

基于 V 形纳米天线的平面透镜设计与制备

焦 蛟^{1,2}, 罗先刚², 赵 青¹

¹电子科技大学物理电子学院, 四川 成都 610054;

²中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 四川 成都 610209

摘要 传统透镜由于其体积大、性能差等因素的制约,使其在微纳光学系统中的应用遇到挑战。金属纳米结构能够耦合自由光波产生表面等离子体激元,通过控制表面等离子体激元来实现对入射光波的调控。V形等离子体纳米天线凭借其双共振效应以及 $0\sim 2\pi$ 的全相位调谐范围,使其在可以实现光束调控的金属纳米结构中脱颖而出。首先基于 V 形纳米天线设计了可以在 $34\ \mu\text{m}$ 处高效聚焦的超透镜;接着利用聚焦电子束和光刻工艺制备样品;最后对样品进行表征分析与光学检测。这些工作将促进 V 形纳米天线在激光直写、光学集成方面的应用。

关键词 表面光学; 表面等离子体; V 形纳米天线; 光束调控; 电子束

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0724001

Design and Preparation of Planar Lens Based on V-Shaped Nanoantennas

Jiao Jiao^{1,2}, Luo Xiangang², Zhao Qing¹

¹ School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China;

² State Key Laboratory of Optical Technologies for Microfabrication, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

Abstract Conventional lens encounters challenges in the application of micro-nano optical system due to its big volume and poor performance. While metallic nanostructure can couple the free light wave to produce surface plasmon polaritons. And we can adjust and control the incident light wave by controlling the surface plasmon polaritons. V-shaped plasmonic nanoantenna stands out among the metallic nanostructures which are able to realize beam controlling because of its double resonant effect and comprehensive phase tuning range of $0\sim 2\pi$. Firstly, based on the V-shaped nanoantenna, a super lens which can realize high efficient focus at $34\ \mu\text{m}$ is designed. Then by using focused electron beam and photolithography technique, the samples are prepared. Finally, the characterization analysis and optical detection of the samples are carried out. These works have the potential to promote the applications of V-shaped nanoantenna in laser direct writing and optical integration.

Key words optics at surfaces; surface plasmon; V-shaped nanoantennas; beam control; electron beam

OCIS codes 240.6680; 350.4238; 240.3990; 350.3850

1 引 言

传统透镜是通过在弯曲表面产生连续的光折射来实现光束整形的。伴随着集成光学的快速发展,传统透镜由于其体积、性能等各方面因素的制约,在微纳光学系统中的应用遇到了前所未有的挑战。金属纳米结构能够耦合自由光波产生表面等离子体激元,通过对表面等离子体激元的控制来实现对入射光波的空间调

收稿日期: 2017-02-08; **收到修改稿日期:** 2017-03-08

基金项目: 国家 973 计划(2013CBA01700)、国家自然科学基金(61138002,11275045)

作者简介: 焦 蛟(1988—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事微纳光学方面的研究。E-mail: jiaojiao3721@sina.cn

导师简介: 赵 青(1964—),男,博士,研究员,主要从事等离子体技术及微纳光学方面的研究。

E-mail: zhaq@uestc.edu.cn(通信联系人)

控^[1-9]。这种微纳光束调控结构能够有效防止光学畸变、像散和彗差,使光在一个很薄的平面区域内实现精准的光束调控。

由于表面等离子体激元能够把光波限制在远小于波长的尺度内传播,打破了传统光学衍射极限,使得基于表面等离子体的金属微纳结构能够对光产生调控。当光通过金属微纳结构传播时,会在其中产生不同的相位差,通过调节相位差便可以对出射光的波前形状进行控制^[10-12]。2012年美国哈佛大学的科技人员宣布研制出了一种厚度仅为60 nm的超薄平面镜片,有望取代传统透镜^[13-14]。该团队设计的透镜是基于一种新的V形纳米天线结构阵列排布而成的。这种V形纳米天线同时具有双共振、相位覆盖面广、超薄等特性,使得这种天线结构在诸多纳米光束调控天线中脱颖而出。这种由两个天线杆组合而成的纳米天线具有广泛的应用前景,同时也有很多奇特现象有待探索^[15-16]。

