

## 基于介质超表面的宽谱、大偏转角近红外光束偏转器

程宏, 李洪涛, 韩彦军, 孙长征, 郝智彪, 熊兵, 汪莱, 王健, 余佳东

引用本文:

程宏, 李洪涛, 韩彦军, 等. 基于介质超表面的宽谱、大偏转角近红外光束偏转器[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(9): 1873–1880.

CHENG Hong, LI Hong-tao, HAN Yan-jun, et al. Near-infrared beam deflector with broadband and large deflection angle based on dielectric metasurface[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(9): 1873–1880.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/OPE.20202809.1873>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 大角度压电式快速控制反射镜

Piezoelectric fast steering mirror with large excursion angle

*光学精密工程*. 2015, 23(8): 2258–2264 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152308.2258>

### 用于视角偏转的光学膜表面微结构设计

Design of optical film with microstructure for viewing angle deflection

*光学精密工程*. 2016, 24(5): 1009–1014 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162405.1009>

### 高精度激光光束准直系统设计

Design of high-accuracy laser beam collimation system

*光学精密工程*. 2020, 28(4): 817–826 <https://doi.org/10.3788/OPE.20202804.0817>

### KDP晶体支撑系统工作姿态确定

Ascertainment of operating posture of KDP crystal supporting system

*光学精密工程*. 2017, 25(3): 632–640 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172503.0632>

### 压电式快速控制反射镜的迟滞特性及线性化

Hysteresis and linearization of piezoelectric fast steering mirror

*光学精密工程*. 2015, 23(6): 1650–1656 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152306.1650>

文章编号 1004-924X(2020)09-1873-08

# 基于介质超表面的宽谱、大偏转角近红外光束偏转器

程 宏<sup>1</sup>, 李洪涛<sup>1,3\*</sup>, 韩彦军<sup>1,2,3</sup>, 孙长征<sup>1,3</sup>, 郝智彪<sup>1,3</sup>,

熊 兵<sup>1,3</sup>, 汪 莱<sup>1,3</sup>, 王 健<sup>1,3</sup>, 余佳东<sup>1,2,3</sup>

(1. 清华大学 电子工程系 北京信息科学与技术国家研究中心, 北京 100084;

2. 浙江清华柔性电子技术研究院 柔性智能光电子技术研究所, 浙江 嘉兴 314006;

3. 清华大学 柔性电子技术研究中心, 北京 10084)

**摘要:**设计了一种适合集成的基于介质超表面的透射式光束偏转器,可在 1 550 nm 附近的红外波段实现大角度偏转,同时具有宽光谱、高效率的优势。根据广义斯涅尔定律设计并优化了光束偏转器的结构,由横截面为梯形的非晶硅纳米柱周期性排列在石英玻璃衬底上构成,相比于传统超表面采用多个纳米柱实现离散的相位梯度,梯形纳米柱形成的连续相位梯度可以获得更好的偏转特性。利用时域有限差分算法对光束偏转器的效率、偏转角、宽光谱和入射角度依赖性 etc 性能进行了仿真分析,采用电子束光刻等工艺制备加工出上述器件并进行了测试。仿真结果表明:偏转器在 1 350~1 650 nm 波段均具备良好的偏转特性,平均透射率高于 87%,平均偏转率为 81%;器件在 1 550 nm 处实现了 42.8° 的大偏转角,透射率为 84%,偏转率为 80%,且允许入射角度在 -10°~5° 变化。实验测试结果表明:对于 1 550 nm 波长,光束偏转角度在 41° 附近,器件透射率约为 76%,约 35% 的入射光偏转到目标角度。上述方案为近红外超表面器件的设计提供了新的思路,实现了效率、偏转角和适用波长的优化,透射式光路更加适合集成,应用潜力更大。

**关键词:**近红外;宽光谱;大偏转角;光束偏转器;介质超表面;梯形纳米柱

**中图分类号:**TB34;TN214 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20202809.1873

## Near-infrared beam deflector with broadband and large deflection angle based on dielectric metasurface

CHENG Hong<sup>1</sup>, LI Hong-tao<sup>1,3\*</sup>, HAN Yan-jun<sup>1,2,3</sup>, SUN Chang-zheng<sup>1,3</sup>, HAO Zhi-biao<sup>1,3</sup>,  
XIONG Bing<sup>1,3</sup>, WANG Lai<sup>1,3</sup>, WANG Jian<sup>1,3</sup>, YU Jia-dong<sup>1,2,3</sup>

(1. Beijing National Research Center for Information Science and Technology (BNRist),  
Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Flexible Intelligent Optoelectronic Device and Technology Center,  
Institute of Flexible Electronics Technology of THU, Jiaxing 314006, China;

