

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202501008

基于超表面的全介质透射式偏振转换器设计

张志利, 邓朝中, 张明娣, 王晓伟, 张 慧
(火箭军工程大学, 陕西 西安 710025)

摘 要: 针对超表面的光偏振转换器件能量损耗大和结构复杂等问题, 设计了一种基于超表面的全介质单层透射式偏振转换器件, 该偏振转换器由二氧化硅基底和基底上方的周期性硅纳米手性结构阵列组成, 并对器件进行了仿真计算。结果表明: 该器件因是单层结构, 制备难度低; 在有效带宽 3 930~4 180 nm 内, 可以将入射的 y 线偏振光转换为左旋圆偏振光, 总透射率最低为 0.80, 最高可达 0.98, 具有高效性; 该偏振转换现象是由于结构层隙间产生反平行电流共振所致, 在透射率高的波长处, 相邻单元结构的电场具有相近的值; 设计的器件在入射角小于 15° 时具有较好的鲁棒性。

关键词: 超表面; 透射式; 手性结构; 偏振转换

中图分类号: O436.3

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2025)01-067-09

Metasurface-based All-dielectric Transmission Polarization Converter

ZHANG Zhili, DENG Chaozhong, ZHANG Mingdi,
WANG Xiaowei, ZHANG Hui
(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

ABSTRACT: To address the problems of large energy loss and complex structure of metasurface polarization conversion devices, an all-dielectric single-layer transmission polarization converter based on a metasurface was designed. The polarization converter consists of a silicon dioxide substrate and a periodic array of silicon nanochiral structures over the substrate. Simulation calculations showed that preparation of the converter is easy because of its single-layer structure. Within the effective bandwidth range of 3 930~4 180 nm, the incident y -linearly polarized light can be converted into left-handed circularly polarized light, with a total transmittance of 0.80 and a maximum of 0.98, demonstrating high efficiency. Polarization conversion is caused by the antiparallel current resonance between the structural gaps. The electric fields of adjacent unit structures have similar values at wavelengths with high transmittance. Additionally, the designed device exhibited good robustness when the angle of incidence is less than 15° .

KEYWORDS: metasurface; transmission; chiral structure; polarization conversion

收稿日期: 2024-07-15

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目 (2023-JC-QN-0089)

第一作者: 张志利 (1966—), 男, 教授, 主要从事智能感知与导航技术研究。E-mail: 157918018@qq.com

引用格式: 张志利, 邓朝中, 张明娣, 等. 基于超表面的全介质透射式偏振转换器设计[J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39 (1): 67-75. ZHANG Zhili, DENG Chaozhong, ZHANG Mingdi, et al. Metasurface-based all-dielectric transmission polarization converter[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2025, 39 (1): 67-75.

超表面是一种周期排列的人造电磁结构，由于其具有不同于自然界存在的传统光学材料的电磁特性而受到科研人员的广泛关注。超表面的光学性质不仅取决于其组成材料，也取决于其几何结构，它可以在亚波长尺寸上对光场的偏振态、振幅以及相位等多个维度进行有效调控，进而出现一系列性能可以媲美甚至超过传统光学元件的微纳光学器件，如超透镜^[1-3]、光学全息超表面^[4-6]、偏振器件^[7-8]和波片^[9-11]等。

2015 年，Ding 等^[12]在近红外波段范围内设计、制造并实验验证了一个超薄的宽带半波片。仿真及实验结果表明，使用该半波片的偏振转换器工作带宽可达 800 nm，线性偏振转换效率大于 0.97，反射率大于 0.90。但其顶部金结构阵列的引入，可能会吸收一部分入射的电磁波，造成能量损耗。此外，加工工艺也可能会消耗额外的能源和资源。介质材料相对于金属材料具有更低的损耗、更轻量化和更低的制备成本。2019 年，Basiri 等^[13]利用介质设计了一个多层式可选择性透射的偏振调控器件。该器件包含 Si 柱、介质层和光栅三层结构，其中 Si 柱可实现四分之一波片功能，光栅主要作用是选择性透过线偏振光。通过对器件的调节，可使圆偏振光转换为线偏振光，并根据光栅方向，选择性透过与光栅相垂直的线偏振光，但设计的结构较为复杂，属于多层式结构。2022 年，刘靖宇等^[14]设计了一种基于“V”形单元结构阵列的太赫兹波段宽带透射式偏振转换器，该偏振转换器由光栅-V 形超表面-光栅组成，实现了将 x 偏振入射的太赫兹波转换为 y 偏振透射的太赫兹波，但同样结构较为复杂，属于多层式结构。2024 年，邓嘉豪等^[15]提出了一种基于体 Dirac 半金属的动态超材料结构极化转换器，通过调控电压改变费米能级以实现线偏振转换。但同样，金属结构的引入会造成一定的能量损耗。

基于上述偏振转换器件面临的能量损耗和结构较为复杂等问题，本文设计了一种基于超表面全介质单层透射式偏振转换器件，并从结构、结构参数、仿真结果、物理机理 4 方面阐述了器件的设计成果。

1 器件的结构设计与理论分析

如图 1 所示，该器件由 SiO_2 基底和高度为 h 的周期性 Si 纳米手性结构阵列组成，结构单元由一

个矩形纳米棒和 2 个关于结构中心对称的三角形纳米棒构成，其中 2 个三角形纳米棒的几何尺寸完全相同。定义结构单元矩形长为 l_1 、宽为 l_2 ，三角形下底宽为 W 。 ΔW 定义为上方三角形上顶点与三角形左侧下顶点横坐标之差（以结构中心为原点，上顶点横坐标减去左下顶点横坐标），图中标注的 ΔW 为正值。 ΔX 定义为上方三角形下底中心点与单元中心点的横坐标之差（上方三角形的下底中心点横坐标减去单元中心横坐标），图中标注的 ΔX 为正值。中间矩形的中心与单元中心重合，结构单元在 x 轴方向上的周期为 P_x ，在 y 轴方向上的周期为 P_y ，且结构具有以 z 轴为旋转轴的二重旋转对称性。

