性^[13-14]、L 型天线单一结构阵列产生涡旋光束的研究^[5]。

本文中利用 L 型金属天线阵列超表面设计了 1 阶和 2 阶太赫兹波涡旋光束产生器件。数值计算结果表明,线偏太赫兹波垂直入射时,单个 L 型天线结构的透射效率能达到 55% 左右。控制 L 型天线两个自由度结构参量,选择不同几何尺寸的 L 型天线,作者设计了两组不同阶数的阵列,计算显示其可以分别覆盖 2π 和 4π 相位延迟。最后根据拓扑荷的不同进行涡旋相位板的设计,产生了涡旋光束。

1 L 型天线单元结构理论分析和设计

对于金属天线阵列超表面而言,关键是基本散射单元的选择,具体说来就是散射单元的结构、几何尺寸以及衬底材料的选择。当前人们主要使用 V 型、C 型以及棒状天线作为基本单元,其中 V 型天线较为普遍。如前所述,V 型天线的电磁波散射特性主要由 3 个自由度来决定,臂长、张角和开口方向,自由度与场的振幅相关,其散射场的表达式^[15]是:

$$E_i = \frac{1}{2}(S_i + A_i)(y\cos\alpha + x\sin\alpha) \pm \frac{1}{2}(S_i - A_i)[y\cos(2\beta - \alpha) + x\sin(2\beta - \alpha)] \quad (1)$$

式中,当 $i=1 \sim 4$ 时,取为正;当 $i=5 \sim 8$ 时,取为负; S_i 和 A_i 是相应轴的振幅分量, α 是入射光与 y 轴的夹角, β 是天线两轴之间的夹角。

在实际制作过程中,张角和开口方向容易偏离设计值,导致功能实现率较低。而 L 型天线只有两个自由度(即臂长 h 和宽度 r ,如图 1 所示)影响散射特性,以 x 线偏光入射时, $\alpha=90^\circ, 2\beta-\alpha=0^\circ$,其散射表达式简化为:

$$E_i = \frac{1}{2}(S_i + A_i)x \pm \frac{1}{2}(S_i - A_i)y \quad (2)$$

在制作过程中,不同臂长比较容易实现,因此使用

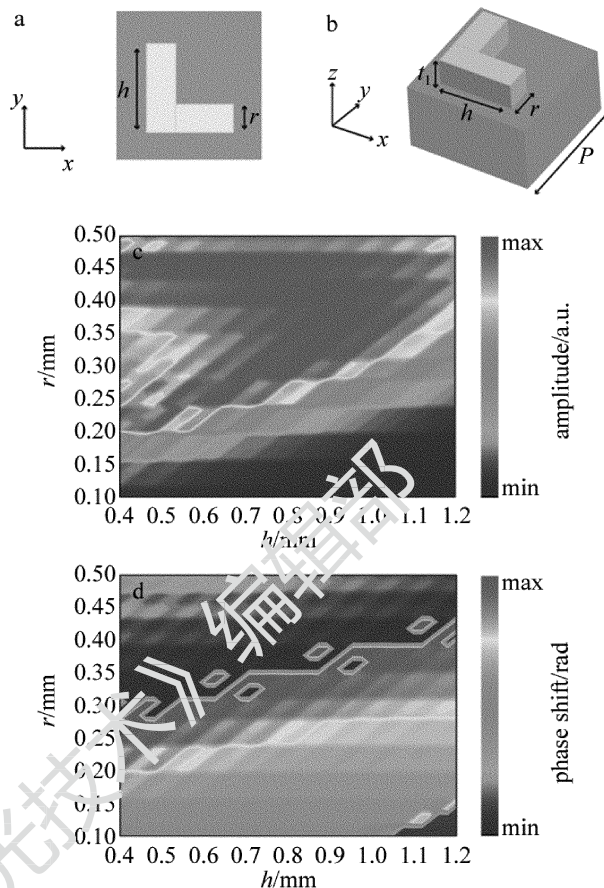


Fig. 1 a—2-D graph of L-shaped antenna unit b—3-D map of L-shaped antenna unit c—the scattering amplitude of single L-shaped antenna unit with the change of h and r d—the scattering phase of single L-shaped antenna unit with the change of h and r