3. Center for Flexible Electronics Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

\* Corresponding author, E-mail: lihongtao@tsinghua.edu.cn

收稿日期:2020-03-13;修订日期:2020-04-03.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61875104, No. 61975093, No. 61927811, No. 61822404, No. 61974080, No. 61904093);国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2015CB351900);国家重点研发计划资助项目(No. 2016YFB0400903, No. 2018YFB2201701);清华大学自主科研计划资助项目(No. 20193080036);北京信息科学与技术国家研究中心重点实验室资助项目(No. BNR2019ZS01005);中国博士后科学基金项目(No. 2018M640129, No. 2019T120090)

**Abstract:** For the infrared band near 1 550 nm, a transmissive beam deflector based on a dielectric metasurface is proposed. This deflector can achieve a large deflection angle together with a broadband spectrum and high efficiency. The structural design of the deflector is optimized according to the generalized Snell's law. It comprises amorphous silicon nanopillars with trapezoidal cross sections that are arranged periodically on a quartz glass substrate. The continuous phase gradient formed by the unique trapezoidal nanopillars in the proposed structure provides superior deflection characteristics compared with those provided by the discrete phase gradient formed by the discrete nanopillars utilized in traditional metasurfaces. The performance of the proposed device is simulated and analyzed with respect to efficiency, deflection angle, wavelength dependence, and incident angle dependence using the finite-difference time-domain method. The performance of this device is tested after its fabrication via processes such as electron beam lithography. The simulations indicate that this deflector realizes a deflection angle as large as  $42.8^\circ$  at 1 550 nm, as well as a transmissivity of 84%, a deflection efficiency of 80%, and an allowance of incident angle between  $-10^\circ$  and  $5^\circ$ . Moreover, the deflector exhibits impressive deflection characteristics for wavelengths ranging from 1 350—1 650 nm, with an average transmissivity exceeding 87% and an average deflection efficiency of 81%. Experimental test results show that, at the wavelength of 1 550 nm, the beam deflection angle is nearly  $41^\circ$ , the device transmissivity is approximately 76%, and approximately 35% of the incident light is deflected to the target angle. The proposed device represents a new approach for the design of near-infrared metasurface devices and has application potential in numerous fields.

**Key words:** near-infrared; broadband and large deflection angle; beam deflector; dielectric metasurface; trapezoidal nanopillars

## 1 引 言

超表面是基于波长或者亚波长量级二维结构(如纳米柱阵列)的超薄平面光学元件,它利用亚波长结构引入相位、振幅及偏振跳变,每个亚波长结构相当于一个新的子波源,根据惠更斯原理,通过控制各个子波源的相位、振幅和偏振来实现特定的光学功能<sup>[1-5]</sup>。这样的特性使它在高效率、微型化、柔性化以及突破传统器件性能限制等方面具备独特优势,能为包括激光光束控制和整形、理想透镜成像、高性能 3D 显示在内的众多应用提供有效手段。基于超表面的理想透镜(接近或超越衍射极限)、全息光栅、光束偏转器、光耦合器、波片、准直器、涡旋光产生器等光学器件相继问世<sup>[6-15]</sup>,光学超表面已成为光学和光电子领域的研究热点之一,为新型高效率光学器件的微型化、集成化提供了新的思路。

光束偏转器作为一种最基础的光学器件,能够对入射光进行一定角度的偏折,是激光雷达探测等应用领域的核心部件。光在超表面处的折射

和反射满足广义斯涅尔定律,即:在两个折射率不同的材料交界面处,出射光的偏转角度不仅受到材料折射率和入射角度的影响,还与超表面引入的相位跳变梯度有关<sup>[2]</sup>。因此,要实现给定角度的光束偏转,就需要引入特定的相位跳变梯度,传统超表面一般采用一组尺寸或旋向各异的亚波长结构等间距地离散排列在一起。本文以“纳米柱”为例,每个纳米柱单元形成特定的相位跳变,相位跳变的大小为等差序列,从而整体上形成  $0\sim 2\pi$  的相位梯度。

然而,基于离散纳米柱阵列实现的光束偏转器面临以下问题:一方面,离散纳米柱对应的离散相位是阶梯状的  $0\sim 2\pi$  采样,不连续的相位梯度会造成能量损失、偏转效果扰动和高级次衍射;另一方面,离散纳米柱不易加工、鲁棒性差,较难实现大角度的光束偏转(大角度偏转需要大的相位梯度,离散纳米柱的尺寸存在最小极限,相邻纳米柱间存在空隙,采样率不变的情况下,相位梯度难以扩大),而且因为每个纳米柱的相位跳变是根据电磁共振原理设计,结构一旦确定,适用波长范围较窄。目前,传统超表面光束偏转器大多针对单

