

基于 V 形超表面的透射式太赫兹线偏振转换器*

刘靖宇¹⁾²⁾³⁾ 李文宇¹⁾²⁾³⁾ 刘智星¹⁾²⁾³⁾ 舒敬懿¹⁾²⁾³⁾ 赵国忠¹⁾²⁾³⁾†

1) (首都师范大学物理系, 北京 100048)

2) (北京市成像技术高精尖创新中心, 北京 100048)

3) (太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048)

(2022 年 6 月 28 日收到; 2022 年 7 月 30 日收到修改稿)

提出了一种基于 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, 顶层、底层是一对相互正交的光栅, 中间层为 V 形超表面, 层与层间被聚酰亚胺隔开. 该结构在 0.35—1.11 THz 频段内可以实现交叉偏振透射率达到 80% 以上, 偏振转换率达到 99% 以上. 对该结构在交叉偏振透射率高和低频率处的表面电流和电场进行仿真, 发现相邻 V 形结构间会产生偶极振荡, 在透射率高的频率处, 相邻 V 形结构间电场具有相近的值, 而在透射率低的频率处, 相邻 V 形结构间电场具有相反的值. 同时, 还分别研究了 V 形阵列的单层结构和 V 形阵列后放置光栅的双层结构对于垂直入射 x 偏振太赫兹波的响应, 并分析了引起高偏振转换率和宽带的物理机理.

关键词: V 形, 透射式, 偏振转换

PACS: 07.05.Tp, 07.60.-j, 81.05.Xj

DOI: 10.7498/aps.71.20221259

1 引言

在微波、太赫兹和光学频率范围的各种应用中, 操纵电磁波的偏振态对于有效控制电磁波至关重要^[1,2]. 传统的偏振态控制方法是利用双折射晶体, 在电磁波传播过程中相位差可以逐渐积累, 但是这些偏振转换器件通常具有较大的体积, 这与光学系统集成的趋势背道而驰. 与天然材料相比, 超材料由于具有奇异的物理性质而越来越受到关注, 例如负折射率^[3-6]、光学成像^[7-11]和完美吸收^[12-14]. 特别是其在偏振转换方面的卓越能力, 以及超薄和宽带性能方面的优势, 开辟了操纵电磁波偏振态的新途径^[15,16]. 目前, 已经通过设计不同的超材料结构实现了多种偏振转换器, 可用于线偏振波转换为圆偏振波^[17,18], 将右旋圆偏振波转换为左旋圆偏振

波^[19], 或是将线偏振波转换为交叉偏振. 2015 年 Liu 等^[20]用单层超表面将线偏振光转换为交叉线偏振光, 在 0.91—1.45 THz 的频率范围内实现高效的交叉偏振转换; 2020 年 Zhang 等^[21]提出了一种透射式单层超表面, 可以在窄带频率范围内实现较高的偏振转换率; 2021 年 Kamal 等^[22]提出了一种基于 L 形的单层偏振转换器, 在宽带频率范围内实现偏振转换率高于 90%; Liu 等^[23]利用一种基于十字形的双层偏振转换器, 能够将线偏振波转换为交叉偏振波; Yin 等^[24]提出了一种基于相位梯度的双层反射式偏振转换器, 可在 0.40—0.60 THz 频段内同时操纵反射波的偏振和波面, 偏振转换率可达 95% 以上; Huang 等^[25]提出了一种三层双各向异性超表面, 在 5.8—11.8 GHz 频率范围内实现了交叉偏振转换; Fan 等^[26]利用三层旋转金属光栅在 0.20—0.44 THz 范围内实现交叉偏振透射率

* 国家重点研发专项 (批准号: 2021YFB3200102) 和国家自然科学基金 (批准号: 62071312) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: guozhong-zhao@126.com

达到 95% 以上; Grady 等^[27] 提出一种切割线阵列的三层结构线偏振转换器, 可在 0.52—1.82 THz 范围内将入射的线偏振光旋转 90°, 但偏振转换率只有 50% 以上. 本文提出了一种基于 V 形超表面的透射式太赫兹线偏振转换器, 可以在太赫兹波段实现宽带高效的偏振转换, 有望成为一款实用化的太赫兹偏振转换器件.