L 型天线作为基本电磁散射单元。

如图 1a 和图 1b 所示,单个散射结构单元周期长度为 $P=1.5\text{mm}$,由上层 L 型金属天线(Au)和下层衬底材料组成聚丙烯组成,折射率在 0.1THz 时为 1.48, L 型天线厚度 $t_1=300\text{nm}$,大于太赫兹的趋肤深度。采用时域有限差分法(finite difference time-domain, FDTD)仿真软件进行模拟计算,在 x, y, z 方向设置为完全匹配层。计算了单个散射单元的电磁散射特性,即出射光的振幅和相位随不同臂长 h 和宽度 r 的变化行为,如图 1c 和图 1d 所示,其中入射光偏振方向为 x 方向线偏光。

根据图 1c 和图 1d,可以获得不同 (h, r) 的出射光振幅和相位信息。根据设计超表面的基本原理,需要从中挑选出若干个不同 (h, r) 的天线来完成界面处不同相位突变的要求。为了实现 2 阶涡旋光束,首先挑选 8 个天线对 2π 相位突变进行覆盖,然后再挑选 8 个天线实现 4π 相位突变。

由图 1c 和图 1d,首先选取 4 个天线出来,具体几何参量如图 2a 所示。相邻天线相位差间隔为 $\pi/4$,实现了一个相位差为 π 的覆盖。然后将 $A_1 \sim A_4$ 这 4 个

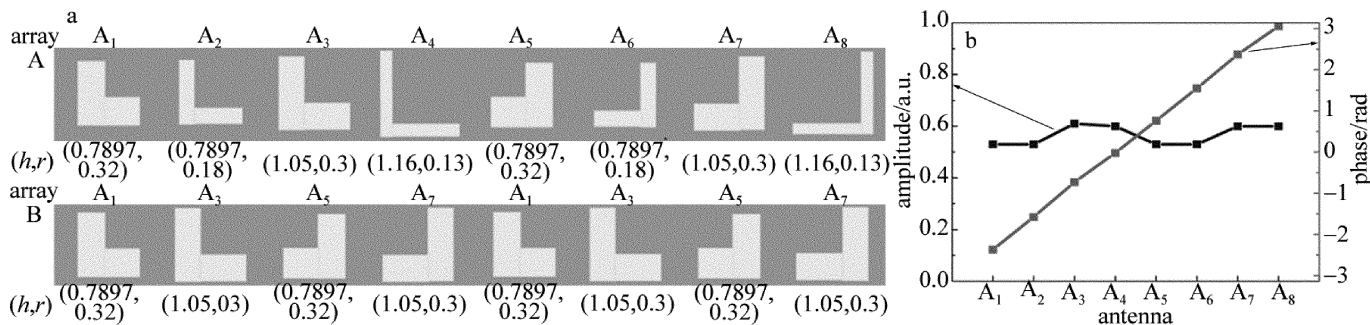


Fig. 2 a—the overlay phase array: array A(2π) and array B($2 \times 2\pi$) b—the normalized amplitude and phase diagram of the polarized light vertically

天线逆时针旋转 90° , 形成 $A_5 \sim A_8$ 4 个基本天线, 其相位差间隔也为 $\pi/4$, 而 A_4 和 A_5 的相位差也是 $\pi/4$, 从而完成另外一个 π 相位差覆盖。为了验证这 8 个天线是否实现了 2π 相位延迟, 再次计算了它们的散射特性, 如图 2b 所示。可以明显看出, 它们的相位延迟确实覆盖了 2π , 而且出射振幅比较平坦, 符合超表面的设计原理。

对于 4π 相位突变而言, 从阵列 A 中挑选出了 A_1, A_3, A_5 和 A_7 4 个天线单元, 其相邻的相位差为 $\pi/2$, 这样这 4 个天线完成 2π 相位突变, 因此可以再重复使用这 4 个天线就可以得到另一个 2π 相位突变。

2 L型天线阵列的研究

2.1 L型天线阵列的透射特性的研究

如前所述, 光学超表面对入射光进行波前调制是基于界面处相位突变, 根据广义斯涅耳定理^[5], 这种相位突变会带来异常折射或者异常反射。由于作者采用透射式结构来产生 2 阶太赫兹涡旋光束, 因此, 需要验证上述选取的天线阵列是否会产生异常折射现象。