基于V形纳米天线设计的光束调控器件由于其结构的特征尺寸仅有50 nm左右,所以样品制备较为困难。本文基于金属表面等离子体相关理论,通过改变天线的尺寸,选择合适的材料来减小传输中的能量损失,设计出一种可实现远场高效聚焦的V形纳米天线透镜。接着利用聚焦电子束系统(EBL)制备样品,经过表征,得到形貌较好的V形纳米天线结构。最后进行了相关光学检测实验。

2 基本原理

2.1 光束调控原理

当光在光学元件中传播时,不同的光路间存在累积的相位差,通过调整相位差可以修正出射波的波前形状,进而对光束进行调控。然而,相位差的大小受到材料光学性能,如材料折射率的限制。而且,光在材料中的传播长度大于或等于光的传播波长时才能得到一个明显的相位变化。

一个优异的纳米结构光束调控天线首先要对出射光的波前有较为全面的控制,并且能够在得到所需相位的同时保持较大的散射光振幅。V形纳米天线不仅能够提供 $0\sim 2\pi$ 的全面相位变化而且具有双共振效应,其共振模式可分为对称模式与非对称模式。当一束 x 方向的线偏振光从天线底部垂直入射时,入射光的电场能量被分为平行于天线对称轴的 E_s 分量和垂直于天线对称轴的 E_a 分量。其中 E_s 分量激发了等离子体对称共振模式, E_a 分量激发了等离子体非对称共振模式。这样的双共振效应可以使得经过天线的光在获得所需相位的同时拥有所需的振幅,所以V形纳米天线是设计平面聚焦透镜的可靠选择。

2.2 V形纳米天线仿真

如图1(a)所示,V形天线由两个柱状的金天线杆组成。天线杆一端相连,另外一端形成一个夹角。其中 l 为臂长, w 为臂宽, t 为厚度, P 为单元纳米天线周期, α 为天线夹角, β 为天线与 x 轴的夹角。

利用时域有限元差分法(FDTD)对天线的结构尺寸进行参数扫描,从而获得设计所需要的散射光的相位和振幅。考虑到设计因素、制备因素及实验室客观条件因素,最后选取波长为785 nm的 x 方向线偏振光作为入射光源。根据波长确定V形纳米天线材料为金,考虑到衬底导电性的问题,选取氧化铟锡(ITO)玻璃作为衬底。

不同V形纳米天线结构可以使光产生不同的相位和振幅响应。如图1(b)所示,一般取 $\alpha=60^\circ、90^\circ、120^\circ、180^\circ$ 4种不同夹角的的天线,并取方位角 $\beta=45^\circ、135^\circ$,一共8个不同方向与夹角的纳米天线。本着减少变量与简化计算过程的设计思路,在确定好天线夹角 α 和方位角 β 后,将天线结构的周期设定为 $P=280$ nm,对天线的透射率进行初步仿真后得出,当 $w=50$ nm、 $t=50$ nm时纳米天线的激励效果最好。因此,只需要计算8个V形纳米天线的臂长 l 对光的相位和振幅响应即可。

根据以上条件,分别对8个不同夹角与方向角的V形天线的臂长 l 进行参数扫描,计算出不同臂长值所对应的相位和振幅响应。图1(b)为8个不同夹角和方向的V形纳米天线所对应的曲线颜色。图1(c)为不同臂长的各V形纳米天线所对应的相位分布,由图可以看出相位分布已经达到 $0\sim 2\pi$ 全覆盖。图1(d)为不同臂长的各V形纳米天线的振幅分布,平均振幅值达到0.4,说明大部分V形纳米天线结构能够同时满足设计平面透镜对相位与振幅的双要求。

