

文章编号: 2095-4980(2021)03-0361-05

宽入射角高效宽带超表面太赫兹线极化转换器

尹波, 马越*, 张晓玲, 刘伽利, 夏禾禾, 张玉瑶, 梁景瑞

(重庆邮电大学 光电工程学院, 重庆 400065)

摘要: 为解决当前太赫兹频段下的极化转换器件带宽窄和带内转换率低的问题, 设计了一款基于超表面的高效率太赫兹线极化转换器。通过在两端增加一对谐振枝节的方法, 将原本的单谐振频点变为2个, 增加了极化转换器的工作带宽。另一方面, 利用超表面在电磁谐振时的高阻抗表面特性, 获得了极低的同极化反射系数, 提高了带内的总体转换效率。仿真结果显示, 该结构能够在0.401~0.555 THz的宽频带范围内实现高效率的线极化转换, 相对带宽约为32.5%, 带内转换率高于95%。在理论分析方面, 通过对高转换率频率下的表面电流与相位的仿真, 阐明了宽带高转换率的机理。研究了该结构对于太赫兹波入射角度的依赖性, 结果表明, 该结构在0°~40°的入射角范围内均可保持较好的极化转换性能。同时, 这款极化转换器具有设计简单的优点, 这些工作能够对宽带高效的超表面极化转换器件设计提供设计思路。

关键词: 超表面; 太赫兹; 极化转换器

中图分类号: O441

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020518

Terahertz high-efficiency broadband metasurface polarization converter with wide incident angle

YIN Bo, MA Yue*, ZHANG Xiaoling, LIU Jiali, XIA Hehe, ZHANG Yuyao, LIANG Jingrui
(Institute of Photoelectric, Chongqing University of Post and Telecommunication, Chongqing 400065, China)

Abstract: A high-efficiency broadband polarization converter based on metasurface is proposed in order to broaden the working bandwidth of the polarization converter in terahertz band as well as improving the polarization conversion ratio. By adding a couple of resonating branches, the original single resonating point is increased to two, dramatically increasing the working bandwidth of the polarization converter. The low co-polarized reflectance is acquired through the characteristic of high-resistance surface when the metasurface is under electro-magnetic resonance, which could enhance the overall polarization conversion rate. The simulation results illustrate that this structure is able to achieve high polarization conversion in 0.401–0.555 THz with conversion ratio above 95%. The mechanism for high-efficiency broadband polarization conversion is discussed through simulating the reflect phase and surface current distribution. The dependence of the structure on the incident angle of terahertz waves is studied. The results show that this structure is able to maintain high conversion ratio at incident angle within 0°–40°. In addition, this design has advantage of simple structure. These works can help in the design of broadband efficient metasurface polarization converter.

Keywords: metasurface; terahertz; polarization converter

极化在电磁波的传输中扮演了十分重要的角色。不论是在发射与接收中的极化匹配, 还是在电磁波的传输过程中采用不同的极化以避免干扰, 都需运用极化转换器件。太赫兹极化转换器件在太赫兹成像^[1]与无损医疗方面有着极为重要的应用价值, 如在太赫兹时域光谱中对生物大分子的测量^[2]、太赫兹偏振成像与霍尔效应测量等。由于传统的基于双折射与法拉第效应的极化转换器件^[3]较为依赖材料的电磁特性, 其在太赫兹频段内会存在转换

