

文章编号: 2095-4980(2021)05-0814-05

基于电磁超表面的太赫兹线极化转换器

汪 域, 李子晗

(东南大学 信息科学与工程学院, 江苏 南京 211189)

摘要: 研究基于电磁超表面的太赫兹波束极化调控技术, 即采用金属-介质-金属的三层结构设计了一种反射式太赫兹波 90° 线极化转换器, 并分别采用数值仿真和实验测试方法表征其极化转换特性。结果表明, 该反射式超表面可以在工作频率 (0.5 THz) 达到高效的线极化转换 (高于 75%), 且具有宽带特性 (在 0.35~0.65 THz 极化转换效率超过 50%)。此外, 采用的超薄玻璃介质衬底使得超表面极化转换器具有厚度小、质量轻和耐热性好等优异的综合性能。

关键词: 电磁超表面; 太赫兹; 极化转换; 反射式超表面

中图分类号: O441.4

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021201

Terahertz linear polarization converter based on electromagnetic metasurface

WANG Yu, LI Zihan

(School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu 211189, China)

Abstract: The terahertz polarization manipulation technology based on electromagnetic metasurface is studied. Specifically, a reflective-type terahertz 90° linear polarization converter is designed by using the metal-dielectric-metal sandwiched structure, and the polarization conversion characteristics are investigated both numerically and experimentally. It is shown that the reflective-type metasurface designed in this work achieves a high polarization conversion efficiency (above 75%) at the operating frequency of 0.5 THz as well as a broad working band (the polarization conversion efficiency is more than 50% over the frequency range of 0.35–0.65 THz). In addition, the ultrathin glass substrate produces the excellent overall performances of the metasurface linear polarization converter, including small thickness, light weight, and good heat resistance.

Keywords: electromagnetic metasurface; terahertz; polarization conversion; reflective-type metasurface

太赫兹 (THz) 波通常是指频率范围在 0.1~10 THz 之间的电磁波, 其在低频段与毫米波段重合, 在高频段与远红外波段重合, 是衔接电子学和光子学的重要波段^[1-4]。目前, 太赫兹技术快速发展, 高功率太赫兹辐射源及高灵敏度探测器件的研发, 极大地促进了太赫兹技术在安全检查、成像、通信等领域的应用, 包括太赫兹安检仪、宽频太赫兹雷达、宽带移动通信等^[3-6]。对太赫兹波束的灵活调控 (包括波束扫描、极化操控等) 是实现太赫兹技术广泛应用的重要前提, 然而太赫兹材料和器件的缺乏, 已严重制约了太赫兹领域的发展, 其主要原因是绝大多数自然物质对太赫兹波没有电磁响应。人工电磁材料 (超材料) 的出现解决了这一问题, 研究人员通过构筑各种无源和有源超材料与超表面器件实现了对太赫兹波的高效调控^[7-8]。Yen 等采用开口谐振环结构实现了太赫兹频率的磁响应^[9]。此后, 基于超材料研制了太赫兹吸波器、调制器和光开关等各种新型器件, 以调控太赫兹波的传播性质^[10-12]。电磁超表面, 作为一种二维形式的超材料, 其单元具有深亚波长厚度。通过设计超表面相邻单元之间的相位梯度 (不连续分布), 可以实现电磁波幅度、相位、波前和极化等性质的灵活调控^[13]。2014 年, 东南大学的崔铁军教授团队首次提出了数字编码超表面的概念, 将超表面的设计与数字编码相结合, 使用“0”和“1”及其组合来表示不同相位或幅度的单元结构, 并通过不同的排列方式实现对电磁波束的多种操纵, 从而进一步简化了超表面结构的设计与优化^[14]。在此基础上, 太赫兹编码超表面、各向异性编码超表面、频率双功能编码超材料等相继被提出, 进一步拓展了太赫兹波束的调控自由度^[15-17]。

极化转换器是一种调控电磁波极化特性的器件, 在通信等方面具有重要应用。2013 年, Grady 等利用表面微

收稿日期: 2021-05-14; 修回日期: 2021-07-01

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划资助项目 (202010286163)