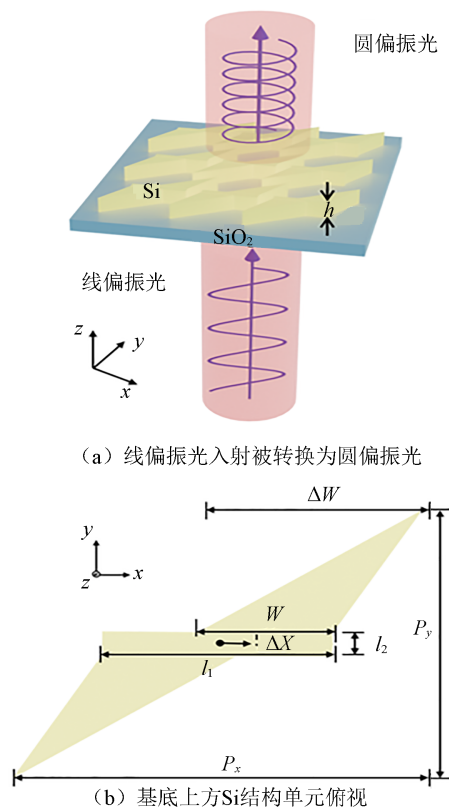


图 1 透射式偏振转换器示意
Fig. 1 Schematic of a transmission polarization converter

众所周知，沿 z 轴正方向入射的线偏振光可以表示为

$$\mathbf{E}_i(\mathbf{r}, t) = \begin{bmatrix} I_x \\ I_y \end{bmatrix} \exp(\varphi(kz - \omega t))$$

式中： ω 为频率； $\mathbf{k}$ 为波矢量； I_x 和 I_y 分别为入射光在 x 轴和 y 轴上的电场复振幅； E_i 为入射场的电场强度； $\mathbf{r}$ 为空间中的位置矢量； t 为时间； φ 为相

位差; z 为光波传播方向。则透射场可以表示为

$$\mathbf{E}_t(\mathbf{r}, t) = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix} \exp(\varphi(\mathbf{kz} - \omega t))$$

式中: $\mathbf{E}_t$ 为透射场的电场强度; T_x 和 T_y 分别为透射场 x 轴和 y 轴的复振幅。透射电场也可以用琼斯矩阵 $\mathbf{T}$ 表示为

$$\mathbf{E}_t(\mathbf{r}, t) = \mathbf{T} \cdot \mathbf{E}_i(\mathbf{r}, t) = \begin{bmatrix} T_{xx} & T_{xy} \\ T_{yx} & T_{yy} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_x \\ I_y \end{bmatrix} \exp(\varphi(\mathbf{kz} - \omega t))$$

式中: $\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_{xx} & T_{xy} \\ T_{yx} & T_{yy} \end{bmatrix}$, T_{xx} 、 T_{yy} 和 T_{xy} 、 T_{yx} 分别表示相同偏振态和正交偏振态下透射场的复振幅。

为了获得一个完美的线偏振到圆偏振的转换器件, 应满足如下条件:

$$\begin{cases} |T_{xx}| = |T_{yy}| = 1 \\ |T_{xy}| = |T_{yx}| = 0 \\ \delta_{xy} = n\pi/2, \delta_{xy} = \varphi_{xx} - \varphi_{yy} \end{cases} \quad (1)$$

式中: n 为奇数; $\varphi_{xx} = \arg(T_{xx})$ 和 $\varphi_{yy} = \arg(T_{yy})$ 表示与入射光相同偏振态的透射光的相位差。

上述分析是器件设计的理论基础。

2 器件结构参数分析

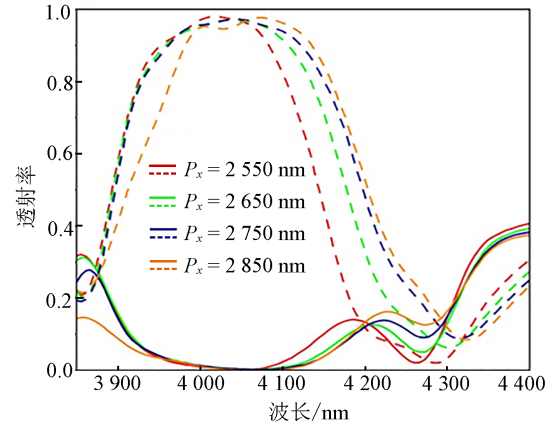
采用基于时域有限差分算法的商用软件 FDTD Solutions 2020 计算并分析偏振转换器件的透射特性。在全波数值仿真计算中, 建立了结构单元三维模型, 在 x 与 y 方向上均采用周期性边界条件, 光传播方向上的边界条件被设置为完美匹配层。仿真试验中, 将光源设置为从 SiO_2 基底入射的平面波, SiO_2 与 Si 的折射率均采用 Palik 的实验数据^[16]。