收稿日期: 2020-10-12; 修回日期: 2021-01-05

作者简介: 尹波(1976–), 男, 教授, 主要研究方向为天线理论与技术、射频微波电路。email:389233516@qq.com

*通信作者: 马越 s180431047@stu.cqupt.edu.cn

率较低,工作频段窄和物理尺寸较大等问题。人工电磁超表面的出现可以很好地解决以上问题^[4-16],相比于自然材料,超表面可以提供特定的电磁特性,以实现太赫兹波的相位、振幅、极化、传输方向等的自由控制;同时,由于其厚度小于波长,器件的物理尺寸也会小很多,克服了传统材料体积大、损耗大等局限,满足了小型化设计需求。2013年,N K Grady 等^[4]通过金属短线的方式设计了一款线极化转换器。入射波在金属短线处激发偶极子振荡引起极化转换效果,在 0.8~1.2 THz 实现了线极化转换,但转换效率不足。2014年,Wen 等^[5]设计了一款基于开口双圆环的线极化转换器,该极化转换器能够在 0.7~1.3 THz 实现一个宽带的线极化转换。该设计通过中心圆片加强了 F-P 腔体结构,提高了整体的转换率。2016年,Luo 等^[6]通过非对称的开口谐振环实现了在 0.4~1.2 THz 频段范围内的 4 个谐振频点,并在论文中对各个频点的形成进行了一定的分析。2018年,Zhang 等^[7]通过椭圆形金属片设计了一款线极化转换器,该转换器件采用了石墨烯衬底。论文中对椭圆的长短轴和石墨烯对极化转换率的影响进行了分析。该结构能够在 0.75~1.31 THz 实现宽带的极化转换相对带宽 54%,同时其极化转换峰值能够达到 99%。但椭圆形图案在微米级加工时难以保证精确度,多层石墨烯也存在成本较高的问题。综上,在太赫兹频段下,具有简单结构的、同时能够保证高效率的极化转换器设计仍是当下研究的热点。

本文提出了一种结构简单的太赫兹线极化转换器,由金属-介质基板-金属构成。上层金属为哑铃形,底层由全金属板覆盖。这种设计会形成一个类似于法布里-珀罗谐振腔的结构,可以让入射波在顶层金属图案与底层金属板之间激发多次电磁谐振,提高了整体的转换效率,实现相对带宽约 32.5%,带内转换率在 95%以上,并且在 0°~40°的入射角范围内,该结构都具有较好的极化转换性能。

1 设计与仿真

1.1 基础理论

当一束 y 极化平面波垂直入射到超表面线极化转换器表面时,反射波的电场可表示为:

$$\mathbf{E}_r = \mathbf{E}_x^r e^{-jkz} \hat{x} + \mathbf{E}_y^r e^{-jkz} \hat{y} \quad (1)$$

式中 \mathbf{E}_x^r 与 \mathbf{E}_y^r 分别代表反射波在 x 与 y 方向上的分量。

定义同极化反射系数 $r_{yy} = \frac{|\mathbf{E}_y^r|}{|\mathbf{E}_y^i|}$ 与交叉极化反射系数 $r_{xy} = \frac{|\mathbf{E}_x^r|}{|\mathbf{E}_y^i|}$ 。因此可以将式(1)改写为:

$$\mathbf{E}_r = r_{yy} e^{-j(kz-\varphi_{yy})} \mathbf{E}_y^i \hat{y} + r_{xy} e^{-j(kz-\varphi_{xy})} \mathbf{E}_y^i \hat{x} \quad (2)$$

式中: φ_{yy} 为 y 极化到 y 极化的反射相位; φ_{xy} 为 y 极化到 x 极化的反射相位。

从式(2)可看出,当 $r_{yy}=0$ 时,反射波表达式为 $\mathbf{E}_r = r_{xy} e^{-j(kz-\varphi_{xy})} \mathbf{E}_y^i \hat{x}$,只有 x 方向上的电场分量,即为 x 极化波。为量化极化转换能力,将极化转换率(Polarization Conversion Ratio, PCR)定义为:

$$PCR = \frac{r_{xy}^2}{r_{yy}^2 + r_{xy}^2} \quad (3)$$

1.2 结构设计

图 1 为本文设计的超表面单元示意图,单元结构为 3 层式设计,上下金属层为铜,中间介质基板为硅。单元的几何结构参数如下:单元周期 $a=100 \mu\text{m}$;中间金属线长 $l_1=86 \mu\text{m}$,线宽 $w_1=4 \mu\text{m}$;两头金属线线长 $l_2=6 \mu\text{m}$,线宽 $w_2=2 \mu\text{m}$;介质基板厚度 $h=40 \mu\text{m}$ 。

在电磁仿真软件 CST 中利用频域求解器进行仿真, x 和 y 方向上边界条件设为 unit cell 周期性边界条件, z 方向上边界条件设为 open add space,电磁波沿 z 轴负方向垂直入射超表面,分别设置了 x 极化与 y 极化波入射,得到的仿真结果如图 2 所示。

从仿真结果可以看出,当 x 极化波与 y 极化波垂直入射时,该结构能够在 0.395~0.565 THz 实现高极化转换效果,极化转换率高于 95%,相对带宽约 32.5%。在 0.418 THz 与 0.521 THz 这 2 个频点附近能够实现 99.9%的极化转换率。

