

基于各向异性超表面的太赫兹宽带偏振转换器

李永花, 周璐, 赵国忠

首都师范大学物理系, 太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048

摘要 提出了一种基于各向异性超表面的太赫兹宽带偏振转换器, 该器件由金属-电介质-金属三层构成, 位于顶层的是沿对角线相交的正方形谐振腔, 底层为金属板, 中间被介质层隔开。通过仿真计算该结构在所研究频率范围内的反射比和偏振转换率, 结果表明该偏振转换器可以在 0.4~1.04 THz 频率范围内将线偏振的太赫兹波偏振方向旋转 90°, 转换率达 90% 以上。同时, 在偏振转换率高的频率下对该结构表面电流分布进行仿真, 分析了高偏振转换率的机理。该偏振转换器与以前的设计相比不但结构简单, 而且工作带宽较宽, 在太赫兹波的偏振调制方面具有潜在的应用价值。

关键词 光学器件; 太赫兹; 宽带; 偏振转换; 超表面; 偏振转换率

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0314001

Terahertz Broadband Polarization Converter Based on Anisotropic Metasurface

Li Yonghua, Zhou Lu, Zhao Guozhong

Department of Physics, Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China

Abstract A terahertz broadband polarization converter based on anisotropic metasurface is proposed, which is composed of metal-dielectric-metal three layers. The top layer is a square-shaped resonator intersecting along a diagonal line. The bottom layer is the metal plate. The top and bottom layers are separated by a dielectric layer. The reflection ratio and polarization conversion rate of the structure in the studied frequency range are calculated by simulation. The results show that the polarization converter can rotate the polarization direction of the linearly polarized terahertz wave 90° in the frequency range of 0.4-1.04 THz, and the conversion rate is more than 90%. Meanwhile, the distribution of the surface current of the structure is simulated at the frequency with high polarization conversion rate, and the mechanism of high polarization conversion rate is analyzed. Compared with the previous design, the polarization converter has a simple structure and a broad operation bandwidth, and has a potential application value in the field of terahertz polarization modulation.

Key words optical devices; terahertz; broadband; polarization conversion; metasurfaces; polarization conversion rate

OCIS codes 230.5440; 160.3918; 300.6495; 260.5430

1 引 言

太赫兹波有安全性、透视性、吸水性、高分辨等诸多优越特性, 在光谱^[1-4]、成像^[5-7]、无损检测^[8-10]

等领域具有重要的应用价值。作为电磁波的一个重要的物理性质, 偏振在很多方面(如无线通信^[11]、成像^[12]、探测器^[13]等)具有广泛的应用。而改变太赫兹的偏振态是太赫兹领域的一个重大挑战。传统控

收稿日期: 2017-09-18; 收到修改稿日期: 2017-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(61575130, 61575131, 50971094)、北京市自然科学基金和北京市教育委员会科技计划重点项目(KZ201310028032)

作者简介: 李永花(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事太赫兹波段光子功能材料和器件机理方面的研究。

E-mail: 1909577101@qq.com

导师简介: 赵国忠(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事太赫兹波段光子功能材料和器件机理方面的研究。

E-mail: guozhong-zhao@126.com(通信联系人)

制偏振的方法是利用自然双折射材料或具有延迟效应的二色性晶体作为波片,使两个正交偏振分量之间形成相位延迟^[14-17]。然而,这些方法由于受晶体基本性质的限制,使得器件本身比较复杂且工作带宽窄。近年来,超表面控制太赫兹波的偏振成为了热门课题。超表面是一种人工合成的二维周期性平面阵列结构,它的厚度远远小于波长。近年来,利用超材料控制偏振已取得了相当大的进步,为调控太赫兹波的偏振提供了良好的基础。例如,基于新型手性螺旋结构的偏振转换器^[18],在两个太赫兹频率处实现了线偏振波到交叉偏振波的转换。E形、F形和U形等多带偏振转换器等^[19-21],在多个频率处实现线偏振波到交叉偏振波和圆偏振波的转换。但这些器件大多数都工作在微波波段且带宽很窄,不利于实际应用。而太赫兹波段的宽带高效偏振转换器,大多通过多层结构以及复杂的图形实现。例如,2013年 Grady 等^[22]提出的基于金属切割线结构的反射式偏振转换器,在 0.65~1.87 THz 频率范围内,偏振转换效率为 50%;在 0.8~1.36 THz 频率范围内,偏振转换效率达到 80%;而在 1.36 THz 处,最高偏振转换效率为 88%,转换效率相对较低。又如:2016年 Li 等^[23]提出了基于 Z 形的宽带偏振转换器,在 0.116~0.26 THz 频率范围内,偏振转换效率达到 80%以上,但工作带宽很窄。为了实现宽带且高效的偏振转换器,2017年, Jing 等^[24]提出了基于双层超材料耦合的宽带线偏振转换器,可以在 0.73~1.41 THz 频率范围内实现线偏振波到交叉偏振波的转换;另外, Cheng 等^[25]提出了由光栅-分裂磁盘结构-光栅三层结构组成的超宽带线偏振转换器,可以实现宽带、高效的线偏振转换。但众所周知,复杂的图形和多层结构都存在制备困难和成本高等问题。因此,目前急需宽带和简易结构的高效太赫兹宽带偏振转换器。本文提出了一种基于各向异性超表面的偏振转换器,可以在太赫兹波段实现宽带、高效的偏振转换,且相比于以前的设计结构简单,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