一波长设计,在近红外波段宽谱效率高于 80% 的透射式器件的偏转角度小于  $35^\circ$ <sup>[16-19]</sup>。

为了解决上述问题,人们设计出大偏转角、宽光谱、高效率的光束偏转器。2014 年, Li 等人提出了一种连续超表面的结构,由一个横截面为梯形的纳米柱替代传统超表面中多个离散纳米柱构成的阵列,实现了  $0 \sim 2\pi$  的连续相位梯度,在 850 nm 的入射光照射下,偏转角度为  $45^\circ$ ,仿真偏转率高于 80%。这种结构已成功应用于光谱仪、分束器等领域,但是他们采用的金属等离子体材料和反射式光路限制了它在近红外和可见光波段的运用和集成<sup>[20-22]</sup>。2018 年,刘洋等人延续“连续超表面”的概念仿真设计了一种适用于红色可见光波段的单晶硅超表面光束偏转器,该偏转器在 740~780 nm 波段具备高于 70% 的仿真透射率,751 nm 处的仿真偏转率接近 79%,偏转角为  $30^\circ$ ,但是由于工艺难度大未能制备出器件进行测试<sup>[23]</sup>。

本文针对近红外 1 550 nm 附近波段,以石英玻璃为衬底、非晶硅作为亚波长结构材料,设计了一种透射式、宽谱、大偏转角光束偏转器,降低了反射式光路,高阶衍射,耦合串扰以及工艺难度的限制,在 1 550 nm 处实现了高达  $42.8^\circ$  的大角度偏转,仿真偏转率为 80%;光束入射角在  $-10^\circ \sim 5^\circ$  变化时,偏转角度符合广义斯涅尔定律,偏转率为 68%~84%。该器件在 1 350~1 650 nm 波段均可适用,仿真得到的平均透射率高于 87%,平均偏转率为 81%。

## 2 光束偏转器设计

如图 1 所示,传统超表面采用多个离散的小尺寸纳米柱等间距排列在一起构成纳米柱阵列,通过改变各个纳米柱的尺寸或旋向实现特定的相位跳变,从而形成图中  $0 \sim 2\pi$  的离散梯度相位。根据广义斯涅尔定律有:

$$n_t \sin \theta_t - n_i \sin \theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi} \cdot \frac{d\varphi}{dx}. \quad (1)$$

当入射光垂直入射时,由于纳米柱阵列引入了相位梯度,出射光会发生对应角度的偏转,实现光束偏转功能。其中  $\theta_i$  为入射角,  $\theta_t$  为出射角,  $n_i, n_t$  为材料的折射率,  $\lambda_0$  是自由空间中光波长,  $\frac{d\varphi}{dx}$  是沿着交界面  $x$  轴方向的相位梯度。

本文设计的超表面光束偏转器利用一个横截面为梯形的大尺寸纳米柱,替换图 1 中传统超表面采用的多个离散的小尺寸纳米柱,在梯形高的方向上实现连续的  $0 \sim 2\pi$  梯度相位。根据广义斯涅尔定律实现光束偏转功能,具体的单元亚波长结构如图 2 所示。

利用椭偏仪测得石英玻璃的折射率在 1.4 附近,本文制备的非晶硅折射率在 3.6 附近,两者在所涉及的目标波段的吸收可以忽略,之后的仿真设计围绕该参数展开。

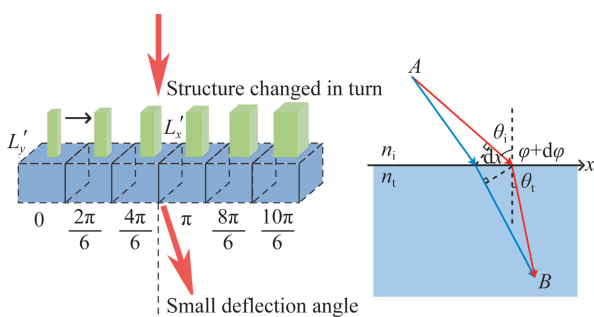


图 1 传统超表面基于广义斯涅尔定律的偏转器结构<sup>[2]</sup>  
Fig. 1 Structure of traditional metasurface beam deflector based on Snell's law<sup>[2]</sup>

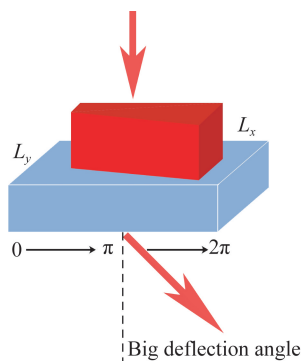


图 2 本文设计的超表面光束偏转器采用的单元  
Fig. 2 Unit cell of proposed metasurface beam deflector

为了使纳米柱的间距足够大以降低制备工艺的难度,同时保证高效率和大偏转角,单元结构的尺寸设置为  $P_x = 2\ 280\ \text{nm}$ ,  $P_y = 450\ \text{nm}$ 。根据广义斯涅尔定律可知,改变单元结构的长度周期  $P_x$  即可改变一个  $2\pi$  相位周期对应的距离,更小的  $P_x$  对应更大的  $\frac{d\varphi}{dx}$ ,即更大的偏转角度  $\theta_t$ 。经过理论分析和初步仿真计算,设定目标梯形纳米柱横截面的上底为 140 nm,下底为 345 nm,梯形高为