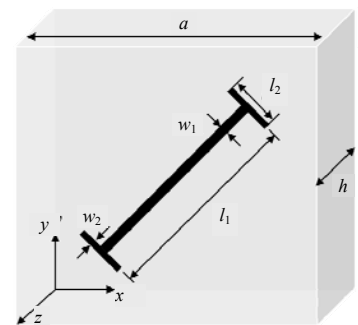


Fig.1 Schematic of the unit cell structure
图 1 超表面单元结构示意图

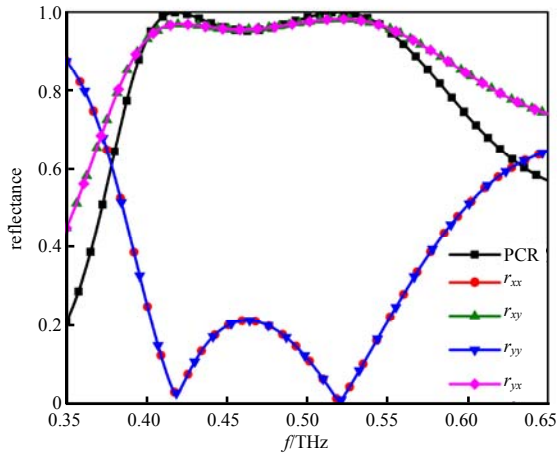


Fig.2 Simulation results for vertical incident x and y polarized waves
图 2 x 与 y 极化波垂直入射的仿真结果

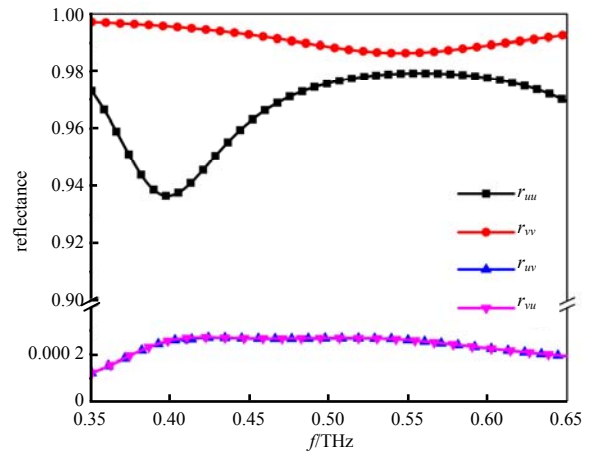


Fig.3 Co-reflectance for u and v polarized incident waves
图 3 u 与 v 极化波入射的同极化反射系数

2 仿真结果与机理分析

为便于说明该极化转换器的工作原理, 将坐标轴沿 $z+$ 轴逆时针旋转 45° 后得到 u, v 轴。将入射波的极化方向改为沿 u, v 轴入射后得到的共极化与交叉极化反射系数的仿真结果如图 3 所示。

从图 4 可以看出, 当 u 与 v 极化波分别垂直入射超表面时, 该极化转换器分别在 0.407 THz 与 0.527 THz 处产生了谐振。设一个沿 y 方向极化的电磁波垂直入射该极化转换器, 将入射电场表示为 u 与 v 两个方向的表达式:

$$\mathbf{E}_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \mathbf{E}_1 e^{-jkz} \hat{u} + \frac{\sqrt{2}}{2} \mathbf{E}_1 e^{-jkz} \hat{v} \quad (4)$$

经过极化转换器转换反射后, 反射出的电磁波可以表示为:

$$\mathbf{E}_r = \frac{\sqrt{2}}{2} [r_{uu} \mathbf{E}_1 e^{-j(kz-\phi_{uu})} + r_{vu} \mathbf{E}_1 e^{-j(kz-\phi_{vu})}] \hat{u} + \frac{\sqrt{2}}{2} [r_{vv} \mathbf{E}_1 e^{-j(kz-\phi_{vv})} + r_{uv} \mathbf{E}_1 e^{-j(kz-\phi_{uv})}] \hat{v} \quad (5)$$

式中: ϕ_{uv} 为从 u 极化到 v 极化的反射相位; r_{uv} 为从 u 极化到 v 极化的反射系数。从图 3 可以看出, 在整个 $0.35 \sim 0.65 \text{ THz}$ 范围内, u 极化与 v 极化之间的交叉反射系数一直很低, 可以忽略不计。即式(5)可以改写为:

$$\mathbf{E}_r = \frac{\sqrt{2}}{2} [r_{uu} \mathbf{E}_1 e^{-j(kz-\phi_{uu})}] \hat{u} + \frac{\sqrt{2}}{2} [r_{vv} \mathbf{E}_1 e^{-j(kz-\phi_{vv})}] \hat{v} \quad (6)$$