2.1 结构设计

图 1 为偏振转换器的单元结构图,它由金属-电介质-金属三层结构构成,顶层为互补的正方形金属结构,中间为介质层,材料为聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET),底层为金属板。单元结构的几何参数定义如下:周期 $P=200\ \mu\text{m}$, $a=b=80\ \mu\text{m}$, $c=62\ \mu\text{m}$,

$d_1=0.2\ \mu\text{m}$, $d_2=50\ \mu\text{m}$ 。入射电磁波电场为沿着 Y 方向的线偏振光,波矢 \mathbf{k} 沿着 Z 轴正方向。

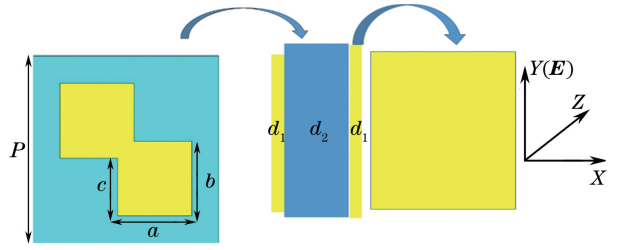


图 1 偏振转换器单元结构示意图

Fig. 1 Schematic of the unit structure of polarization converter

2.2 结构仿真分析

为了研究该结构的偏振转换性能,利用 CST Microwave Studio 软件对该结构进行了仿真。由于结构本身具有各向异性,反射波存在同向偏振和交叉偏振两个分量。同向偏振是反射波的偏振方向与入射波的偏振方向相同,而交叉偏振是反射波的偏振方向与入射波的偏振方向垂直。本研究对反射率的定义如下:

$$R_{yy} = \left| \frac{E_{yr}}{E_{yi}} \right|^2, \quad R_{xy} = \left| \frac{E_{xr}}{E_{yi}} \right|^2, \quad (1)$$

式中 E_{yi} 代表偏振方向沿着 Y 轴入射的太赫兹波的振幅, E_{xr} 代表偏振方向沿着 X 轴反射的太赫兹波的振幅, E_{yr} 代表偏振方向沿着 Y 轴反射的太赫兹波振幅。 R_{yy} 和 R_{xy} 分别代表 y 偏振到 y 偏振和 y 偏振到 x 偏振的反射率。基于此,也给出了偏振转换率 R_{PC} 及反射波相位差的定义:

$$R_{PC} = \frac{R_{yx}}{R_{xx} + R_{yx}}, \quad (2)$$

$$\Delta\Psi = \Psi_{xy} - \Psi_{yy}, \quad (3)$$

式中 R_{xx} 和 R_{yx} 分别代表 x 偏振到 x 偏振和 x 偏振到 y 偏振的反射率。 Ψ_{yy} 表示 y 偏振到 y 偏振的反射相位, Ψ_{xy} 表示 y 偏振到 x 偏振的反射相位。仿真结果如图 2 所示。