1 500 nm, 纳米柱厚度为 800 nm; 以此作为初始参数, 令上底和下底尺寸在 100~400 nm 变化, 梯形高的尺寸在 1 300~1 800 nm 变化; 利用时域有限差分算法 (Finite Difference Time Domain, FDTD) 进行建模仿真扫描, 在保证偏转角度大于  $40^\circ$  的前提下, 以高于 85% 的透射率和高于 80% 的偏转率为目标, 设计最终结构。优化后的结构如图 3 所示 (图中忽略了真实尺寸比例), 横截面为等腰梯形的非晶硅纳米柱连同其下的石英玻璃衬底构成单元结构 (详见虚线框); 在  $x$  和  $y$  轴方向上周期性排列单元结构构成本文设计的光束偏转器。最终得到的优化结构为: 梯形上底  $y_1 = 160$  nm, 下底  $y_2 = 310$  nm, 高  $h = 1 440$  nm; 纳米柱厚度为  $H = 800$  nm, 衬底厚 1 mm。

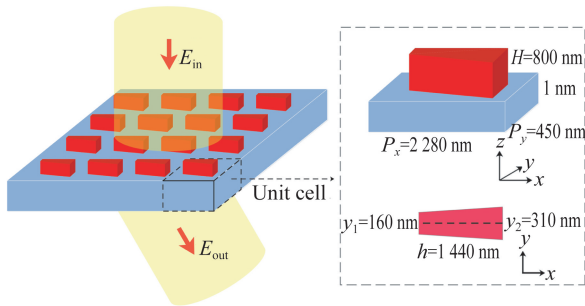


图 3 优化后的超表面光束偏转器结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of optimized beam deflector

### 3 宽谱、大偏转角光束偏转器的性能仿真

本文采用 FDTD 完成理论计算与 3D 仿真。器件的真实结构为 800 nm 高的纳米柱排列在 1 mm 厚的衬底上, 仿真时采用的仿真区域如下:  $z$  轴方向 (高度方向) 为纳米柱中心上方 10 个波长至纳米柱中心下方 20 个波长 (纳米柱的中心作为坐标原点);  $x$  轴方向和  $y$  轴方向的仿真区域尺寸分别为该方向的单元周期。仿真时在  $z$  轴方向设置了完美吸收层 (Perfectly Matched Layer, PML) 以隔绝反射和散射的影响, 在  $x$  和  $y$  轴方向上采用周期性边界条件以降低计算复杂度。通过设置垂直于  $z$  轴的平面监视器来获得衬底内部的光束偏转效果, 再根据折反射定律计算最终出射到空气中的偏转角度。入射光为正入射的

1 150~1 750 nm 线偏光, 偏振方向垂直于梯形横截面的高  $h$ , 平行于  $y$  轴。为了验证偏转效果, 本文仿真验证了器件的透射率、远场能量分布以及偏转率等参数。其中, 透射率等于出射光能量与入射光能量的比值, 偏转率等于偏转到目标角度的能量与入射光总能量的比值。

#### 3.1 透射与偏转特性

仿真发现, 梯形纳米柱在 1 350~1 650 nm 的线偏光照射下均具备良好的偏转特性。图 4 表示不同波长下器件的透射率和偏转率。由图可知, 1 550 nm 处器件的透射率和偏转率达到 84% 和 80%; 1 350~1 650 nm 间的效果略有起伏, 透射率和偏转率区间分别是 77.2%~94.9%, 67.7%~83.9%, 平均值高于 87% 和 81%。

本文在入射光源上方 3 000 nm、衬底下方 3 000 nm 以及衬底内部距离纳米柱阵列 2 000, 5 000 和 20 000 nm 的深度处设置了仿真监视面。结果显示: 1 550 nm 波长入射下, 14% 的光反向穿透入射光源上方的监视面, 而衬底中的光能随着传输仅下降了 1%, 由此证明超表面入射面处的反射是造成透射率较低的主要原因, 可以通过优化梯形尺寸、减少尖角、降低高度和设置增透膜等方式进行改善; 石英玻璃衬底的吸收损耗占据整个器件损耗的绝大部分, 但影响微乎其微。

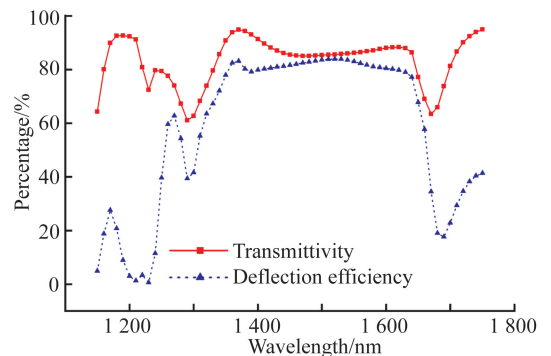


图 4 不同波长下器件的仿真透射率和偏转率

Fig. 4 Simulated transmittivity and deflection efficiency at different wavelengths

在 1 150~1 750 nm 波段, 本文均匀选择 61 个波长作为研究对象。通过仿真远场能量分布发现, 在 1 350~1 650 nm 波段, 远场分布显示出明显的光束偏转效果, 以 1 450, 1 550 和 1 650 nm