在 0.407 THz 与 0.527 THz 处, 其相位差 $\Delta\phi = \phi_{vv} - \phi_{uu}$ 在这两个频点处存在突变, 且这两个频点附近的相位差值为 $-180^\circ \pm 10^\circ$ 。对比式(2)与式(6)可以看出, 当 $\Delta\phi = \pi + 2k\pi$ ($k \in \mathbf{Z}$) 时, 反射电磁波的传播方向为 $-\hat{u} + \hat{v}$, 此方向与入射的 y 方向即 $\hat{u} + \hat{v}$ 相互垂直, 证明了该极化转换器能够在这个频段内将入射的 y 极化波转换为 x 极化波。

通过在 0.407 THz 与 0.527 THz 处的表面电流分布能说明该结构在这两个频点形成 180° 相位差的原因。如图 5 所示, 在 0.407 THz 时, 上表面的电流流向与金属背板的表面电流流向相反, 说明此时的超表面结构处于一个强烈的磁谐振状态。对于处于磁谐振的各向异性材料, 该材料的磁导率趋于无穷大, 介电常数不变, 根据阻抗公式 $Z = \sqrt{\mu/\epsilon}$ 可知, 在磁谐振状态下的超表面呈现出高阻抗表面特性, 其反射相位趋于 180° 。在 0.527 THz 时, 上表面的电流流向与金属背板的表面电流流向相互垂直, 此时的超表面结构处于强烈的电谐振状态。在电谐振状态下的各向异性材料, 其磁导率不变, 而介电常数趋于无穷小。同样根据阻抗公式能看出, 在电谐振状态下超表面也呈现出高阻抗表面特性, 在 0.527 THz 附近也能够保持 $-180^\circ \pm 10^\circ$ 的反射相位差。由于 2 个相近的电磁谐振点与高阻抗表面特性, 整个频带被拓宽并能够保持带内极高的转换效率。

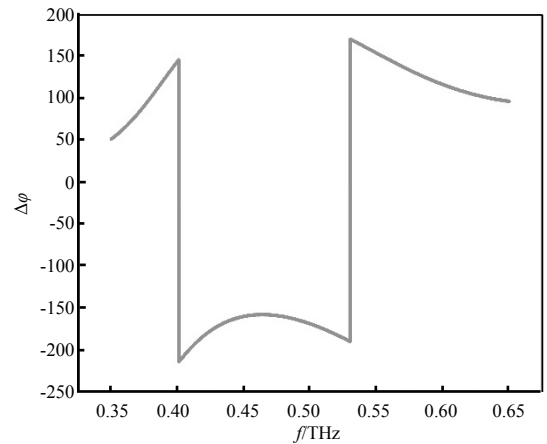


Fig.4 Phase difference for u and v polarized incident waves
图 4 u 与 v 极化波反射相位差

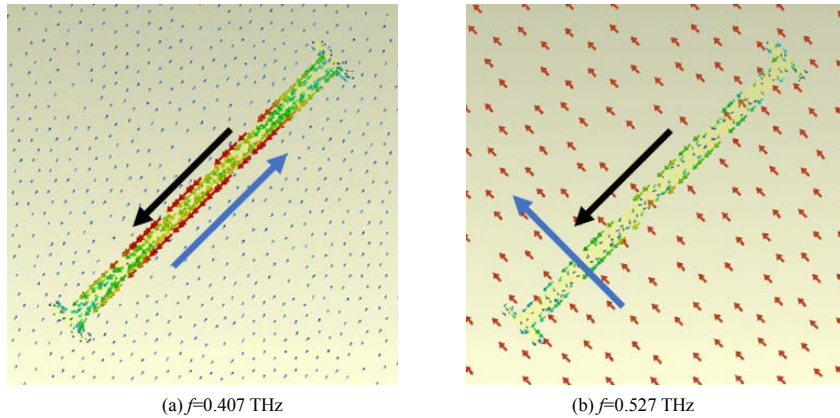


Fig.5 Surface current distribution at different frequencies
图 5 不同频率下表面电流分布图

为更好地说明宽带高效的极化转换机理，对不同的枝节长度 w_2 进行仿真，结果如图 6 所示。可以看出，通过调节枝节长度可以对较低频率的谐振频点进行调控。当枝节长度越长时，该谐振频点的频率越低，与 0.527 THz 处的谐振频点越远，2 个频点之间的极化转换效率恶化。当 $w_2=6 \mu\text{m}$ 时，既可以保持一个较宽的工作带宽，又能使带内有极高的极化转换效率。