细加工技术制作了第一款基于电磁超材料结构的太赫兹波线极化转换器，该极化转换器在 0.65~1.87 THz 频率范围内，极化转换效率为 50%；在 0.8~1.36 THz 频率范围内，极化转换效率达到 80%；而在 1.36 THz 处，最高极化转换效率为 88%^[18]。同年，Cheng 等设计了一款顶层结构由双开口谐振环和金属圆盘构成的反射型太赫兹线极化转换器，中介质层材料为聚二甲硅氧烷(PDMS)，该线极化转换器在 0.53~1.36 THz 的范围内极化转换率高于 50%^[19]。2018 年，周等提出了顶层金属图案为 4 个 L 形金属结构的反射型太赫兹极化转换器，该极化转换器在大于 0.5 THz 的带宽范围内，可实现超过 80%的极化转换效率^[20]；同年，付等提出了一款基于开口谐振环结构的太赫兹线极化转换器，为典型的金属-电介质-金属结构，该器件可在 0.59~1.24 THz 频率范围内实现超过 80%的极化转换效率^[21]。在上述已有成果的基础上，本文做出进一步研究，采用性能更为优异的超薄氟玻璃作为衬底，研究了在 0.5 THz 频率附近的太赫兹波束极化调控技术，实现了对太赫兹波的线极化调控，研制了高效的线极化波转换器件。

1 反射式超表面设计

1.1 超表面单元结构设计

图 1 为实现极化偏转作用的人工微结构，沿着 x 方向线极化波入射到材料表面后，在金属切线处激发了偶极子振荡，坐标原点的交叉圆形代表 z 轴，其方向与入射方向相同且垂直纸面向内。假设入射波不会产生透射，且初相位为 0，其电场表示为：

$$\mathbf{E}_i = x\mathbf{E}_{ix}e^{-jkz} \quad (1)$$

式中 \mathbf{E}_{ix} 和 k 分别为 x 方向的电场幅度和传输常数。经过偶极子单元作用后，反射波为：

$$\mathbf{E}_r = x\mathbf{E}_{rx}e^{j\phi_x}e^{jkz} \quad (2)$$

式中 E_{rx} 和 ϕ_x 为反射波幅度和附加相位。若微结构逆时针旋转 α 角度，将入射波分别沿平行和垂直矩形微结构长的方向分解，分别记 u 和 v ，式(1)和式(2)可改写为：

$$\mathbf{E}_i = (u\cos\alpha + v\sin\alpha)\mathbf{E}_{ix}e^{-jkz}, \quad \mathbf{E}_r = (u\cos\alpha \cdot e^{j\phi_u} + v\sin\alpha \cdot e^{j\phi_v})\mathbf{E}_{rx}e^{jkz} \quad (3)$$

由于假设不会产生透射，所以 $\mathbf{E}_{ix} = \mathbf{E}_{rx}$ ， $\phi_x = \phi_u$ ， $\phi_y = \phi_v$ 。

当 $\phi_x - \phi_y = \pi$ 时，入射波和电场一起贡献于共极化波，垂直分量贡献于交叉极化波，由于金属背板的作用，它和金属短线阵列形成了类 Fabry-Perot 腔^[8]，使得在 F-P 腔中形成多极化耦合干扰，提高了极化转换的效率。

本文设计的最终单元结构见图 2。单元形状为正方形，选择超薄氟玻璃作为衬底材料，使超表面厚度小、质量轻，且具有一定的机械强度和较好的耐热性，综合性能优异。衬底顶层为长方形金属条，底层为金属反射面，材料均为金(Au)，单元结构周期为 250 μm ，厚度为 50 μm ，矩形结构长为 150 μm ，宽为 79 μm ，倾角为 45°，金属板厚度均为 0.3 μm 。

1.2 单元结构几何参数分析与讨论

1.2.1 单元结构周期对极化转换性能的影响

极化转换器的顶层结构为一个倾斜矩形，为便于研究此结构对极化转换性能的影响，这里保持矩形与衬底尺寸比例不变，设置单元结构周期 p 分别为 210 μm , 230 μm , 250 μm , 270 μm 和 290 μm 。图 3(a)给出了不同 p 时，极化转换器的极化转换率的变化曲线。可以看出， p 的变化对极化转换率无明显影响，但随着 p 的增大，工作带宽会向低频移动，且会在工作带宽中心产生一个转换率偏低的凹陷。综合考虑工作带宽和极化转换率，并进一步减小参数扫描的梯度，当 $p=250 \mu\text{m}$ 时，该线极化转换器可以在更宽的工作带宽上获得更高的极化转换率。