的结果为例(如图 5 所示)。出射光集中在目标偏转角度附近,无其他级次的光斑,图中的角度为衬底中的偏转角。随着波长的进一步增大或减小,远场分布逐渐失去光束偏转效果而呈现直接透射或多级次衍射的结果。

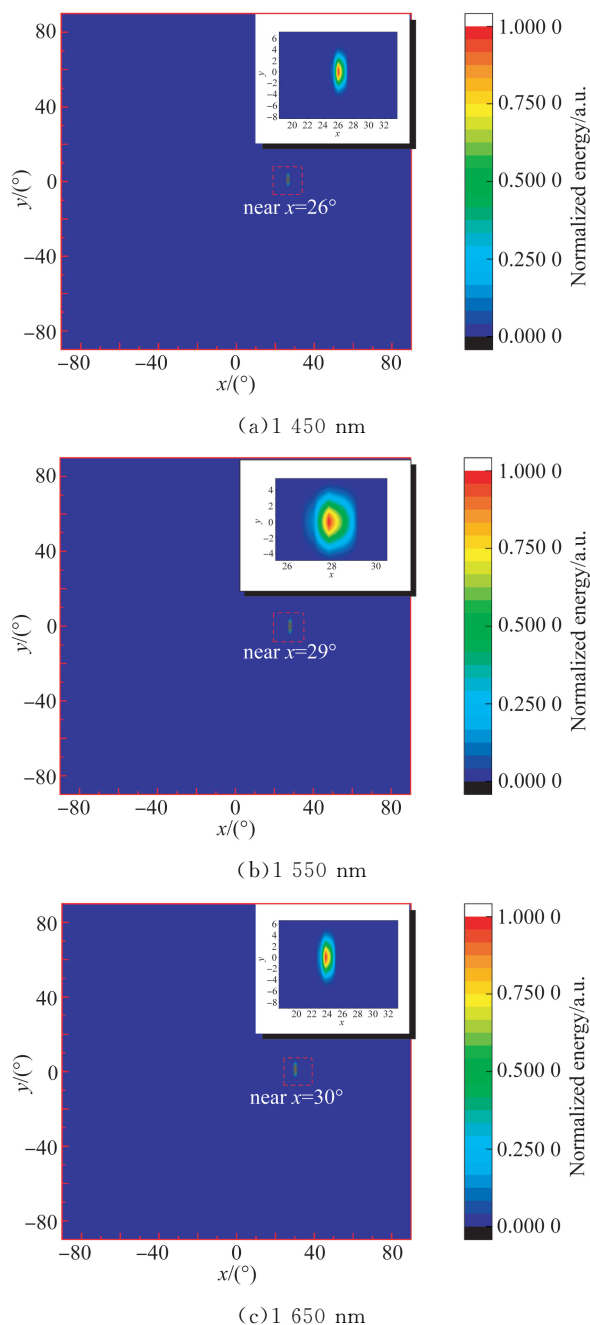


图 5 不同波长处出射光的远场能量分布(右上角为虚线框的放大示意图)

Fig. 5 Far-field energy distribution of outgoing light at different wavelengths(Insert is the enlargement of dotted square)

通过计算远场能量分布随着空间角度的变化,以  $x$  轴的空间角度为横坐标,对应角度上的能量占比为纵坐标,得到图 6。可以发现:对于 1550 nm 的入射光,大于 90% 的出射光集中在衬底中  $29.1^\circ$  附近(从衬底出射到空气后的最终偏转角为  $42.8^\circ$ ),其余角度的出射光可以忽略不记(其中次级最大峰占比为 1.46%)。这样的特性在 1350~1650 nm 得到了保持,偏转角度随波长的变化而变化,符合广义斯涅尔定律。

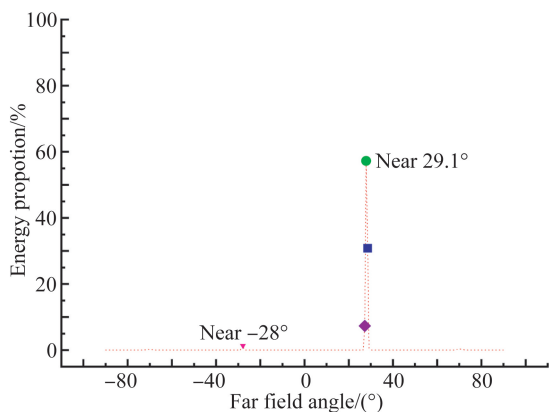
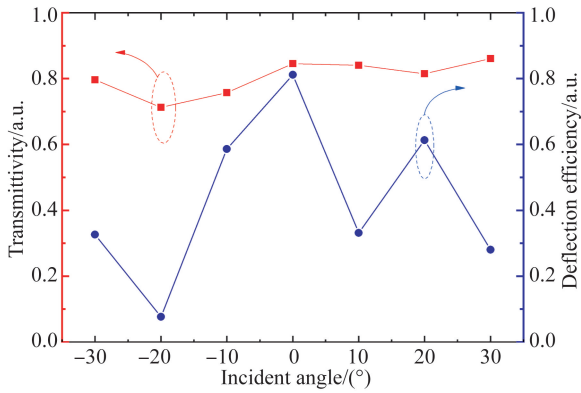