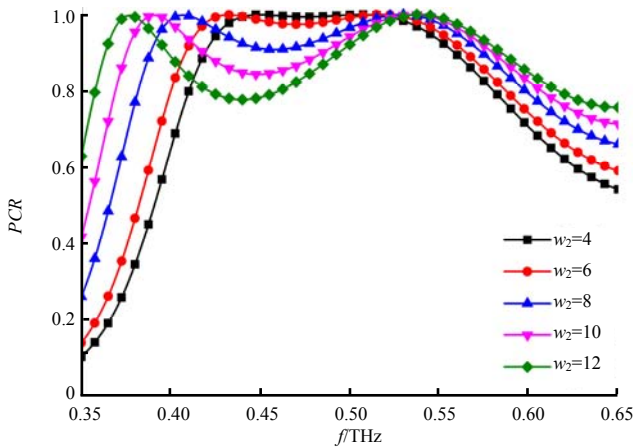


Fig.6 PCR with varied length w_2
图 6 不同枝节长度 w_2 下的极化转换率

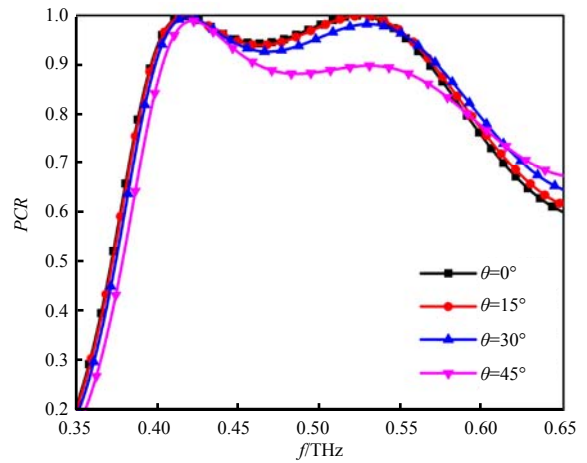


Fig.7 PCR at different incident angles
图 7 不同入射角下的极化转换率

在太赫兹波段，反射型极化转换器对入射角的依赖性越小，其实际的应用场景就越广阔。因此极化转换器的转换效率对入射角的依赖性是一个十分重要的性能指标。对该设计的极化转换率对入射角的依赖性进行仿真分析，结果如图 7 所示。从图 7 可以看出，随着入射角度的增大，该结构在 0.532~0.575 THz 内的转换率降低极为明显。为说明该现象，对 45° 入射角斜入射情况下，沿 u, v 极化波入射的相位差情况进行仿真，结果见图 8。从图 8 可以看出，在 0.532~0.575 THz 范围内，其相位已经小于 -180° ，此时的反射电磁波已经不沿 $\hat{u}-\hat{v}$ 方向反射。取 0.550 THz 处的反射相位差 $\Delta\phi=-192.48^\circ$ 进行计算验证，其方向为 $-0.623\hat{u}+1.781\hat{v}$ ，与 y 极化入射波 $\hat{u}+\hat{v}$ 方向的夹角为 70.72° 。将该反射波沿 x, y 方向分解后，得到 $\tan 70.72^\circ=2.859$ ，即 $E_x^r/E_y^r=2.859$ 。将该结果代入极化转换率公式计算，得到 $PCR=89.10\%$ ，与在 0.550 THz 处的仿真结果 $PCR=88.89\%$ 相近，符合仿真结果。

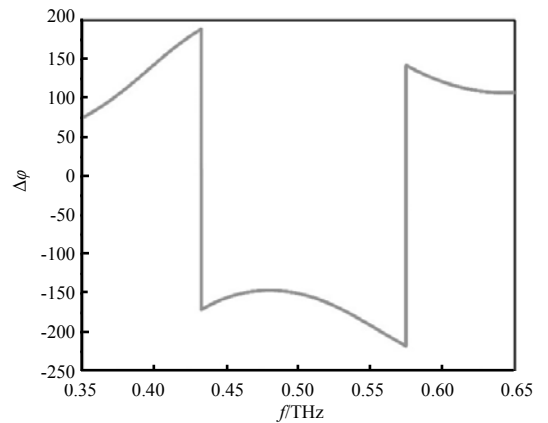


Fig.8 Phase difference of u - and v -polarized waves at 45° incident angle
图 8 45° 入射角 u 与 v 极化波反射相位差