对于阵列 A 而言, 入射光为 x 偏振 0.1THz 太赫兹波, 光源是高斯光束^[16], 入射方向是 z 方向。图 3a 显示出射光 E_x 分量没有被天线调制, 属于正常透射光; 而图 3b 中, 透射光 E_y 分量从阵列表面异常出射出去, 计算数据显示其相位覆盖 2π , 形成异常折射现象, 异常透射角约为 -15° 。理论上, 根据广义斯涅耳定理可以计算异常折射角度 $\theta'_1 = \arcsin(n_i \sin\theta_i - \lambda_0/p)$, 其中 θ_i 是入射角度, n_i 是衬底介质折射率, p 是线性阵列周期长度, λ_0 是入射光波长。对于阵列 A 而言, $\theta'_1 = -14.7^\circ$ 。

对于线性阵列 B 的透射特性如图 3b 和图 3d 所示。相同的入射条件, E_x 和 E_y 分量的计算结果与阵列 A 大致趋势相同。由于线性阵列 B 实现的是 4π 相位突变, 因此模拟计算的异常透射角约为 -30° , 广义斯涅耳定理计算结果为 $\theta'_1 = -30^\circ$ 。

分析 1 阶和 2 阶异常透射现象, E_x 基本相同, 而 E_y 分量, 1 阶的异常透射角度小于 2 阶异常透射角度,

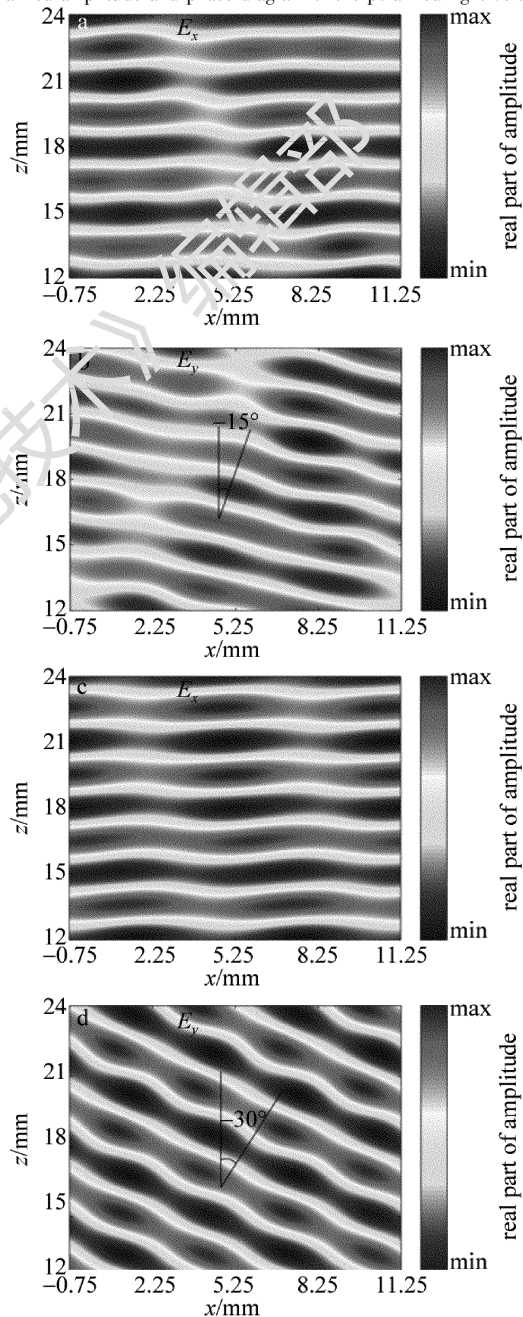


Fig. 3 a—the 1st order transmission spectrum parallel to the polarization direction of incident light b—the 1st order transmission spectrum perpendicular to the polarization direction of incident light c—the 2nd order transmission spectrum parallel to the polarization direction of incident light d—the 2nd order transmission spectrum perpendicular to the polarization direction of incident light

从上述公式可以看出,异常透射角是由介质折射率、入射角、入射光波长和周期长度决定,对比1阶和2阶计算条件,可以发现:唯一不同的是周期条件,2阶周期长度是1阶周期长度的2倍,进而影响异常折射角。