2 设计与仿真

图 1(a) 为透射式偏振转换器示意图, 该偏振转换器由厚度均为 200 nm 的光栅-V 形超表面-交叉光栅组成, 顶层、底层是一对相互正交的光栅, 中间层为 V 形超表面, 层与层间被 35 μm 厚的聚酰亚胺隔开. 入射电磁波电场为沿着 x 方向的线偏振光, 波矢 k 沿着 z 轴正方向. 图 1(b) 是 V 形结构示意图, 经过优化设计的单元结构几何参数如下: 周期 $P = 100 \mu\text{m}$, $a = 12 \mu\text{m}$, $b = 8 \mu\text{m}$, $d = 35 \mu\text{m}$, $L = 67 \mu\text{m}$, $w = 9 \mu\text{m}$, $\alpha = 98^\circ$, $h = 88 \mu\text{m}$, 金的电导率 $\sigma = 4.56 \times 10^7 \text{ S/m}$, 聚酰亚胺的介电常数 $\epsilon = 3.5$, 损耗正切值为 0.0027. 这些几何尺寸都是经过大量模拟和优化得到的结果, 其变化会导致窄带或较低的透射率. 利用 CST microwave studio 软件进行数值模拟, 分析了偏振转换器的透射特性.

为了更好地理解偏振转换机理, 将同向偏振透射率和交叉偏振透射率分别定义为

$$t_{xx} = \left| \frac{E_{xt}}{E_{xi}} \right|^2, t_{yx} = \left| \frac{E_{yt}}{E_{xi}} \right|^2, \quad (1)$$

式中 E_{xi} , E_{xt} 和 E_{yt} 分别表示偏振方向沿着 x 轴方向的入射太赫兹波电场振幅, 以及偏振方向沿着 x 轴和 y 轴方向的透射太赫兹波电场振幅, t_{xx}

和 t_{yx} 分别表示同向偏振透射率和交叉偏振透射率. 对于偏振转换器来说, 其重要的性能参数偏振转换效率 (PCR) 定义为

$$\text{PCR} = \frac{t_{yx}}{t_{xx} + t_{yx}}. \quad (2)$$

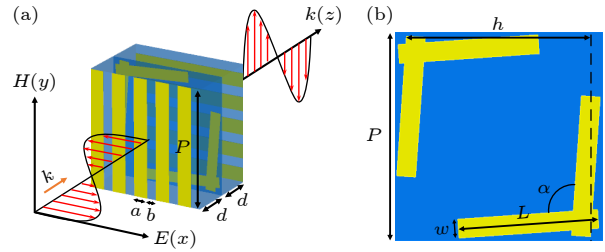


图 1 (a) 透射式偏振转换器示意图; (b) V 形结构示意图
Fig. 1. (a) Diagram of transmission polarization converter; (b) diagram of V-shaped structure.

对偏振转换结构进行了全波仿真, 得到了 t_{xx} 和 t_{yx} , 依据 (2) 式计算出了 V 形偏振转换结构的偏振转换率 PCR, 结果如图 2 所示. 其中, 图 2(a) 为透射式偏振转换器的偏振转换效率, 图 2(b) 为透射式偏振转换器的透射率, t_{yx} 代表 x 偏振到 y 偏振的偏振转换透射率, t_{xx} 代表 x 偏振到 x 偏振的偏振转换透射率.

从图 2 可以看出, 该结构在 0.35—1.11 THz 范围内将线偏振的太赫兹波偏振方向旋转 90°, 即将 x 偏振入射的太赫兹波转换为 y 偏振透射的太赫兹波, 偏振转换效率接近于 1. 交叉偏振透射率高于 80%, 在 0.38 THz, 0.51 THz, 0.78 THz, 1.06 THz 这 4 个频率处偏振转换率最高, 而同向偏振透射率接近于 0.