1.2.2 单元偏转角对极化转换性能的影响

保持其他参数不变，改变矩形长边与 x 轴的夹角 r ，分别为 0°, 15°, 30° 和 45°。图 3(b)给出了不同角度时，极化转换器的极化转换率的变化曲线。可以看出，倾角的变化对极化转换率产生了显著影响，由于矩形的对称性，将倾角变化范围设定在 0°~45° 之间，随着倾角的增大，极化转换率有明显的提高。因此设置 $r=45^\circ$ ，此时该线极化转换器可以在更宽的工作带宽上获得更高的极化转换率。

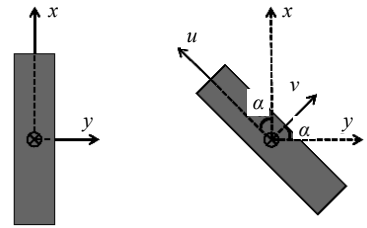


Fig.1 Polarization analysis of artificial micro structure
图 1 人工微结构极化分析

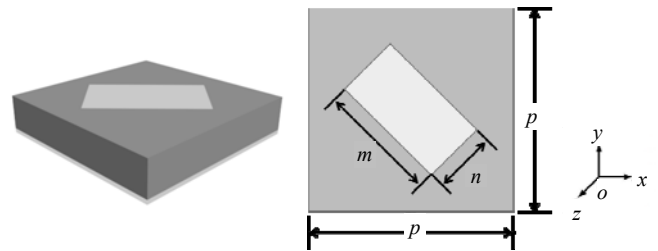


Fig.2 Unit cell of reflective metasurface
图 2 反射式超表面单元模型

1.2.3 长宽比例对极化转换性能的影响

保持矩形线长等其他参数不变, 设置线宽 n 分别为 $59\ \mu\text{m}$, $69\ \mu\text{m}$, $79\ \mu\text{m}$, $89\ \mu\text{m}$ 和 $99\ \mu\text{m}$ 。图 3(c)给出了不同线宽时, 极化转换器的极化转换率的变化曲线。可以看出, n 的变化主要影响工作带宽, 随着 n 的增大, 在 $0.4\ \text{THz}$ 处的极化转换率没有明显变化, 但在 $0.42\sim 0.7\ \text{THz}$ 之间的极化转换率有很大差别。线宽过大时($n=89$ 和 $n=99$), 工作带宽过窄; 而线宽过小时($n=59$ 和 $n=69$), 在 $0.5\ \text{THz}$ 的转换率未达到期望。综合考虑工作带宽和极化转换率, 设置 $n=79\ \mu\text{m}$, 此时该线极化转换器可在更宽的工作带宽上获得更高极化转换率。

1.2.4 衬底厚度对极化转换性能的影响

保持其他参数不变, 改变衬底厚度 t , 分别为 $35\ \mu\text{m}$, $50\ \mu\text{m}$, $65\ \mu\text{m}$, $80\ \mu\text{m}$ 和 $95\ \mu\text{m}$ 。图 3(d)给出了不同厚度时极化转换器的极化转换率的变化曲线。可以看出, 衬底厚度 t 的变化对极化转换率和工作带宽都有影响, 随着 t 的增大, 工作带宽内的极化转换率先提高, 在 $t=50\ \mu\text{m}$ 时, 达到最优, 然后逐渐降低, 且在工作带宽中心产生一个转换率偏低的凹陷。值得注意的是, 在 $t=50\ \mu\text{m}$ 附近, 该凹陷的情况并不明显。综合考虑工作带宽和极化转换率, 并进一步减小参数扫描的梯度, 设置 $t=50\ \mu\text{m}$, 此时该线极化转换器可以在更宽的工作带宽上获得更高的极化转换率。