2.2 涡旋光产生相位板设计和分析

理论上涡旋光束的相位是由轨道角动量^[17] $\exp(i\theta)$ 因子确定, θ 是相位角度, l 是拓扑荷^[18]。 $l=1$ 时,在一个波长传播距离上,波前绕着中心旋转一周,相位改变 2π 。如图4a所示,相位板面积为 $12\text{mm} \times$

12mm ,天线单元为 14×14 个。将整个相位板沿角向均匀分成8个象限,将阵列A中的天线 $A_1 \sim A_8$ 逆时针放置,相邻两个象限相位相差 $\pi/4$ 。对于 $l=2$ 时,相位改变 4π ,将阵列B中的天线 $A_1 \sim A_8$ 逆时针放置,相邻两个象限相位相差 $\pi/2$,如图4d所示。理论上增加象限或者天线密度可以提高转换效率。但是增加象限和天线密度后样品加工很难,另外相邻天线之间相互耦合程度会增加,使得相位突变会偏离原来设计要求。

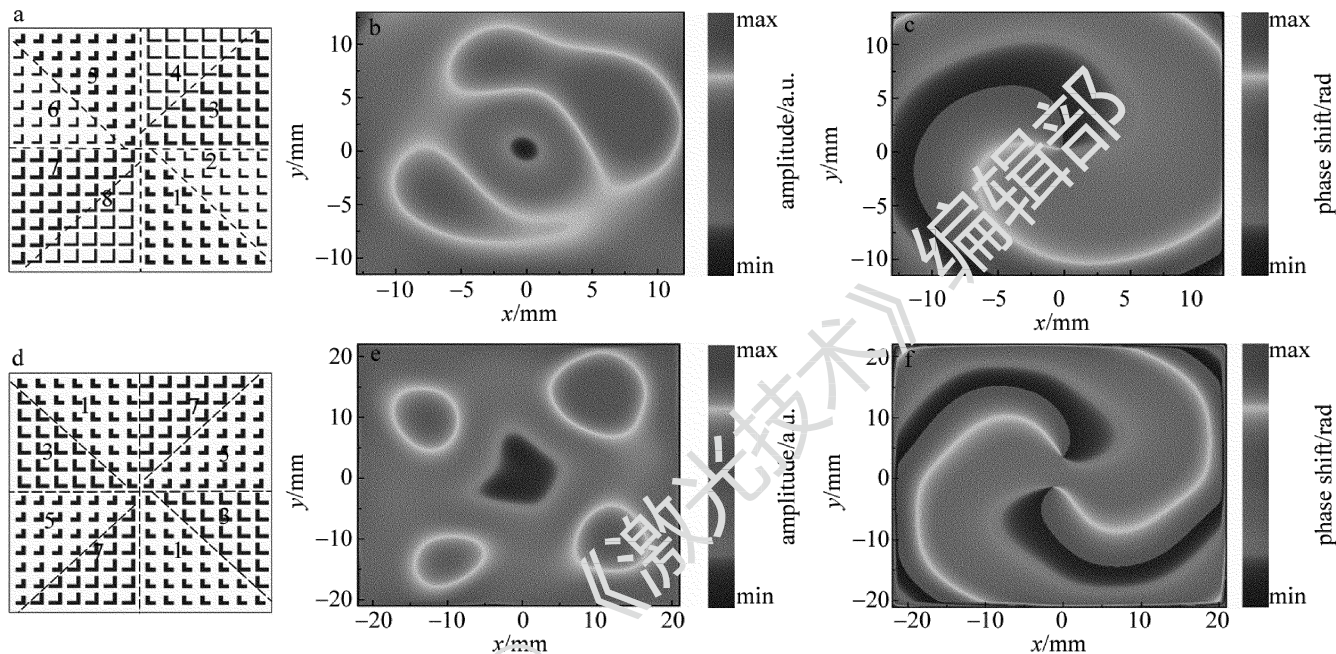


Fig. 4 a—vortex phase plate under topological charge $l=1$ b—the normalized amplitude under topological charge $l=1$ c—the vortex phase under topological charge $l=1$ d—vortex phase plate under topological charge $l=2$ e—the normalized amplitude under topological charge $l=2$ f—the vortex phase under topological charge $l=2$