由图 2 可以看出,该结构在 0.37~1.05 THz 频率范围内将线偏振的太赫兹波的偏振方向旋转 90°,在这里即指将偏振方向沿着 Y 轴入射的太赫兹波转换为偏振方向沿着 X 轴的太赫兹波,偏振转换率达 80%以上。而在 0.40, 0.617, 0.944, 1.034 THz 这 4 个频率处,交叉反射率都在 95%以上,而同向反射率接近 0,偏振转换率最高近似为 1,证明了入射波的偏振方向沿着 Y 轴转换为偏振方向沿着 X 轴。同时,从图 2(a)和(c)可以看出,在 0.355 THz 和 1.056 THz 处,反射波的同向偏振反射率和交叉偏振

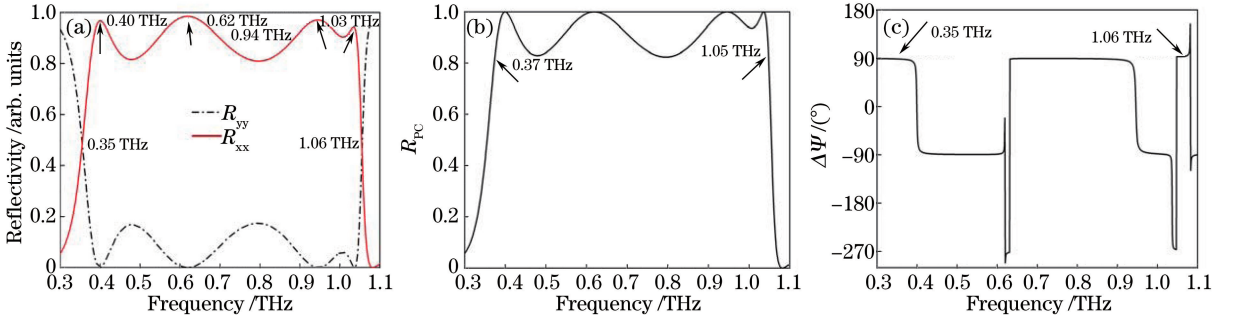


图 2 偏振转换器的(a)反射率;(b)偏振转换率;(c)反射相位差

Fig. 2 (a) Reflectivity; (b) polarization conversion rate; (c) reflection phase difference of polarization converter

反射率相等,同向偏振反射相位和交叉偏振反射相位之差为 90° ,表明了在这两个频率处入射的线偏振太赫兹波转换为圆偏振的太赫兹波。

3 偏振转换分析

3.1 理论分析

为了解释该偏振转换器的工作原理,如图 3(a)所示,将偏振方向沿着 Y 轴的太赫兹波分解为沿着 u 和 v 轴的两个分量,则入射波可以用表示为:

$$\mathbf{E}_i = \frac{\sqrt{2}}{2} E_i \exp(jkz) \hat{\mathbf{u}} + \frac{\sqrt{2}}{2} E_i \exp(jkz) \hat{\mathbf{v}}. \quad (4)$$

式中 \mathbf{u} 和 \mathbf{v} 分别为 u 轴和 v 轴上的单位矢量, \mathbf{k} 为

真空中的波矢, E_i 为入射波的振幅。

基于以上定义,对偏振方向沿着 u 轴和 v 轴的太赫兹波入射情况下偏振转换器的反射率进行仿真,仿真结果如图 3(b)、(c)所示。同时也给出了偏振方向沿着 u 轴和 v 轴的太赫兹波入射情况下同向偏振反射相位差的仿真结果,如图 3(d)所示。图 3 中 r_{uu} 表示 u 偏振到 u 偏振的反射率, r_{vu} 表示 u 偏振到 v 偏振的反射率, r_{vv} 表示 v 偏振到 v 偏振的反射率, r_{uv} 表示 v 偏振到 u 偏振的反射率, φ_{vv} 表示 v 偏振到 v 偏振的反射相位, φ_{uu} 表示 u 偏振到 u 偏振的反射相位, φ_{uv} 表示 v 偏振到 u 偏振的反射相位, φ_{vu} 表示 u 偏振到 v 偏振的反射相位。