2.1 结构单元周期对器件性能的影响

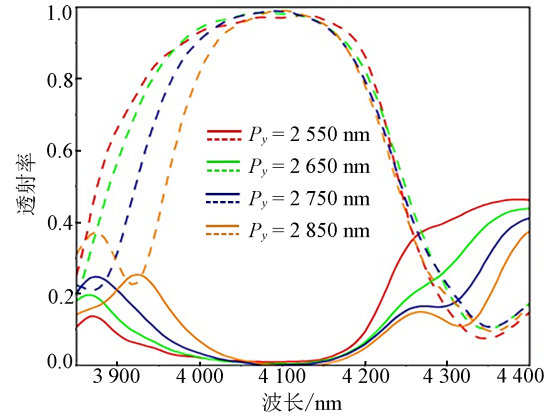
结构单元在 x 、 y 方向上的周期 P_x 、 P_y 对器件透射性能的影响如图 2 所示。在讨论 P_x 的影响过程中, 根据先前实验仿真数据及实践经验, 将几何结构参数设置为: $P_y = 2750 \text{ nm}$ 、 $h = 2700 \text{ nm}$ 、 $W = 1000 \text{ nm}$ 、 $l_1 = 1800 \text{ nm}$ 、 $l_2 = 200 \text{ nm}$ 、 $\Delta W = 1500 \text{ nm}$ 、 $\Delta X = 400 \text{ nm}$ 。在讨论 P_y 的影响过程中, P_x 固定为 2750 nm , 其余参数不变。

由图 2 可以看出, 由于该结构不具备以 z 轴为旋转轴的四重旋转对称性, 因此, x 与 y 方向上周期的变化会对圆偏振光的透射率产生影响。对于

P_x , 器件在 $3930 \sim 4180 \text{ nm}$ 波段出射的左旋圆偏振光透射率在 $P_x = 2550 \text{ nm}$ 时取得最大值; 对于 P_y , 左旋圆偏振光透射率在 $P_y = 2850 \text{ nm}$ 时取得最大值。通过区分 x 方向和 y 方向上的周期, 可以在超表面中引入各向异性特性, 从而可以根据应用需求调整超表面的光学性能, 实现更灵活的调控。因此, 在设计此类不具备四重对称性的超表面时, 为获取最佳的性能, 可对 P_x 、 P_y 加以区分。



(a) 随 P_x 的变化



(b) 随 P_y 的变化

图 2 y 线偏振光入射时, 圆偏振光透射率随结构单元 x 、 y 方向上周期的变化 (实线为右旋圆偏振光, 虚线为左旋圆偏振光)

Fig. 2 Variations of circularly polarized light transmissivity with the period in the x and y directions of the structural unit when the y -linearly polarized light is incident (solid line represents right-handed circularly polarized light and the dashed line represents left-handed circularly polarized light)