该器件为多层结构, 加工制备时需进行多次光刻, 可能会出现前后光栅不完全正交的情况, 本工

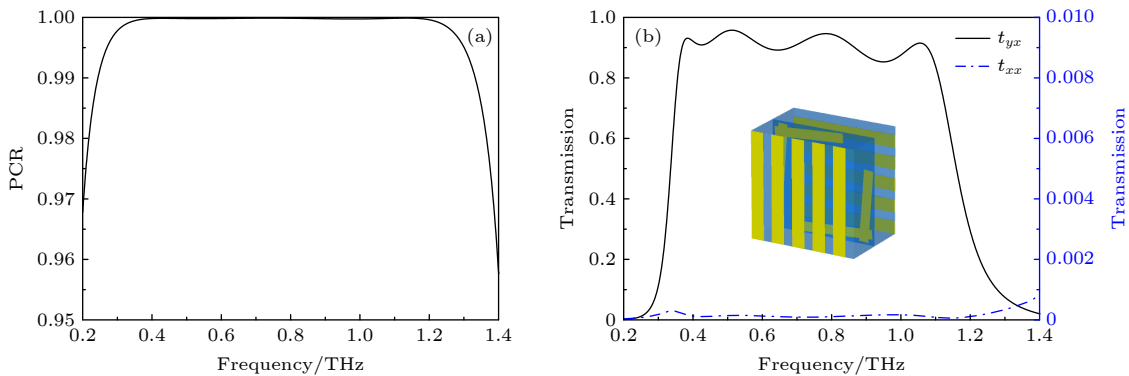


图 2 偏振转换器的 (a) 偏振转换率和 (b) 透射率

Fig. 2. (a) Polarization conversion rate and (b) transmission of polarization converter.

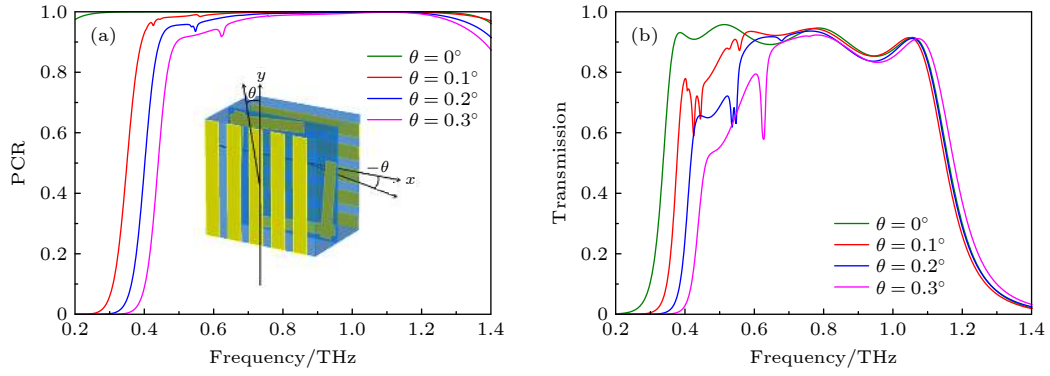


图 3 (a) 偏振转换率和 (b) 交叉偏振透射率与 θ 角的关系, 其中 (a) 中插图是 θ 角的定义

Fig. 3. (a) Polarization conversion rate and (b) cross polarization transmission with respect to θ . The illustration of Fig. (a) is the definition of θ .

作又模拟了前后光栅同时绕 z 轴分别沿逆时针和顺时针方向旋转 θ 角和 $-\theta$ 角时器件的透射特性, 如图 3 所示. 可以看出随着 θ 的增大, 偏振转换率和交叉偏振透射率呈现带宽变窄, 值减小的状况. θ 角的变化对器件性能影响较大, 为保证器件的良好性能, 在制备中要确保加工的精准性.

3 偏振转换机理分析

为了深入理解该偏振转换器的工作机理, 将坐标轴旋转 -45° 得到 u, v 轴, 如图 4(a) 插图所示. 偏振方向沿着 x 方向的太赫兹波可以分解为沿着 u, v 轴的两个分量, 入射的太赫兹波可以表示为

$$\mathbf{E}_i = \frac{\sqrt{2}}{2} E_i \exp(j\mathbf{k}z) \hat{u} + \frac{\sqrt{2}}{2} E_i \exp(j\mathbf{k}z) \hat{v}. \quad (3)$$