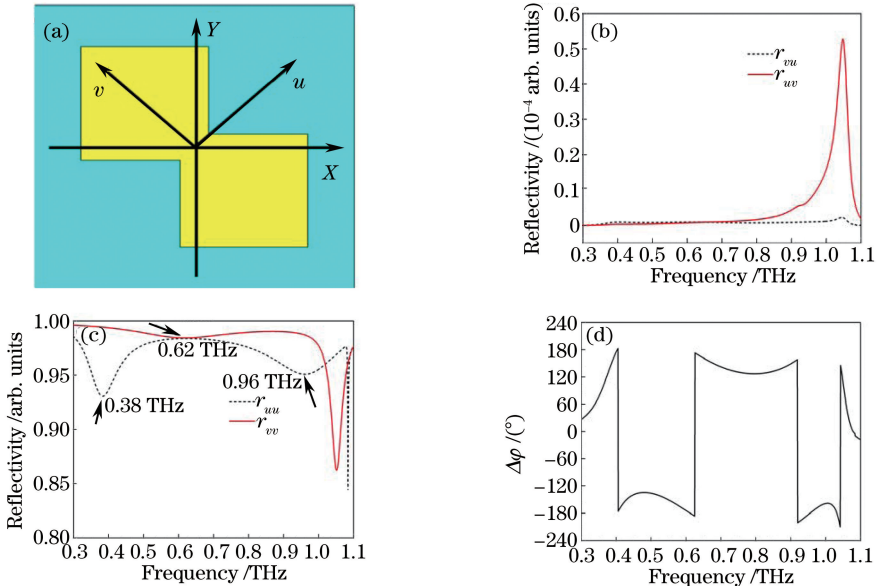


图 3 (a) $u-v$ 轴的定义;电场沿着 $u-v$ 轴的(b)交叉偏振反射率、(c)同向偏振反射率和(d)同向偏振反射相位差

Fig. 3 (a) Definition of $u-v$ axis; (b) reflectivity of cross-polarization, (c) reflectivity of co-polarization and (d) reflection phase difference of co-polarization of electric field along $u-v$ axis

从图 3(b)的仿真结果可知,偏振方向沿着 u 轴和 v 轴的太赫兹波入射情况下,该偏振转换器的交叉偏振反射率近似为零,即该偏振转换结构没有偏振转换效果,所以反射太赫兹波,可以用同向偏振反

射率和相位来表示:

$$\mathbf{E}_r = \frac{\sqrt{2}}{2} r_{uu} E_i \exp[j(-kz + \varphi_{uu})] \hat{\mathbf{u}} +$$

$$\frac{\sqrt{2}}{2} r_{vv} E_i \exp[j(-kz + \varphi_{vv})] \hat{v}. \quad (5)$$

由图 3(c)可知,在 0.3~1.04 THz 频率范围内, u 和 v 偏振入射下的反射振幅几乎相等,电场沿着 $u-v$ 方向同向极化反射率都在 90% 以上,在 0.38, 0.62, 0.96 THz 处出现谐振峰。而从图 3(d)可知,在 0.42~0.60 THz 以及 0.98~1.01 THz 频率范围内,对应的相位与 -180° 相差 20° 以上,即在这些频率范围内转换器将入射的线偏振波转换为右旋椭圆偏振波;而在 0.64~0.92 THz 频率范围内,对应的相位与 180° 相差 20° 以上,即在此频率范围内转换器将入射的线偏振波转换为左旋椭圆偏振波。在 0.40~0.42 THz、0.92~0.98 THz 及 1.01~1.04 THz 频率范围内,沿着 $u-v$ 两个方向偏振的太赫兹波经反射后两偏振分量的相位差为 $-180^\circ \pm 10^\circ$;而在 0.60~0.64 THz 范围内,沿着 $u-v$ 两个方向偏振的太赫兹波经反射后两偏振分量的相位差为 $180^\circ \pm 10^\circ$;同时在谐振点附近存在相位突变。满足 $\Delta\varphi = \varphi_{vv} - \varphi_{uu} = \pi + 2k\pi (k \in \mathbb{Z})$ 的条件,反射太赫兹波的偏振方向与入射波的偏振方向垂直,这就说明太赫兹波的偏振方向能够旋转 90° 。所以经过分析可知,该偏振转换器在 0.40~1.04 THz 范围内偏振转换率达到 90% 左右。