2.2 几何结构参数对器件透射性能的影响

图 3 (a) 为结构单元高度 h 对器件透射性能的影响。讨论过程中, 除结构单元高度 h 变化之外, 其余参数均保持不变, 参数设置同 2.1 节。可

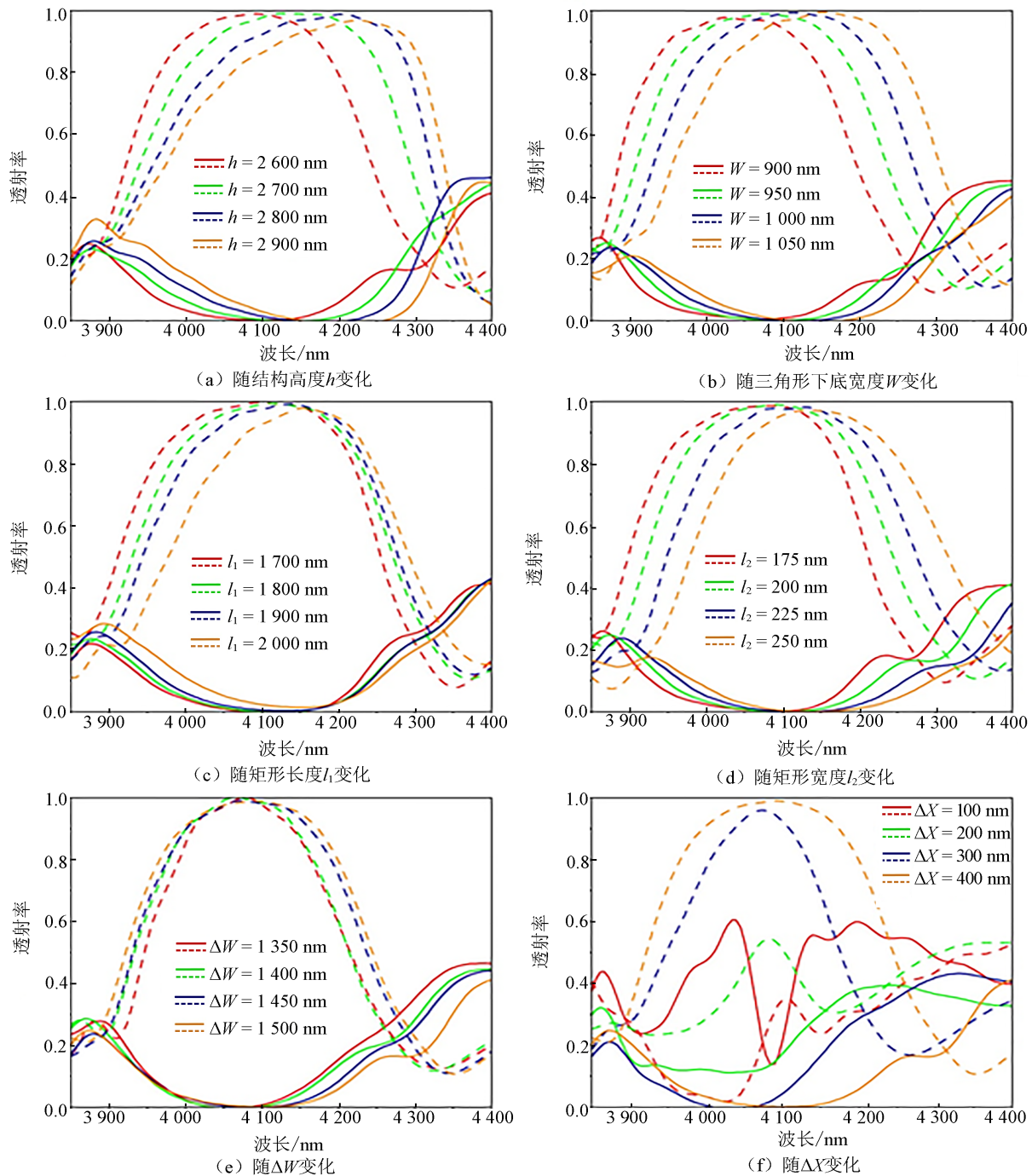


图 3 左、右旋圆偏振光透射率随结构几何参数的变化 (实线为右旋圆偏振光, 虚线为左旋圆偏振光)

Fig. 3 Variations of left- and right-handed circularly polarized light transmissivity with geometric parameters of the structure (solid line represents right-handed circularly polarized light and dashed line represents left-handed circularly polarized light)

以看出, 随着高度 h 的增加, 在 3850~4300 nm 波段, 左旋圆偏振光的透射率先增大后降低, 而右旋圆偏振光的透射率先降低后增大。当 $h = 2700$ nm 时, 左旋圆偏振光透射率高达 0.98, 表明此时该器件的左旋圆偏振光透射性能最好。

图 3 (b) 为三角形下底宽度 W 对器件透射性

能的影响。在讨论过程中, 除三角形下底宽度 W 之外, 其余参数设置与 2.1 节相同。可以看出, 随着 W 的增加, 在波长 3850~4300 nm 之间, 左旋圆偏振光透射率先增高后降低, 而右旋圆偏振光透射率先降低后增高。在 $W = 1050$ nm 时, 左旋圆偏振光透射率达到 0.98, 表明此时该器件的左旋

圆偏振光透射性能最好。

图 3 (c) 为矩形长 l_1 对器件透射性能的影响。除矩形长度 l_1 之外, 其余参数设置同 2.1 节。可以看出, 在 3 850~4 300 nm 波段内, 随着 l_1 的增加, 左旋圆偏振光的透射率先增高后降低, 在 4 200~4 300 nm 波段下降明显, 而右旋圆偏振光透射率在 3 850~4 300 nm 波段内先升高再降低, 后又继续增高。当 $l_1 = 1 800$ nm 时, 器件的左旋圆偏振光透射性能最好。

图 3 (d) 为矩形宽 l_2 对器件透射性能的影响。除矩形宽度 l_2 之外, 其余参数设置同 2.1 节。可以看出, 在 3 850~4 300 nm 波段内, 左旋圆偏振光的透射率先增加后减小, 而右旋圆偏振光透射率先增大后减小, 然后在波长 4 100 nm 之后又逐渐增大。当 $l_2 = 200$ nm 时, 器件的左旋圆偏振光透射性能最好。

图 3 (e) 为 ΔW 对器件透射性能的影响。在讨论过程中, 除 ΔW 之外的其他参数设置同 2.1 节。可以看出, 当 ΔW 从 1 350 nm 增加至 1 500 nm 时, 在 3 850~4 300 nm 波段内, 左旋圆偏振光透射率先迅速升高至接近于 1 再迅速下降, 而右旋圆偏振光先逐渐升高再迅速降低, 最后又逐渐升高。当 $\Delta W = 1 400$ nm 时, 器件的左旋圆偏振光透射性能最好。

图 3 (f) 为 2 个三角形在 x 方向上的相对位置对器件透射性能的影响。在讨论过程中, 除 ΔX 之外的其他参数设置与 2.1 节相同。可以看出, 当 ΔX 为 100 nm 和 200 nm 时, 左、右旋圆偏振光透射率相差不大, 其透射性能区分不佳; 当 ΔX 为 300 nm 和 400 nm 时, 左旋圆偏振光透射率迅速增高, 而右旋圆偏振光透射率迅速降低。由此可得, 2 个三角形在 x 轴方向上的错位, 是所设计的平面手性结构^[17]的几何手性的主要来源。

从图 3 可以看到, 随着几何结构参数的变化, 透射率曲线向着长波方向移动。这是因为: 当调节器件的几何结构参数时, 会改变布里渊散射^[18]的效率, 从而影响透射率的频率依赖性, 使其向长波方向移动。从图 3 (f) 中可以看出, 结构表现出的几何手性特征对其手性光学响应起到决定性作用。但在数学上很难定量地描述某一图形或结构所具有的手性值。在设计过程中, 应该首先明确对结构的几何手性特征起决定性作用的参量, 接着找到该参量的较优值, 最后通过调节其他参量 (或增加可变的结构参数) 进一步优化设计结构。

3 基底对器件透射性能的影响

SiO₂ 是红外波段常见的透明基底材料, 具有物理化学性质稳定、造价低廉、易于获取等优点, 故选取 SiO₂ 作为器件的基底材料。

3.1 有、无基底对器件透射性能的影响

讨论过程中, 二维手性结构的几何参数为: $P_x = 2 750$ nm、 $P_y = 2 750$ nm、 $h = 2 500$ nm、 $W = 1 000$ nm、 $l_1 = 1 800$ nm、 $l_2 = 200$ nm、 $\Delta W = 1 500$ nm、 $\Delta X = 400$ nm。有无基底对器件透射率的影响如图 4 所示。