入射波经 V 形结构透射后, 透射的太赫兹波可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_t = & \frac{\sqrt{2}}{2} \{t_{uu} E_i \exp[j(-\mathbf{k}z + \varphi_{uu})] \\ & + t_{uv} E_i \exp[j(-\mathbf{k}z + \varphi_{uv})]\} \hat{u} \\ & + \frac{\sqrt{2}}{2} \{t_{vv} E_i \exp[j(-\mathbf{k}z + \varphi_{vv})] \\ & + t_{vu} E_i \exp[j(-\mathbf{k}z + \varphi_{vu})]\} \hat{v}, \quad (4) \end{aligned}$$

其中 t_{uu} 表示 u 偏振到 u 偏振的透射率, t_{uv} 表示 v 偏振到 u 偏振的透射率, t_{vv} 表示 v 偏振到 v 偏振的透射率, t_{vu} 表示 u 偏振到 v 偏振的透射率; φ_{uu} 表示 u 偏到 u 偏振的透射相位, φ_{uv} 表示 v 偏振到 u 偏振的透射相位, φ_{vv} 表示 v 偏振到 v 偏振的透射相位, φ_{vu} 表示 u 偏振到 v 偏振的透射相位.

从图 4(a) 可以看出, 在所研究频率范围内, 入

射波的偏振方向沿着 u, v 方向时, 交叉偏振透射率几乎相同. 而当入射波的偏振方向沿着 u, v 向时, 同向偏振透射率不同, 但在 0.41, 0.63 和 0.93 THz 处都出现了谐振峰, 如图 4(b) 所示. 从图 4(c) 可知, 在 0.35—0.54 THz 和 0.79—1.04 THz 频率范围内, 沿着 u, v 两个方向偏振的太赫兹波经透射后同向偏振波相位差在 $180^\circ \pm 3^\circ$ 之间, 而在 0.54—0.79 THz 和 1.04—1.28 THz 频率范围内该相位差在 $-180^\circ \pm 3^\circ$ 之间, 同时在谐振点附近存在相位突变. 图 4(d) 中沿着 u, v 两个方向偏振的太赫兹波经偏振转换器透射后交叉偏振波相位差几乎为 0. 依据 (4) 式, $\varphi_{uu} - \varphi_{vv} = \pi + 2k\pi$, $\varphi_{vu} - \varphi_{uv} \approx 0$ 时, 经偏振转换器透射后的太赫兹波总相位差为 $\pi + 2k\pi$, 偏振方向变为 $\hat{u} - \hat{v}$, 这与入射的太赫兹波偏振方向 $\hat{u} + \hat{v}$ 垂直, 这表明该结构可以使入射太赫兹波的偏振方向能够旋转 90° .

当 x 偏振入射波垂直照射到 V 形阵列上时, 将激发 V 形阵列的表面电流, 这会导致偶极振荡 P_1 和 P_2 , 如图 5(a) 所示. 之后的辐射场包含同向偏振和交叉偏振的太赫兹波, 0.78 THz 和 1.40 THz 频率下衬底的交叉偏振电场分布模拟结果如图 5(b) 所示. 可以看出, 区域 (1) 和区域 (2) 中电场的交叉偏振分量以不同的振幅和相位辐射, 在 0.78 THz 处区域 (1) 和区域 (2) 中的交叉偏振电场的实部呈现相近的值 (具有相近的相位), 导致相邻 V 形结构间的电场相互增强, 这就使交叉偏振透射率在 0.78 THz 处很高. 在 1.40 THz 处区域 (1) 和区域 (2) 中的交叉偏振电场的实部呈现相反的值 (具有 π 的相位差), 导致相邻 V 形结构间的电场相互抑制, 这就使交叉偏振透射率在 1.40 THz 处很低.