图 6 1550 nm 出射光在远场  $x$  轴方向不同角度的能量占比  
Fig. 6 Proportion of far field energy at different angles in  $x$ -axis at 1550 nm

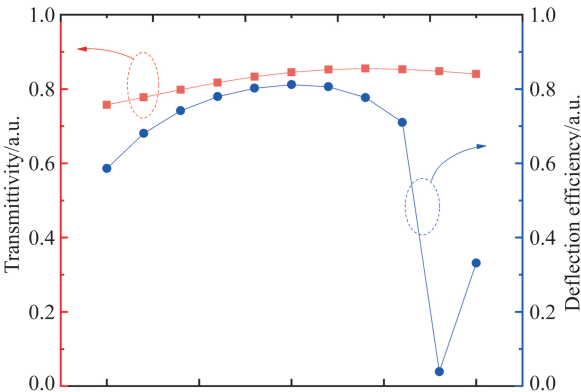
### 3.2 入射角度依赖性

评价光束偏转器的性能时,除了偏转率、透射率、偏转角和加工难度外,入射角度依赖性也是尤为重要的考量指标。它指的是在其他条件不变的情况下,当入射光入射角度改变时器件性能的变化情况。

为了研究器件的入射角度依赖性,本文在保持偏振、强度不变的情况下,令入射角沿着  $x$  轴方向以  $10^\circ$  的间隔从  $-30^\circ \sim 30^\circ$  变化(顺时针为正,逆时针为负),偏转率和透射率关于入射角度的变化曲线如图 7(a)所示。粗略估计可知,器件在  $-10^\circ \sim 10^\circ$  区间内能够保持较好的偏转效果;随着入射角的进一步增大,偏转效果逐渐恶化,偏转率骤降。随后本文对  $-10^\circ \sim 10^\circ$  的入射角进行精细扫描得到图 7(b),准确获得器件的有效入射角度为  $-10^\circ \sim 5^\circ$ ,透射率区间为 77%~86%,偏转率区间为 59%~81%。器件对负向角度入射具备更加优异的效果,表现在图 7 中曲线的不对称性上,这是由于纳米柱横截面梯形的不对称性造成的。



(a)粗略结果  
(a) Rough results



(b)精细结果  
(b) Elaborate results

图 7 入射角变化时的偏转效果

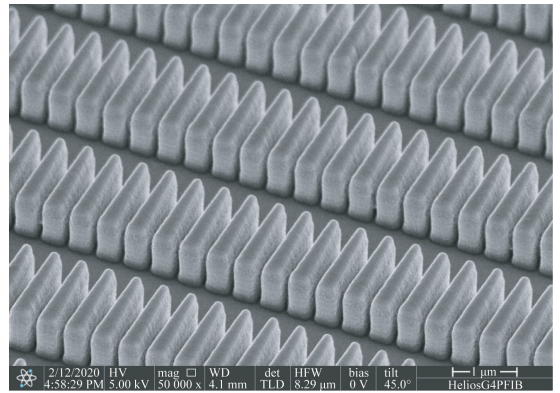
Fig. 7 Deflection characteristics at different incident angles

### 4 器件制备与测试

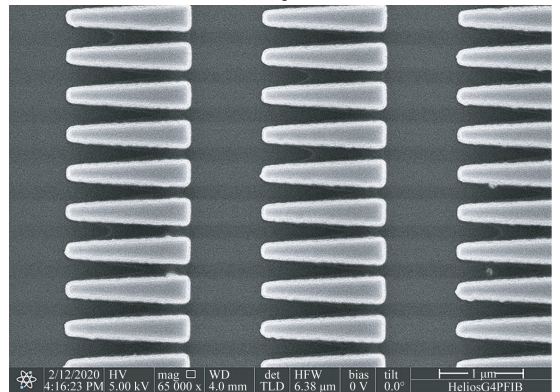
#### 4.1 介质超表面光束偏转器的制备

介质超表面光束偏转器由石英玻璃衬底和非晶硅纳米柱两部分组成,在 1 mm 厚的石英玻璃衬底上采用等离子体增强化学气相沉积法(PECVD)沉积 800 nm 厚的非晶硅,随后将厚度为 200 nm 的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)旋涂在其上,经电子束曝光(EBL, jbx-6300 fs, JEOL)、显影等步骤绘制目标图案,并经电感耦合等离子体(ICP, PlasmaPro 100 Cobra, Oxford)刻蚀等步骤最终在非晶硅上形成目标结构。