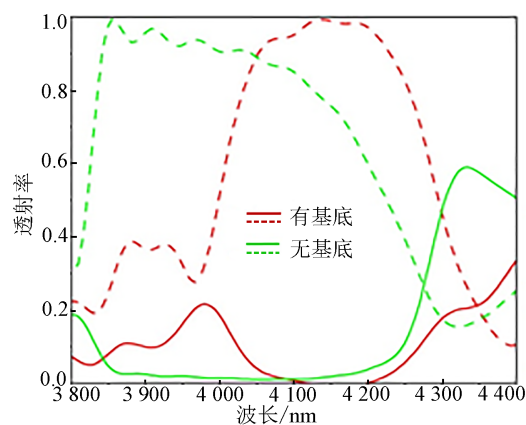


图 4 有无基底对器件透射性能的影响 (实线为右旋圆偏振光, 虚线为左旋圆偏振光)

Fig. 4 Influence of substrate on transmission performance of the device (solid line represents right-handed circularly polarized light and dashed line represents left-handed circularly polarized light)

可以看出, 即使没有基底的情况下, 在 3 850~4 300 nm 波段, 左旋圆偏振光与右旋圆偏振光的透射率仍有巨大的差异, 左旋圆偏振光透射率先急剧增高后逐渐降低, 而右旋圆偏振光透射率一直处于较低水平。这表明所提出的二维手性超表面所具有的巨大光学手性效应来自于高折射率的 Si 手性结构, 这与由结构基底引起的非对称传输效应^[19]有着根本的区别。对比有、无 SiO₂ 基底的情况可以发现, SiO₂ 基底的引入, 使得左、右旋圆偏振光的中心波长向着长波方向移动, 改变了器件整体在 z 方向的镜面对称性, 进一步提高了器件透射的性能。

3.2 基底折射率对器件透射性能的影响

基底折射率对器件透射率的影响如图 5 所示, 参数设置同上节。

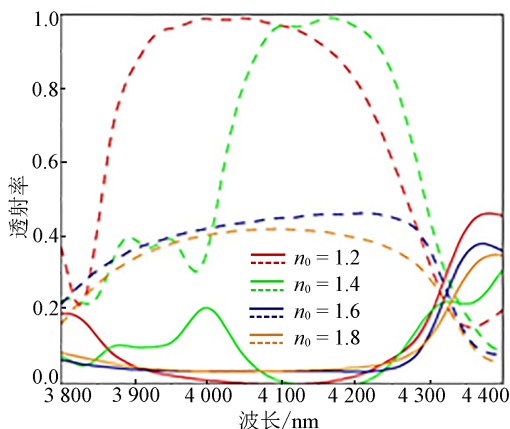


图 5 基底折射率对器件透射性能的影响 (实线为右旋圆偏振光, 虚线为左旋圆偏振光)

Fig. 5 Influence of substrate refractive index on transmission performance of the device (solid line represents right-handed circularly polarized light and dashed line represents left-handed circularly polarized light)

可以看出, 在 3850~4300 nm 波段, 当基底的折射率 $n_0 = 1.2$ 时, 左旋圆偏振光透射率与右旋圆偏振光透射率有着明显的差别, 左旋圆偏振光透射率最高可达 0.98, 而右旋圆偏振光的透射率始终低于 0.2; 当基底的折射率增大到 $n_0 = 1.6$ 时, 左旋圆偏振光透射率迅速降低, 而右旋圆偏振光透射率基本都保持着较低的水平。其主要原因在于: 当结构的周期不变时, 增大基底的折射率, 波长较短的反射光会发生多级衍射现象^[20]。随着反射光中多级衍射光的出现, 增高了反射率, 消散了光的能量, 导致左旋圆偏振光透射率显著降低。而对于右旋圆偏振光, 该手性超表面自身就起到高反射的效果, 反射光中多级衍射光的出现对总体反射率的影响较小, 导致右旋圆偏振光的反射率与透射率都不会有太多的变化。

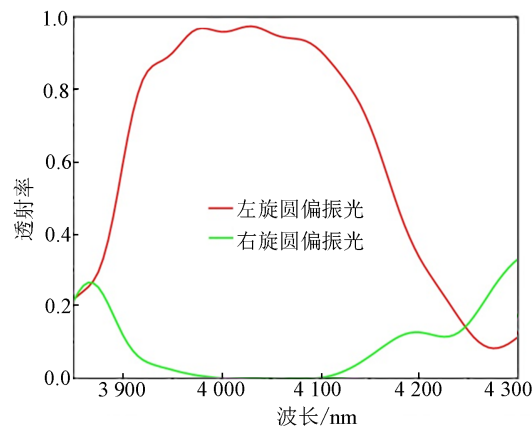
4 参数优化与结果分析

通过对结构几何参数的扫描可以明确结构的几何参数对器件工作性能的影响, 并得到一组较优的几何参数。为进一步提升器件的工作性能, 在此基础上, 采用了多参数优化的粒子群优化算法对结构参数进行优化。在 FDTD Solutions 2020 仿真软件中, 通过控制单一变量, 分别对结构单元中某一参数进行扫描, 得到各结构参数对器件透射性能的影响, 再根据仿真计算结果调整单元结