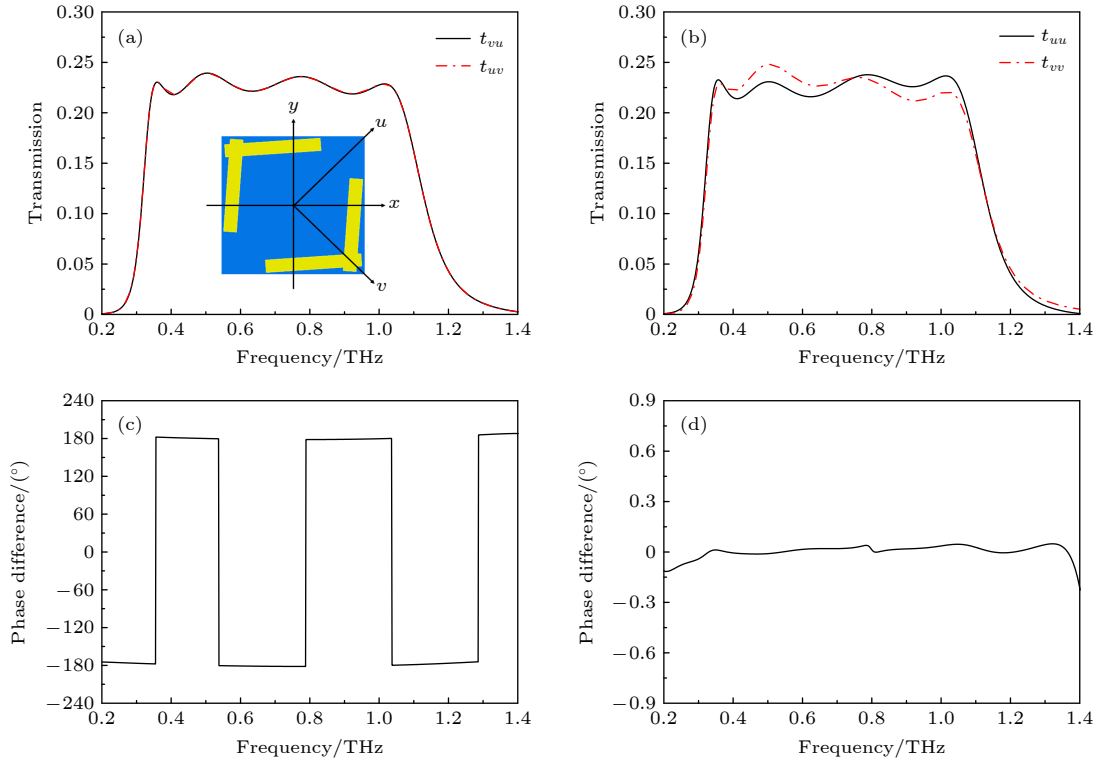


图 4 入射太赫兹波的偏振方向沿着 u, v 轴 (a) 交叉偏振透射率, 插图是 u, v 轴的定义; (b) 同向偏振透射率; (c) 同向偏振透射相位差; (d) 交叉偏振透射相位差

Fig. 4. The polarization direction of the incident THz wave is along the u, v axis: (a) Transmission of cross-polarization, the insert is the definition of u, v axis; (b) transmission of co-polarization; (c) phase difference of co-polarization; (d) phase difference of cross-polarization for electric field along u, v axis.

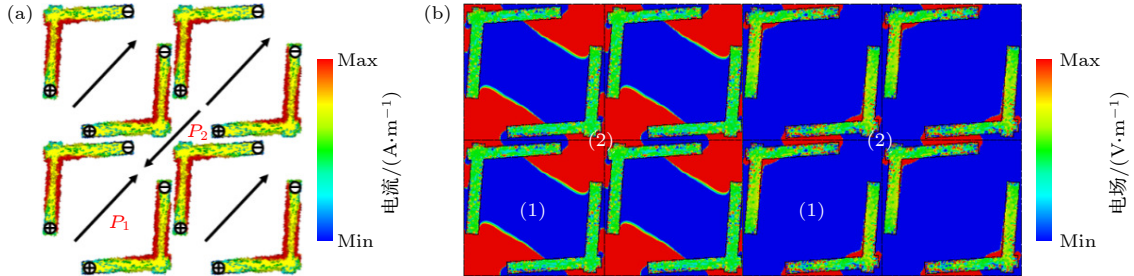


图 5 (a) 0.78 THz 频率处 V 形阵列层的表面电流分布; (b) 1.40 THz (左) 和 0.78 THz (右) 频率处衬底的交叉偏振电场分布

Fig. 5. (a) The distribution of surface current on the V-shaped array layer for 0.78 THz; (b) the distribution of cross-polarized electric field of the substrate layer for 1.40 THz (left) and 0.78 THz (right).