用 0.1THz 偏振光(x 方向)入射到超表面阵列平面上,计算得到透射的涡旋光场分布和相位分布如图4b、图4c、图4e、图4f所示。图4b、图4e和图4c、图4f分别是 $l=1$ 和 $l=2$ 涡旋强度、相位分布示意图。由图4b和图4e可以看出光场中心点为暗场,即涡旋中心强度为0;图4c和图4f显示相位呈螺旋状。相比较于1阶光斑,2阶光斑的尺寸比1阶大,为了使光斑完整的呈现出来,所以采用的监视器尺寸也相应变大。注意到对于 $l=2$ 涡旋光束相位分布的旋转中心发生分离,这是由于2阶光束阵列排列的非连续性造成的。

3 结论

本文中提出了一种基于L型微天线,通过改变L型天线两个自由度的大小,使用8个天线实现相位覆盖 $0 \sim 2\pi$ 和 $0 \sim 4\pi$ 控制光波振幅相位的方法, 0.1THz 线偏光垂直入射,发现线性阵列的周期越小,其垂直偏振方向的异常透射角度越大,这点符合广义斯涅耳定

理。另外还根据拓扑荷 l 为1和2,设计了1阶和2阶涡旋相位板,产生相应的涡旋光束。

参考文献

- [1] WANG B, ZHANG Y. Design and application of THz metamaterials and metasurfaces[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015, 13(1):1-12(in Chinese).
- [2] CHEN H T, TAYLOR A J, YU N F. A review of metasurfaces: physics and applications[J]. Report on Progress in Physical Society, 2016, 79(7): 076401.
- [3] HOLLOWAY C L, DIENSTFREY A, KUESTER E F, et al. A discussion on the interpretation and characterization of metafilms/metamaterials: The two-dimensional equivalent of metamaterials[J]. Metamaterials, 2009, 3(2):100-112.
- [4] SKALAEV M I, SUN J B, TSUKERNIK A, et al. High-efficiency all-dielectric metasurfaces for ultracompact beam manipulation in transmission mode[J]. Nano Letters, 2015, 15(9):6261-6266.
- [5] YU N F, GENEVE P, KATS M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. Science, 2011, 334(6054):333-337.
- [6] QIN F, DING L, ZHANG L, et al. Hybrid bilayer plasmonic metasurface efficiently manipulates visible light[J]. Science Advances,

- 2016,2(1):1501168.
- [7] MO W C, WEI X L, WANG K J, *et al.* Ultrathin flexible terahertz polarization converter based on metasurfaces [J]. *Optics Express*, 2016, 24(12):13622-13627.
- [8] HU D, WANG X K, FENG S F, *et al.* Ultrathin terahertz planar elements[J]. *Advanced Optical Materials*, 2013, 1(2):186-191.
- [9] GENEVET P, YU N F, AIETA F, *et al.* Ultra-thin plasmonic optical vortex plate based on phase discontinuities[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(1):1-11.
- [10] HE J W, WANG X K, HU D, *et al.* Generation and evolution of the terahertz vortex beam[J]. *Optics Express*, 2013, 21(17):20230-20239.
- [11] 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.
- [12] ALLEN L, BEIJERSBERGEN M W, SPREEUW R J C, *et al.* Orbital angular momentum of light and transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Physical Review*, 1992, A45(11):8185-8189.
- [13] BLACK L J, WANG Y D, GROOT C H, *et al.* Optimal polarization conversion in coupled dimer plasmonic nanoantennas for metasurfaces [J]. *ACS Nano*, 2014, 8(6):6390-6399.
- [14] WANG W, GUO Z Y, LI R Z, *et al.* Plasmonics metalens independent from the incident polarizations[J]. *Optics Express*, 2015, 23(13):16782-16791.
- [15] YU N F, GENEVET P, AIETA F, *et al.* Flat optics: Controlling wavefronts with optical antenna metasurfaces[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(3):4700423.
- [16] WEI Y, ZHU Y Y. Analysis of phase change of Laguerre-Gaussian vortex beam during propagation[J]. *Laser Technology*, 2015, 39(5):723-726(in Chinese).
- [17] ZHANG Y X, XU J C, SI C F, *et al.* Effect of turbulent tilt, coma and astigmatism on orbital angular momentum state of laser beam [J]. *Laser Technology*, 2010, 34(6):747-749(in Chinese).
- [18] MAIR A, VAZIRI A, WEIHS C, *et al.* Entanglement of the orbital angular momentum states of photons [J]. *Nature*, 2001, 412(6844):313-316.