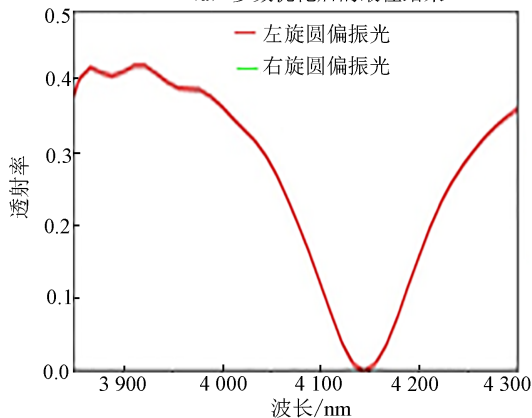
构参数, 最终完成高透射效率偏振转换器的设计。

如图 6 (a) 所示, 仿真计算了 y 线偏振光入射时, 经过参数优化器件后出射的左、右圆偏振光透射率结果。可以看到, 左、右旋圆偏振光透射率表现出了巨大差异。在 3930~4180 nm 波段, y 线偏振光与器件发生作用后, 左旋圆偏振光的透射率高于 0.9 的带宽更长, 且右旋圆偏振光的透射率低于 0.1, 表明入射的 y 线偏振光大部分被转换为左旋圆偏振光。

将结构单元中的三角形纳米棒换为矩形纳米棒, 结构单元的手性由上、下 2 个矩形在 x 方向上的相对位置 (即 ΔX) 决定。当 $\Delta X = 0$ nm 时, 两矩形上下对称, 结构整体不具备手性。进一步计算了非手性结构下左、右旋圆偏振光的透射率, 结果如图 6 (b) 所示。可以看出, 在全波段, 左、右旋圆偏振光的透射率相同。导致上述结果的原因在于: 非手性结构缺乏固有的不对称性, 使得其无法选择性地改变偏振状态。



(a) 参数优化后的最佳结果



(b) 非手性结构

图 6 y 线偏振光入射, 左、右旋圆偏振光的透射率

Fig. 6 Transmissivities of left and right-handed circularly polarized light when the y -linearly polarized light is incident

为了更好地说明器件的带宽效应以及透射性能, 仿真计算了 y 线偏振光入射时, 出射的左旋圆偏振光随波长、线偏振角度变化的透射率, 如图 7 所示。出射的右旋圆偏振光透射率始终处于较低水平, 故在此不再讨论。

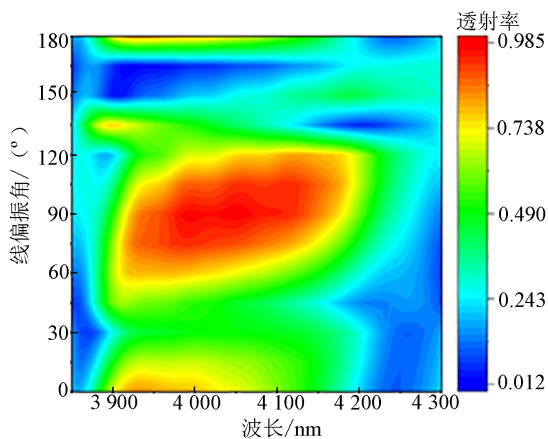


图 7 不同线偏振角度对器件透射性能的影响

Fig. 7 Influence of different linear polarization angles on the transmission performance of the device

可以看出, 在 3930~4180 nm 波段, 当入射的线偏振角为 0° (即 x 线偏振光入射) 时, 左旋圆偏振光透射率只有 0.7 左右; 随着线偏振角增加, 左旋圆偏振光透射率先增大后减小; 当入射的线偏振角为 90° (即 y 线偏振光入射) 时, 左旋圆偏振光的透射率最高, 器件透射性能最好。

仿真计算了 y 线偏振光入射时, 左旋圆偏振光随波长、入射角度变化的透射率, 如图 8 所示。

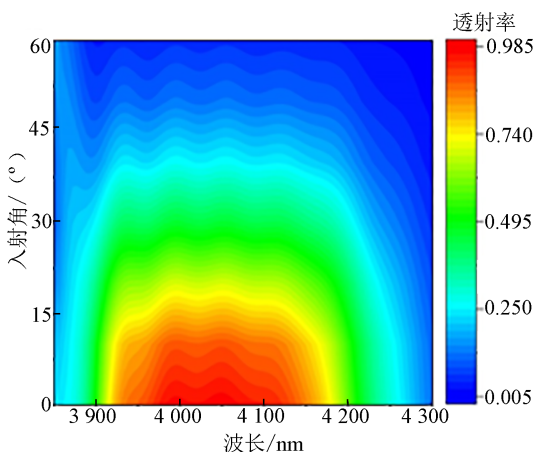


图 8 不同入射角对器件透射性能的影响

Fig. 8 Influence of different incident angles on the transmission performance of the device

可以看出, 在波长 3930~4180 nm 处, 随着入射角增加, 左旋圆偏振光的透射率逐渐下降;

在入射角为 0° (即 z 轴正方向垂直入射) 时, 左旋圆偏振光透射率最高, 器件透射性能最好; 当入射角小于 15° 时, 对器件性能影响较小, 在此范围内器件具有较好的鲁棒性。

为了解释图 7 中只有线偏振角为 90° 时透射性能最好这一现象, 图 9 给出了线偏振角 θ 为 $0^\circ \sim 90^\circ$ (线偏振光与 x 轴的夹角) 时, 各线偏振光透过该器件后的相位差情况。需要注意的是, 本文所设计的器件只能将 y 线偏振光转换为圆偏振光, 因此图 9 中只给出了线偏振角 θ 为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 时的情况。