2 超表面制备与实验表征

采用显微光刻方法制备前述的电磁超表面。图 4 为光学显微镜下观察到的超表面样品显微形貌和单元结构几何尺寸测量结果。其中, 单元对角线测量结果分别为 $357.1\ \mu\text{m}$ 和 $357.5\ \mu\text{m}$, 计算得单元结构周期为 $252.6\ \mu\text{m}$, 长为 $152.9\ \mu\text{m}$, 宽为 $82.5\ \mu\text{m}$ 。与仿真模型单元结构(周期为 $250\ \mu\text{m}$, 矩形结构长为 $150\ \mu\text{m}$, 宽为 $79\ \mu\text{m}$)相比, 误差较小, 实物各参数基本符合要求。

采用图 5 的太赫兹时域光谱系统的反射测试模块表征超表面的太赫兹极化转换特性。光谱系统的发射天线和接收天线的工作模式均为水平极化。首先, 在太赫兹波垂直入射条件下, 测量金属镜的反射光谱作为参考谱; 测量超表面样品的反射光谱, 获得同极化反射谱; 在光路中加入商用 90° 线极化转换器, 测量样品的反射光谱, 即可获得交叉极化(竖直极化)反射光谱。

3 结果与讨论

图 6(a)给出了时域的参考谱和样品的反射光谱, 通过时域 $6\sim 10\ \text{ps}$ 波形变化可以看出, 在添加了超表面后, x 方向即共极化波幅度明显减小, 交叉极化波幅度明显增大。采用 FFT 方法得到频域参考谱和样品的反射谱, 计算得到同极化和交叉极化下的反射率, 结果见图 6(b)。

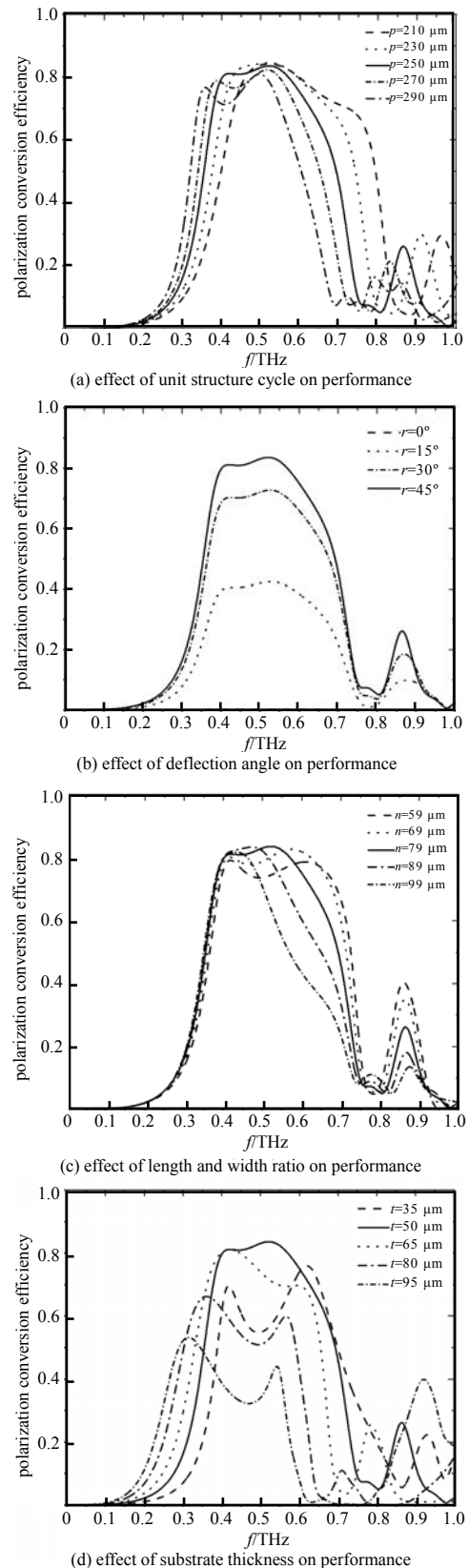


Fig.3 Analysis and discussion on geometric parameters of the unit cell
图 3 单元结构几何参数分析与讨论

工作频率为 0.5 THz 时的极化转换效率超过 75%，并在 0.35~0.65 THz 的频段内极化转换效率超过 50%，实现宽带，表现出较为理想的极化偏转特性。