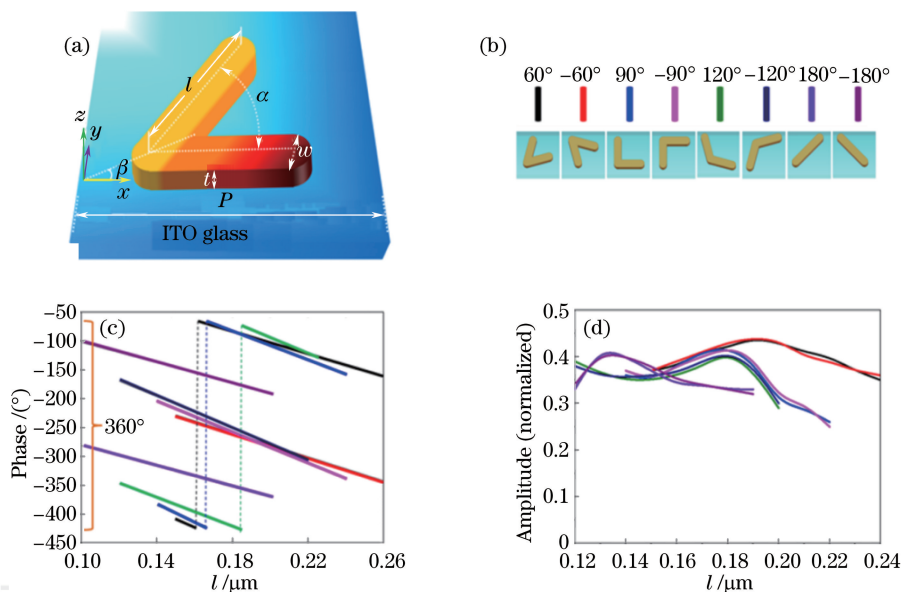


图 1 (a)单元 V 形纳米天线结构图;(b)不同夹角的 V 形纳米天线所对应的曲线颜色;
(c)不同 V 形纳米天线的相位分布随臂长变化曲线;(d)不同 V 形纳米天线的振幅随臂长变化曲线
Fig. 1 (a) Schematic of unit cell V-shaped nanoantennas structure; (b) corresponding curve colors of the V-shaped nanoantennas with different angels; (c) phase distributions with different V-shaped nanoantennas versus arm length; (d) amplitude of different V-shaped nanoantennas versus arm length

3 远场平面聚焦透镜设计

完成单元 V 形纳米天线数据扫描后,接下来要基于 V 形纳米天线结构设计一个远场平面聚焦透镜。将一束 x 方向偏振的平面波由 ITO 玻璃基底入射,用以激发天线等离子体谐振。假设经天线阵列的透射光聚焦于一点,且其焦距为 f 。为了实现聚焦,坐标为 x 处需要提供的相位突变 φ 可由等光程原理推导出,即:

$$\varphi(x) = 2n\pi + \frac{2\pi f}{\lambda} - \frac{2\pi\sqrt{f^2 + x^2}}{\lambda}, \quad (1)$$

式中 n 为任意整数, f 为焦距, λ 为入射平面波波长。

以焦距 $f = 35 \mu\text{m}$, 单元周期 $P = 280 \text{ nm}$ 为例。代入(1)式后计算可得如图 2(a)所示的 x 位置所需的相位分布。由图中所需天线分布可知,要想实现 $0 \sim 2\pi$ 范围的相位变化,至少需要 31 圈天线。