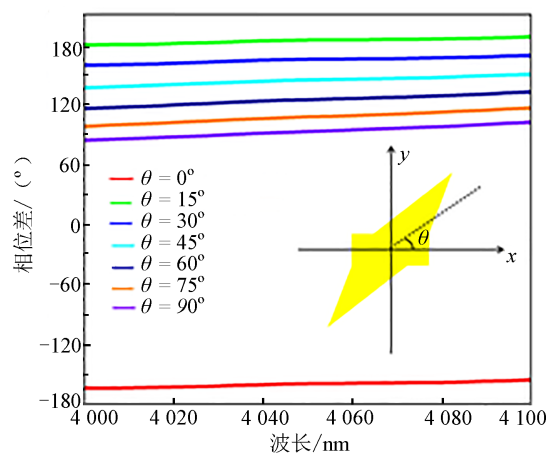


图 9 不同线偏振角入射时的相位差

Fig. 9 Phase difference of the incidence at different linear polarization angles

可以看出, 在 y 线偏振光 (线偏振角度为 90°) 入射时, 相位差满足线偏振到圆偏振转换器件设计的理论条件值 (式 (1))。同时, 也说明了所设计的器件只能将 y 线偏振光转换为圆偏振光, 而对其他线偏振光不起作用。

5 物理机理分析

为进一步探索偏振转换现象的物理机制, 分别仿真计算了 y 线偏振光入射下 $h = 2700$ nm (Si 结构上表面) 和 $h = 0$ nm 处 (Si 结构下表面), 共振波长为 4050 nm 的电场强度分布与电流密度分布三维矢量图, 如图 10 和图 11 所示。

从图 10 和图 11 可以看到, 无论上表面的 Si 结构还是下表面的 Si 结构, 都被极大地激发, 电场集中分布在每个结构单元的两端及其拐角, 这说明入射波与结构之间存在很强的耦合, 每个结构单元都可以产生典型的电偶极子共振。由于 Si 结构的高折射率, 该结构提供了一个场方向转换通

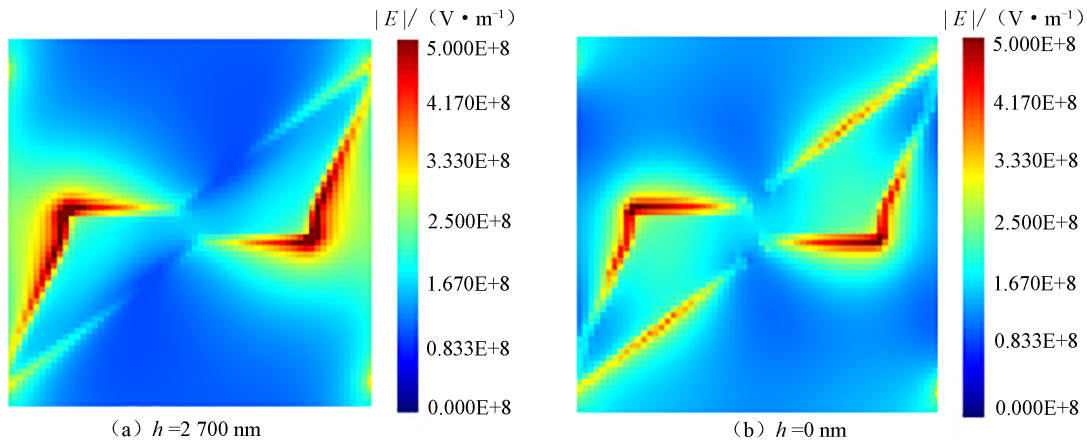


图 10 不同 h 处, y 偏振光入射的电场强度分布

Fig. 10 Electric field intensity distributions of the incident y -polarized light at different heights

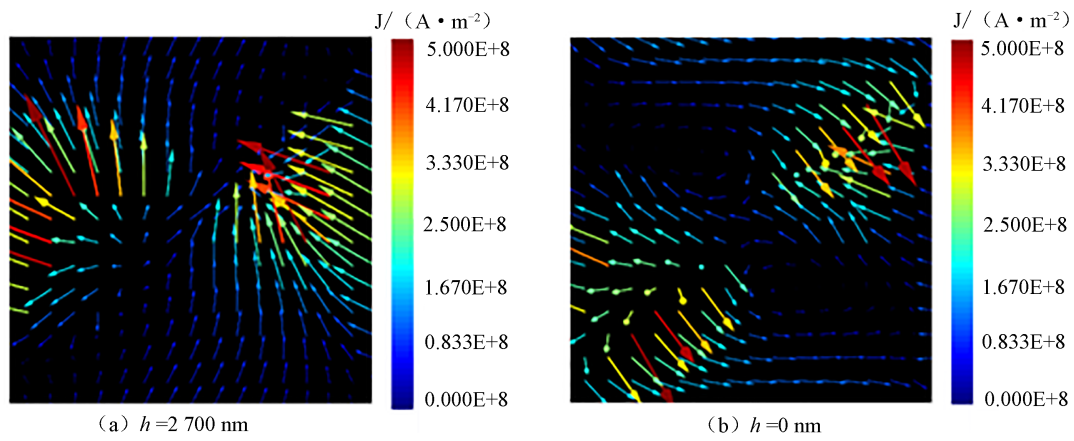


图 11 不同 h 处, y 偏振光入射的电流密度分布

Fig. 11 Current density distributions of the incident y -polarized light at different heights

道, 因此, 底部的 Si 与上层的 Si 分别产生了一个总的等效电场。上层等效电场由右下指向左上, 下层产生的等效电场则与此相反。进一步说明了上表面的电偶极子谐振可以与下表面的电偶极子谐振耦合, 产生反平行电流, 该反平行电流可通过联合作用产生强磁共振, 使 y 方向的磁场分量在 x 方向上诱导出电场。由于该结构中诱导出的电场较弱, 且集中分布在 2 个臂的两端, 在其拐角处较弱。因此, 该结构只能将 y 偏振光部分转换为水平分量, 若转换的水平分量与未转换分量相等, 且相位差为 $\pm\pi/2$, 便可得到圆偏振光。