此外, 在 0.35—1.11 THz 频段内交叉偏振电场分布表现出了与 0.78 THz 处相似的结果, 这导致了宽带高效的偏振转换。

最后, 为了说明前后两个正交光栅对偏振转换性能的影响, 分别研究了 V 形阵列的单层结构和 V 形阵列后放置光栅的双层结构对于垂直入射 x 偏振太赫兹波的响应, 如图 6 所示. 从图 6(a) 中可以看出, 在 0.87 THz 和 1.35 THz 处交叉偏振太赫兹波的透射率达到峰值, 在 0.78—0.89 THz 和 1.35—1.41 THz 频率内交叉偏振透射率均高于同

向偏振透射率, 而在其他频率处的透射率均低于同向偏振透射率, 这说明单层 V 形阵列可将部分线偏振入射光转换成交叉偏振光. 图 6(b) 是双层结构下太赫兹波透射率. 在 0.60 THz 和 1.13 THz 处透射率达到 0.59 和 0.70, 而同向偏振透射率几乎为 0, 这是因为光栅起到偏振选择的作用, 只有 y 偏振的太赫兹波可以透过该结构, 而 x 偏振的太赫兹波会被后光栅反射回去, 这部分波到达 V 形超表面时会再次进行偏振转换, 而后通过后光栅透射出去. 这种交叉偏振的传输增强得益于双层结构内部

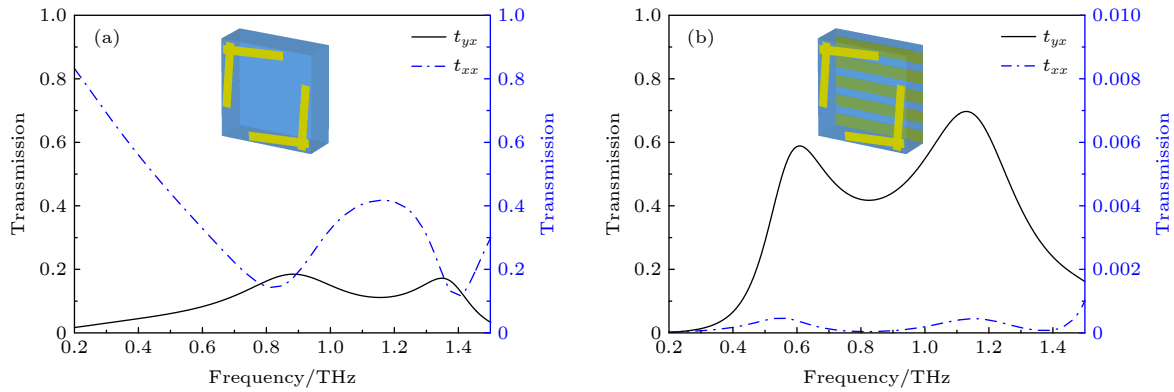


图 6 (a) 单层结构下太赫兹波的透射率; (b) 双层结构下太赫兹波的透射率

Fig. 6. (a) Transmission of terahertz waves in single layer structure; (b) transmission of terahertz waves in bi-layer layer structure.

的 F-P 谐振 [28,29], 当 V 形阵列和光栅间形成法布里-珀罗腔时, 太赫兹波会在腔内来回反射, 最终产生高的交叉偏振透射率, 在图 2(b) 中可以观察到在 3 层结构的情况下这种增强效应更为明显. 这表明 V 形阵列提供了偏振转换的能力, 而光栅的存在使结构内部产生 F-P 腔为太赫兹波来回反射创造了条件, 在 V 形超表面和正交光栅的共同作用下, 实现了高效宽带的偏振转换.

4 结 论

本文设计并分析了一种基于 V 形结构的透射式偏振转换器件, 该器件可在太赫兹波段实现宽带高效的偏振转换. 利用电场分布图像说明了引起高交叉偏振透射率的原因. 同时, 还对 V 形超表面及前后正交光栅进行研究, 发现单层 V 形阵列可将部分线偏振入射光转换成交叉偏振光, 而光栅的存在, 会使 V 形阵列和光栅间形成法布里-珀罗腔, 让太赫兹波会在腔内来回反射, 从而使交叉偏振透射率增大. 本文研究结果为太赫兹偏振转换器件研究提供了参考.