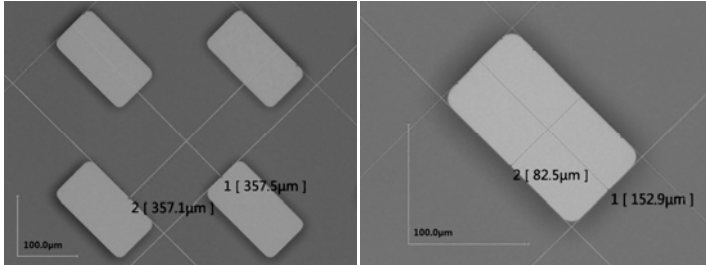


Fig.4 Micro-photograph of metasurface sample
图 4 超表面样品的显微形貌照片

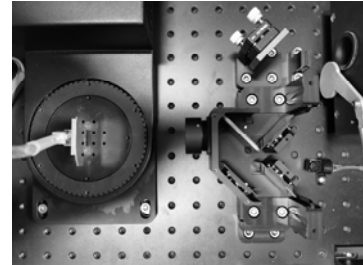


Fig.5 Light path of terahertz reflection measurement
图 5 太赫兹反射光谱测量光路

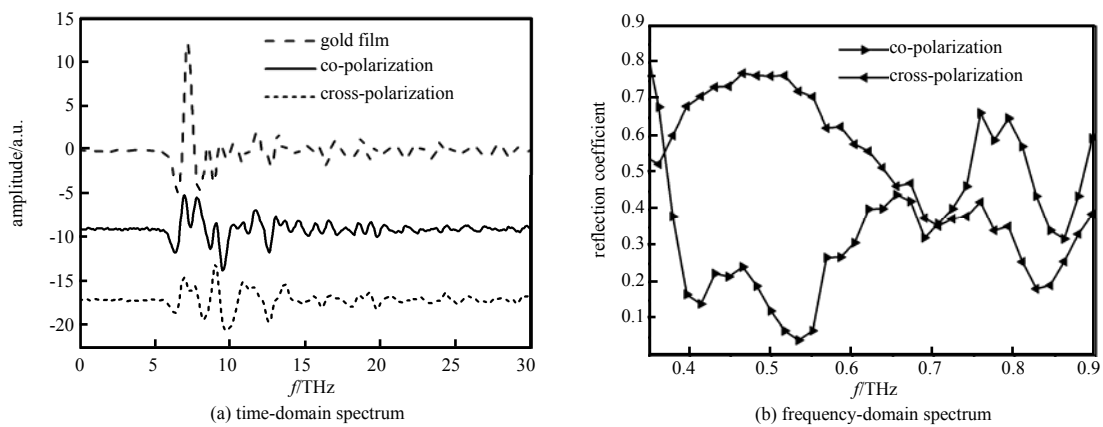


Fig.6 Experimental results of terahertz reflection spectra
图 6 太赫兹反射光谱测试结果

4 结论

本文采用数值仿真和实验相结合的方法研究了基于电磁超表面的反射式太赫兹波束线极化转换器件,实现了太赫兹波束 90° 极化偏转,在工作频率(0.5 THz)达到高效转换(超过 75%),且实现了宽带特性(在 0.35~0.65 THz 极化转换效率超过 50%)。另外,超薄玻璃衬底的使用可以使超表面厚度小、质量轻且具有一定的机械强度和较好的耐高温特性,综合性能优异。太赫兹超表面极化调控器件研究,揭示了太赫兹波与超表面相互作用的新物理、新现象,为高效表面波耦合、平板式棱镜和超表面全息成像等新概念的发展提供了理论基础,同时拓展了人们调控电磁波的空间,为太赫兹技术在成像、通信等方面的应用奠定基础。

致谢: 感谢东南大学信息科学与工程学院傅晓建副教授对本工作的指导!

参考文献:

- [1] 孙树林,何琼,周磊. 电磁超表面[J]. 物理, 2015,44(6):366-376. (SUN Shulin,HE Qiong,ZHOU Lei. Electromagnetic surfaces[J]. Physics, 2015,44(6):366-376.)
- [2] 梁达川,关松. 太赫兹波无损检测技术及其应用[J]. 光电技术应用, 2018,33(6):1-8. (LIANG Dachuan,GUAN Song. Terahertz wave nondestructive testing technology and its application[J]. Application of Optoelectronic Technology, 2018, 33(6):1-8.)
- [3] 孙国安. 电磁场与电磁波理论基础[M]. 南京:东南大学出版社, 2003. (SUN Guoan. The theoretical foundation of electromagnetic field and electromagnetic wave[M]. Nanjing,China:Southeast University Press, 2003.)
- [4] RYZHKOV A V,GIANGRANDE S E,MELNIKO V M,et al. Calibration issues of dual-polarization radar measurements[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2004,22(8):1138-1155.
- [5] MALTSEV A,PERAHIA E,MASLENNIKOV R,et al. Impact of polarization characteristics on 60 GHz indoor radio communication systems[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2010,9(1):413-416.