3.2 根据表面电流分析该结构的宽带偏振转换

为了进一步理解高偏振转换机理,通过仿真给

出了图 3(c)中三个谐振峰处正方形谐振腔结构和底层金属板表面的电流分布结果,如图(4)所示,黑色箭头代表金属表面电流流向,红色箭头代表底层金属板电流流向。其中 0.38 THz 和 0.96 THz 为太赫兹波偏振方向沿着 u 轴入射时,同向偏振存在的两个谐振点,而 0.62 THz 为太赫兹波偏振方向沿着 v 轴入射时,同向偏振存在的一个谐振点。图 4(a)、(b)和(c)分别为 0.38, 0.62, 0.96 THz 三个谐振频率处的正方形谐振腔结构和底层金属板表面的电流分布情况。

从图 4 的表面电流分布情况来看,当入射的太赫兹波偏振方向沿着 u 轴时,在谐振频率 0.38 THz 附近,正方形谐振腔结构上产生一对偶极共振,同时正方形谐振腔结构上的电流与底层金属板上的电流反向,形成等效的磁谐振。在 0.96 THz 附近,正方形谐振腔结构上产生三对偶极共振,正方形谐振腔结构上的电流与底层金属板上的电流同向,形成等效的电谐振。当入射的太赫兹波偏振方向沿着 v 轴时,在谐振频率 0.62 THz 附近,正方形谐振腔结构上产生两对偶极共振,正方形谐振腔结构上的电流与底层金属板上的电流同向,形成等效的电谐振。所以该偏振转换器的宽带效果源于该结构的三阶电磁谐振相互叠加。详细分析可参考本课题组在文献[26]所述的最新研究。

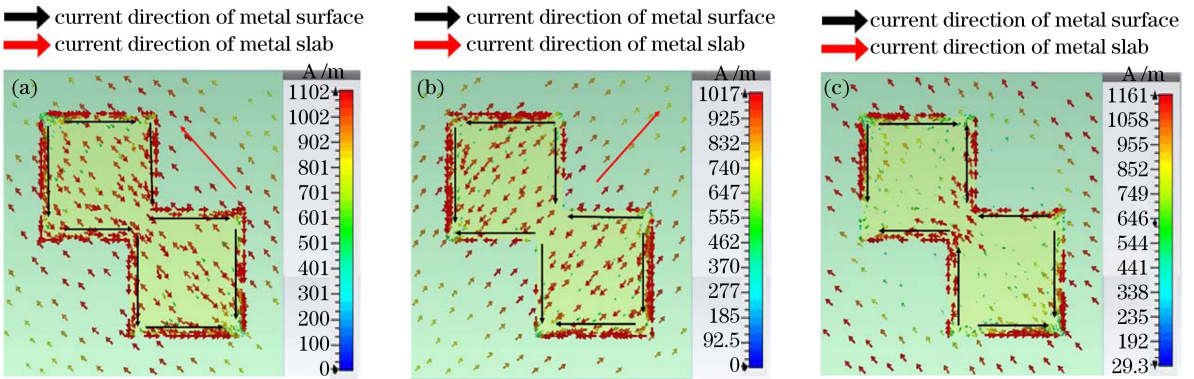


图 4 (a) 0.384 THz、(b) 0.62 THz、(c) 0.962 THz 频率处金属表面电流和金属板上的电流分布

Fig. 4 Distributions of current on metal surface and metal slab with the frequency of

(a) 0.384 THz, (b) 0.62 THz, (c) 0.962 THz

4 结 论

设计并分析了一种正方形谐振腔结构的宽带偏振转换器件,仿真研究表明该器件可以在太赫兹波段实现宽带、高效率的偏振转换。同时,为了分析其偏振转换机理,从理论和仿真方面进行了研究。通过仿

真软件对正方形谐振腔结构和底层金属板表面电流分布进行分析,结果表明引起高偏振转换的原因是介质层两侧金属表面电流形成三阶的电磁共振。

参 考 文 献

[1] Beard M C, Turner G M, Schmuttenmaer C A.