3 结论

本文设计了一款入射角低依赖的高效率极化转换器。这种设计可以让入射波在顶层金属图案与底层金属板之间激发多次电磁谐振,提高了整体的转换效率,相对带宽约32.5%,带内转换率在95%以上。通过对相位差与表面电流分布的分析,阐述了高转换率的物理机理。同时对入射角低依赖的原理进行了分析,入射角度上升后的极化转换率与计算基本相符。本文仅基于超表面设计了一款宽带高效极化转换器,后续的工作将对该设计进行加工测试,分析测试结果,并将该设计与超表面的其他技术点进行结合,如采用梯度相位的形式排布以达到异常反射的效果。

参考文献:

- [1] SAQUEB S A N, SERTEL K. Multisensor compressive sensing for high frame-rate imaging system in the THz band[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2019,9(5):520–523.
- [2] LI R D, YIN B C, YE B C. Ultrasensitive, colorimetric detection of microRNAs based on isothermal exponential amplification reaction-assisted gold nanoparticle amplification[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2016(86):1011–1016.
- [3] BOSTER M F. A new type of circular polarizer using crossed dipoles[J]. *Microwave Theory*, 1961,9(5):385–388.
- [4] GRADY N K, HEYES J E, CHOWDHURY D R, et al. Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction[J]. *Science*, 2013,340(6138):1304–1307.
- [5] WEN X, ZHENG J. Broadband THz reflective polarization rotator by multiple plasmon resonances[J]. *Optics Express*, 2014, 22(23):28292–28300.
- [6] LUO F, LAN F, YANG Z, et al. Multiband terahertz reflective polarizer based on asymmetric L-shaped split-ring resonators metasurface[C]// 2016 11th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). Guilin, China: IEEE, 2016:905–907.
- [7] ZHANG H, CHENG Y. Tunable terahertz reflective linear polarization convertor based on oval-shape-perforated graphene metasurface[C]// 2018 Asia Communications and Photonics (ACP) Conference. Hangzhou, China: IEEE, 2018:1–4.
- [8] KONG G S, WANG G Z, MA H F, et al. Broadband circular and linear polarization conversions realized by thin birefringent reflective metasurfaces[J]. *Optical Materials Express*, 2014,4(8):1717–1724.
- [9] HEADLAND D, NIU T, CARRASCO E, et al. Terahertz reflectarrays and nonuniform metasurfaces[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016,23(4):1–18.
- [10] CHEN L, QU S W, CHEN B J, et al. Terahertz metasurfaces for absorber or reflectarray applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016,65(1):234–241.
- [11] WU J, DA X, WU K, et al. Circularly polarized high efficiency wideband reflectarray using rectangle-shaped patch element[J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2017,27(5):108–115.
- [12] HUANG H F, LI S. High-efficiency planar reflectarray with small-size for OAM generation at microwave range[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019,18(3):432–436.
- [13] XU L, CURWEN C A, CHEN D, et al. Terahertz metasurface quantum-cascade VECSELS: theory and performance[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017,23(6):1–12.
- [14] 周璐, 赵国忠, 李晓楠. 基于双开口谐振环超表面的宽带太赫兹涡旋光束产生[J]. *物理学报*, 2019,68(10):297–304. (ZHOU Lu, ZHAO Guozhong, LI Xiaonan. Broadband terahertz vortex beam generation based on metasurface of double-split resonant rings[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019,68(10):297–304.)
- [15] 余积宝, 马华, 王甲富, 等. 基于开口椭圆环的高效超宽带极化旋转超表面[J]. *物理学报*, 2015,64(17):377–383. (YU Jibao, MA Hua, WANG Jiafu, et al. High-efficiency ultra-wideband polarization conversion metasurfaces based on split elliptical ring resonators[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015,64(17):377–383.)
- [16] 张盟, 袁雪琪, 王学田, 等. 一种太赫兹波段宽带反射型极化变换器[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2018,16(3):388–392. (ZHANG Meng, YUAN Xueqi, WANG Xuetian, et al. A broadband terahertz reflective polarization converter[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2018,16(3):388–392.)