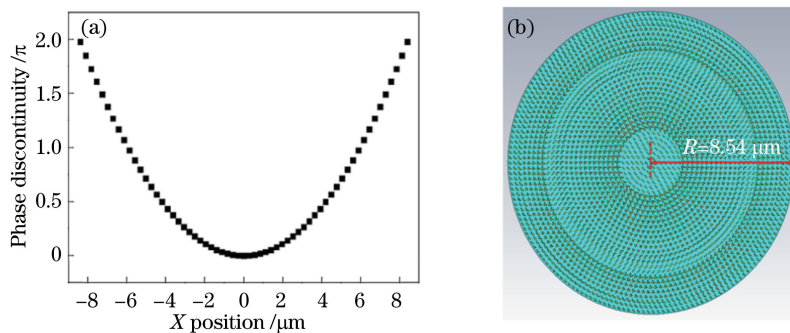


图 2 远场聚焦超透镜结构设计。(a) x 位置所需相位分布图;(b)二维环形阵列结构图
Fig. 2 Design of far-field focusing super lens. (a) Phase distribution needed at x position;
(b) structure of two-dimensional circularly arranged arrays

选取合适的纳米天线排列成能够实现聚焦的平面透镜。其中一维周期排列的天线阵列可以将光聚焦为一条线,这种特性与柱面镜类似。将天线按环形排列,能提供一个抛物面形的相位变化,那么该天线阵列就

可以使光聚焦为一个点。

根据极坐标来表示每个天线单元的中心坐标。经过推算得出每个天线单元中心点坐标 (x, y) 为：

$$\begin{cases} x = i \cdot \Delta r \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{n} \cdot j\right) \\ y = i \cdot \Delta r \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{n} \cdot j\right) \end{cases}, \quad i = 0, \dots, m; j = 1, \dots, n, \quad (2)$$

式中 i 为第 i 个圆环($i=0$ 表示中心天线), j 表示第 i 个圆环中的第 j 个天线, Δr 为每个圆环的宽度, m 为任意整数。 n 表示不同圆环的天线数量,这里 $n=8+(i-1) \times 4$ 个天线, n 可以根据实际情况增多或减少。

按照上述方式进行排列得到了所需的由V形纳米天线二维排列组成的平面透镜结构。透镜半径为 $8.54 \mu\text{m}$,厚度为 50 nm 。然后,对平面透镜的光束调控情况进行仿真计算。

将一束波长为 785 nm 的 x 方向线偏振光作为入射光光源由ITO玻璃衬底入射。经过计算得到如图3所示的仿真结果。其中图3(a)为 y 面的光场分布图,白色虚线为焦平面位置,实际聚焦焦距为 $34 \mu\text{m}$,接近设计之初的 $35 \mu\text{m}$ 。图3(b)为焦平面所对应的光强分布曲线,可以看到聚焦中心场的光强为入射光强的2.7倍。图3(c)为焦平面上的光场分布图,其半峰全宽(FWHM)值为 1902 nm 。由衍射极限计算可得当 $f = 34 \mu\text{m}$ 、入射波长为 785 nm 时, $0.5\lambda/\text{NA} = 0.578535/8.54 = 1611 \text{ nm}$,仿真结果接近衍射极限值。

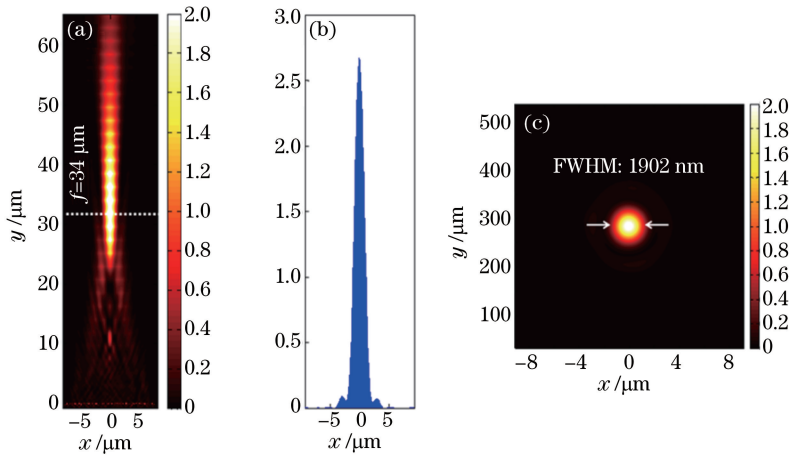


图3 远场聚焦平面透镜仿真。(a) y 面光场分布图;(b)焦平面光强度分布曲线;(c)焦平面光场分布图
Fig. 3 Simulation of far-field focusing plane lens. (a) Distribution of optical field on y plane;
(b) light intensity distribution of the focal plane; (c) light field distribution of the focal plane