- [6] 孙树林,何琼,肖诗逸,等. 梯度特异介质表面研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013,50(8):81–95. (SUN Shulin,HE Qiong,XIAO Shiyi,et al. Research progress on gradient meta-surfaces[J]. Advances in Laser and Optoelectronics, 2013, 50(8):81–95.)
- [7] GENEVET P,YU N,AIETA F,et al. Ultra-thin plasmonic optical vortex plate based on phase discontinuities[J]. Applied Physics Letters, 2012,100(1):013101.
- [8] 王腾,张岩. 动态可调的太赫兹超构表面[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(3):368–372. (WANG Teng,ZHANG Yan. Dynamic tunable terahertz ultra structure surface[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(3):368–372.) doi:10.11805/TKYDA201903.0368.
- [9] YEN T J,PADILLA W J,FANG N,et al. Terahertz magnetic response from artificial materials[J]. Science, 2004,303(5663): 1494–1499.
- [10] LIU S,CHEN H B,CUI T J. A broadband terahertz absorber using multi-layer stacked bars[J]. Applied Physics Letters, 2015,106(15):151601.
- [11] JU L,GENG B,HORNG J,et al. Graphene plasmonics for tunable terahertz metamaterials[J]. Nature Nanotechnology, 2011, 6(10):630–634.
- [12] LEE S H,CHOI M,KIM T T,et al. Switching terahertz waves with gate-controlled active graphene metamaterials[J]. Nature Materials, 2012,11(11):936–941.
- [13] YU N F,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.
- [14] CUI T J,QI M Q,WAN X,et al. Coding metamaterials,digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. Light: Science and Applications, 2014,3(10):e218.
- [15] GAO L H,CHENG Q,YANG J,et al. Broadband diffusion of terahertz waves by multi-bit coding metasurfaces[J]. Light: Science & Applications, 2015,4(9):e324.
- [16] LIU S,CUI T J,XU Q,et al. Anisotropic coding metamaterials and their powerful manipulation of differently polarized terahertz waves[J]. Light Science & Applications, 2016(2):131–141.
- [17] LIU S,ZHANG L,YANG Q L,et al. Frequency-dependent dual-functional coding metasurfaces at terahertz frequencies[J]. Advanced Optical Materials, 2016,4(12):1965–1973.
- [18] GRADY N K,HEYES J,CHOWDHURY D R,et al. Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction[J]. Science, 2013,340(6138):1304–1307.
- [19] CHENG Y Z,WITHAYACHUMNANKUL W,UPADHYAY A,et al. Ultrabroadband reflective polarization convertor for terahertz waves[J]. Applied Physics Letters, 2014,105(18):181111–181114.
- [20] 周璐,赵国忠,李永花. 基于 L 形超材料的太赫兹宽带偏振转换器[J]. 激光与光电子学进展, 2018,55(4):298–302. (ZHOU Lu,ZHAO Guozhong,LI Yonghua. Terahertz broadband polarization converter based on L-shaped metamaterials[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2018,55(4):298–302.)
- [21] 付亚男,张新群,赵国忠,等. 基于谐振环的太赫兹宽带偏振转换器件研究[J]. 物理学报, 2017,66(18):180701-1–180701-9. (FU Yanan,ZHANG Xinqun,ZHAO Guozhong,et al. A broadband polarization converter based on resonant ring in terahertz region[J]. Acta Physica Sinica, 2017,66(18):180701-1–180701-9.)

作者简介:

汪 域(2000–), 男, 杭州市人, 在读本科生, 信息工程专业.email:wymmm648@163.com.

李子晗(1999–), 男, 南京市人, 在读本科生, 信息工程专业.