图 8 是最终制备出的器件的 SEM 图(扫描电子显微镜下的结构)。梯形纳米柱尺寸为:上底 172 nm(误差为 7.5%),下底 319 nm(误差为 2.9%),梯形高为 1 457 nm(误差为 1.1%),纳米柱厚度为 830 nm(误差为 3.7%),垂直度保持在±5°以内。



(a)斜视图  
(a) Oblique view



(b)俯视图  
(b) Top view

图 8 介质超表面光束偏转器的 SEM 图  
Fig. 8 SEM images of beam deflector based on dielectric metasurface

#### 4.2 测试平台与结果

测试光路如图 9 所示,1 550 nm 激光器(Thorlabs LDM1550)出射的准线偏光经过缩束器(Thorlabs GBE10-C)进行缩束及准直以匹配器件尺寸,通过波片(Thorlabs AQWP10M-980)和线偏振滤光片(Thorlabs LPIREA100-C)调节线偏光的偏振方向。利用荧光对准盘确定光斑的大小和位置后,调整入射光对准加持在 XYZ 位移调节台上的超表面器件。出射光照射在毛玻璃上,利用 CCD 相机(Xenics 4153)拍摄毛玻璃上的光斑分布。

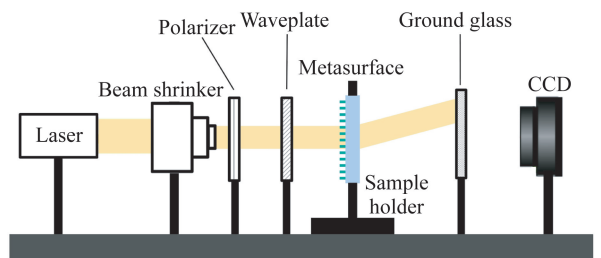


图 9 光束偏转测试平台光路

Fig. 9 Optical path of beam deflection test platform

测试结果如图10所示,对于1 550 nm的入射光,制备加工出的光束偏转器的实际偏转角度集中在 $41^\circ$ 附近,透射率为76%,偏转率为35%。与仿真结果对比发现,实际偏转角度与仿真结果的相对误差小于5%,器件透射率略小于仿真结果,测试得到的偏转率相对较低。偏转率的下降主要是由纳米柱的高度、垂度以及尺寸误差造成,纳米柱结构的偏移会影响相位调制的效果,实际相位与仿真相位之间的差异破坏了出射光的偏转特性;同时,PECVD沉积的非晶硅存在一定的不均匀性,在蚀刻过程中发生了脱落和倾倒,影响偏转效果;另一方面,实际入射光并非完全均匀准直的线偏光,造成偏转特性的降低。这些问题将在后续的研究中加以改进。

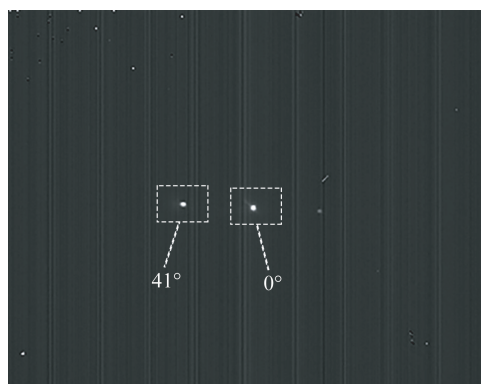


图10 CCD拍摄的出射光斑分布

Fig. 10 Distribution of outgoing light spot captured by CCD

## 参考文献:

- [1] KILDISHV A V, BOLTASSEVA A, SHALAEV V M. Planar photonics with metasurfaces [J]. *Science*, 2013, 339(6125): 1232009.
- [2] 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.
- [3] DECKER M, STAUDE I, FALKNER M, *et al.*. High-efficiency dielectric Huygens' surfaces [J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(6): 813-820.
- [4] YU N F, CAPASSO F. Flat optics with designer metasurfaces [J]. *Nature Materials*, 2014, 13(2): 139-150.
- [5] 李雄,马晓亮,罗先刚. 超表面相位调控原理及应用 [J]. *光电工程*, 2017, 44(3): 255-275.
- LI X, MA X L, LUO X G. Principles and applica-

## 5 结论

本文设计了一种基于介质超表面的宽谱、大偏转角光束偏转器,它由一个横截面为梯形的非晶硅纳米柱周期性重复排列在石英玻璃衬底上构成。相比于传统超表面采用多个纳米柱实现离散的相位梯度,本文提出的结构易于加工、入射角依赖性低,形成的连续相位梯度对应更好的偏转率和透射率,偏转角度也大于传统结构,并且具备一定的宽谱特性。仿真结果显示,在1 550 nm处,器件的透射率高达84%,偏转率为80%,偏转角度为 $42.8^\circ$ ,允许 $x$ 轴方向的入射角在 $-10^\circ \sim 5^\circ$ 变化,透射率为77%~86%,偏转率为59%~81%。该器件在1 350~1 650 nm均具备良好的偏转特性,仿真平均偏转率高于81%,偏转角度符合广义斯涅尔定律。测试结果表明:偏转角度在 $41^\circ$ 附近,与仿真结果的相对误差小于5%,超表面透射率高达76%,有接近35%的入射光束偏转到设定方向(角度)上。上述设计方案为近红外超表面的设计提出了新的思路,透射式光路更加适合集成,在偏振态探测、扫描式激光雷达和结构光等领域拥有应用潜力。