4 制备、表征与测试

基于V形纳米天线设计的平面透镜难点不在设计,而在于加工制备。因为制备面积较大且特征尺寸仅有 50 nm 的复杂图形并非易事。接下来对样品的加工工艺及制备方法进行讨论,最后对加工好的样品进行表征分析。

4.1 样品制备与表征

由于结构尺寸的限制,可选的加工制备方法不多。聚焦电子束系统是一种加工精度很高的设备,它由场发射电子枪发射出聚焦电子束,在光刻胶上直写出所需的复杂二维图形。如果将其与光刻工艺相结合,即采用Lift-off的工艺方法便可以制备出线宽小于 10 nm 的金属图形。由于直写式曝光技术所具有的超高分辨率使得它在微纳加工方面有着巨大的优势。

图4为Lift-off制备工艺流程图。考虑到衬底大的导电性故选取ITO玻璃作为衬底。接着在干净的衬底上旋涂一层聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)胶并烘干。在进行曝光前需要将待加工样品结构数据导入EBL系统。在绘制结构图时不需要画出V形纳米天线的宽度,只需要表达出天线的臂长与夹角即可,因为臂宽可以通过电子束剂量大小来调节。在正式直写前要先研究不同电子束剂量对线宽的影响,确定合适剂量后,

对样品进行曝光。显影后的样品仅保留未被曝光的区域。利用电子束蒸发系统在 PMMA 胶结构上蒸发一层厚度为 50 nm 的金薄膜。最后将镀膜后的样品放入超声机中清洗,使未被电子束曝光的光刻胶及附着其上的金薄膜脱落,这部分区域脱落后剩下的结构部分便是所需的图形结构。

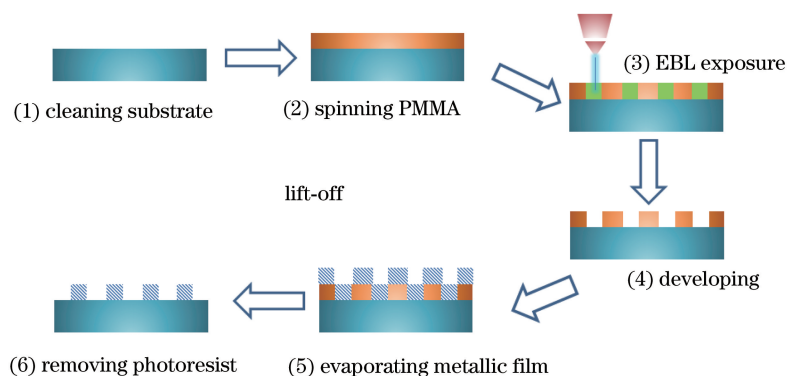


图 4 Lift-off 制备工艺流程

Fig. 4 Lift-off preparation process flow chart

制备的平面透镜结构的扫描电子显微镜 (SEM) 照片如图 5 所示,从图中可以看出图形区域半径 $R = 8.54 \mu\text{m}$,整体结构边界清晰。但仍有一些 V 形纳米天线的夹角处尺寸较大,这是由于纳米尺度下的临近效应造成的。另外由于蒸镀的金薄膜在超声时脱落不均匀,会造成天线臂的形貌不均匀。但是这些制备误差都是在允许范围内,对透镜的整体聚焦效果影响不大。