参考文献

[1] Dietlein C, Luukanen A, Popovi Z, Grossman E 2007 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **55** 1804
 [2] Zhu W, Jiang M, Guan H, Yu J, Lu H, Zhang J, Chen Z 2017 *Photonics Res.* **5** 684
 [3] Monticone F, Valagiannopoulos C A, Alù A 2016 *Phys. Rev. X* **6** 041018
 [4] Yin X, Ye Z, Rho J, Wang Y, Zhang X 2013 *Science* **339** 1405
 [5] Rajaram M, Rajamani A 2021 *J. Supercond. Novel Magn.* **34** 1185
 [6] Zhang Z, Qin F, Xu Y, Fu S, Wang Y, Qin Y 2021 *Photonics*

Res. **9** 1592
 [7] Fang N, Lee H, Sun C, Zhang X 2005 *Science* **308** 534
 [8] Stoja E, Konstantin S, Philipp D, Wilke R N, Betancourt D, Bertuch T, Jenne J, Umatham R, Gunther M 2021 *Sci. Rep.* **11** 16179
 [9] Lee S H, Shin S, Roh Y, Oh S J, Lee S H, Song H S, Ryu Y S, Kim Y K, Seo M 2020 *Biosens. Bioelectron.* **170** 112663
 [10] Engay E, Huo D, Malureanu R, Bunea A I, Lavrinenko A 2021 *Nano Lett.* **21** 3820
 [11] Slobozhanyuk A P, Shehelokova A V, Kozachenko A V, et al. 2021 *Phys. Rev. Appl.* **16** L021002
 [12] Peng X Y, Wang B, Lai S, Zhang D H, Teng J H 2012 *Opt. Express* **20** 27756
 [13] Zhang N, Zhou P, Zhang L, Weng X, Xie J, Deng L 2015 *Appl. Phys. B* **118** 409
 [14] Ra'di Y, Simovski C R, Tretyakov S A 2015 *Phys. Rev. Appl.* **3** 037001
 [15] Yin J Y, Wan X, Zhang Q, Cui T J 2015 *Sci. Rep.* **5** 12476
 [16] Chen H, Wang J, Ma H, Qu S, Xu Z, Zhang A, Yan M, Li Y 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 154504
 [17] Han B, Li S, Cao X, Han J, Jidi L, Li Y 2020 *AIP Adv.* **10** 125025
 [18] Chaudhary P, Kumar A, Kumar P, Kanaujia B K, Birwal A 2020 *Int. J. Electron.* **108** 411
 [19] Wu L, Yang Z, Cheng Y, Gong R, Zhao M, Zheng Y, Duan J A, Yuan X 2014 *Appl. Phys. A* **116** 643
 [20] Liu W, Chen S, Li Z, Cheng H, Yu P, Li J, Tian J 2015 *Opt. Lett.* **40** 3185
 [21] Zhang Y, Yang L, Li X K, Wang Y L, Huang C P 2020 *J. Opt.* **22** 305101
 [22] Kamal B, Chen J, Yingzeng Y, Ren J, Ullah S, Khan W U R 2021 *Opt. Mater. Express* **11** 1343
 [23] Liu Z, Zhao B, Jiao C, Zhao L, Han X 2021 *Appl. Phys. A* **127** 825
 [24] Yin B, Ma Y 2021 *Opt. Commun.* **493** 126996
 [25] Huang X, Xiao B, Yang D, Yang H 2015 *Opt. Commun.* **338** 416
 [26] Fan R H, Zhou Y, Ren X P, Peng R W, Jiang S C, Xu D H, Xiong X, Huang X R, Wang M 2015 *Adv. Mater.* **27** 1201
 [27] Grady N K, Heyes J E, Chowdhury D R, Zeng Y, Reiten M T, Azad A K, Taylor A J, Dalvit D A, Chen H T 2013 *Science* **340** 1304
 [28] Xiao Z Y, Liu D J, Ma X L, Wang Z H 2015 *Opt. Express* **23** 7053
 [29] Chiang Y J, Yen T J 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 011129

Transmission polarization converter based on V-shaped metasurface in terahertz region*

Liu Jing-Yu¹⁾²⁾³⁾ Li Wen-Yu¹⁾²⁾³⁾ Liu Zhi-Xing¹⁾²⁾³⁾
Shu Jing-Yi¹⁾²⁾³⁾ Zhao Guo-Zhong^{1)2)3)†}