表 1 总结了参考文献与本论文工作的对比。由于基于金属材料的超表面存在欧姆损耗, 这些类型的偏振转换器件大多工作在反射模式。然而, 采用反射模式会增加结构的层数, 给实际应用和纳米制造技术带来挑战。利用单层介质超表面可以有效提高工作效率, 有利于光学系统的集成化

和小型化。由表 1 对比可知, 单层 Si 结构透射式的超表面转换器件具有上述优点。

表 1 参考文献与本文工作的对比
Tab. 1 Comparison of references with the work of this dissertation

文献	偏振转换	工作模式	结构层数	工作波段	效率
[12]	线-线	反射式	多层	800~1 600 nm	≥ 0.9
[13]	圆-线	透射式	多层	1 400~1 550 nm	≥ 0.8
[14]	线-线	透射式	多层	太赫兹	≥ 0.9
[15]	线-线	透射式	单层	太赫兹	≥ 0.9
本文	线-圆	透射式	单层	3 930~4 180 nm	≥ 0.9

6 结论

本文设计了一种基于超表面的全介质单层透

射式偏振转换器件, 该器件可以在 3 930~4 180 nm 波段实现 y 线偏振光到左旋圆偏振光的高效转换, 透射效率最高可达 0.98。该偏振转换现象是由于结构层隙间产生的反平行电流共振所致。同时发现, 当入射角小于 15° 时, 器件具有较好的鲁棒性。设计的器件为单层结构, 工作模式为透射式, 具有损耗低、效率高的特点, 有利于光学系统的集成化和小型化, 未来有望成为一款实用化的偏振转换器件。

参考文献:

- [1] KHORASANINEJAD M, CHEN W T, DEVLIN R C, et al. Metalenses at visible wavelengths: Diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging[J]. *Science*, 2016, 352 (6290): 1190-1194.
- [2] KHORASANINEJAD M, SHI Z, ZHU A Y, et al. Achromatic metalens over 60 nm bandwidth in the visible and metalens with reverse chromatic dispersion[J]. *Nano Letters*, 2017, 17 (3): 1819-1824.
- [3] WANG S M, WU P C, SU V C, et al. A broadband achromatic metalens in the visible[J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(3): 227-232.
- [4] WEN D D, YUE F Y, LI G X, et al. Helicity multiplexed broadband metasurface holograms[J]. *Nature communications*, 2015, 6: 8241.
- [5] ZHENG G X, MÜHLENBERND H, KENNEY M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(4): 308-312.
- [6] ZHAO R Z, SAIN B, WEI Q S, et al. Multi-channel vectorial holographic display and encryption [J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 95.
- [7] FANIAYEU I, KHAKHOMOV S, SEMCHENKO I, et al. Highly transparent twist polarizer metasurface[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111 (11): 111108.
- [8] JI R N, JIN C, SONG K, et al. Design of multifunctional Janus metasurface based on subwavelength grating[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11 (4): 1034.
- [9] KEENE D, LEPAIN M, DURACH M. Ultimately thin metasurface wave plates[J]. *Annalen Der Physic*, 2016, 528(11/12): 767-777.
- [10] KHAN M I, TAHIR F A. Simultaneous quarter-wave plate and half-mirror operation through a highly flexible single layer anisotropic metasurface [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 16059.
- [11] YU N F, AIETA F, GENEVE P, et al. A broadband, background-free quarter-wave plate based on plasmonic metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(12): 6328-6333.
- [12] DING F, WANG Z X, HE S L, et al. Broadband high-efficiency half-wave plate: A supercell-based plasmonic metasurface approach[J]. *ACS Nano*, 2015, 9(4): 4111-4119.
- [13] BASIRI A, CHEN X H, BAI J, et al. Nature-inspired chiral metasurfaces for circular polarization detection and full-Stokes polarimetric measurements [J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 78.
- [14] 刘靖宇, 李文宇, 刘智星, 等. 基于 V 形超表面的透射式太赫兹线偏振转换器[J]. *物理学报*, 2022, 71 (23): 43-48.
LIU J Y, LI W Y, LIU Z X, et al. Transmission polarization converter based on V-shaped metasurface in terahertz region[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(23): 43-48.
- [15] 邓嘉豪, 熊汉, 李媛, 等. 一种基于 Dirac 半金属的可调控极化偏转器件的仿真分析[J]. *电子学报*, 2024, 52(5): 1488-1495.
DENG J H, XIONG H, LI Y, et al. Simulation and analysis of a tunable polarization converter based on Dirac semimetals[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2024, 52(5): 1488-1495.
- [16] PALIK E. Handbook of optical constants of solids [M]. Amsterdam: Elsevier, 1997: 5-114.
- [17] KHALIQ H S, KIM I, KIM J, et al. Manifesting simultaneous optical spin conservation and spin isolation in diatomic metasurfaces[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(8): 2002002.
- [18] 程光煦. 拉曼布里渊散射[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 461-531.
- [19] ZHAO Y, ALÙ A. Manipulating light polarization with ultrathin plasmonic metasurfaces[J]. *Physical Review B*, 2011, 84(20): 205428.
- [20] 杨雪玲, 刘劲松, 李铭华, 等. 光折变晶体中的一种新现象——转致多级衍射现象的实验观测[J]. *激光与红外*, 1991, 21(6): 42-44.
YANG X L, LIU J S, LI M H, et al. Experimental observation of the new phenomenon in a photorefractive crystal turn induced multistage diffracted phenomenon[J]. *Laser & Infrared*, 1991, 21 (6): 42-44.

(编辑: 刘建民)