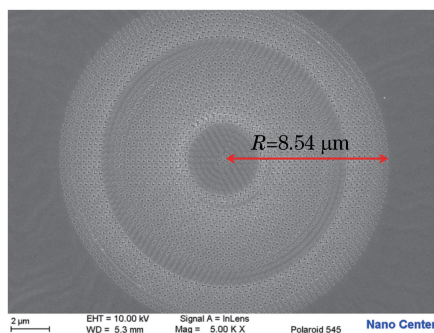


图 5 基于 V 形纳米天线阵列的透镜结构样品 SEM 照片

Fig. 5 SEM picture of lens structure samples based on V-shaped nanoantenna arrays

4.2 光学测试

由于设计的平面透镜采用的入射光均是 x 方向的线偏振光。所以在光路的搭建以及后续测试时,要考虑其偏振态,只需要测出出射光场 y 方向的光参量即可。

图 6 为测试实验所用光路示意图,主要包括激光器、衰减片、线偏振片、样品架、聚焦物镜以及 CCD 相

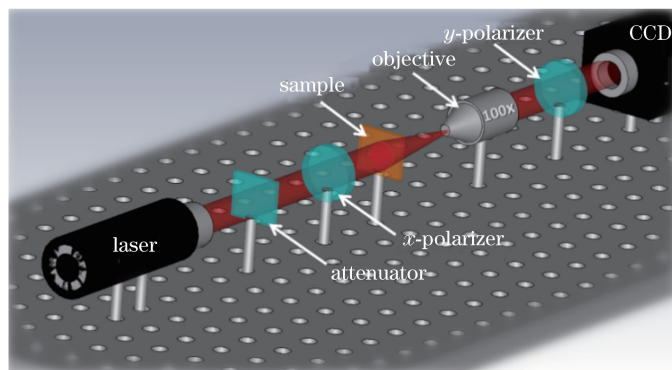


图 6 光学检测平台示意图

Fig. 6 Schematic diagram of optical inspection platform

机。当激光由激光器发出后,经过衰减片和偏振片将光减弱并以线极化光由样品底部入射,通过平面透镜聚焦于某一个面的光场再经过物镜进行放大,最后在 CCD 相机上成像。移动物镜的位置,便可以得到任意平面的光场分布数据。

采用 785 nm 波长的激光入射至样品,透射后交叉极化偏振光的 y 分量将在焦平面形成聚焦焦斑。将所测得的数据进行处理后得到,当 $z=32.3 \mu\text{m}$ 时其光斑效果最好,即测试的实际焦距为 $f=32.3 \mu\text{m}$ 。图 7 (a)为实际焦平面的聚焦光场分布图,图 7(b)为对应的光强分布曲线,可见实际聚焦焦斑能量比仿真所得的值要大。

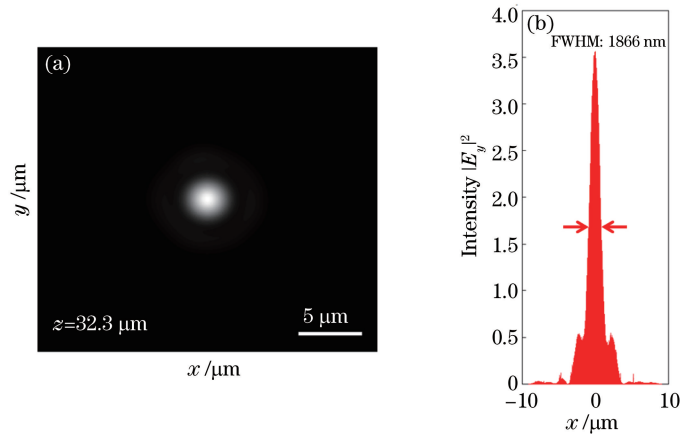


图 7 光学测试结果。(a) $z=32.3 \mu\text{m}$ 时的光场分布;(b)焦斑中心对应的光强分布曲线

Fig. 7 Optical test results. (a) Distribution of light field at $z=32.3 \mu\text{m}$;

(b) light intensity distribution curve corresponding to the center of the focal spot