1) (*Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China*)

2) (*Beijing Advanced Innovation Center for Imaging Technology, Beijing 100048, China*)

3) (*Key Laboratory of THz Optoelectronics, Ministry of Education, Beijing 100048, China*)

(Received 28 June 2022; revised manuscript received 30 July 2022)

Abstract

Metasurfaces have attracted extensive attention due to their powerful functions, especially the manipulation of the polarization state of electromagnetic wave in many different areas, which have aroused a lot of research interest. In this work, a broadband transmission polarization converter based on V-shaped element array in terahertz band is designed and analyzed, which consists of grating-V-shaped metasurface-grating. The top layer and bottom layer form a pair of crossed gratings, and the middle layer is a V-shaped metasurface, and the layers are separated by polyimide. The structure parameters of the polarization converter are optimized by CST microwave studio, changes of which can result in narrow band or low transmission. Cross-polarization transmission rate and polarization conversion rate can reach more than 80% and 99%, respectively, in a frequency range from 0.35 THz to 1.11 THz. By studying the electric field distribution in the substrate under the V-shaped metasurface, it is found that the real part of the cross-polarization electric field between adjacent V-shaped metasurfaces presents similar values in a frequency range from 0.35 THz to 1.11 THz, resulting in high cross-polarization transmission. However, the real part of the cross-polarization electric field between adjacent V-shaped metasurfaces presents opposite values, resulting in low cross-polarization transmission at 1.40 THz. At the same time, the responses of the single layer structure of the V-shaped array and the bi-layer structure of the grating placed behind the V-shaped array to vertically incident x-polarized terahertz waves are investigated respectively, and the results show that the single-layer V-shaped array can convert part of linearly polarized incident light into cross-polarization light, however, in the bi-layer structure, Fabry-Perot cavity is formed between the V-shaped array and the grating, and the cross polarization transmission increases. This indicates that the V-shaped array provides the capability of polarization conversion, and the existence of the grating makes the F-P cavity inside the structure create the conditions for the back and forth reflection of terahertz waves. The combined action of the V-shaped metasurface and orthogonal grating results in a high polarization conversion rate.

Keywords: V-shaped, transmission, polarization conversion

PACS: 07.05.Tp, 07.60.-j, 81.05.Xj

DOI: [10.7498/aps.71.20221259](https://doi.org/10.7498/aps.71.20221259)

* Project supported by the Special Foundation for State Major Research Program of China (Grant No. 2021YFB3200102) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62071312).

† Corresponding author. E-mail: guozhong-zhao@126.com



基于V形超表面的透射式太赫兹线偏振转换器

刘靖宇 李文宇 刘智星 舒敬懿 赵国忠

Transmission polarization converter based on V-shaped metasurface in terahertz region

Liu Jing-Yu Li Wen-Yu Liu Zhi-Xing Shu Jing-Yi Zhao Guo-Zhong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 230701 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20221259

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221259>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

动态可调谐的频域多功能可重构极化转换超表面

Dynamically tunable frequency-domain multifunctional reconfigurable polarization conversion metasurface

物理学报. 2022, 71(22): 224102 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221256>

基于剪纸方法的一种可重构线极化转换空间序构超表面

Reconfigurable linear polarization conversion based on spatial-order kirigami metasurfaces

物理学报. 2021, 70(15): 154101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210188>

局域表面等离子体谐振辅助的高效率宽频带可调谐偏振转换超表面

A high-efficiency wideband tunable polarization conversion metasurface assisted by localized surface plasmon resonances

物理学报. 2022, 71(12): 128101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20220288>

基于双开口谐振环超表面的宽带太赫兹涡旋光束产生

Broadband terahertz vortex beam generation based on metasurface of double-split resonant rings

物理学报. 2019, 68(10): 108701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182147>

基于反射超表面产生太赫兹涡旋波束

Terahertz vortex beam generation based on reflective metasurface

物理学报. 2019, 68(23): 238101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191055>

基于柔性超构材料宽带调控太赫兹波的偏振态

Broadband modulation of terahertz wave polarization states with flexible metamaterial

物理学报. 2022, 71(18): 187802 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220801>