- Terahertz spectroscopy [J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2002, 106(29): 7146-7159.
- [2] Vieweg N, Fischer B M, Reuter M, *et al.* Ultrabroadband terahertz spectroscopy of a liquid crystal[J]. *Optics Express*, 2012, 20(27): 28249-28256.
- [3] Janek M, Zich D, Naftaly M. Terahertz time-domain spectroscopy response of amines and amino acids intercalated smectites in far-infrared region [J]. *Materials Chemistry & Physics*, 2014, 145(3): 278-287.
- [4] Qin J Y, Xie L Y, Ying Y B. A high-sensitivity terahertz spectroscopy technology for tetracycline hydrochloride detection using metamaterials[J]. *Food Chemistry*, 2016, 211: 300-305.
- [5] Hu B B, Nuss M C. Imaging with terahertz waves [J]. *Optics Letters*, 1995, 20(16): 1716-1718.
- [6] Mittleman D, Gupta M, Neelamani R, *et al.* Recent advances in terahertz imaging[J]. *Applied Physics B*, 1999, 68(6): 1085-1094.
- [7] Köhler R, Tredicucci A, Beltram F, *et al.* Terahertz semiconductor-heterostructure laser [J]. *Nature*, 2002, 417(6885): 156-159.
- [8] Zhang Z W, Zhao Y M, Li C Y, *et al.* Non-destructive detection of pigments in oil painting by using terahertz tomography[J]. *Science China*, 2015, 58(12): 124202-124203.
- [9] Heljo V P, Nordberg A, Tenho M, *et al.* The effect of water plasticization on the molecular mobility and crystallization tendency of amorphous disaccharides [J]. *Pharmaceutical Research*, 2012, 29(10): 2684-2697.
- [10] Huang Z, Park H, Parrott E P J, *et al.* Robust thin-film wire-grid THz polarizer fabricated via a low-cost approach[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(1): 81-84.
- [11] Han Y, Li G. Coherent optical communication using polarization multiple-input-multiple-output [J]. *Optics Express*, 2005, 13(19): 7527-7534.
- [12] Liu Y, Zhao G Z, Shen Y C. Polarization imaging detection based on the continuous terahertz wave[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(1): 0111001. 刘影, 赵国忠, 申彦春. 连续太赫兹波偏振成像检测 [J]. *中国激光*, 2016, 43(1): 0111001.
- [13] Stevenson T, Benford D, Bennett C, *et al.* Cosmic microwave background polarization detector with high efficiency, broad bandwidth, and highly symmetric coupling to transition edge sensor bolometers [J]. *Journal of Low Temperature Physics*, 2008, 151(1-2): 471-476.
- [14] Grischkowsky D, Keiding S. THz time-domain spectroscopy of high T_c substrates [J]. *Applied Physics Letters*, 1990, 57(10): 1055-1057.
- [15] Nose T, Sato S, Mizuno K, *et al.* Refractive index of nematic liquid crystals in the submillimeter wave region[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(25): 6383-6387.
- [16] Chen C Y, Tsai T R, Pan C L, *et al.* Room temperature terahertz phase shifter based on magnetically controlled birefringence in liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(22): 4497-4499.
- [17] Masson J B, Gallot G. Terahertz achromatic quarter-wave plate[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(2): 265-267.
- [18] Tang J Y, Xiao Z Y, Xu K K. Cross polarization conversion based on a new chiral spiral slot structure in THz region[J]. *Optical & Quantum Electronics*, 2016, 48(2): 1-11.
- [19] Huang X, Xiao B, Guo L, *et al.* Triple-band linear and circular reflective polarizer based on E-shaped metamaterial[J]. *Journal of Optics*, 2014, 16(12): 125101.
- [20] Li H, Xiao B X, Huang X, *et al.* Multiple-band reflective polarization converter based on deformed F-shaped metamaterial[J]. *Physica Scripta*, 2015, 90(3): 35806-35811.
- [21] Huang X J, Yang D, Yang H L. Multiple-band reflective polarization converter using U-shaped metamaterial[J]. *Applied Physics*, 2014, 115(10): 2494-2499.
- [22] 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.
- [23] Li M, Lan F, Yang Z, *et al.* Broadband and highly efficient sub-THz reflective polarization converter based on Z-shaped metasurface [C]. *International Conference on Mechatronics*, 2016, 83: 427-432.
- [24] Jing X, Zhu H, Wang W, *et al.* Broadband linear polarization conversion based on the coupling of bilayer metamaterials in the terahertz region [J]. *Optics Communications*, 2017, 383: 310-315.
- [25] Cheng Y, Gong R, Wu L. Ultra-broadband linear polarization conversion via diode-like asymmetric transmission with composite metamaterial for terahertz waves[J]. *Plasmonics*, 2017, 12(4): 1113-1120.
- [26] Fu Y N, Zhang X Q, Zhao G Z, *et al.* A broadband polarization converter based on resonant ring in terahertz region[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(18): 18701. 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): 18701.