5 结 论

本文首先基于 V 形纳米天线设计出可以实现远场高效聚焦的平面透镜。透镜焦距为 $34 \mu\text{m}$, 聚焦光斑中心光强为入射光强的 2.7 倍,半峰全宽值为 1902 nm,接近衍射极限值 1611 nm。接着利用聚焦电子束直写系统并结合电子束蒸发与剥离工艺完成样品的制备。通过扫描电镜对样品进行表征与分析。最后搭建相关光学测试平台进行检测,其检测结果与仿真结果相差不大。这项作为基于 V 形纳米天线设计各种光学功能器件积累了经验,并且探索出了制备复杂纳米结构的工艺方法。但是这种透镜仍然不能在实现远场聚焦的同时形成超分辨聚焦,且 EBL 无法完成大面积直写。所以在今后的工作中应寻找可以实现透镜远场超分辨聚焦的设计方法,并且探索新的制备工艺。

参 考 文 献

- [1] Kim S, Lim Y, Kim H, *et al.* Optical beam focusing by a single subwavelength metal slit surrounded by chirped dielectric surface gratings[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(1): 013103.
- [2] Sun Z, Kim H K. Refractive transmission of light and beam shaping with metallic nano-optic lenses [J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(4): 642-644.
- [3] Verslegers L, Catrysse P, Yu Z. Deep-subwavelength focusing and steering of light in an aperiodic metallic waveguide array[J]. Physical Review Letters, 2009, 103(3): 033902.
- [4] Wang Q, Yuan X C, Tan P S, *et al.* Phase modulation of surface plasmon polaritons by surface relief dielectric structures[J]. Optics Express, 2008, 16(23): 19271-19276.
- [5] Lopez-Tejiera F, Rodrigo S G, Martin-Moreno L, *et al.* Efficient unidirectional nanoslit couplers for surface plasmons [J]. Nat Physics, 2007, 3(5): 324-328.
- [6] Yu Chunyan, Cui Qingfeng, Zhu Hao, *et al.* Optical design of a double-side Fresnel lens for concentrator[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0122008.
于春岩, 崔庆丰, 朱 浩, 等. 双面菲涅耳聚光镜设计[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0122008.

-
- [7] Xu T, Wang C T, Du C L. Plasmonic beam deflector[J]. *Optics Express*, 2008, 16(7): 4753-4759.
- [8] Xu T, Du C L, Wang C T. Subwavelength imaging by metallic slab lens with nanoslits[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(20): 201501.
- [9] Li Z, Caglayan H, Colak E, *et al.* Enhanced transmission and directivity from metallic subwavelength apertures with nonuniform and nonperiodic grooves[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(1): 011128.
- [10] Grober R D, Schoelkopf R J, Prober D E. Optical antenna: towards a unity efficiency near-field optical probe[J]. *Applied Physics Letters*, 1997, 70(11): 1354-1356.
- [11] Muhlschlegel P, Eisler H J, Martin O J F, *et al.* Resonant optical antennas[J]. *Science*, 2005, 308(5728): 1607-1609.
- [12] Aieta F, Genevet P, Yu N, *et al.* Out-of-plane reflection and refraction of light by anisotropic optical antenna metasurfaces with phase discontinuities[J]. *Nano Letters*, 2012, 12 (3): 1702-1706.
- [13] Yu N, Aieta F, Genevet P, *et al.* A broadband, background-free quarter-wave plate based on plasmonic metasurfaces [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(12): 6328-6333.
- [14] 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.
- [15] Lin J, Wu S B, Li X, *et al.* Design and numerical analyses of ultrathin plasmonic lens for subwavelength focusing by phase discontinuities of nanoantenna arrays[J]. *Applied Physics Express*, 2013, 6(2): 022004.
- [16] Ni X, Emani N K, Kildishev A V, *et al.* Broadband light bending with plasmonic nanoantennas[J]. *Science*, 2012, 335(6067): 427.