- tions of metasurfaces with phase modulation [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(3): 255-275. (in Chinese)
- [6] ARBABI E, ARBABI A, KAMALI S M, *et al.*. MEMS-tunable dielectric metasurface lens [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1-9.
- [7] 胡森,刘丹,杨河林. 基于全介质超表面的电磁诱导透明研究 [J]. *光子学报*, 2018, 47(11): 1116001-1116001.
- HU S, LIU D, YANG H L. Electromagnetic induced transparency based on all-dielectric metasurface [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(11): 1116001-1116001. (in Chinese)
- [8] DENG Z L, DENG J H, ZHUANG X, *et al.*. Dielectric metasurface for vectorial holography [J]. *Nano Letters*, 2018, 18(5): 2885-2892.
- [9] 邓学松,方明,任信钢,等. 基于陷模的全介质石墨烯超表面在超敏生物检测中的应用 [J]. *光子学*

- 报, 2019, 48(12): 1248005-1248005.
- DENG X S, FANG M, REN X G, *et al.*. Ultra-sensitive bio-sensor based on trapped mode all-dielectric metasurface coating with graphene layer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(12): 1248005-1248005. (in Chinese)
- [10] ZHANG J M, YANG L, LI L P, *et al.*. High-efficiency polarization conversion phase gradient metasurface for wideband anomalous reflection [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122(1): 014501.
- [11] ZHAO Y, ALÙ A. Tailoring the dispersion of plasmonic nanorods to realize broadband optical meta-waveplates [J]. *Nano Letters*, 2013, 13(3): 1086-1091.
- [12] LIU S, VABISHCHEVICH P P, VASKIN A, *et al.*. An all-dielectric metasurface as a broadband optical frequency mixer [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1-6.
- [13] CHEN Y, GAO J, YANG X D. Direction-controlled bifunctional metasurface polarizers [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(12): 1800198.
- [14] 罗奕, 梁中翥, 孟德佳, 等. 混合谐振模式宽带长波红外超表面吸收器研究 [J]. *中国光学*, 2020, 13(1): 131-139.
- LUO Y, LIANG ZH ZH, MENG D J, *et al.*. Study on long wavelength infrared broadband metasurface absorber via hybrid resonant mode [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(1): 131-139. (in Chinese)
- [15] 余晓畅, 赵建村, 虞益挺. 像素级光学滤波—探测集成器件的研究进展 [J]. *光学精密工程*, 2019, 27(5): 999-1012.
- YU X CH, ZHAO J C, YU Y T. Research progresses of pixel-level integrated devices for spectral imaging [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(5): 999-1012. (in Chinese)
- [16] GENEVET P, CAPASSO F, AIETA F, *et al.*. Recent advances in planar optics: from plasmonic to dielectric metasurfaces [J]. *Optica*, 2017, 4(1): 139-152.
- [17] EGOROV V, EITAN M, SCHEUER J. Genetically optimized all-dielectric metasurfaces [J]. *Optics Express*, 2017, 25(3): 2583-2593.
- [18] AIETA F, KATS M A, GENEVET P, *et al.*. Multiwavelength achromatic metasurfaces by dispersive phase compensation [J]. *Science*, 2015, 347(6228): 1342-1345.
- [19] ARBABI A, HORIE Y, BAGHERI M, *et al.*. Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(11): 937-943.
- [20] LI Z W, HUANG L R, LU K, *et al.*. Continuous metasurface for high-performance anomalous reflection [J]. *Applied Physics Express*, 2014, 7(11): 112001.
- [21] LI Z Y, PALACIOS E, BUTUN S, *et al.*. Visible-frequency metasurfaces for broadband anomalous reflection and high-efficiency spectrum splitting [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(3): 1615-1621.
- [22] LI Z Y, PALACIOS E, BUTUN S, *et al.*. Ultra-wide angle, directional spectrum splitting with visible-frequency versatile metasurfaces [J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, 4(6): 953-958.
- [23] YANG L, WU D, LIU Y, *et al.*. High-efficiency all-dielectric transmission metasurface for linearly polarized light in the visible region [J]. *Photonics Research*, 2018, 6(6): 517-524.

## 作者简介:



程宏(1995—),男,河南信阳人,硕士研究生,2017年于西南交通大学获得学士学位,主要从事超表面微纳光学结构的设计研究。E-mail: chengh17@mails. tsinghua. edu. cn

## 通讯作者:



李洪涛(1981—),男,山东滨州人,博士,副研究员,2003年于山东大学获得学士学位,2008年于清华大学获得博士学位,主要从事新型光学和光电子器件的研究。E-mail: lihongtao@tsinghua.edu